
유전자 알고리즘과 퍼지 논리 제어를 이용한 지능 제어 방식

김주용* · 이승형* · 엄기환*

Intelligent Control Method Using Genetic Algorithm and Fuzzy Logic Controller

Joo-Woong Kim* · Seung-Hyung Lee* · Ki-Hwan Eom*

요 약

기존의 제어방식 보다 강인성이 우수한 퍼지 논리 제어방식에서 최적화되지 않은 제어규칙을 이용하여, 오프라인 상에서 소속함수 관계와 스케일링 팩터를 유전자알고리즘으로 최적화한 후, 온라인으로 퍼지제어를 구성하는 제어방식을 제안하였다. 제안한 방식을 단일 링크 매니퓰레이터의 추종제어에 적용하여 기존 퍼지제어 방식과 비교 검토한 결과 퍼지제어규칙의 수도 감소하고 제어성능도 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

In the fuzzy control method behaves more robustness than conventional control method, we propose a intelligent control method that membership functions and scaling factor of the fuzzy logic controller are optimized by genetic algorithm under off-line, and then fuzzy logic controller is constructed by the optimization parameters under on-line.

In order to verify the usefulness of the proposed control method, we are applied to one link manipulator, and confirmed that the proposed control method is reduced the fuzzy rule base and is the better performance than the conventional fuzzy control method.

키워드

유전자 알고리즘, 퍼지 논리 제어기, 추종제어, 지능 제어

1. 서 론

복잡한 현대 정보화 사회에서 인간을 대신하여 편리하게 해줄 수 있는 것 중의 하나가 자동제어시스템이다. 그러나 점점 더 고도로 발전되어 가는 이러한 제어시스템들은 복잡하고 불확실하며 비선형성이 강하여 고전적인 선형화 제어방식으로는 적용의 한계에 부

딛치곤 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 기존의 제어방식으로는 적응제어방식과 H_{∞} 의 강인제어방식 등이 있다. 적응제어방식은 플랜트의 동특성의 변동에 따라 제어를 온라인으로 자동조정하며, 미지 또는 변동 파라미터에도 관계없이 항상 최적의 성능을 유지하는 제어방식으로 모델규범형 적응 제어 방식과, 자기 동조 레귤레이션 방식 등이 있다. H_{∞} 강인제어방

* 동국대학교

접수일자: 2001. 12. 14

식은 외란에서 제어량까지의 전달함수를 평가함수로 하고, Riccati 대수 방정식을 이용하는 제어방식으로 주로 외란에 대한 강인성이 크다[4][6]. 하지만 이러한 제어방식도 제한된 불확실성 내에서만 적용이 가능하며 비선형성이 너무 강하거나 동작점의 범위가 넓은 경우에는 문제점이 있다. 그래서 이런 문제점을 해결하기 위한 일환으로 최근에 각광을 받고 있는 지능 제어방식은 사람의 자연적인 언어 체계를 표현하는 데에 효과적인 퍼지시스템과 생물학적 신경 계통을 모방한 신경회로망 그리고 자연 세계의 진화 현상에 기초한 유전자알고리즘 등을 이용하는 방식이다[1][2][3][4].

1965년 L.A.Zadeh 교수에 의해 제안된 퍼지이론은 1974년 Mamdani가 모형 증기 기관의 제어에 퍼지 논리 시스템을 성공적으로 적용함으로써 제어분야에도 적용 가능함을 제시하였다. 그러나 퍼지제어방식은 전문가로부터 제어지식의 획득, 소속함수관계의 조정과 알맞은 스케일링 팩터 선정 등의 문제점을 가지고 있어 원하는 제어특성을 얻기 위해서는 여러 번의 시행착오를 거쳐야만 한다[5][6][7][8].

