

# 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계 자동화 및 매개 변수 최적화

°장 옥\*, 손유식\*, 주영훈\*\*, 박진배\*  
 \* 연세대 전기공학과, \*\* 군산대 제어계측공학과

## Optimization of Fuzzy Logic Controller Using Genetic Algorithm

Wook Chang\*, You Seok Son\*, Young Hoon Joo\*\*, Jin Bae Park\*  
 \* Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.,  
 \*\* Dept. of Control & Instrumentation Eng., Kunsan Univ.

**Abstract:** This paper presents the automatic construction and parameter optimization technique for the fuzzy logic controller using genetic algorithm. In general, the design of fuzzy controller has difficulties in the acquisition of expert's knowledge and relies to a great extent on empirical and heuristic knowledge which, in many cases, cannot be objectively justified. Therefore the performance of the controller can be degraded in the case of plant parameter variations or unpredictable incident which the designer may have ignored. And fuzzy logic controller parameters elicited from the expert may not be global. Some of these problems can be resolved by application of genetic algorithm. Finally, we provides the second order dead time plant to evaluate the feasibility and generality of our proposed method. Comparison shows that the proposed method can produce a fuzzy logic controller with higher accuracy and a smaller number of fuzzy rules than manually tuned fuzzy logic controller.

### 1. 서론

퍼지 제어기는 언어 변수에 의한 규칙들로써 제어기를 구성하기 때문에 제어 대상 플랜트의 정확한 수학적인 모델을 알지 못한다 하더라도 좋은 결과를 얻을 수 있고 강인한 성질을 지니고 있으며 그 구현도 간단하나 퍼지 제어기의 설계는 설계자의 주관적인 경험에 의해 이루어지며 이러한 방법은 시스템이 복잡해지는 경우 제어 성능이 떨어지기 쉽다. 또한 이렇게 전문가의 경험에 의해 설정된 여러가지 퍼지 제어기의 구성 요소들이 가장 최적의 값이라는 보장이 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에는 기계 학습 방법을 이용하여 퍼지 제어기의 설계를 자동화하는 연구가 진행되어왔으며 이에 는 자기 동조 방식[3], 신경망 이론과의 융합 방식[4,5], 유전 알고리즘에 의한 방식[6-8]이 사용되고 있다. 유전 알고리즘은 자연 선택과 유전 방법론에 기반하여 만들어진 탐색 방법이며 그 특징으로는 임의적이 며 병렬적이고 진역적인 해의 탐색 기능을 들 수 있다[9]. 이러한 유전 알고리즘의 특징을 이용하여 퍼지 제어기의 여러가지 구성 요소들의 매개 변수를 최적화하는데 적용되었다. 특히 위 의 연구들은 모두 시스템의 성능에 크게 영향을 끼치는 요소중 의 하나인 스케일링 팩터에 대한 고려를 하지 않고 있다. 또한 입력 변수의 퍼지 집합의 분할 수에 의해 결정되는 모든 규칙들 에 대한 고려를 함으로 인해 효율적인 제어기의 구성을 하지 못 한다. 따라서 본 논문에서는 스케일링 팩터를 포함한 퍼지 제어 기의 여러 구성 요소와 적절한 규칙의 수를 유전 알고리즘을 이 용하여 체계적으로 구성하는 방법을 제안한다. 또한 증가된 최 적화 대상 매개 변수로 인한 탐색 공간의 증가를 효과적으로 억 제하는 방안도 아울러 제시하여 빠른 시간내에 최적의 퍼지 제

어기 구성을 할 수 있는 방법을 제안한다. 제안된 방법의 효용 성을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 증명한다.

