

# 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 자동 설계

박 세 환, 김 영 일, 김 중 규, 이 광 형  
한국과학기술원 전산학과  
☎305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1  
{seihwan, cutty, jkkim, khlee}@monami.kaist.ac.kr

## An Automatic Design for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms

Seihwan Park, Youngil Kim, Jongkyou Kim, Hyung Lee-Kwang  
Dept. of Computer Science, KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)  
373-1, Kusong, Yousung, Taejon, 305-701, Korea  
{seihwan, cutty, jkkim, khlee}@monami.kaist.ac.kr

### Abstract

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기를 위한 최적 소속함수와 제어 규칙들을 자동으로 생성하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 효과적인 염색체 암호화 방법을 이용하여 소속함수의 표현 해상도가 증가하여도 소속함수의 언어항의 개수를 일정하게 유지하여 제어 규칙을 표현하는 염색체의 길이가 크게 늘어나지 않도록 한다. 또, 소속함수의 언어항의 개수가 서로 다른 염색체에 대해서도 개선된 교배 및 돌연변이 연산자를 이용하여 효과적으로 유전자 연산을 적용할 수 있게 한다. 본 논문에서는 제안된 방법을 퍼지 제어기의 자동 생성 방법의 평가 문제로 널리 이용되는 트럭 후진 주차 문제에 적용하여 성능을 평가한다.

## 1. 서론

퍼지 제어는 많은 응용 분야에서 성공적으로 이용되어 왔다. 퍼지 제어기를 설계하는 전통적인 방법에서는 전문가의 개입을 통한 전문가의 지식을 표현하는 과정이 반드시 필요한데, 여기에 많은 시간과 비용이 든다. 그래서 소속함수나 제어 규칙의 자동 생성 및 동조(tuning)에 관한 연구들이 이루어지고 있다. 최근에는 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기 생성에 관한 연구들이 행해지고 있다.

유전자 알고리즘은 자연계의 진화 과정을 기반한 탐색 알고리즘으로, 다양한 문제에 적용되어 그 문제의 최적해를 찾는 데 성공적으로 이용되어 왔다.

기존에 사용되고 있는 유전자 알고리즘을 이용해서 퍼지 제어기를 표현하는 방법(encoding scheme)은 소속함수의 언어항의 수가 증가하면 제어 규칙을 표현하는 부분의 염색체의 길이가 매우 길어지는 문제점이 있다. 또한 소속함수의 언어항의 수가 다를 때는 그 제어 규칙의 교배나 돌연변이가 연산이 불가능하다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기를 위한 최적 소속함수와 제어 규칙들을 자동으로 생성하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 효과적인 염색체 암호화 방법(encoding scheme)을 이용하여 변수에 대한 해상도가 증가하여도 소속함수의 언어항의

수를 제한하여 제어 규칙을 표현하는 부분의 염색체의 길이가 크게 늘어나지 않도록 한다. 그리고 소속함수의 언어항의 수가 다른 염색체들에 대해서도 개선된 교배 및 돌연변이 연산자를 이용하여 효과적으로 유전자 연산을 적용할 수 있게 한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)

유전자 알고리즘은 1975년 John H. Holland[3]에 의해서 제안된 자연계의 진화 과정에 기반한 탐색 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 개체 집단(population)내의 개체(individual)를 선택(selection)하고, 재생산(reproduction)하는 과정을 반복하여 최적의 개체를 찾는데, 이 때 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)같은 유전자 연산이 사용된다. 이러한 유전자 알고리즘은 최적화를 목표로 하는 다양한 문제들에 적용되어 좋은 성능을 보이고 있다.

### 2.2 유전자 알고리즘을 이용한

#### 퍼지 제어기 생성에 관한 연구들

C. Karr[7]는 주어진 규칙들에 사용되는 퍼지 집합의 모양을 바꾸기 위해서 유전자 알고리즘을 사용하였다. C. Karr는 [7]에서 하나의 퍼지 집합을 좌, 우, 중심으

로 각각 7 비트로써 표현한, 단순한 표현 방식을 가진 유전자 알고리즘으로도 좋은 해를 찾을 수 있다는 것을 보여 주었다.

Takagi와 Lee[8]는 규칙 기반(rule base)과 퍼지 집합의 모양을 최적화하기 위해서 유전자 알고리즘을 사용하였다. 이것은 SUGENO-TAKAGI 제어기에 적용되어 제어 규칙의 수를 감소시키는 성능을 보였다. 그러나 생성된 소속함수가 사람이 이해하기 어려운 형태의 퍼지 집합으로 나타난다.

