유전자 알고리즘을 이용한 타입-2 퍼지논리시스템의 설계

Design of Type-2 Fuzzy Logic Systems Using Genetic Algorithms

박세환, 이광형
한국과학기술원 전자전산학과, 첨단정보기술연구센터
Seihwan Park, H. Lee-Kwang
Dept. of EECS, AITrc, KAIST
{seihwan, khlee}@monami.kaist.ac.kr

Abstract

타입-2 퍼지집합을 이용하여 퍼지논리시스템(Fuzzy Logic System : FLS)을 구현하기 위한 연구들이 R. I John, N. Karnik, J. Mendel 등에 의해 현재 진행되고 있다. 타입-2 집합을 이용한 타입-2 FLS은 기존의 타입-1 FLS보다 제어규칙이나 소속함수가 가지고 있는 불확실성을 표현하는데 있어서 더 효과적이다. 그러나, 타입-2 FLS 역시 타입-1 FLS이 가지고 있는 문제점인 설계시 전문가에게 의존하여 시간과 비용이 많이 소요되고, 제어기의 구성요소들을 효율적으로 생성하기가 어렵다는 문제점을 더욱 심각하게 가지고 있다. 또한, 그 문제점을 해결하기 위한 연구들도 아직 미진한 상태이다. 본 논문에서는 타입-2 FLS의 설계를 위해 유전자 알고리즘을 사용하는 방법을 제안한다. 타입-2 FLS를 설계하기 위해서는 소속함수와 제어규칙을 생성하여야 한다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 사용하여 타입-2 퍼지제어규칙과 소속함수를 설계하는 방법을 제안한다. 먼저, 유전자 알고리즘에서 사용할 수 있는 유전자의 형태로 타입-2 퍼지제어규칙과 소속함수를 표현하기 위한 인코딩방법을 제안하고, 각각의 염색체를 진화시키기 위한 교차연산자와 돌연변이 연산자를 정의한다. 그리고, 제안된 방법을 함수근사문제에 적용하여 유효성과 성능을 평가, 검증한다.

I. 서론

퍼지이론은 L. Zadeh에 의해서 제안되어 불확실성을 포함하는 애매한 정보들을 표현하는데 사용되고 있으며, 특히 제어분야에서 실제 시스템에 적용되어 성공적으로 이용되고 있다[1]. 일반적인 타입-1 퍼지집합의 개념을 확장한 타입-2 퍼지집합은 L. Zadeh, Mizumoto 등에 의해 개념과 연산이 정의되어 왔다. 타입-2 퍼지집합은 타입-1 퍼지집합과 달리 퍼지소속함수를 가짐으로써, 불확실성을 더욱더 잘 표현하고, 처리할 수 있게 하였다[2].

최근 이러한 타입-2 퍼지집합을 이용한 퍼지논리시스템(Fuzzy Logic System:FLS)에 대한 연구들이 R. John, N. Karnik, J. Mendel 등에 의해 진행되고 있다[3,4]. 타입-2 퍼지집합을 이용한 타입-2 FLS은 기존의 타입-1 FLS보다 소속함수나 제어규칙에 포함된 불확실성을 다루는데 있어서 더욱 효과적이다. 그러나, 타입-2 FLS 역시 타입-1 FLS과 마찬가지로 설계하는 과정을 전문가에게 의존하여 시간과 비용이 많이 소요되는 등, 퍼지제어기의 구성요소들을 생성하기가 쉽지않다라는 문제점을 더욱 심각하게 가지고 있고, 문제점을 해결하기 위한 연구들도 아직 미진하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 타입-2 FLS을 설계하는 방법을 제안한다. 타입-2 FLS를 설계하기 위해서는 사용될 소속함수와 제어규칙을 생성, 최적화하여야 한다. 유전자 알고리즘[5]은 자연계의 진화과정을 모사한 최적화, 탐색 알고리즘으로서, 기존의 타입-1 FLS을 설계하기 위해서도 많이 사용되어 그 성능을 인정받고 있다[6,7]. 따라서, 유전자 알고리즘은 타입-2 FLS의 설계에서도 뛰어난 최적화 성능을 보일 것으로 생각된다.

본 논문의 순서는 다음과 같다. 먼저, 2절에서는 타입-2 FLS에서 대해서 설명한다. 3절에서는 제안된 유전자 알고리즘을 이용한 타입-2 FLS의 설계방법에 대해 기술한다. 타입-2 퍼지제어규칙과 소속함수를 표현하기 위한 인코딩 방법을 설명하고, 각각의 염색체를 진화시키기

위한 교차연산자와 돌연변이 연산자를 정의한다. 그리고, 제안된 설계 방법을 간단한 함수 근사문제에 적용하여 그 가능성을 확인한다. 끝으로, 4절에서는 결론에 대해 기술한다.

