

유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 자동 동조

노 기갑*, 주 영훈*,

* 군산대 제어계측공학과,

박 진배**

** 연세대 전기공학과

Auto-Tuning Method for Fuzzy Controller Using Genetic Algorithms

Gi-Gab Rho*, Young-Hoon Joo*,

* Dept. of Control & Instrumentation Eng., Kunsan Univ.

Jin-Bae Park**

** Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

[Abstract]

This paper proposes the systematic auto-tuning method for fuzzy controller using genetic algorithm(GA). In general, the design of fuzzy logic controller has difficulties in the acquisition of expert's knowledge and relies to a great extent on heuristic knowledge which, in many cases, cannot be objectively justified. So, the performance of the controller can be degraded in the case of plant parameter variations or unpredictable incident which the designer may have ignored. Proposed genetic algorithm searches the optimal rule structure, parameters of membership functions and scaling factors simultaneously and automatically by a new genetic coding format. Inverted pendulum system is provided to show the advantages of the proposed method.

1. 서 론

현대 제어 이론은 정확한 수학적 모델로 표현되는 선형 시스템이나 몇몇 간단한 비선형 시스템을 분석하는 데 있어서 성공적인 결과를 보여 왔으며 폭넓게 사용되어져 왔으나 시스템의 복잡도가 높아짐에 따라 제어 대상 시스템이 수학적으로 모델링하기 어렵거나 강한 비선형성을 가지는 경우 또는 외부의 환경이 불확실하게 변하는 경우에 제어 프로세스 설계가 매우 어려워지고 능률도 떨어진다. 또한, 제어될 플랜트의 입력과 출력의 관계가 알려졌을 때에는 전통적인 제어이론이 편리하지만, 입력과 출력의 데이터와 플랜트에 대한 전문적인 지식 몇 가지만이 주어졌을 때에는 전통적인 방법은 유용성이 떨어지게 된다. 이에 대한 대안으로서 여러 가지 지능 제어 기법이 제안되었으며 그 중의 하나로서 퍼지 제어 시스템이 제안되었다. 퍼지 제어기(FLC)는 전문가의 경험을 퍼지 논리를 이용하여 언어 규칙으로 표현하고, 이와 같이 이루어진 규칙들로서 제어기를 구성하기 때문에 제어 대상 플랜트의 정확한 수학적 모델을 알지 못한다 하더라도 좋은 결과를 얻을 수 있고 강인한 성질을

지니고 있으며 그 구현도 간단하다. 그러나, 이러한 퍼지제어기는 몇몇 구성요소를 플랜트에 맞게 조정해야 한다. 그를 위해서는 전문가의 지식이 필요하며 전문가의 지식은 얻기가 힘들다. 또한 전문가의 주관적인 경험에 의해 시행 착오의 방법으로 이루어진 시스템은 시스템의 복잡도가 증가하거나 돌발적인 상황에 처했을 경우 제어 성능이 떨어지기가 쉬우며, 시스템의 구성요소가 가장 최적의 값이라는 보장도 없다. 그러한 이유로 퍼지 시스템의 구성요소를 최적화 시키기 위해 자기 동조 방식 [1]-[2], 신경 회로망 이론과의 융합방식 [3]-[5], 유전 알고리즘에 의한 방식 [6]-[7] 등이 제안되고 있다.

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 자동동조 기법을 제안한다. 제안된 방법은 유전알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 설계시 부분적인 구성 요소의 최적화 방법 [7]-[9]과는 달리 퍼지 제어기의 거의 모든 구성 요소, 즉 환산계수 (scaling factor), 규칙의 전제부와 결론부의 소속함수, 규칙 베이스(rule base)를 유전알고리즘을 통해 동시에 최적화할 수 있다.

2. 퍼지제어기의 자동 동조

2.1 퍼지제어기

그림 1은 본 논문에서 사용하는 퍼지 제어기의 블록도를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 본 논문에서 사용한 퍼지 제어기는 두 개의 입력 $e(kT)$, $ce(kT)$ 와 하나의 출력 $\Delta u(kT)$ 를 가진다. 여기서, $e(kT)$ 는 플랜트의 출력 $y(kT)$ 과 기준 신호 $r(kT)$ 와의 오차를 의미하고, $ce(kT)$ 는 오차의 변화율을 나타낸다. $\Delta u(kT)$ 는 퍼지 제어기 출력의 변화율을 의미한다. 그들의 수식적 정의는 다음과 같다.