Homaifar와 McCormick[4]은 유전자 알고리즘을 이용해서 소속함수와 제어 규칙을 동시에 찾는 방법을 제안했다. 이 방법은 퍼지 집합의 기반과 제어 규칙을 유전자 알고리즘을 이용해서 결정하는 방법으로 문제에 적용해서 아주 우수한 성능을 보여 주었으나, 제어 변수의 퍼지 집합의 중심과 개수가 우선 주어져야 한다는 문제점을 가지고 있다.

### 3. 제안된 방법

#### 3.1 퍼지 제어기의 암호화 방법

퍼지 제어기는 입출력 변수들의 소속함수와 제어 규칙으로 구성된다. 이러한 퍼지 제어기를 유전자 알고리즘으로 표현하기 위해서 입출력 변수들의 소속함수와 제어 규칙을 나타내는 방법은 다음과 같다.

##### 3.1.1 소속함수의 암호화 방법

본 논문에서 사용된 입출력 변수들의 소속함수는 삼각 퍼지 수자로 표현된 언어항(linguistic term)으로, 소속함수의 양쪽 끝부분은 사다리꼴 퍼지 수자로도 표현이 가능하게 하였다. 소속함수를 표현하는 부분은 삼각 퍼지 수자로 표현된 언어항의 위치를 결정하는 부분(L)과 언어항을 표현하는 삼각 퍼지 수자의 기울기를 결정하는 부분(k)으로 나누어진다. 변수들의 소속함수의 언어항의 위치를 결정하는 부분은 먼저 소속함수가 나타낼 수 있는 범위(universe of discourse)의 해상도 L을 결정하고, 소속함수의 값이 1이 되는 삼각 퍼지 수자의 중심에 해당되는 유전인자의 위치를 1로 표현한다[5]. 이때, 생성될 수 있는 언어항의 개수에 따라 제어 규칙의 수가 증가하므로, 이것을 방지하기 위해서 언어항의 개수를 어느 정도로 제한시킨다. 따라서 표현 해상도를 높여도 소속함수의 언어항의 수가 증가하지 않게 된다. 이러한 암호화 방법으로 생성된 소속함수는 사람이 이해하기 쉬운 형태로 결정된다. 이것을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

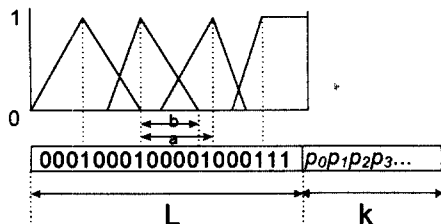


그림 1. 소속함수의 암호화 방법(예)

위의 그림에서 표현 해상도 L에 따라, 소속함수는 2

개에서부터 L-2개까지의 언어항을 가질 수 있는데, 제어 규칙의 증가를 방지하기 위해서 적당한 수로 제한하도록 한다. 또한, 삼각 퍼지 수자의 기울기를 표현하는데 사용되는 k는 4비트일 때, 다음의 식과 같이 결정된다.

$$\frac{b}{a} = 0.5 + \frac{1}{32} (p_0 \cdot 2^3 + p_1 \cdot 2^2 + p_2 \cdot 2 + p_3 + 1)$$

즉, 삼각 퍼지 수자의 밀편이 움직일 수 있는 범위는 자신의 중심과 이웃하는 삼각 퍼지 수자의 중심 사이를 이등분하는 지점에서 이웃하는 삼각 퍼지 수자의 중심까지가 된다.

#### 3.1.2 제어 규칙의 암호화 방법

제어 규칙을 염색체로 표현하는 방법은 하나의 제어 규칙을 0이상의 정수를 그 값으로 가지는 하나의 유전인자로 나타내고 미리 정해놓은 순서대로 나열하는 방법이 사용된다. 제어 규칙은 일반적으로 입력 변수가 2개이고 출력변수가 1개일 경우 아래와 같이 규칙표(rule table)의 형태로 표시하는데, 본 논문에서는 이것을 염색체로 표현하기 위해서 줄 우선(row major)으로 일렬로 나열하여 염색체 형태로 구성하였다. 이 때, 한 유전인자가 가지는 값은 제어 규칙의 결론부의 언어항을 나타내게 된다.