### 2. 퍼지 제어기

본 논문에서 사용되는 퍼지 제어기는 간략화 퍼지 추론 방법을 사용한다. 간략화 퍼지 추론 방법은 후건부가 퍼지 집합이 아닌 실수로 표현된 형태이다. 전형적인 퍼지 제어기의 설계 절차는 입력력 변수의 결정, 퍼지 제어기 매개 변수의 결정, 퍼지 규칙 베이스의 구성, 실제 퍼지 제어기의 구현으로 이루어진다[7]. 기존의 퍼지 제어기는 이러한 과정을 시행 착오를 통해 반복하여 최종적인 제어기를 설계함으로써 이러한 방법은 전문가가 지식을 퍼지 제어 규칙에 어울리게 기술하기 어려우며 그러한 전문가의 지식을 함상 얻을 수 있는 것도 아니다. 더욱이 다변수 퍼지 제 어기의 규칙 베이스의 구성은 아직까지도 매우 어려운 분야에 속한다. 본 논문에서는 기계 학습 방법의 일종인 유전 알고리즘 을 사용하여 퍼지 제어기의 설계 과정을 자동화하고 그 구성 요 소의 최적화를 하고자 한다. 또한 기존의 방법이 멤버십 함수의 형태와 퍼지 제어 규칙만을 최적화하는 것에 반하여 본 논문에 서는 퍼지 규칙에 가중치를 부여하여 제어 상황에 필요한 직결 한 퍼지 제어 규칙의 수도 결정하도록 하였다. 또한 기존의 방 법들이 간과한 스케일링 팩터에 대한 고려도 포함하여 더욱 일 관성있는 퍼지 제어기의 설계 자동화 및 최적화 방법을 제안한 다.

### 3. 유전 알고리즘(GA)을 이용한 퍼지 제어기의 최적화

본 절에서는 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계 자동 화 및 구성 요소 최적화에 관한 논의를 한다. 이를 위해서는 먼 저 퍼지 제어기의 여러가지 구성요소를 직결히 염색체의 형태로 코딩하는 것과 적절한 적합도 함수의 선택이 필요하다.

#### 3.1 염색체 표현

본 논문에서는 퍼지 제어기의 설계 절차를 자동화하고 그 매개 변수를 최적화하고자 한다. 본 논문에서 유전 알고리즘을 이 용하여 설계를 자동화하고 매개 변수를 최적화하고자 하는 퍼지 제어기는 입력 변수의 수가  $n$ , 출력 변수의 수가 1인 MISO(Multiple Inputs and Single Output) 시스템이다.  $i$ 번째 ( $1 \leq i \leq n$ ) 입력 변수의 분할 수가  $m_i$ 개, 각 소속 함수를 나타내 는데 필요한 매개 변수의 수는  $p_i$ 개라 하자. 또한 출력 변수의 분할 수는  $m_o$ 개이며 소속 함수를 나타내는데 필요한 매개 변수

의 수는  $p_0$ 개라 하자. 기존의 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제를 염색체 문자열로 표현할 경우, 이전 문자열을 사용하였으나 이는 탐색 공간이 커질 수록 문자열의 길이가 길어지므로 효율적인 탐색을 하기 힘들다. 그러므로 본 논문에서는 탐색 시간의 단축을 위하여 실수 문자열과 정수 문자열을 복합적으로 사용하였다. 본 논문에서는 입력 변수와 출력 변수에 사용되는 소속 함수를 위한 염색체의 부분자열은 실수치 코딩을 하였으며 그 길이는  $m_i \times p_i$ ,  $m_o \times p_o$ 이다. 또한 퍼지 규칙 베이스를 나타내기 위한 부분자열은 정수 코딩을 사용하고 그 길이는 입력 변수가  $n$ 일 경우  $\prod_{i=1}^n m_i$ 이며 가중치를 나타내기 위한 부분자열의

또한 정수 코딩을 사용하고 그 길이는  $\prod_{i=1}^n m_i$ 이다. 이에 따라 입력 변수의 수가  $n$ 개이고 출력 변수가 1개인 MISO 퍼지 제어기를 최적화하기 위해 필요한 염색체 문자열의 길이는 식 (1)과 같다.

$$\text{chromosome length} = \sum_{i=1}^n m_i p_i + m_o p_o + 2 \prod_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

### 3.2 적합도 함수의 결정

개체군내의 각 개체에 대하여 유전 알고리즘을 적용하기 위해서는 그 개체가 풀고자 하는 문제에 어느 정도 적합한지를 평가하는 적합도 함수를 사용해야 한다. 적합도 함수는 풀고자 하는 문제에 따라 특징하게 결정이 되며 일반적으로 목적 함수의 역수나 지수 함수를 사용하여 정의한다. 본 논문에서는 식 (2)와 같은 목적 함수를 사용하고 적합도 함수는 식 (3)과 같이 정하였다. 이러한 목적 함수와 적합도의 목적은 목표 지점에 대한 도달 시간과 정상상태 오차를 모두 줄이는 방향으로 탐색을 전개하도록 유전 알고리즘에 지시하는 역할을 한다고 할 수 있다.

$$x = \sum_{n=0}^{\text{final time}} \{ne_n^2 + n(De_n)^2\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{if null set exists } f(x) = 0 \\ &\text{otherwise } f(x) = 1/x \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서 제안하는 퍼지 제어기 설계 자동화 및 최적화를 위한 퍼지 모델의 또 다른 평가 기준은 전체 입력 집합 내에서 퍼지 제어 규칙의 공집합 형성 여부이다. 공집합을 형성하는 퍼지 제어 규칙은 입력범위 내의 일부 입력에 대해서는 그에 해당하는 출력을 생성하지 못하므로 유용한 규칙이 될 수 없다. 본 논문에서는 공집합을 갖는 경우가 발생할 경우 적합도의 값에 0을 부과하여 공집합을 갖는 퍼지 제어 규칙의 생성을 막는다.

