

## 적응진화연산과 퍼지 로직을 이용한 퍼지 제어기의 이득요소 동조

김종율\*, 황기현\*, 문경준\*, 김형수\*, 박준호\*\*  
 \* 부산대학교 전기공학과, \*\* 부산대학교 전기공학과 교수

### Scaling Factor Tuning of Fuzzy Controller Using Adaptive Evolutionary Computation and Fuzzy Logic

Jong Yul Kim · Gi-Hyun Hwang · Kyeong-Jun Mun · Hyung-Su Kim · June Ho Park  
 Dept. of Electrical Eng. Pusan National University

**Abstract** - In this paper, we propose a scaling factor tuning method to improve the performance of fuzzy controller. Tuning rules and reasoning are utilized on-line to determine the scaling factors based on absolute value of the error and its difference. An adaptive evolutionary computation(AEC) is used to search for the optimal tuning rules that will maximize the fitness function. Finally, the proposed fuzzy controller is applied to the angular stabilization of an inverted pendulum .

#### 1. 서 론

퍼지이론이 1960년대 Zadeh에 의해 제안되었고 여러 분야에서 성공적으로 응용되어 왔으며, 특히 제어분야에서 기존 선형제어기의 문제점을 해결할 수 있어 연구와 응용이 활발히 진행되었다. 퍼지 제어는 제어대상의 정확한 수학적 모델링없이 입·출력 관계만으로도 제어가 가능하며, 외란에 대해 매우 강인한 특성을 가진다. 퍼지제어기의 제어성능에 중요한 영향을 미치는 요소들은 제어규칙, 퍼지 소속함수의 모양, 이득요소(scaling factor) 등이 있으며 이를 최적으로 동조하기 위한 여러 방법들이 제안되었다. [1-4].

본 논문에서는 퍼지제어기의 이득요소를 퍼지 로직을 이용하여 오차와 오차 변화분의 절대값에 따라 온라인으로 자기동조하였다. 그리고 이득요소의 동조 규칙은 적응진화연산을 이용하여 최적화 하였다. 적응진화연산은 기존의 진화연산의 문제점을 개선하여 최적해를 빠른 시간내에 정확하게 찾기 위한 알고리즘으로써 유전알고리즘의 전역탐색능력과 진화 전략의 국부탐색능력을 적응적으로 이용하는 알고리즘이다.

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 비선형 시스템인 도립진자의 각도제어에 적용하여 기존의 퍼지제어기와 비교·분석하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 해본 결과, 제안한 퍼지제어기가 기존의 퍼지제어기보다 상승시간과 정정시간면에서 더 나은 제어 성능을 나타내었으며, 기존의 퍼지제어기보다 더 강인한 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

#### 2. 퍼지제어기

퍼지제어기의 이득요소를 퍼지로직과 적응진화연산을 이용하여 동조하기 위한 제어기의 구성은 그림 1과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 퍼지제어기의 입력변수로 식(1)과 같이 정규화된 오차(se(t))와 오차 변화분(sde(t))을 이용하였으며, 이득요소를 동조하기 위한 퍼지로직의 입력변수로 오차와 오차 변화분의 절대값을 사용하였다. 그리고 적응진화연산을 이용하여 이득요소의 동조 규칙을 최적화하는데 사용되는 적합도는 오차를 사용하였다.

$$se(t) = [ref - y(t)] \times \frac{1}{K_e}$$

$$sde(t) = [e(t) - e(t-1)] \times \frac{1}{K_{de}} \quad (1)$$

$$u(t) = su(t) \times K_u$$

여기서 ref : 기준입력  
 y(t) : 실체출력  
 su(t) : 제어기 출력  
 ke, kde, ku : 이득요소

본 논문에서 사용한 퍼지 제어기의 퍼지변수, 비퍼지화, 퍼지 추론 방법은 다음과 같으며 이득요소 동조시에도 동일한 방법을 사용하였다.

- 퍼지변수 : 삼각형 소속함수
- 퍼지추론 : max-min방법
- 비퍼지화 : 무게중심법

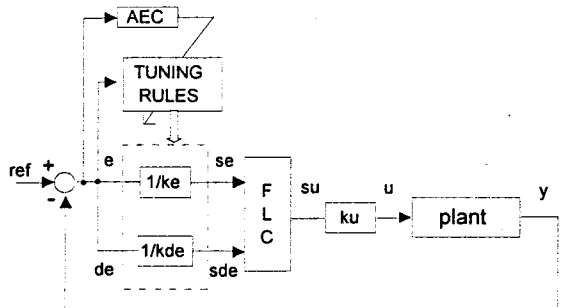


그림 1 퍼지로직과 적응진화연산을 이용한 퍼지제어기

## 2. 1 이득요소의 동조 규칙

본 논문에서는 이득요소 동조 규칙의 입력변수로 오차와 오차 변화분의 절대값, 출력변수로 퍼지제어기의 이득요소를 사용하였다. 그리고 각 입력변수는 3개의 삼각형 소속함수를 사용하였으며, 동조 규칙은 표 1과 같다. 여기서,  $a_1, \dots, a_9$ 와  $b_1, \dots, b_9$ 는 식 (2), (3)을 만족하는 상수값이다.