	NM	NS	PS	P
N	0	1	2	2
ZE	1	2	3	4
P	1	3	3	5

⇒ 0 1 2 2 1 2 3 4 1 3 3 5

그림 2. 제어규칙의 암호화 방법(예)

#### 3.1.3 퍼지 제어기의 암호화 방법

앞서 말한 것과 같이 퍼지 제어기는 소속함수와 제어 규칙으로 구성되어 있다. 따라서, 퍼지 제어기를 유전자 알고리즘으로 암호화하는 방법은 3.1.1과 3.1.2에서 설명한 소속함수와 제어 규칙의 암호화 방법에 따라 입력 변수와 제어 변수들을 각각 암호화하여 하나의 염색체 안에 나열하고 그 뒤에 제어 규칙을 암호화한 것을 연속해서 나열하면 된다.

### 3.2 교배 연산(crossover)

기존의 유전자 알고리즘에서 사용되는 일반적인 교배 연산은 두개의 염색체에서 한 특정 위치를 정하여 그 뒤의 유전인자들을 서로 바꾸는 연산이다. 그러나 퍼지 제어기를 3.1에서 설명한 방법으로 암호화하여 유전자 알고리즘으로 표현하였을 때, 염색체 앞부분의 소속함수와 뒷부분의 제어 규칙이 연관되어 있어 일반적인 교배 연산은 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 소속함수를 먼저 교배하고, 그 다음 그와 관련된 제어 규칙들을 교배해 주는 방법을 제안한다. 이 때에도 일반적인 교배 연산과 같은 방법으로 교배하면, 교배되는 소속함수에 따라 소속함수의 언어항의 수가 앞에서 제한했던 개수를 넘는 경우가 생겨서 제어 규칙이 많아지게 된다. 따라서 소속함수의 언어항의 수를 제한하여 제어 규칙의 수가 많아지게 되는 것을 막기

위해서 교배되는 소속함수의 언어항의 개수를 같게 하였다. 교배되는 언어항들은 두 염색체의 교배되는 부분의 길이의 비를 이용하여 상대 염색체의 교배되는 부분의 길이에 맞게 교배된다.

그리고, 소속함수의 교배가 끝나면 교배된 소속함수의 언어항에 관련된 제어 규칙들도 서로 교배한다. 이것을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

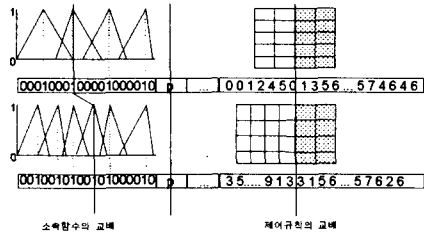


그림 3. 제안된 교배 연산

이때 교배되는 변수들의 소속함수의 언어항의 개수가 다를 수 있기 때문에, 제어 규칙들간의 교배가 일어날 때에는 규칙표의 하나의 언어항이 나타내는 열이나 행이 균등하다고 가정했을 때, 두 규칙표가 겹치는 정도에 맞추어 평균을 내어서 교배한다. 또한 교배되는 두 염색체의 결론부 변수의 소속함수의 언어항의 개수가 다를 수 있기 때문에 그 개수의 비를 곱하여 적합화한다. 결론부 변수만 교배되는 경우에는 규칙의 수와 관련된 가정부의 언어항의 개수는 변하지 않기 때문에 제어 규칙을 교배시키지 않아도 된다.

### 3.3 돌연변이 연산(mutation)

#### 3.3.1 소속함수의 돌연변이 연산

소속함수의 돌연변이 연산은 염색체에서 소속함수의 언어항의 위치를 나타내는 부분의 유전인자가 0에서 1 또는 1에서 0으로 바뀌게 한다. 이 때, 0에서 1이 되면 그 위치에 새로운 삼각 퍼지 숫자로 표현되는 언어항이 생기게 되고, 1에서 0이 되면 그 위치에 있던 언어항이 없어지게 된다. 단지 돌연변이 연산이 일어난 후, 언어항의 개수가 제한한 것보다 크거나 작으면 돌연변이 연산이 일어난 것을 무시한다.