II. 타입-2 퍼지논리시스템

2.1 타입-2 FLS의 구조[4]

일반적인 타입-2 퍼지시스템의 구조는 다음 Fig. 1과 같다.

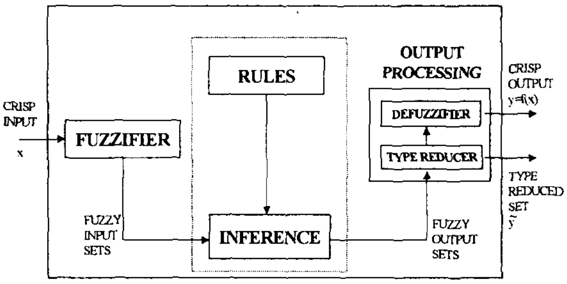

Fig. 1 Structure of type-2 FLS

타입-2 FLS은 크게 퍼지화부(fuzzifier), 제어규칙부(rules), 추론부(inference), 출력처리부(output processing) 등의 네 부분으로 구성되어 있다. 타입-2 FLS은 기존 타입-1 FLS와 비교할 때, 비퍼지화부 대신 타입-감소부와 비퍼지화부로 구성된 출력처리부를 가진다는 차이점 외에는 유사한 구조를 가진다.

그러면, 타입-2 FLS의 각 부분에 대해서 설명하기로 한다.

- 퍼지화부

현재 대부분의 타입-2 FLS에서 사용되고 있는 퍼지화 방법은 타입-1 FLS과 마찬가지로 단일입력(singleton)을 이용한 방식이다. 입력값을 타입-1 또는 타입-2 퍼지집합으로 하는 방법에 대한 연구는 향후의 과제로 남아 있다.

- 제어규칙부

타입-2 FLS에서의 지식베이스를 이루는 제어규칙은 다음과 같이 기존의 타입-1 FLS의 제어규칙과 형태면에서는 같은 모양을 가진다.

$$R^l : IF\ x_1\ is\ \widetilde{F}_1^l \text{ and } \cdots x_p\ is\ \widetilde{F}_p^l,\ THEN\ y\ is\ \widetilde{G}^l$$

이 때, 단지 적어도 하나이상의 타입-2 퍼지집합이 제어규칙에 포함되어 있으면 타입-2 제어규칙이라고 할 수 있다.

- 추론부

타입-2 FLS의 추론도 타입-1 FLS에서 사용되고 있는 sup-* 합성추론을 그대로 타입-2 퍼지집합을 이용하여 확장하여 정의된다.

타입-2 FLS에서 입력 $x' \in \widetilde{X}'$에 대해 l번째 제어규칙에 대응하는 출력집합 $\widetilde{B}^l$은 meet 연산[2]에 의해서 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\widetilde{B}^l \equiv \widetilde{X}' \circ \widetilde{F}_1^l \times \cdots \times \widetilde{F}_p^l \rightarrow \widetilde{G}^l$$

$$\mu_{B^l}(y) = \mu_{F_1^l \times \cdots \times F_p^l}(\mathbf{x}') \sqcap \mu_{G^l}(y)$$

$$= \mu_{G^l}(y) \sqcap \left[\sqcap_{i=1}^{p} \mu_{F_i^l}(x_i) \right]$$

- 출력처리부

a. 타입-감소부(type-reducer)

타입-1 FLS에서 비퍼지화부는 여러 조합된 출력퍼지집합들의 무게중심(centroid)을 구함으로써, 일반값(crisp value)을 얻는다. 타입-2 FLS에서는 각각의 제어규칙의 타입-2 출력집합을 조합하여 타입-1 집합으로 축소하여 나타낸다. 조합된 타입-2 퍼지집합의 무게중심 $\widetilde{C}_{\widetilde{A}}$은 다음의 식으로부터 얻어진다.

$$\widetilde{C}_{\widetilde{A}} = \int_{D_1} \cdots \int_{D_N} [\mu_{\widetilde{D}_1}(\theta_1) * \cdots * \mu_{\widetilde{D}_N}(\theta_N)] \Bigg/ \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^{N} \theta_i}$$

$$\widetilde{D}_i = \widetilde{\mu}_{\widetilde{A}}(x_i),\ \theta_i \in \widetilde{D}_i$$

타입-감소방법에는 다음과 같은 방법등이 제안되어 있다.