$$ke_{\min} \leq a_i \leq ke_{\max} \quad (2)$$

$$kde_{\min} \leq b_i \leq kde_{\max} \quad (3)$$

표 1 이득요소의 동조 규칙

$ e $	Zero	Small	Big
Zero	$ke = a_1$	$ke = a_2$	$ke = a_3$
	$kde = b_1$	$kde = b_2$	$kde = b_3$
Small	$ke = a_4$	$ke = a_5$	$ke = a_6$
	$kde = b_4$	$kde = b_5$	$kde = b_6$
Big	$ke = a_7$	$ke = a_8$	$ke = a_9$
	$kde = b_7$	$kde = b_8$	$kde = b_9$

## 2. 2 적응진화연산

본 논문에서 제안한 적응진화연산은 한 세대에서 다른 세대로 진화할 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 적용하고, 세대의 진행과정에서 유리한 진화연산기법이 다음 세대의 해집단을 형성하는데 우위에 있도록 하였다. 적응진화연산의 주요 과정은 개체의 구분(초기화), 평가 및 복제, 최소해집단 보장, 유전알고리즘과 진화전략의 연산으로 구성되어 있으며, 각각의 특징은 다음과 같다.

1. 개체의 구분(초기화) : 초기해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0 또는 1을 임의로 대응시킨다. 태그변수 0은 유전알고리즘을 적용할 개체이고 태그변수 1은 진화전략을 적용할 개체이다.
2. 평가 및 복제 : 각 스트링을 평가함수에 따라 적합도(fitness)를 평가한다. 복제방법은 적합도에 비례하여 복제하는 무울렛휠을 사용하였다. 복제 후 태그변수가 0인 개체들은 유전알고리즘의 교배 및 돌연변이 과정을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 0을 대응시킨다. 그리고 태그변수가 1인 개체들은 진화전략을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 1을 대응시킨다.
3. 최소 해집단수의 보장 : 세대가 진행됨에 따라 유전알고리즘 혹은 진화전략중 어느 하나의 역할이 너무 커지는 것을 방지하기 위해 유전알고리즘과 진화전략의 해집단은 전체 해집단에 대해 일정

비율이상의 개체를 대응시키도록 하였다.

4. 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation) : 교배는 부모염색체의 유전자 정보를 서로 교환하여 새로운 정보를 가진 자손(offspring)염색체를 생성하는 과정이며 돌연변이는 부모염색체 유전자의 형태변화로 새로운 유전정보를 발생하는 메커니즘이다.

## 2. 3 적응진화연산을 이용한 이득요소의 동조 규칙 선정

본 논문에서는 적응진화연산을 이용하여 이득요소 동조 규칙의 결론부 소속함수 꼭지점을 최적화하였다. 각 규칙마다 2개의 이득요소를 출력함으로 각 염색체는 총 18개의 변수로 구성되고 해집단은 그림 2와 같다. 그리고 각 스트링을 평가하기 위해서 사용한 적합도는 식(4)와 같이 오차의 절대치 합을 사용하였다.

$$fitness = \frac{1}{1 + \sum_{t=1}^N |e(t)|} \quad (4)$$

여기서,  $e(t) : \text{ref} - y(t)$

$N : T$  시간 동안에 취득한 데이터 개수

String(1) :	$a_{11}$	...	$a_{19}$	$b_{11}$	...	$b_{19}$
String(2) :	$a_{21}$	...	$a_{29}$	$b_{21}$	...	$b_{29}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
String(n) :	$a_{n1}$	...	$a_{n9}$	$b_{n1}$	...	$b_{n9}$

오차의 이득요소	오차 변화분의 이득요소
----------	--------------

그림 2 해집단 구성

## 3. 사례 연구

제안한 퍼지제어기의 유용성을 입증하기 위해서 비선형 시스템인 도립진자의 각도제어에 적용하였다. 제어의 목적은 가능한 빠른 시간에 진자의 각도가  $0^\circ$ 로 수렴하도록 힘(F)를 가하는 것이다. 식 (5), (6)은 도립진자의 운동방정식을 나타내었다. 여기서, 진자의 제어 가능 각도는  $-20^\circ < \theta < 20^\circ$ 로 가정하고 이 범위를 벗어나면 제어가 실패한 것으로 간주한다.

