

유전알고리즘을 이용한 규칙 기반 퍼지제어기의 최적 설계

論 文

48A-2-7

Optimal Design for Rule-Based Fuzzy Logic Controller Using GA

盧 己 甲* · 周 永 焄** · 朴 珍 培***
(Gi-Gab Rho · Young-Hoon Joo · Jin-Bae Park)

Abstract - This paper presents an optimal design method for fuzzy logic controllers using genetic algorithms. In general, the design of fuzzy logic controllers 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. 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, and parameters of the fuzzy logic controller obtained by expert's control action may not be global. To solve these problems, the proposed method using genetic algorithms in this paper, can tune the parameters of fuzzy logic controller including scaling factors and determine the appropriate number of fuzzy rules systematically and automatically. we provide the second order dead time plant and inverted pendulum system to evaluate the feasibility and generality of our proposed method. Comparison shows that the proposed controller can produce higher accuracy and a smaller number of fuzzy rules than manually tuned fuzzy logic controller.

Key Words: Fuzzy Logic Controller, Genetic Algorithm, Parameter Optimization

1. 서 론

PID, 적응제어, 강인제어등과 같은 전통적인 제어 이론과 현대의 제어 이론은 정확한 수학적 모델을 이용하여 선형 시스템이나 몇몇 간단한 비선형시스템을 분석하는데 있어서 성공적인 결과를 보여 왔으며 폭 넓게 사용되어져 왔다. 그러나 시스템이 복잡해짐에 따라 제어 대상 시스템이 수학적으로 모델링하기 어렵거나 강한 비선형성을 가지는 경우 또는 외부의 환경이 불확실하게 변하는 경우, 제어 프로세스 설계가 매우 어려워지고, 능률도 떨어지게 되었다. 또한, 제어될 플랜트의 입력과 출력의 관계가 알려졌을 때에는 전통적인 제어이론이 편리하지만, 입력과 출력의 데이터와 플랜트에 대한 전문적인 지식 몇 가지만 주어졌을 때에는 전통적인 방법은 그같은 플랜트의 제어에 대해 유용성이 떨어지게 된다. 이에 대한 대안으로서 여러 가지 지능 제어 기법이 제안되었으며 그 중의 하나로서 퍼지 제어 시스템이 제안되었다[1-10]. 퍼지제어기는 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 간단하

다고 알려져 있다[3-5, 11]. 퍼지 제어시스템은 인간의 생각과 자연적인 언어를 표현하는데 있어서 전통적인 논리 제어기보다 더 적합하다. 그러나, 이러한 퍼지 제어기는 제어기를 구성하고 있는 퍼지 제어 규칙의 수와 몇몇 구성요소를 플랜트에 맞게 조정해야 한다. 이를 위해서는 전문가의 지식이 필요하며 전문가의 지식은 얻기가 힘들다. 또한, 전문가의 주관적인 경험에 의해 시행 착오적인 방법으로 구성되는 제어기는 시스템의 복잡도가 증가하거나 돌발적인 상황에 처했을 경우 제어 성능이 떨어지기 쉬우며, 시스템의 구성요소가 최적의 값이라는 보장이 없어 정확도면에서도 신뢰가 부족하다고 알려져 있다. 이러한 이유로 퍼지 시스템의 구성요소를 최적화 시키기 위한 여러 가지 동조 이론이 등장하였는데 여기에는 비선형 프로그래밍 기법등을 이용한 자기 동조 방식[3-11], 신경 회로망 이론과의 융합방식[12-16], 유전 알고리즘에 의한 방식[17-22]등이 많이 사용되고 있다. 신경구조망의 이용은 퍼지 제어규칙을 신경망의 특징인 학습능력을 통해 구성해 주는 방법으로 현재에도 연구가 계속되고 있는 분야이고, 자기 동조 방식에서는 실행 측정표를 참고로 하여 제어 대상의 현재 상태에서부터 새로운 퍼지 제어 규칙과 환산계수(scaling factor)를 만들며, 동시에 제어규칙을 만들어 주는 방법이 많이 사용된다. 실행 측정표는 현재 사용된 제어 규칙의 기여도에 따라 제어규칙의 후반부를 강화 또는 약화시켜 제어규칙을 만들면서 수정해 가는 참고 표가 된다. 그러나 자기 구성법에서 실행 측정표를 만들어주는 기준을 어떻게 정할 것인가가 문제가 된다.