### 4. 모의 실험

본 논문에서 제안한 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계 자동화 및 최적화 방법의 효용성을 보이기 위하여 식 (4)와 같이 전달 함수  $G_p(s)$ 가 불감 시간대를 갖는 2차 지연 플랜트를 사용한다.

$$G_p(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls} \quad (4)$$

모의 실험을 위한 매개 변수의 설정은 다음과 같이 하였다.

표 1. 매개 변수 설정  
Table 1. Parameter setup

K	1
$\zeta$	0.75
$\omega_n$	10
L	0.12
Maximum generation G	50
Population size N	50
Crossover probability $P_C$	0.9
Mutation probability $P_M$	0.05

유전 알고리즘을 이용하여 동정된 퍼지 제어기를 이용하여 여러 가지 실험을 하였으며 그 결과를 모두 유전 알고리즘을 사용하지 않고 수동으로 동정된 퍼지 제어기와 비교하였다. 그림 2는 세대의 진행에 따른 적합도의 변동을 표시한 것이다. 최종적으로 가장 적합도가 높은 개체를 이용하여 모의 실험을 진행하였다. 가장 적합도가 높은 개체의 소속 함수의 형태는 그림 3에 있으며 동정된 퍼지 규칙은 표 2에 보여졌다. 갈색으로 표시된 부분은 규칙 베이스에서 제외된 규칙들이다. 식 (8)의 플랜트를 위해서 결국 27개의 규칙으로만으로도 충분한 제어를 할 수 있음을 보였다. 그림 4는 이 개체에 의한 제어 대상 플랜트의 출력을 보인 것이다. 그림 5는 유전 알고리즘에 의해 생성된 퍼지 제어기의 강인성을 보이기 위해 플랜트 매개 변수 K가 50% 증가 및 감소하는 경우의 출력 결과를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 유전 알고리즘에 의해 동정된 퍼지 제어기는 플랜트의 매개 변수의 변동에 매우 강인함을 보인다. 각 실험의 결과를 표 2에 표시하였다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 유전 알고리즘에 의해 설계된 퍼지 제어기는 매개 변수의 변동에 대한 강인성을 지니고 또한 기준 입력의 변동에도 적절히 대처함을 알 수 있다. 또한 수동으로 동정된 퍼지 제어기에 비해 성능은 약간 좋아지지만 그에 반해 필요한 규칙의 수는 확실히 줄었음을 알 수 있다. 이에 따라 본 논문에서 실험한 간단한 플랜트의 경우와는 달리 더욱 복잡한 플랜트에 대해 유전 알고리즘을 이용해 구성된 퍼지 제어기는 매우 좋은 성능을 나타낼 수 있음을 기대할 수 있다.

표 2. 퍼지 규칙  
Table 2. Fuzzy rule table

Error	Change of Error						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	NM	NM	ZE	PM	NB	PM
NM	NB	ZE	NB	PM	NB	NS	NS
NS	NB	PM	NB	NS	NS	NB	PB
ZE	NM	NB	NS	PS	PB	PS	NS
PS	PM	NM	PM	PS	NM	NM	NB
PM	NS	ZE	NB	PM	NM	PM	NM
PB	NM	NS	NS	PB	PB	NB	NS