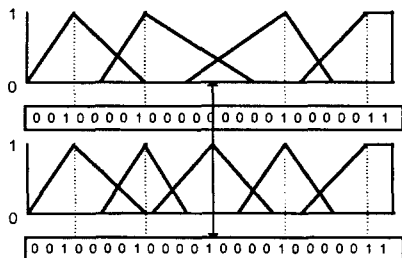


그림 4. 소속함수의 돌연변이 연산

이렇게 소속함수의 언어항의 위치나 개수가 변하게 되면 그에 따라 제어 규칙들도 바뀌어야 하는데 새로운 언어항이 생성된 경우에는 규칙표에서 그 위치의

상하 또는 좌우에 있는 제어 규칙들을 평균하여 그 값을 결론부의 언어항으로 하고, 언어항이 없어진 경우에는 제어 규칙에서 그 언어항이 사용된 것을 제거한다. 즉, 규칙표에서 그 언어항과 관련된 행이나 열을 제거한다. 그런데, 소속함수의 돌연변이 연산을 할 때 끝부분의 언어항이 사다리꼴 퍼지 숫자인 경우에는 그에 따른 고려가 있어야 한다.

#### 3.3.2 제어규칙의 돌연변이

제어 규칙은 일반적인 유전자 알고리즘의 돌연변이 연산처럼 일렬로 표현된 제어 규칙들에 대해서 일정한 확률로 돌연변이가 일어나게 한다. 제어 규칙은 결론부의 언어항의 수만큼으로 표현되기 때문에, 돌연변이가 일어나면 이미 있던 값을 제외한 나머지 언어항중의 하나로 바뀌게 한다.

## 4. 실험 및 결과

본 논문에서는 제안된 방법을 트럭 후진 주차 문제에 적용시켜 보았다.

### 4.1 트럭 후진 주차 문제

트럭 후진 주차 문제는 다음 그림에서와 같이 트럭의 위치나 각도 등의 상태와 트럭을 주차시키기 원하는 최종 위치로 나타낼 수 있다.

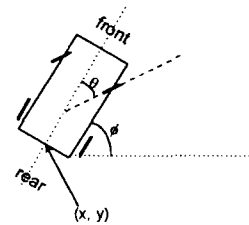


그림 5. 트럭의 후진 주차 문제

트럭 후진 주차 문제에서 트럭은 세 가지 상태 변수  $\phi, x, y$ 와 제어 변수  $\delta$ 를 가지고 있는데, 이것은 각각 트럭 뒷부분의 중앙의 위치와 트럭의 정면이 수평선과 이루는 각을 나타낸다. 이 문제의 목적은 트럭이 주차되기를 원하는 최종 위치인  $(x_f, y_f) = (500, 1000)$ 에 목적하는 각도  $\phi_f = -90^\circ$  로 주차되는 것이다. 트럭은 단지 후진만 할 수 있으며,  $[0, 1000] \times [0, 1000]$ 의 정해진 주차장 영역을 벗어나기 전까지 매 단계마다 정해진 거리만큼을 움직인다고 가정한다. 단,  $y$ 는 충분한 거리가 주어졌다고 생각하고 무시한다.

매 단계에서는 제어기에 의해서 제어될 앞바퀴의 기울어진 각도  $\delta$ 가 트럭이 초기 위치에서부터 원하는 주차 지점까지 갈 수 있도록 제어되어야 한다.

트럭을 모의실험하기 위해서 사용된 간단한 운동방정식은 트럭이  $(x, y)$ 에서  $(x', y')$ 으로 움직인다고

했을 때, 다음의 세 개의 식으로 나타내어질 수 있다. 여기에서,  $r$ 은 트럭이 한 단계에 움직이는 고정된 거리를 나타내고,  $\phi$ 는 다음 단계의 트럭의 각도이다.

$$\begin{aligned} x &= x + r \cos(\phi) \\ y &= y + r \sin(\phi) \\ \phi &= \phi + \theta \end{aligned}$$

## 4.2 모의 실험 결과

본 논문에서는 13개의 초기 상태를 가지고 각 50단계까지 주차 지점에 트럭이 원하는 상태로 도착하도록 학습을 한다. 실험에 사용된 매개변수들의 값들은 다음과 같다.

개체 집단의 크기	: 200
세대 수	: 200
유전자의 길이	: 244
교배될 확률	: 0.7
돌연변이될 확률	: 0.03
해상도	: 37
언어항의 최대 개수	: 11

본 논문에서는 트럭 후진 주차 문제를 20회동안 모의 실험하였다. 결과를 평가하기 위해 사용된 초기 상태는  $x=50$ 에서  $x=950$ 까지 50씩 증가시켜 나가면서 각각에 대해서 트럭의 초기 각도를  $-270^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지  $5^\circ$ 씩 증가시켜 만든 것으로, 총개수는 1368개이다.