유전 알고리즘은 자연 세계의 진화 과정을 컴퓨터상에서 시뮬레이션 함으로써 복잡한 실세계의 문제를 해결하고자

* 準 會 員 : 群山大 大 學 院 制 御 計 測 工 學 科 碩 士 課 程

** 正 會 員 : 群山大 工 大 制 御 計 測 工 學 科 助 教 授 · 工 博

*** 正 會 員 : 延 世 大 工 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

接受日字 : 1998年 9月 11日

最終完了 : 1999年 1月 8日

하는 계산 모델이다. 최적화 하고자 하는 파라미터들을 염색체로 표현하여 주어진 함수의 적합 정도에 따라 적합도 (fitness)를 할당하고, 적합도가 높은 인자의 유전자를 추출하여 교배와 돌연변이등을 통해 새로운 염색체를 생성해낸다. 이렇게 만들어지 염색체는 세대를 거치면서 최적화가 이루어지게 된다. 이러한 유전 알고리즘은 특히 적응적 탐색과 학습 및 최적화를 통한 공학적인 문제의 해결에 많이 응용된 바 있으며, 최근 들어 특히 신경망과 퍼지 로직과의 결합으로 그 응용 범위는 점점 늘어나고 있다. 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계는 많은 논문에서 거론되었다. Joo등[20-22]은 퍼지 제어기의 구조 동정에는 클러스터링 방법을 이용하고 퍼지 규칙을 구성하고 있는 파라미터들은 유전알고리즘을 이용하여 동정하였다. 또한, 기존의 여러 방법들에서의 퍼지제어기 설계는 제어기의 구성요소중 일부만을 동정한 형태이다[17-19]. 따라서, 유전알고리즘만을 이용하여 퍼지제어기의 규칙 동정과 각종 파라미터의 동정을 동시에 자동으로 동정할 수 있는 알고리즘의 개발은 현재 많은 논문에서 발표되고 있다.

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계에 대한 체계적이고 간단한 오프라인 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 유전알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 구성요소인 퍼지 제어 규칙의 동정과 각 규칙을 구성하고 있는 멤버쉽 함수의 파라미터들과 퍼지 제어기의 환산계수를 포함한 모든 제어기 구성 요소를 동시에 자동으로 동정할 수 있는 방법이다. 이를 위해 본 논문에서는 기존의 유전 알고리즘의 염색체의 구조를 본 논문에서 설계하려고 하는 퍼지 제어기의 각종 파라미터의 동정에 맞게 새로 구성하는 방법을 개발한다. 제안된 방법은 독자적으로 퍼지 제어기의 최적화에 적용이 가능하며 또한 퍼지 신경망, RLS 방법과 같은 다른 학습법과 혼합 사용되어 퍼지 제어기의 설계를 자동적으로 수행할 수 있다.

마지막으로, 본 논문에서 제안한 방법은 2차 시간 지연 비선형 시스템과 도입인자 시스템의 제어를 위한 퍼지 제어기 설계에 적용하여 그 우수성을 증명한다.

2. 퍼지제어기의 자동 동조

2.1 일반적인 퍼지제어기

본 논문에서 사용하는 GA-퍼지 제어기의 기반이 되는 두 개의 입력 $e(kT)$, $ce(kT)$ 와 하나의 출력 $u(kT)$ 를 가지는 일반적인 퍼지제어기의 블록도를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 $e(kT)$ 는 플랜트의 출력 $y(kT)$ 와 기준 신호 $r(kT)$ 와의 오차를 의미하고, $ce(kT)$ 는 오차의 변화율을 나타낸다. 이러한 퍼지 제어기의 수식적 정의는 다음과 같다.

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \quad (1)$$

$$ce(kT) = e(kT) - e((k-1)T) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u(kT) &= GU \times FLC[e(kT) * GE, ce(kT) * GCE] \\ &= GU \times FLC[E(kT), CE(kT)] \end{aligned} \quad (3)$$

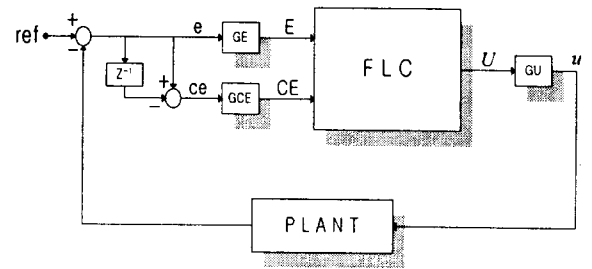


그림 1 퍼지제어기의 블록도

Fig. 1 Block diagram of fuzzy logic controller

식 (3)에서 FLC는 퍼지 제어기를 의미하며 GE와 GCE는 입력 $e(kT)$, $ce(kT)$ 의 환산 계수, GU는 출력 $u(kT)$ 의 환산 계수이다. 본 논문에서 동정하고자 하는 퍼지 제어 규칙은 식 (4)과 같은 간략화 퍼지 추론 규칙이다.

$$\begin{aligned} R^i : & \text{If } E \text{ is } \Lambda_{1i} \text{ and } CE \text{ is } \Lambda_{2i}, \text{ Then } u \text{ is } w_i \\ & (i = 1, \dots, m) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 R^i 는 퍼지 제어기의 i 번째 규칙, Λ_{1i} 와 Λ_{2i} 는 전제부의 소속함수이며 w_i 는 실수치로 표현되는 결론부의 소속함수이다. 전제부의 소속함수는 그림 2와 같이 중심으로부터 좌우 꼭지점까지의 길이가 서로 다른 부등변 삼각형 함수를 사용한다. 이 소속 함수를 결정하는 요소는 왼쪽 꼭지점(α), 중심(β)와 오른쪽 꼭지점(γ)이며 식 (5)와 같이 정의된다. 후반부 소속함수는 그림 3과 같은 실수치를 사용한다.