- Centroid 타입-감소법
- Center-of-Sums 타입-감소법
- Height 타입-감소법
- Center-of-Sets 타입-감소법

b. 비퍼지화부(defuzzifier)

타입-2 FLS에서 비퍼지화는 타입-감소부에서 얻어진 집합으로부터 일반 출력값을 얻어내는 것을 말한다. 즉, 타입-2 감소 집합(type-2 reduced set)의 무게중심을 구하면 된다. 다음 식은 타입-감소집합 $\widetilde{Y}$의 무게중심 $C_{\widetilde{Y}}$을 구하는 식이다.

$$C_{\widetilde{Y}}(\mathrm{x}) = \frac{\sum y_k \mu_{\widetilde{Y}}(y_k)}{\sum \mu_{\widetilde{Y}}(y_k)}$$

일반적인 타입-2 FLS의 타입-감소부에서 타입-감소집합을 구하기 위해서는 우선 모든 출력값에 대해 타입-2 출력집합들을 조합하고, 무게중심을 계산해야 한다. 무게중심을 계산하는 방법은 출력값의 정의역을 N개의 점으로 이산화하고, 각 출력값에서의 타입-1 퍼지소속함수의 정의역 D_i을 M개의 점으로 이산화하여, 가능한 모든 $\{\theta_1, \cdots \theta_N\}$의 조합에 대해서 무게중심값을 계산하는 것이다. 그런데, 이때 가능한 모든 조합의 수는 M^N이 된다. 따라서, 일반적인 형태의 2차 소속함수를 가진 타입-2 FLS에서 타입-감소집합을 계산하기 위해서는 매우 많은 계산량이 필요하기 때문에, 대부분의 타입-2 FLS에서는 모든 조합의 계산을 수행하지 않고도 무게중심의 정확한 값이나 근사값을 얻어낼 수 있게 하기 위해, D_i의 소속함수를 구간, 가우시안, 또는 삼각퍼지소속함수와

같은 정규적인 구조를 사용한다.

2.2 구간 타입-2 FLS

앞에서 말한 것과 같이 일반적인 타입-2 FLS는 타입-감소과정에서의 계산량이 매우 많다. 타입-감소집합을 계산하는 가장 일반적인 형태는 타입-1 퍼지집합의 가중합을 이용하는 것으로 다음 식과 같다.

$$\tilde{Y}(\tilde{Z}_1,\cdots,\tilde{Z}_M,\tilde{W}_1,\cdots,\tilde{W}_M) = \int_{z_1}\cdots\int_{z_M}\int_{w_1}\cdots\int_{w_M}[T_{l=1}^{M}\mu_{\tilde{Z}_l}(z_l) * T_{l=1}^{M}\mu_{\tilde{W}_l}(w_l)] \Big/ \frac{\sum_{l=1}^{M} w_l z_l}{\sum_{l=1}^{M} w_l}$$

타입-2 FLS에서 2차 소속함수들이 구간값을 가지게 되면 많은 계산들이 단순해진다. 이러한 경우를 구간 타입-2 FLS(interval type-2 FLS)이라고 한다.

구간 타입-2 FLS에서는 위의 식에서 각각의 $\tilde{Z}^l$와 $\tilde{W}$이 구간 타입-1 퍼지집합이 되기 때문에, $\mu_{\tilde{Z}_l}(z_l)=\mu_{\tilde{W}_l}(w_l)=1$이 된다. 따라서, 타입-감소집합을 구하는 식은 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$Y(Z_1,\cdots,Z_M,W_1,\cdots,W_M) = \int_{z_1}\cdots\int_{z_M}\int_{w_1}\cdots\int_{w_M} 1 \Big/ \frac{\sum_{l=1}^{M} w_l z_l}{\sum_{l=1}^{M} w_l}$$

위의 식에서 집합 Y는 구간 타입-1 집합으로 $[y_l, y_r]$과 같이 나타나게 되고, 따라서, 구간의 양 끝점 y_l과 y_r만을 계산하면 된다. 이것은 [4]에서 제안된 계산방법을 이용하면 고작 M번의 반복수행만으로 각각을 계산할 수 있다.

본 논문에서는 구간형태의 2차 소속함수를 가지는 구간 타입-2 FLS를 대상으로 한다.

III. 제안된 설계방법

이제, 앞서 설명한 타입-2 FLS를 설계하기 위한 방법을 제안한다. 먼저, 대상이 되는 구간 타입-2 FLS를 설계하기 위해서는 각각의 입출력변수에 대한 소속함수와 타입-2 퍼지제어규칙을 결정하여야 한다. 본 논문에서는 소속함수와 제어규칙을 결정하기 위한 유전자 코딩방법과 함수근사문제에 적용한 예를 이용하여 제안된 방법을 설명하도록 한다.