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \tag{1}$$

$$ce(kT) = e(kT) - e((k-1)T) \tag{2}$$

$$\Delta u(kT) = FLC [e(kT)*GE, ce(kT)*GCE] = FLC [E(kT), CE(kT)] \tag{3}$$

식 (3)에서 FLC는 퍼지 제어기를 의미하며 GE와 GCE는 입력 $e(kT)$, $ce(kT)$ 의 환산 계수, GU는 출력 $\Delta u(kT)$ 의 환산 계수이다.

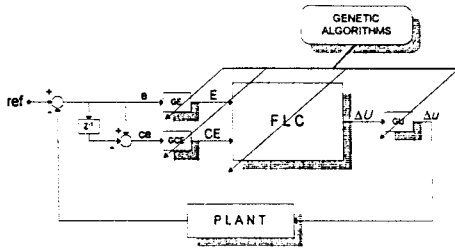


그림 1. 퍼지제어기의 블록도
Fig. 1. Block diagram of fuzzy logic controller

본 논문에서 사용하는 퍼지 제어 규칙은 식 (4)과 같은 간략화 퍼지 추론 규칙이다.

$$R^i : \text{If } E \text{ is } A_{1i} \text{ and } CE \text{ is } A_{2i}, \text{ Then } \Delta u \text{ is } w_i \quad (i=1, \dots, m) \quad (4)$$

식 (4)에서 R_i 는 퍼지 제어기의 i 번째 규칙, A_{1i} 와 A_{2i} 는 전제부의 소속함수이며 w_i 는 실수치로 표현되는 결론부의 소속함수이다. 전제부의 소속함수는 그림 2와 같이 중심으로부터 좌우 꼭지점까지의 길이와 서로 다른 부등변 삼각형 함수를 사용한다. 이 소속 함수를 결정하는 요소는 왼쪽 꼭지점(α), 중심(β), 오른쪽 꼭지점(γ)이며 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\Lambda(u; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} \frac{u-\alpha}{\beta-\alpha} & \alpha \leq u \leq \beta \\ \frac{\beta-u}{\beta-\alpha} & \beta \leq u \leq \gamma \\ 0 & u > \gamma \text{ or } u < \alpha \end{cases} \quad (5)$$

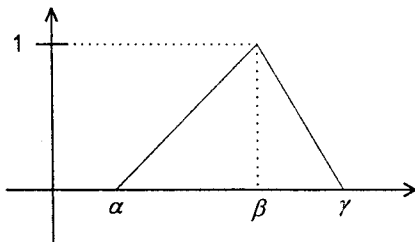


그림 2. 전제부의 소속함수
Fig. 2. Membership function in the premise

입력에 대한 i 번째 규칙의 적합도 μ_i 는 식 (6)과 같이 구하며 최종 추론값은 식 (7)과 같은 무게 중심법을 사용한다.

$$\mu_i = \Lambda_{1i}(E) \times \Lambda_{2i}(CE) \quad (6)$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (7)$$

2.2 유전알고리즘

유전 알고리즘은 자연 선택을 통한 진화의 원리를 이용한 최적화 기법이다. 유전 알고리즘을 이용해 어떠한 문제를 해결하고자 할 때에는 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 염색체(chromosomes)로 표현하고 이들을 점차 변형해 나가므로써 점점 더 좋은 해들을 생성해나간다. 여기에서 각각의 가능한 해를 하나의 개체로 본다. 이 개체는 보통 하나 또는 여러개의 염색체로 구성되며 이 개체들의 집합을 개체군(population)이라 한다. 각 개체들은 몇가지 연산자에 의해 변형이 되는데 이 연산자들을 유전 연산자라 하며 다음과 같다.

재생 연산자(reproduction) : 재생은 적합도 함수 값에 의해서 개별적인 문자열이 복제되는 과정이다. 이 연산자를 통해 보다 높은 적합도를 갖는 문자열이 이후의 세대에서 더 많은 수의 자손을 갖게된다.