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

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

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

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

본 논문의 목적은 식 (4)로 표현되는 퍼지 규칙의 집합으로 구성된 퍼지 제어기를 설계하는 것으로, 그 내용은 퍼지 제어기의 규칙 수 (m), 전제부와 후반부 멤버쉽 함수의 파라미터($\alpha, \beta, \gamma, \omega$)와 환산계수 (GE, GCE, GU)등을 유전 알고리즘을 이용하여 동시에 동정할 수 있는 방법을 제안하는 것이다.

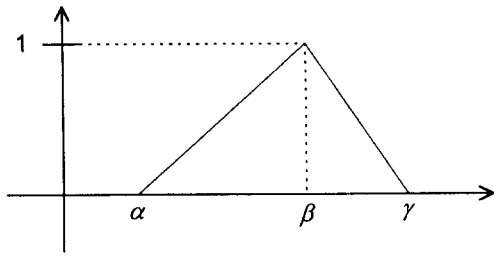


그림 2 전제부의 소속함수
Fig. 2 Membership function in the premise

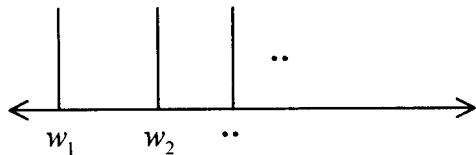


그림 3 결론부의 소속함수
Fig. 3 Membership function in consequent part

2.2 유전알고리즘

제안한 방법을 제시하기 전에 먼저 유전 알고리즘에 대한 개요를 알아본다. 유전 알고리즘은 자연 선택을 통한 적자 생존이라는 진화의 원리를 이용하여 확률적인 방법으로 최적해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 염색체(chromosomes)로 표현하여 이들을 자연 진화의 원리에 따라 점차 변형해 나감으로써 점점 더 좋은 해를 생성해가는 컴퓨터 프로그래밍의 하나의 기법이다. 여기에서 각각의 가능한 해를 하나의 개체(individual)로 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 염색체간에 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. 그림 4는 교차 연산자의 동작 원리를 나타낸 그림이다.

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 확률을 적용함으로써 수행된다. 본 논문에서는 실수 코드와 정수 코드를 이용하므로 일정한 정수나 실수를 더하기

나 빼는 것으로 돌연변이를 행한다. 그림 5는 이러한 돌연변이의 원리를 도시한 그림이다

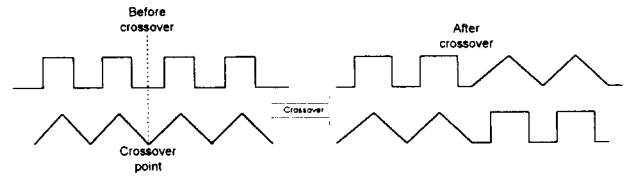


그림 4 교차 연산자의 원리
Fig. 4 The principle of crossover operator



그림 5 돌연변이 연산자의 작동원리
Fig. 5 The principle of mutation operator

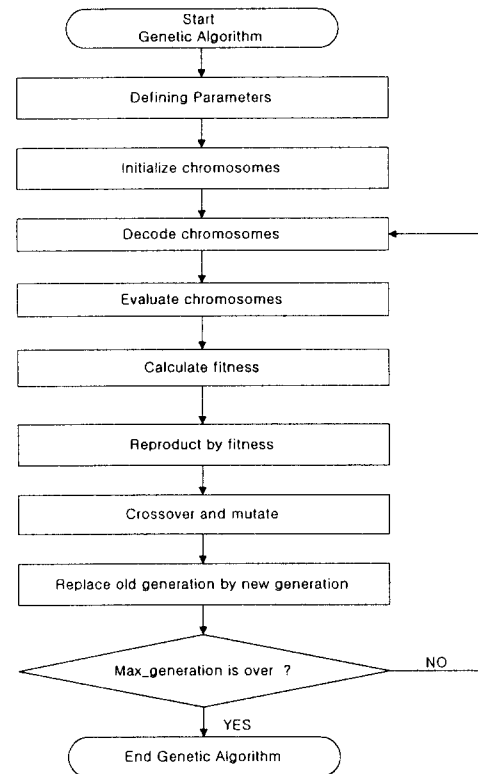


그림 6 유전알고리즘의 플로우 차트
Fig. 6 The flowchart for GA algorithm

그림 6은 유전 알고리즘의 프로그램 흐름도를 나타낸 그림이다. 유전 알고리즘의 수행 절차는 아래와 같이 정리할 수 있다.