John Holland에 의해 1975년에 개발된 유전자알고리즘은 전역적인 최적의 해를 발견할 높은 가능성을 가진다는 장점과 목적 함수값에 대한 수학적 제약이 거의 없기 때문에 여러 분야에 적용할 수 있으며, 최근 들어 특히 신경회로망이나 퍼지제어방식과의 결합으로 그 응용범위는 점점 늘어나고 있다[9][10].

본 논문에서는 퍼지논리제어방식에서 전문가의 지식없이 시행착오법에 의한 최적화 되지 않은 제어규칙을 이용하는 경우에도, 소속함수관계와 스케일링 팩터를 유전자알고리즘으로 최적화하여 우수한 제어 성능을 갖는 지능제어방식을 제안한다. 제안하는 제어방식은 실제 플랜트에 대해 먼저 오프라인으로 퍼지제어기의 소속함수 초기변수값과 스케일링 팩터의 초기값을 유전자알고리즘으로 최적화시킨 후, 온라인으로 퍼지논리제어기를 이용해서 제어를 하는 직접적용제어방식이다. 제안된 제어방식의 유용성을 확인하기 위하여 비선형 제어 대상인 단일 링크 매니플레이터에 적용하여 기존의 퍼지제어방식과 시뮬레이션 및 실험을 통하여 비교·검토 한다.

II. 일반적인 퍼지논리제어방식 및 유전자알고리즘

2-1. 일반적인 퍼지논리제어방식

퍼지제어기는 시스템 제어분야의 현장 경험이 많은 전문가의 지식을 "IF-THEN 형식"의 언어적 형태로 기술한 제어 규칙을 작성하여 시스템의 출력이 원하는 기준입력을 추종하도록 제어입력을 계산한다.

퍼지화를 위한 소속함수는 삼각형, 가우시안, 사다리꼴함수 등이 사용되며, 본 논문에서 사용한 가우시안 형태의 소속함수 모양은 그림 1과 같으며 그에 적용되는 소속함수식은 식 (1)과 같다[5][6].

$$\mu_{A_i}(x_i) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_i}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서, x_i 는 입력 변수의 값이고, c_i 는 가우시안 함수의 중심이고, σ_i 는 표준편차에 해당하며, $\mu_{A_i}(x_i)$ 는 소속함수에 대한 입력변수의 소속정도를 나타낸다.

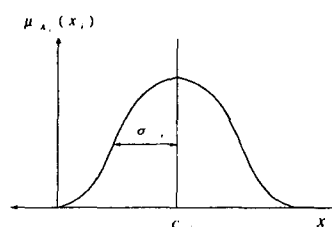


그림 1. 가우시안 형태의 소속 함수
Figure 1. Gaussian-type membership function.

퍼지제어규칙은 일반적으로 오차와 오차의 변화량의 소속함수가 각각 7개일 경우에 49개의 규칙이 표 1과 같이 나타난다.

표에서 사용한 언어적인 변수(linguistic variable)들의 의미는 다음과 같다.

PL : Positive Large NL : Negative Large

표 1. 제어규칙
Table 1. Control rule.

e	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

PM : Positive Medium NM : Negative Medium
 PS : Positive Small NS : Negative Small
 Ze : Zero

제어기의 입력과 표 1과 같은 퍼지규칙을 이용하여 퍼지추론을 하게 되며 퍼지추론에는 Max-Min, Max-Product 등의 방법이 있다[5][8].

퍼지 추론후의 결과는 퍼지값이므로 플랜트의 입력으로 적절한 값으로의 변환을 위한 비퍼지화 단계를 거쳐야 한다. 비퍼지화는 최대평균값, 최대최소평균값, 무게중심법 등이 있으며 식 (2)와 같은 무게중심법을 많이 사용하고 있다[5][8].

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

여기서 n 은 제어규칙의 수이고, w_i 는 퍼지추론의 적합도, z_i 는 i 번째 제어규칙에서 추론된 후의 퍼지집합의 지지값이다.