교차 연산자(crossover) : 재생연산자에 의해 선택된 부모 개체로부터 염색체 교환을 일어나게 하는 연산자이다. 염색체가 교환되는 위치는 무작위로 결정되며 이 교차 위치를 기준으로 두 염색체 간에 유전자 값이 교환되어 새로운 두 개의 자식 개체가 생성된다. 교차는 이 연산자가 적용되는 확률을 나타내는 파라미터인 P_c (probabilities of crossover)에 의하여 그 적용빈도가 제어된다.

돌연변이 연산자(mutation) : 개체군의 다양성을 유지하는데 중요한 역할을 하는 돌연변이 연산자는 스트링에 대한 돌연변이의 경우 스트링이 있는 각각의 정보에 대한 돌연변이를 독립적으로 P_m (probabilities of mutation)의 확률로 적용함으로써 수행된다. 본 논문에서는 실수 코드와 정수 코드를 이용하므로 일정한 정수나 실수를 더하거나 빼는 것으로 돌연변이를 행한다.

2.3 유전 알고리즘에 의한 퍼지제어기 설계

퍼지 제어기의 규칙 베이스는 제어기의 동작 시간에 많은 영향을 주게 되는데 규칙 수가 많으면 많을수록 연산 속도는 느려지게 되며, 제어시에 이 모든 규칙들을 필요로하지는 않는다. 본 논문에서는 유전 알고리즘을 사용하여 제어기의 성능에 도움이 되지 않는 규칙은 제거하고, 필요한 규칙만을 남겨 놓는 방법으로 규칙 베이스를 최적화시키는 것과 동시에 제어기가 최적의 성능을 내기 위한 환산 계수, 전제부 및 결론부 소속함수의 매개변수를 동조한다. 이러한 목적을 위해서는 퍼지제어기 규칙, 전제부 소속함수의 매개변수, 후반부 소속함수의 매개변수, 환산 계수와 같은 퍼지제어기의 요소

들을 하나의 염색체로 표현하는 부호화 기법을 제안한다.

염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하며 염색체의 길이는 퍼지 제어기의 입력 변수가 n 개, 출력 변수가 1개인 MISO 시스템인 경우, 전제부의 i 번째 입력 변수의 분할 수가 m_a 개, 각 소속함수를 표현하는데 필요한 매개 변수의 수를 p 개라 하면 전제부 스트링의 총 길이는 $n \times m_a \times p$ 가 된다. 결론부의 경우 분할 수가 m_c 개, 소속함수는 실수이므로 매개변수는 1개가 되고 결론부 스트링의 총 길이는 $m_c \times 1$ 이 된다. 또한 rule base를 염색체로 표현하는 데에는 입력 변수의 수가 n 개 이므로 $\prod_{i=1}^n m_a$ 이 된다. 본 논문에서 제안한 2개의 입력과 1개의 출력을 가지고, 입력과 출력이 모두 7개로 분할된 퍼지 제어기의 염색체 길이는 전제부의 경우 $2 \times 7 \times 3$, 결론부의 경우 7×1 , 규칙 베이스는 7×7 이고 각 염색체의 표현은 그림 3과 같다. 그림 3에서 규칙 베이스에는 결론부의 소속함수 번호가 들어가게 되고 여기에 규칙의 사용/비사용을 결정하는 규칙 베이스와 동일한 길이의 이진 스트링이 덧붙여지게 된다.

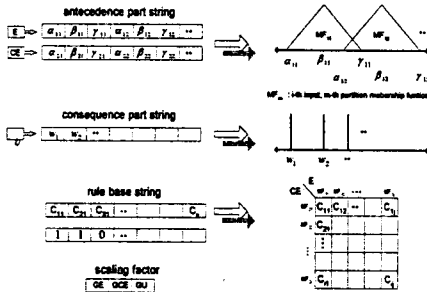


그림 3. FLC의 설계를 위한 염색체의 구조
Fig. 3. Chromosomes for the design of the FLC

각 개체의 적합도(fitness)를 평가하는 적합 함수는 보통 풀고자 하는 최적화 문제의 목적 함수나 다른 주관적 평가 함수에 기본하여 결정된다. 일반적으로 퍼지 제어기의 최적화는 목적 함수값을 최소화시키는 퍼지 제어기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 본 논문에서는 식 (8)과 같은 목적함수를 이용한 식 (9)를 적합도 함수로 정한다.