1단계 : 유전 알고리즘의 각종 매개변수 및 환경변수를 초기화 한다.

- 2단계 : 동정될 시스템의 매개변수들을 검색체화 하여 초기 세대를 위한 개체들을 발생시킨다.
- 3단계 : 각 개체의 검색체에서 암호 해독 과정에 의해 퍼지 제어기의 매개변수들을 추출하여 평균가를 하고 적합도 함수 값을 각 개체에 부여한다.
- 4단계 : 적합도 함수 값에 비례하여 선택이 이루어지고 교차와 돌연변이를 거쳐 새로운 세대인 객체군을 형성한다.
- 5단계 : 최대 세대수가 지날 때까지 단계 3과 단계 4를 반복한다.

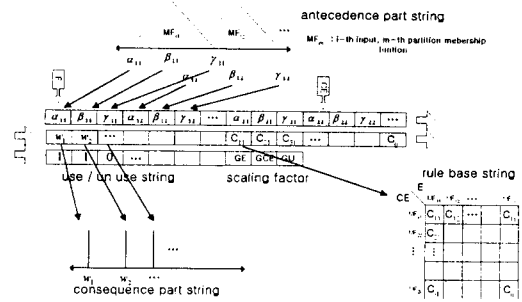


그림 8 FLC의 설계를 위한 검색체의 구조
Fig. 8 Chromosomes for the design of the FLC

2.3 유전 알고리즘에 의한 퍼지제어기 설계

본 논문에서 제안하는 GA-퍼지 제어기의 블록 다이어그램은 그림 7과 같다. 이는 2.1에서 설명하였던 일반적인 퍼지제어기에 유전 알고리즘 부분을 추가한 구조를 하고 있다.

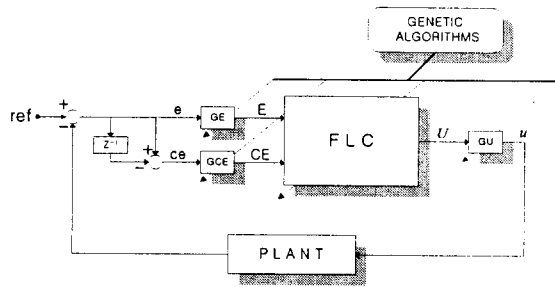


그림 7 GA-퍼지제어기의 블록도
Fig. 7 Block diagram of GA-fuzzy logic controller

퍼지 제어기의 규칙 베이스는 제어기의 동작 시간에 많은 영향을 주게 되는데 규칙 수가 많으면 많을수록 수행 속도는 느려지게 되며, 제어시에 이 규칙들을 모두 필요로 하지는 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 동조하는 방법을 제안한다. 이러한 목적을 위해서는 퍼지제어기 규칙, 전제부 소속함수의 매개변수, 결론부 소속함수의 매개변수, 환산 계수와 같은 퍼지제어기의 요소들을 하나의 검색체로 표현하는 부호화 기법을 제안한다.

그림 8은 본 논문에서 제안하는 검색체 구조의 한 예를 도시한 그림이다. 그림 8의 일반적인 설명은 다음과 같다. 검색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하며 검색체의 길이는 퍼지 제어기의 입력 변수가 n 개, 출력 변수가 1개인 MISO 시스템인 경우, 전제부의 i 번째 입력 분할 수가 m_a 개, 전제부의 각 소속함수를 표현하는데 필요한 매개 변수의 수를 p 개라 하면 (본 논문에서는 부등변 삼각형으로 동정할 매개변수들은 α, β, γ 로 $p=3$) 전제부 스트링의 총 길이는 $n \times m_a \times p$ 개가 된다. 결론부의 경우 분할 수가 m_c 개,

소속함수는 실수로 매개변수는 1개(ω)가 되므로 결론부 스트링의 총 길이는 $m_c \times 1$ 개가 된다. 또한, 규칙의 사용/비사용을 검색체로 표현하는데에는 입력 변수의 수가 n 개이므로 $\prod_{i=1}^n m_a$ 이 된다. 그림 8에서와 같이 2개의 입력과 1개의 출력을 가지고, 입력과 출력이 모두 7개로 분할된 퍼지제어기의 경우, 검색체 길이는 전제부의 경우 $2 \times 7 \times 3$, 결론부의 경우 7×1 , 규칙 베이스는 7×7 이며 각 검색체의 표현은 그림 8에 되어있다. 그림 8에서 전제부의 각 소속함수의 파라미터인 왼쪽 꼭지점 α , 중심점 β , 오른쪽 꼭지점 ω 가 차례로 검색체로 구성되며, 이어서 결론부 소속함수의 파라미터인 ω 가 배치되며, 그 다음에는 규칙베이스가 검색체로 구성된다. 규칙베이스에는 결론부의 소속함수 번호가 들어가게 되고 여기에 규칙의 사용/비사용을 결정하는 규칙베이스와 동일한 길이의 이진 스트링이 덧붙여지게 된다. 마지막으로 환산 계수에 대한 매개변수가 검색체로 구성된다. 이렇게 구성된 검색체는 하나의 긴 검색체를 구성하며 이 검색체를 사용하여 유전 알고리즘이 수행된다. 새롭게 생성된 개체들로 모두 같은 구조를 따르며, 각 객체를 평가할 때에는 검색체로 부호화할 때와 반대로 검색체를 해독하여 퍼지 제어기의 매개변수를 추출하고 추출된 매개 변수에 의해 구성된 퍼지 제어기를 이용하여 평가하게 된다.