그림 3은 진자의 초기 각도가  $20^\circ$ 인 경우에 대한 시뮬레이션 결과로서 기존의 퍼지제어기의 성능은 점선, 본 논문에서 제안한 퍼지제어기의 성능은 실선으로 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 제안한 퍼지제어기가 기존의 퍼지제어기보다 상승시간이 더 짧고 최대 오버슈트도 또한 작음을 알 수 있다. 제안한 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해서 진자의 초기 각도가  $10^\circ, 5^\circ$ 일 때의 시뮬레

이선 결과로 그림 4.5에 나타내었다. 그림 4.5에서 보는 바와 같이 상승시간과 정정시간면에서 제안한 퍼지제어기가 더 나은 제어성능을 나타내었다.

$$\dot{\theta}_1 = \theta_2 \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{g \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \left( \frac{-F - m_p l \theta_2^2 \sin \theta_1}{m_c + m_p} \right)}{l \left( \frac{4}{3} - \frac{m_p \cos^2 \theta_1}{m_c + m_p} \right)} \quad (6)$$

여기서  $\theta_1$ :진자의 각도[deg]

$\theta_2$ :진자의 각속도(deg/sec)

F:수레에 가해진 힘[N]

$m_p$ :진자의 질량(0.1[kg])

$m_c$ :수레의 질량(1[kg])

l:진자길이의 반(0.5[m])

g:중력가속도([9.8m/s<sup>2</sup>])

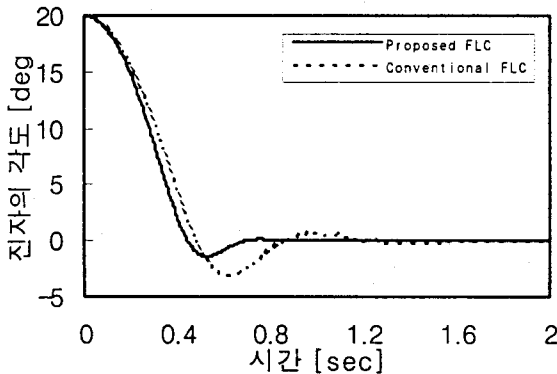


그림 3 초기 각도가 20°인 경우

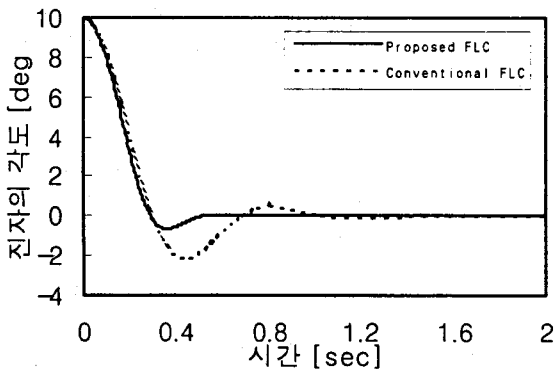


그림 4 초기 각도가 10°인 경우

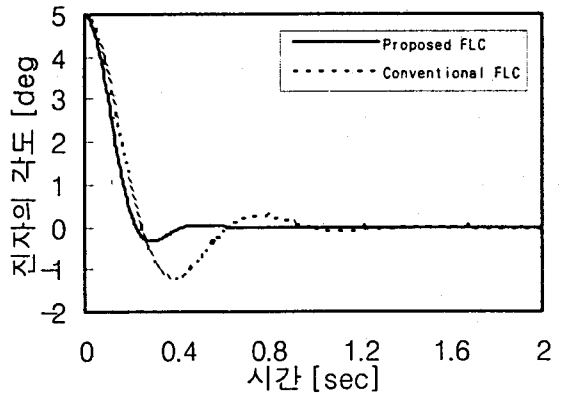


그림 5 초기 각도가 5°인 경우

## 6. 결론

본 논문에서는 퍼지제어기의 제어성능을 향상 시키기 위해 퍼지 로직과 적응진화연산을 이용하여 퍼지제어기의 이득요소를 온라인으로 자기동조하였다. 제안한 퍼지제어기는 가변 이득요소를 가지게 되는데 이는 퍼지제어기의 멤버십 함수의 UOD (universe of discourse)가 변하는 것과 같은 효과를 가진다. 그리고 적응진화연산을 이용하여 이득요소의 동조 규칙을 선정함으로써 시행착오법에 의한 어려움을 해결할 수 있었다. 제안한 퍼지제어기의 성능을 평가하기 위해 도입진자 시스템에 적용하였고 시뮬레이션을 해본 결과, 제안한 방법이 기존의 퍼지제어기에 비해 상승시간과 정정시간면에서 더 나은 제어성능을 보임을 확인할 수 있었다.

## (참고 문헌)

- [1] Han-Xiong Li and H.B.Gatland, "A new methodology for designing a fuzzy logic controller", IEEE Trans. Syst. Man, and Cyber., Vol. 25, No. 3, pp. 505-512, March, 1995.
- [2] G.M.Abdelnour, "Design of a fuzzy controller using input and output mapping factors", IEEE Trans. Syst. Man, and Cyber., Vol. 21, No. 5, pp. 952-960, Sept., 1991.
- [3] Ching-Chang Wong and Shyuan-Ming Feng, "Switching-type fuzzy controller design by genetic algorithms", Fuzzy Sets and Systems, Vol 74, pp. 175-185, 1995
- [4] Cuck Kar, "Genetic algorithms for fuzzy controllers", AI EXPERT, pp. 26-35, February, 1991
- [5] Chia-Ju and Ching-Hou Huang, "A hybrid method for parameter tuning of PID controllers", Journal of the franklin institute, Vol. 334B, No. 4, pp. 547-562, 1997