$$x = \sum_{n=0}^{\text{sampling numbers}} \{ nT \cdot e_n^2 + nT \cdot ce_n^2 \} \quad (8)$$

$$f_{\text{fitness}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{null-set exists} \\ \frac{1}{x} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

식 (8)에서 T 는 샘플링 주기, e 는 플랜트의 출력과

기준 신호간의 오차, Δe 는 오차의 변화율이다. 식 (8)은 퍼지 제어기가 기준 신호에 빨리 도달하고 정상 상태 오차가 최소가 될 때, 적합도 함수가 최대의 값을 갖는다. 임의의 개체로 제어 규칙을 형성시 공집합을 가질 때에는 유용하지 않은 규칙을 가진 개체의 생성을 막기 위하여 식 (9)와 같이 적합도의 값에 0을 부과하는 방법을 사용한다.

3. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서 제안한 퍼지 제어기의 자동 동조 기법의 유용성을 증명하기 위하여 비선형 시스템인 도립 진자(inverted pendrum)를 사용한다. 그림 4는 도립진자 시스템을 나타낸 그림이다. 수레는 수평 선상에서 앞 또는 뒷방향으로만 이동할 수 있으며, 진자를 수직 방향으로 세우기 위하여 제어입력인 수레를 미는 힘 F 를 조절한다. 이 도립 진자의 운동 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta - \cos \theta [F + ml(\sin \theta) \dot{\theta}^2]}{\frac{4}{3} \frac{ml(\cos \theta)^2}{m_c + m}} \quad (10)$$

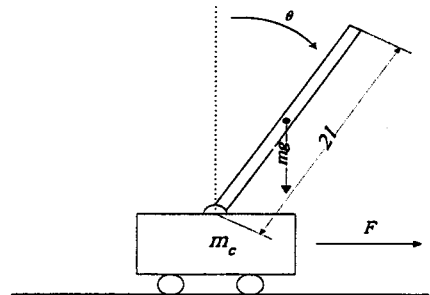


그림 4. 도립 진자 시스템
Fig. 4. Inverted pendulum system

식 (7)에서 θ 는 수직으로부터 폴의 변위각을 시계 방향으로 측정한 각이고, g 는 중력가속도, mg 는 폴의 질량, m_c 는 수레의 질량, l 은 폴의 길이, F 는 수레에 가해지는 힘을 나타낸다. 시뮬레이션을 위해 각 변수들은 $g = 9.8 [m/sec^2]$, $m_g = 0.1 [kg]$, $m_c = 1.0 [kg]$, $l = 1 [m]$ 로 하였다. 시뮬레이션을 위한 초기 파라미터값들은 샘플링 간격 0.01, 집단 100, 세대수 200, 교차율 0.96, 돌연변이율은 0.2로 하였다.

그림 5는 초기각과 각속도가 각각 1.0 rad/sec , 0.0 rad/sec^2 로 설정했을 때의 시뮬레이션 결과로써 수동설정시의 FLC의 성능은 점선으로 본 논문에서 제안한 GA퍼지 제어기의 성능은 실선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 퍼지제어기는 수동 동정시의 FLC보다 상승시간이 더 짧으며 최대 오버슈트 또한 작다. 표 1은 최종적으로 동정된 퍼지 제어기의 전제부와 결론부 매개변수, 표 2

는 규칙 베이스를 나타내었다. 표 2에서 어두운 색으로 표시된 부분은 규칙 베이스에서 제외된 규칙으로 제안된 기법에 의해 총 49개의 규칙이 23으로 감소하였음을 알 수 있다. 동정된 환산 계수는 표 3에 나타내었다. 수동으로 동정한 FLC와 제안한 기법에 의해 설계된 FLC의 성능비교를 위한 평균 제곱 오차는 각각 0.0323과 0.0179로 우수하였다.