각 개체의 적합도를 평가하는 적합도 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. 따라서, 본 논문에서는 식 (8)과 같은 목적함수를 이용한 식 (9)를 적합도 함수로 정한다.

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

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

식 (8)에서 T 는 샘플링 주기, e 는 플랜트의 출력과 기준 신호간의 오차, Δe 는 오차의 변화율이다. 식 (9)는 퍼지 제어기가 기준 신호에 빨리 도달하고 정상 상태 오차가 최소가 될 때, 적합도 함수가 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의된 퍼지 적합도 함수는 각 객체가 다음 세대에 생존할 가능

성의 척도가 되며 이 적합도 함수의 값이 큰 객체는 다음 세대에 생존할 가능성이 크게되며 이와 반대로 값이 작은 객체는 생존할 가능성이 작게 된다. 본 논문에서 제안하는 퍼지 제어기 설계에 대한 또 다른 평가 기준은 전체 입력 집합 내에서 퍼지 제어 규칙의 공집합(null set) 형성 여부이다. 공집합을 형성하는 퍼지 제어 규칙은 입력범위 내의 일부 입력에 대해서는 그에 해당하는 출력을 생성하지 못하므로 유용한 규칙이 될 수 없다. 따라서, 퍼지제어기의 자동 설계 과정에서 공집합을 갖는 경우가 발생할 경우 식 (9)와 같이 적합도 값에 0을 부과하여 공집합을 갖는 퍼지 제어 규칙의 생성을 막는다. 이는 다음 세대에는 그 객체가 생존할 수 없음을 의미한다.

제안된 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 자동 설계 방법은 오프 라인 방식을 사용한다. 즉, 제어 대상 시스템의 입출력 데이터만을 얻을 수 있는 경우 (하수 처리 시스템 등)는 기존의 연구에서 개발된 동정 방법을 사용하여 오프 라인으로 사용할 시스템을 구축하여 적용한다. 또한 적절한 동력학 방정식을 얻는 것이 가능한 경우 (도립 전자 시스템이나 로봇 시스템 등)는 주어진 동력학 방정식을 기반으로 오프 라인으로 퍼지 제어기의 최적화를 수행한다. 따라서 온 라인 방식의 경우에 문제가 될 수 있는 시스템에 대한 위험한 입력은 고려 하지 않는다.

3. 시뮬레이션과 결과고찰

3.1 2차 시간 지연 시스템

본 논문에서 제안한 퍼지 제어기의 자동 동조 기법의 평가를 위한 플랜트로 식 (10)과 같은 불감 시간대를 갖는 2 차 지연 플랜트를 정의한다.

$$G_p(s) = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} e^{-Ls} \quad (10)$$

식 (10)에서 w_n (>0)은 각속도, ζ (>0)는 댐핑 계수 (damping factor), L 은 시간 지연(time delay), K 는 이득 (gain)을 나타낸다. w_n 은 시간 스케일에만 영향을 미치며 ζ 는 응답에 영향을 미친다. 시뮬레이션을 위한 파라미터는 $\zeta=0.75$, $w_n=10$, $L=0.12$ 로 설정한다. 시뮬레이션 초기 파라미터 표 1과 같이 설정하였다.

본 논문에서는 먼저 수동으로 설계된 퍼지 제어기를 기본으로 하여 시뮬레이션을 실시한다. 수동으로 설계된 퍼지 제어기는 입력 변수를 7×7 으로 균등 분할한 제어기이다. 이를 기본으로 하여 본 논문에서 제안하는 유전알고리즘을 이용한 자동동조 방법에 의하여 최종적으로 동정된 퍼지 제어기의 전제부와 결론부의 매개변수는 표 2에 나타내었으며 규칙베이스는 표 3에 나타내었다. 표 3에서 어두운 색으로 표시된 부분은 수동으로 분할한 규칙 베이스에서 제거된 규칙이다. 표에서 밝은 색으로 표시된 부분 즉 유효한 규칙의 개수는 초기의 규칙수인 49개에서 30개로 크게 감소되었음을 표 3에서 알 수 있다. 동정된 환산 계수는 표 4에 나타내었다. 본 논문에서 사용한 FLC는 입력과 출력의 범위가