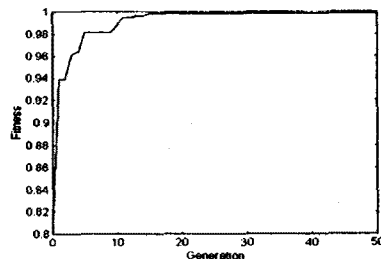


그림 2. 세대의 진행에 따른 제어 대상 플랜트의 적합도 변동

Fig. 2. Fitness history of the controlled plant

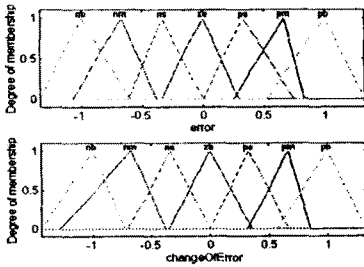


그림 3. 소속 함수의 형태

Fig. 3. The shapes of membership functions

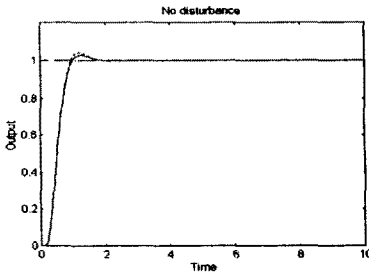
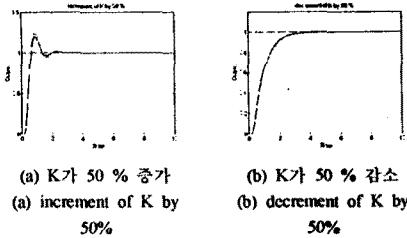


그림 4. 제어 대상 플랜트의 출력

Fig. 4. The output of the controlled plant



(a) K가 50% 증가  
(a) increment of K by 50%

(b) K가 50% 감소  
(b) decrement of K by 50%

그림 5. 플랜트 매개 변수 K의 변동에 따른 제어 대상 플랜트의 출력

Fig. 5. The output of the controlled plant when the parameter K is changed.

표 2. 수동으로 동정된 퍼지 제어기와 유전 알고리즘으로 동정된 퍼지 제어기의 성능 비교

Table 2. Performance comparison between manually tuned fuzzy logic controller and GA tuned fuzzy logic controller

	Manually tuned FLC	GA tuned FLC
No disturbance	0.0429	0.0417
Increment of K by 50 %	0.0382	0.0363
decrement of K by 50 %	0.0656	0.0637
The number of fuzzy rules	49	27

### 5. 결론

본 연구에서는 퍼지 제어기의 설계 과정을 자동화하고 퍼지 제

어기의 각 요소별 최적화하기 위하여 유전 알고리즘을 사용하였다. 일반적으로 퍼지 제어기의 설계 과정은 시행 착오적이고 경험적인 방법으로 수행되어 왔다. 본 논문에서는 스케일링 팩터를 포함한 퍼지 제어기의 여러 구성 요소와 적절한 규칙의 수를 유전 알고리즘을 이용하여 체계적으로 구성하는 방법을 제안하고 증가된 최적화 대상 매개 변수로 인한 탐색 공간의 증가를 효과적으로 억제하는 방안도 아울러 제시하였다. 제안된 방법의 효율성을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 증명되었다.

### 6. 참고 문헌

- [1] Abdollah Homaifar, Bijan Sayyarodsari, and John E. Hogans IV, "Fuzzy Controller for Robot Arm Trajectory", *Information Sciences*, vol. 2, pp. 69-83, 1994.
- [2] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Woo, and K. B. Kim, "Fuzzy System Modeling And Its Application to Mobile Robot Control", *Fuzzy Logic and Its Applications, Information Sciences, and Intelligent Systems*, pp. 147-156, 1995.
- [3] Jeffery R. Layne and Kevin M. Passino, "Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering", *Proceedings of the 1993 International Symposium on Intelligent Control*, pp. 457-462, 1993.
- [4] Yie-Chien Chen, Ching-Cheng Teng, "A Model Reference Control Structure Using a Fuzzy Neural Network", *Fuzzy Sets and Systems* 73, pp. 291-312, 1995.
- [5] Shin-ichi Horikawa, Takeshi Furuhashi, and Yoshiki Uchikawa, "On Fuzzy Modeling Using Fuzzy Neural Networks with the Back-Propagation Algorithm", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 3, No. 5, September, 1992.
- [6] Chuck Karr, "Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers", *AI EXPERT*, February, pp. 26-35, 1991.
- [7] D. A. Linkens, H. O. Nyongesa, "Genetic Algorithms for Fuzzy Control, Part 1: Offline system development and application", *IEE Proc.-Control Theory*, vol. 142, No. 3, pp. 161-176, 1995.
- [8] D. A. Linkens, H. O. Nyongesa, "Genetic Algorithms for Fuzzy Control, Part 2: Online system development and application", *IEE Proc.-Control Theory*, vol. 142, No. 3, pp. 177-185, 1995.
- [9] Goldberg, D. E., *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley, 1989.