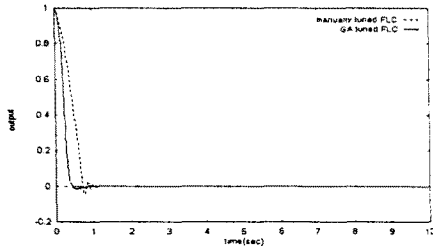


그림 5 도립 진자의 출력 궤적
Fig. 5 Output trajectory of the inverted pendrum

표 1. 동정된 전건부 소속 함수의 매개 변수
Table 1. Identified membership parameters in the premise

| | E(k) | | | CE(k) | | | $\Delta U(k)$ |
|----|----------|---------|----------|----------|---------|----------|---------------|
| | α | β | γ | α | β | γ | |
| NB | -1.3333 | -1 | -1.0282 | -1.3333 | -1 | -0.2462 | -0.9230 |
| NM | -1.2735 | -0.7024 | -0.5311 | -0.6549 | -0.5442 | -0.1775 | -0.6702 |
| NS | -0.9879 | -0.0155 | 0 | -0.3934 | -0.1989 | 0.04372 | -0.0491 |
| ZE | -0.7811 | 0 | 0.1581 | -0.1488 | 0 | 0.0726 | 0 |
| PS | -0.4675 | 0.2288 | 0.6405 | -0.2404 | 0.6456 | 1.0965 | 0.5101 |
| PM | 0.2069 | 0.3746 | 0.9190 | 0.8354 | 1.1052 | 1.1115 | 0.5394 |
| PB | 0.8445 | 1 | 1.3333 | 0.8445 | 1 | 1.3333 | 1 |

표 2. 동정된 퍼지 규칙베이스
Table 2. Identified fuzzy rule base

| | | E | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| CE | NB | PS | | | PM | | | PB |
| | NM | | | | | | | ZE |
| | NS | NS | | | | | PB | NB |
| | ZE | | | PB | ZE | NS | | PS |
| | PS | | | PB | | NM | | PS |
| | PM | NS | | | ZE | | | ZE |
| | PB | NM | ZE | | | | | PB |
| | PB | | | | | | | PM |

표 3. 동정된 스케일링 팩터
Table 3. Identified scaling factors

| GE | GCE | GU |
|---------|---------|---------|
| 1.21158 | 11.9755 | 49.2187 |

4. 결론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 자동 동조 방법을 제안하였다. 제안된 기법은 유전 알고리즘의 새로운 유전 암호화 방법에 의해 퍼지 제어기의 구성 요소인 환산 계수, 퍼지 규칙의 전제부 및 결론부 소속함수, 규칙 베이스 등 모든 요소의 최적화를 동시에 체계적으로 동정하는 것이 가능하다. 제안된 방법의 효율성 및 우수성을 평가하기 위하여 비선형 시스템인 도립 진자의 풀 제어에 적용하였다. 제안된 방법은 수동으로 동조된 퍼지 제어기와 비교하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 방법을 사용함으로써 새로운 플랜트에 대한 퍼지 제어기를 설계할 때 전문가의 개입 없이 적은 수의 규칙 베이스로 우수한 성능을 가진 제어기를 설계할 수 있음을 증명하였다.

[참고 문헌]

- [1] Shihuang SHAO, "Fuzzy Self-Organizing Controller And Its Application for Dynamic Processes", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 26, pp. 151-164, 1988,
- [2] C. G. Moore and C. J. Harris, "Aspects of Fuzzy Control and Estimation", Advances in Intelligent Control, pp. 201-242, 1994
- [3] Shin-ichi Horikawa, "A Fuzzy Controller Using A Neural Network And It's Capability To learn Control Rules", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp.103-106, 1990.
- [3] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optmization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [4] Y. Tamaguchi, T. Takagi, and T. Mita, "Self-organizing Control Using Fuzzy Neural Networks", Advancec in Intelligent Control, pp. 337-361. 1992.
- [5] Yie-Chien Chen, Ching-Cheng Teng, "A Model Reference Control Structure Using a Fuzzy Neural Network", Fuzzy Sets and Systems, Vol 73, pp. 291-312, 1995.
- [6] Cuck Kar, "Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers", AI EXPERT, pp. 26-35, February, 1991
- [7] Hung-Ching Lu et al(1996),"Fuzzy Logic Controller Design Using Genetic Algorithm", IIZUKA '96', pp. 525-528, 1996.
- [8] Chuck Karr, "Genetic Algorithms for Fuzzy Contr-ollers", AI EXPERT, pp. 26-35 February, 1991.
- [9] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Kim, K. B. Woo, " Fuzzy system modeling by fuzzy partition and GA hybrid schemes", Fuzzy Sets and Systems, Vol 86, pp 279-288, 1997.