표 1 시뮬레이션을 위한 초기 파라미터

Table 1 Initial parameters for simulation

Parameters	Values
Sampling number	1000
Population size	100
Number of generation	200
Crossover rate Pc	0.95
Mutation rate Pm	0.2

표 2 동정된 전·후건부 소속 함수의 매개 변수

Table 2 Identified membership parameters in the premise-consequence part

	$E(k)$		
	α	β	γ
NB	-1.3333	-1	-0.7243
NM	-1.2645	-0.8737	0.0519
NS	-0.7539	-0.0508	0.5105
ZE	-0.3523	0	0.6771
PS	-0.0024	0.1987	0.4993
PM	0.0362	0.0936	1.1923
PB	0.9428	1	1.3333

	$CE(k)$			$U(k)$
	α	β	γ	ω
NB	-1.3333	-1	-0.5336	-0.3587
NM	-1.3239	-0.3539	-0.1689	-0.2833
NS	-0.4655	-0.1298	0	-0.1019
ZE	-0.0921	0	0.611741	0
PS	0.1749	0.6778	0.8010	0.1665
PM	0.3285	0.7046	1.1625	0.3885
PB	0.9053	1	1.3333	0.8172

모두 $-1.0 \sim 1.0$ 이다. 환산 계수는 FLC로의 입력과 출력을 이 범위에 맞게 조절해 주는 역할을 한다. 또한 환산 계수는 같은 FLC의 입력값에 대하여 이를 정밀하게 혹은 거칠게 제어할 수 있게 해준다.

그림 9는 2차 지연시간을 갖는 비선형시스템의 시뮬레이션 결과로 수동설정시의 FLC의 성능은 점선으로, 본 논문에서 제안한 GA퍼지 제어기의 성능은 실선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 GA-퍼지 제어기는 수동 설정시의 FLC보다 상승시간이 더 짧으며 최대 오버슈트 또한 상당히 작다는 것을 알 수 있다. 표 5는 수동으로 동정한 FLC와 유전알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 성능 비교를 위해 MSE (mean square error)값을 비교한 것이다. 표 5에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방법에 의해 설계된 GA-퍼지 제어기는 규칙수면에서, 그리고 정확도 면에서 우수함을 알 수 있다.

표 3 동정된 퍼지 규칙 베이스
Table 3 Identified fuzzy rule base

		<i>E</i> (error)						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
<i>CE</i>	NB	PB	NS	ZE	PM	PS	NS	PS
	NM	NS	NS	NM	NM	PM	PM	PB
	NS	NS	ZE	ZE	NS	PM	PM	NS
	ZE	NB	PM	PS	ZE	PB	NB	PB
	PS	NM	PM	NB	NS	NS	ZE	PS
	PM	PS	NS	ZE	PB	ZE	ZE	NM
	PB	NS	PS	PS	ZE	NM	ZE	PB

표 4 동정된 스캘링 계수
Table 4 Identified scaling factors

<i>GE</i>	<i>GCE</i>	<i>GU</i>
0.91961	13.6723	10.9531

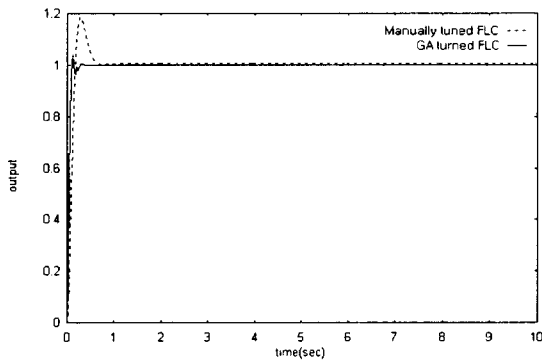


그림 9 2차지연을 갖는 비선형 시스템의 출력
Fig. 9 The output trajectory of the second order dead time plant

3.2 독립진자에의 응용

본 논문에서 제안한 퍼지 제어기의 자동 동조 기법의 유용성을 증명하기 위하여 비선형 시스템인 독립 진자 (inverted pendulum)를 사용한다. 그림 10은 독립진자 시스템을 나타낸 그림이다. 수레는 수평선상에서 앞 또는 뒷방향으로만 이동할 수 있으며, 진자를 수직 방향으로 세우기 위하여 제어입력인 수레를 미는 힘 *F*를 조절한다. 이 독립진자의 운동 방정식은 식 (11)과 같다.

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta - \cos \theta [F + ml(\sin \theta) \dot{\theta}^2]}{\frac{4}{3} - \frac{ml(\cos \theta)^2}{m_c + m}} \quad (11)$$

식 (11)에서 θ 는 수직으로부터 폴의 변위각을 시계 방향으로 측정한 각이고, *g*는 중력가속도, *m*은 폴의 질량, *m_c*는 수레의 질량, *l*은 폴의 길이, *F*는 수레에 가해지는 힘을 나타낸다. 시뮬레이션을 위한 각 변수들은 *g*=9.8 [*m/sec*²], *m*=0.1[*kg*], *m_c*=1.0 [*kg*], *l*=1[*m*]이다.