20회의 모의 실험의 결과를 평균으로 나타내면, 1368개의 초기 상태에서 302.35개(77.8%)가 주차 위치에서 오차 범위  $\pm 1\%$ 범위 내에 주차되었다.

그림 6은 생성된 각 변수들의 소속함수를 보여주고, 그림 7은 모의 실험 결과를 그림으로 보여 주고 있다.

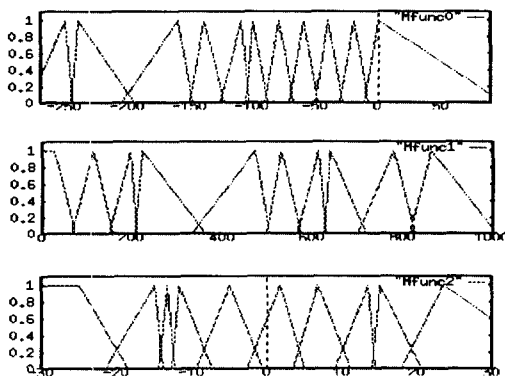


그림 6. 제안된 방법으로 생성된 소속함수 ( $\phi, x, \theta$ )

## 5. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 사용하여 퍼지 제어기를 자동 생성하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 퍼지제어기의 소속함수의 해상도와 소속함수의 언어항의 개수를 분리시켜서 표현 해상도의 증가에 따라 소속함수의 개수가 증가하여 제어규칙의 수가 너무

많아지지 않도록 하였다. 또한 기존의 유전자 알고리즘에서 사용되던 교배와 돌연변이 연산을 퍼지 제어기의 특성에 맞게 제안하였다. 제안된 유전자 연산자는 소속함수의 교배나 돌연변이가 일어날 때, 그와 관련된 제어 규칙도 함께 교배나 돌연변이를 시켜준다.

본 논문에서는 제안된 방법을 트럭 후진 주차 문제에 적용하여 그 성능을 평가하여 비교적 좋은 결과를 보여주었다. 본 논문에서 제안된 방법이 아직 완전히 동조되지 않은 특성을 보이고 있으므로, 좀더 나은 결과를 얻기 위해서 미세 동조(fine tuning)시키는 방법에 대한 연구가 앞으로 있어야 할 것이다.

## 6. 참고문헌

- [1] 이광형, 오길록, "퍼지 이론 및 응용 I권:이론", 홍릉출판사, 1991
- [2] 이광형, 오길록, "퍼지 이론 및 응용 II권:응용", 홍릉출판사, 1991
- [3] John H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", the MIT Press, 1992
- [4] Abdollah Homaifar, Ed McCormick, "Simultaneous Design of Membership Functions and Rule Sets for Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithms", IEEE Trans. Fuzzy Systems, 129-139, 1995
- [5] 이지형, 이광형, "진화적 방법을 이용한 퍼지제어기의 자동생성에 관한 연구", KFIS 95 추계학술대회 학술발표논문집, 203-210, 1995
- [6] Hideyuki Ishigami, Toshio Fukuda, Takanori Shibata, Fuzihito Arai, "Structure optimization of fuzzy neural network by genetic algorithm", Int. J. Fuzzy Sets and Systems, 257-264, 1995
- [7] Charles L. Karr, Edward J. Gentry, "Fuzzy Control of pH Using Genetic Algorithms", IEEE Trans. Fuzzy Systems, 46-53, 1993
- [8] Michael A. LEE, Hideyuki TAKAGI, "Integrating Design Stages of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms", Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE '93), 612-617, 1993

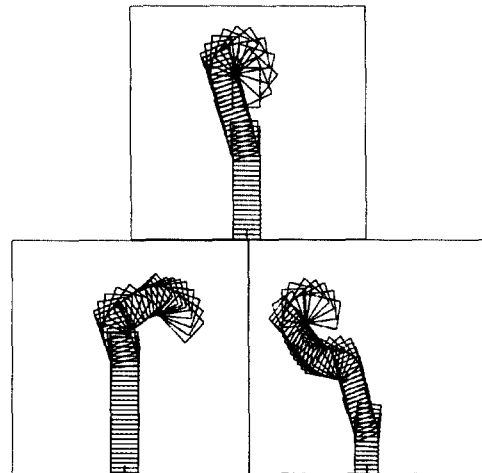


그림 7. 트럭 후진 주차 문제의 모의 실험 결과