3.1 타입-2 FLS의 소속함수의 코딩

먼저, 구간 타입-2 FLS의 각각의 입출력변수에 대한 소속함수와 타입-2 제어규칙을 개체(individual)로 코딩하는 방법을 설명한다.

일반적으로 타입-1 FLS에서 타입-1 퍼지집합인 소속함수의 코딩방법은 소속함수의 특징을 나타내는 파라미터들을 유전인자에 코딩하여 나타낸다. 예를 들면, 가우스 함수인 경우에는 평균과 표준편차, 삼각퍼지함수인 경우에는 세 꼭지점의 가로축 좌표를 이용하여 각각의 소속함수를 표현한다. 따라서, 타입-2 퍼지집합을 표현하기 위한 특징 파라미터를 결정하면, 유전자 코딩 방법을 결정할 수 있다. 타입-2 FLS에서 주로 사용되는 불확실한 평균을 가진 가우스 함수(Fig. 2)는 불확실한 평균값이 포함된 구간 $[m_1, m_2]$($m_1 = m+\delta, m_2 = m+\delta, \delta \geq 0$)과 표준 편차 σ의 세 파라미터를 이용하여 유전자 코딩될 수 있다.

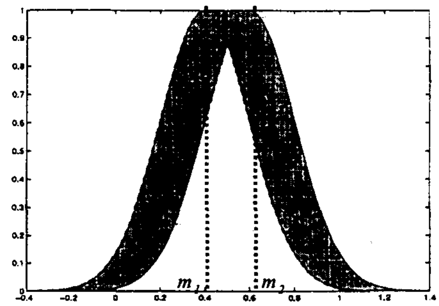

Fig. 2 type-2 gaussian membership function

타입-2 제어규칙에 대한 유전자 코딩 방법은 타입-2 제어규칙의 형태가 타입-1 제어규칙과 동일하므로, 기존의 연구[6,7]등에서 사용된 코딩방법을 이용할 수 있다. 본 논문에서는 FLS를 제어규칙들의 집합으로 표현하는 방식[6]의 코딩방법을 사용한다.

그리고, 타입-2 FLS를 표현한 개체들의 유전자 연산은 기존의 단순 유전자 알고리즘의 그것과 같이 각각의 제어규칙들을 기준으로 하여 교환하는 교차연산과 가우스분포의 변화를 통해 지역탐색을 할 수 있게 하기 위한 돌연변이 연산으로 이루어진다.

3.2 유전자 알고리즘을 이용한 타입-2 FLS의 설계 및 실험

본 논문에서는 제안된 유전자 알고리즘을 이용한 구간 타입-2 FLS의 설계방법의 유효성을 검증하기 위해서 간단한 함수근사문제에 적용하여 성능을 분석하였다. 본 논문에서 함수근사문제를 위해서 사용한 함수는 $y=100-x^2$, $x \in [-10, 10]$이다.

설계하고자 하는 구간 타입-2 FLS는 9개의 제어규칙으로 이루어져 있고, 각각의 제어규칙은 y값만이 불확실성을 내포한다고 가정하여, 조건부 집합은 타입-1 가우스 소속함수로, 결론부집합은 불확실한 평균을 가진 타입-2 가우스 소속함수로 하였다.

$$IF\ x\ is\ \tilde{A},\ THEN\ y\ is\ \tilde{\tilde{B}}.$$

실험에 사용한 타입-2 FLS는 단일입력 퍼지화, max t-conorm, product t-norm, 곱을 이용한 추론, center-of-sets 타입-감소방법을 사용하였다.

각 제어규칙은 다음과 같이 5개의 유전인자로 코딩되었다. 제어규칙의 수가 9개이므로, 개체의 총길이는 45이다.

m_A	σ_A	m_B	δ_B	σ_B

Fig. 3 coding for a type-2 fuzzy rule

이 때, m_A, σ_A는 각각 x의 소속함수 $\tilde{A}$의 평균과 표준편차이다. m_B, δ_B, σ_B는 y의 소속함수 $\tilde{B}$의 불확실한 평균 $[m_B-\delta_B, m_B+\delta_B]$과 표준편차를 나타내는 인수이다.