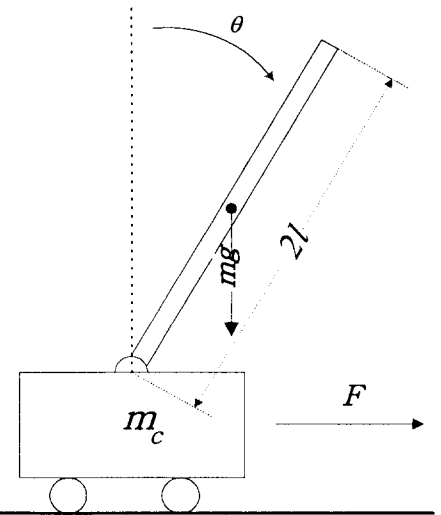


그림 10 독립진자 시스템
Fig. 10 Inverted pendulum system

표 5 GA 퍼지제어기와 수동으로 동정된 퍼지 제어기와의 성능비교
Table 5 Performance comparison between GA fuzzy controller and manually tuned FLC

	Manually tuned FLC	GA tuned FLC
MSE	0.007626	0.003741

시뮬레이션을 위한 초기 파라미터값들은 샘플링 간격 0.01, 집단 100, 세대수 200, 교차율 0.96, 돌연변이율은 0.2로 하였다.

그림 11은 초기각과 각속도가 각각 1.0 [*rad/sec*], 0.0 [*rad/sec*²]로 설정했을 때의 시뮬레이션 결과로서 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 6은 최종적으로 동정된 퍼지 제어기의 전제부와 결론부 매개변수, 표 7은 규칙 베이스를 나타내었다. 표 7에서 어두운 색으로 표시된 부분은 규칙 베이스에서 제외된 규칙으로 제안된 기법에 의해 총 49개의 규칙이 23으로 감소하였음을 알 수 있다. 동정된 환산 계수는 표 8에 나타내었다. 표 8에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방법에 의해 설계된 GA-퍼지 제어기는 규칙수면에서, 그리고 정확도 면에서 우수함을 알 수 있다.

본 논문의 모의 실험에서는 하나의 기준 입력에 대하여 퍼지 제어기를 최적화하였다. 그러나 하나의 스텝 입력에 대해 최적화된 퍼지 제어기가 다른 크기를 갖는 스텝 입력의 추종에도 효과적이라는 사실은 저자들이 [20-24]에 실험적으로 보였다. 그러므로 본 논문에서 제안된 퍼지 제어기의 설계 방법은 기준 입력이 다른 조건하에서도 적절한 성능을 보일 수 있다.

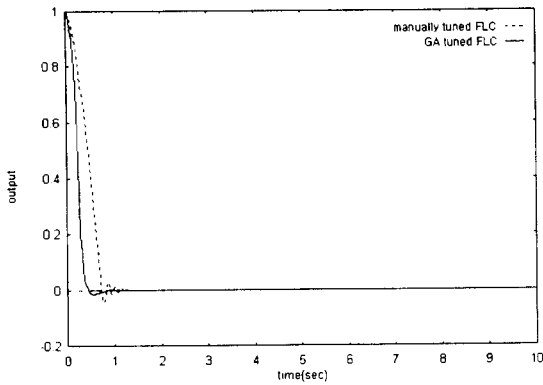


그림 11 도립 진자의 출력 궤적
Fig. 11 Output trajectory of the inverted pendulum

표 6 동정된 전건부 소속 함수의 매개 변수

Table 6 Identified membership parameters in the premise

	$E(k)$		
	α	β	γ
NB	-1.3333	-1	-1.0282
NM	-1.2735	-0.7024	-0.5311
NS	-0.9879	-0.0155	0
ZE	-0.7811	0	0.1581
PS	-0.4675	0.2288	0.6405
PM	0.2069	0.3746	0.9190
PB	0.8445	1	1.3333

	$CE(k)$			$U(k)$
	α	β	γ	ω
NB	-1.3333	-1	-0.2462	-0.9230
NM	-0.6549	-0.5442	-0.1775	-0.6702
NS	-0.3934	-0.1989	0.04372	-0.0491
ZE	-0.1488	0	0.0726	0
PS	-0.2404	0.6456	1.0965	0.5101
PM	0.8354	1.1052	1.1115	0.5394
PB	0.8445	1	1.3333	1

4. 결론

본 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 설계에 대한 체계적이고 간단한 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 유전알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 구성요소인 퍼지 제어 규칙의 동정과 각 규칙을 구성하고 있는 멤버십 함수의 파라미터들과 퍼지 제어기의 환산계수를 포함한 모든 제어기 구성 요소를 동시에 자동으로 동정할 수 있는 방법이다. 이를 위해 본 논문에서는 기존의 유전 알고리즘의 탐색체의 구조를 본 논문에서 설계하려고 하는 퍼지 제어기의 각종 파라미터의 동정에 맞게 새로 구성하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 효율성 및 우수성을 평가하기 위하여 2차 지연 시스템과 비선형 시스템인 도립 진자의 제어에 적용하였다. 제안된 방법은 수동으로 동조된 퍼지 제어기와 비교하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 방법을 사

표 7 동정된 퍼지 규칙베이스

Table 7 Identified fuzzy rule base

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

표 8 동정된 스캘링 팩터

Table 8 Identified scaling factors

GE	GCE	GU
1.21158	11.9755	49.2187

용함으로써 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] H. A. Malki, H. Li and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 48, pp.279-287, 1994.
- [3] D. Misir, H. A. Malki and G. CHen, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional Integral Derivative Controller", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 79, pp.297-314, 1994.
- [4] J. M. Mendel and G. C. Mouzouris, "Designing Fuzzy Logic Systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, Vol. 44, pp. 885-895, 1997.
- [5] K. Passino and S. Yurkovish, Fuzzy Control, Addition-Wesley, Menro Park, 1997.
- [6] M. Sugeno and T. Yasukawa, "A Fuzzy Logic Based Approach to Qualitative Modeling", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 1, pp. 7-31, 1993.
- [7] C. T. Sun, "Rule Base Structure Identification in an Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 64-73, 1994.
- [8] C. S. Ting, T. H. S. Li and F. C. Fung, "An Approach to Systematic Design of Fuzzy Control System", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 77, pp. 151-166, 1996.
- [9] L. X. Wang and J. M. Mendel, "Generating Fuzzy

- Rules by Learning from Examples", IEEE Trans. on System, Men and Cybernetics, Vol. 22, pp. 1414-1427, 1996.
- [10] L. X. Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Controllers with Application to Inverted Pendulum tracking", Vol. 31, pp. 677-691, 1996.
- [11] C. G. Moore and C. J. Harris, "Aspects of Fuzzy Control and Estimation", Advances in Intelligent Control, pp. 201-242, 1994.
- [12] Shin-ichi Horikawa, "A Fuzzy Controller Using A Neural Network And Its Capability To learn Control Rules", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp.103-106, 1990.
- [13] K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 1, pp. 4-27, 1990.
- [14] K. S. Narendra and S. Mukhopadhyay, "Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 8, pp. 475-485, 1997.
- [15] Y. Tamaguchi, T. Takagi, and T. Mita, "Self-organizing Control Using Fuzzy Neural Networks", Advancec in Intelligent Control, pp. 337-361, 1994.
- [16] 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.
- 과 조교수.
- [17] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optmization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [18] Chuck Kar, "Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers", AI EXPERT, pp. 26-35, February, 1991.
- [19] Hung-Ching, "Fuzzy Logic Controller Design Using Genetic Algorithm", IIZUKA '96', pp. 525-528, 1996.
- [20] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Kim and K. B. Woo, " Fuzzy System Modeling by Fuzzy Partition and GA Hybrid Schemes", Fuzzy Sets and Systems, Vol 86. No. 3, pp 279-288, 1997.
- [21] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Kim and K. B. Woo, "Linguistic Model Identification for Fuzzy System", Electronics Letters, Vol. 31, pp. 330-331, 1995.
- [22] Y. H. Joo, H. S. Hwang, K. B. Woo and K. B. Kim, "Fuzzy System Modeling and Its Application to Mobile Robot Control", in Fuzzy Logic and Its Applications, Information Sciences, and Intelligent Systems, Kluwer Academic Publishers, pp. 147-156, 1995.
- [23] 장욱, 손유석, 박진배, 주영훈, "유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 최적화", 전기학회 하계학술대회 논문집 B, pp:1158-1160, 1996.
- [24] 장욱, 박진배, 주영훈, "유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 최적화", 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol. 7, No. 4, pp. 48-57, 1997.

저 자 소 개



노 기 갑(盧 己 甲)
1997년도 군산대 제어계측공학과 졸업.
1997년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



주 영 훈(周 永 焄)
1958년 6월 26일생. 1982년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 연세대 대학원 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1986~1995년 8월 삼성전자(주) 자동화연구소(선임 연구원). 1998년 2월~1999년 1월 휴스턴 대학교 교수, 1995년 9월~현재 군산대 공대 제어계측공학



박 진 배(朴 珍 培)
1954년 8월 7일생. 1977년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 Kansas State University 공대 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업 (공박). 1990~1991년 Kansas State University 공대 전기 및 컴퓨터 공학과 조교수. 현재 연세대 공대 전기공학과 부교수.