유전자 알고리즘은 2번의 세기(era)에 걸쳐서 각각 100세대를 진화하고, 개체군의 크기는 50, 교차와 돌연변이 확률은 각각 0.7, 0.03으로 하였다. 그리고, 각 세대마다 전체 개체군에서 20%정도의 개체를 임의로 초기화하였다. 함수근사를 위해서 사용된 훈련군은 구간 [-10,10]의 x값에 대해서 평균이 0이고, 표준편차가 3인 가우시안 노이즈가 포함된 y값의 쌍을 사용하였다. 사용된 훈련군의 크기는 균일한 간격으로 추출된 21개로 하였다. 각 개체의 평가는 각각의 훈련군의 자료쌍에 대한 오차의 제곱평균의 제곱근방법을 이용하여 최소화를 목적으로 하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 조건부와 결론부 퍼지집합을 나타낸다.

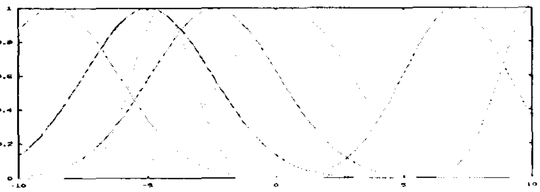

Fig. 4 membership functions for x

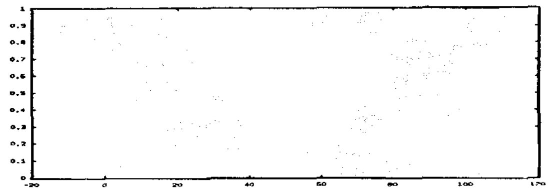

Fig. 5 three membership functions for y

Fig. 6은 얻어진 구간 타입-2 FLS의 함수근사의 결과를 나타낸다.

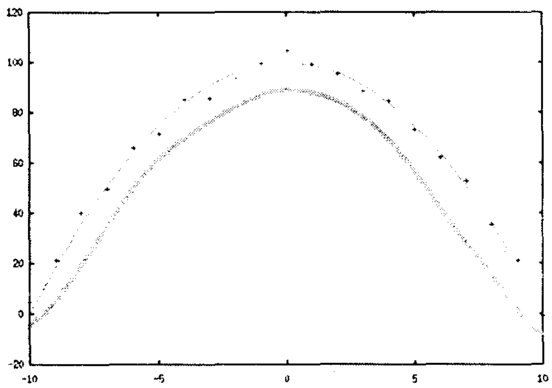

Fig. 6 Results of a interval type-2 FLS

여기에서 +로 표시된 점은 사용된 21개의 훈련군이다. Fig. 6에서 함수 $y=100-x^2$의 실제값에 대해, 타입-2 FLS의 결과값이 매우 근사하게 접근함을 알 수 있고, 상한 경계선과 하한 경계선 사이에 모든 함수값이 포함됨을 알 수 있다. 즉, 제안된 방법에 의해 설계된 구간 타입-2 FLS가 주어진 함수근사문제에 적용되어 불확실성을 내포한 훈련군에 대해서 좋은 근사 성능을 나타냄을 보여주었다.

IV. 결론

타입-2 FLS은 기존 타입-1 FLS보다 불확실성을 다루는데 있어 더 유용함이 알려지고 있다. 그러나, 타입-2 FLS를 설계하는데 있어서, 그 구성요소들을 결정하는데 많은 어려움이 있지만, 그것을 해결하기 위한 연구들는 미진하다 할 수 있다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 타입-2 FLS를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 타입소속함수와 제어규칙을 유전자 개체로 코딩하고, 교차와 돌연변이 연산을 통해 보다 향상된 성능을 보이도록 최적화시킨다. 제안된 방법은 간단한 함수근사문제를 통해 그 유효성을 보였고, 앞으로 좀더 실제분야의 응용문제들에 적용되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] H. Lee-Kwang, G. R. Oh, "Fuzzy Theory and Applications, I. II", Hongreung publishing co., 1990(in Korean).

[2] M. Mizumoto, K. Tanaka, Some properties of fuzzy sets of type 2, Information and Control, 31:312-340, 1976.

[3] R. John, C. Czarnecki, An Adaptive Type-2 Fuzzy System FOr Learning Linguistic Membership Grades, IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, pp. 1552-1556, 1999.

[4] N. Karnik, J. Mendel, Q. Liang, Type-2 Fuzzy Logic Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 7(6):643-658, 1999.

[5] D. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989.

[6] B. Carse, T. Forgarty, A. Munro, Evolving fuzzy rule based controllers using genetic algorithms, Fuzzy Sets and Systems, 80:273-293, 1999.

[7] S. Park, H. Lee-Kwang, An Automatic Design for Fuzzy Control Program using Genetic Algorithms, Journal of KISS, 25:1321-1332, 1998(in Korean).