2-2. 기본적인 유전자알고리즘

유전자알고리즘은 개체표현방법, 유전연산자, 적합함수, 선택 메카니즘 및 알고리즘 제어파라미터등의 5개의 구성요소를 갖는다[9][10].

개체표현방법은 유전연산자를 적용하기 위해서 풀고자 하는 문제의 변수값을 이진 스트링으로 표현하는 것이다. 좀 더 구체적으로 문제의 한 변수에 대한 최소값 min과 최대값 max를 알고 이 변수의 값을 n 개의 비트로 최적화 하고자 할 때 식 (3)과 같은 디코딩 방식에 의해 각 이진 스트링에 대한 실수값을 구할 수 있다[9][10].

$$\text{이진스트링실수값} = \text{ival}_{bin} \cdot \frac{(\max - \min)}{2^n - 1} + \min \quad (3)$$

여기서 ival_{bin} 은 이진 스트링에 대한 십진수 정수의 값이고, n 은 이 변수에 배정된 스트링의 길이이다.

유전자알고리즘에서 사용되는 기본적인 유전연산자는 재생산, 교배, 돌연변이이다.

재생산은 각각의 스트링이 가지는 적합도에 따라 그 스트링을 복제하는 과정이다. 자연계에서 자손은 부모세대로부터 유전자를 이어받으면서도 부모와는 전혀 다른 형질을 가지듯이 유전자알고리즘에서도 이

과정을 모방한 것이 교배 과정이다. 이는 교배율(crossover rate : Pc)을 가지는 확률적 과정임에도 불구하고 재생산과 함께 쓰여 개체간의 정보를 교환하고 스트링의 좋은 부분을 결합하는 효과적인 수단이 된다.

돌연변이 과정은 집단의 개체들이 현재 가지고 있는 정보들을 이용해서 결합하고 탐색하는 과정으로, 이는 아주 낮은 돌연변이율(mutation rate : Pm, 보통 0.05 이하의 값을 사용)로 스트링의 한 비트를 0에서 1로 혹은 1에서 0으로 우연히 바꿈으로서 구현된다.

적합함수는 최적화하고자 하는 함수가 각 개체에 얼마나 적합한가를 평가하는 함수이다. 표준화되기 전의 적합도의 값을 로우 적합도(raw fitness)라고 하면 표준화되어서 실제로 선택의 기준이 되는 함수를 적합함수라고 한다. 표준화하는 한 가지 방법은 목적함수의 값을 식 (4)와 같이 선형적으로 재조정되는 것이다.

$$f' = af + b \quad (4)$$

여기서 f 는 로우 적합도를 나타내고 f' 은 표준화된 적합함수의 값을 나타낸다[9][10]. 상수 a 와 b 는 알고리즘 수행의 처음부터 끝까지 고정된 값을 가질 수도 있고, 매 세대마다 재조정될 수도 있다.

선택메카니즘은 잘 적응한 해들은 살아남고 잘 적응하지 못한 해들은 도태되도록 유도함으로써 자연선택현상을 모델링한다.

III. 제안한 제어방식

일반 퍼지제어방식에서는 소속함수의 변수값과 비퍼지화의 스케일링 팩터를 시행착오에 의하여 정하므로, 이런 값은 최적화 값이 아니다. 그러므로 제안하는 제어방식에서는 이러한 값들을 최적화하여 우수한 제어성능을 얻기 위하여 유전자알고리즘을 이용한다. 그러나 유전자알고리즘은 계산량이 상당히 많기 때문에 간단한 하드웨어에 실시간으로 적용하기에는 무리가 따른다. 그래서 시뮬레이션에서 유전자알고리즘을 이용하여 최적의 소속함수의 변수값과 비퍼지화 스케일링 팩터를 구하여 오프라인으로 하고, 이렇게 구한 값들을 초기값으로 하여 온라인으로 퍼지제어기를 구성하고 실제 하드웨어 상에서 실시간으로 실험을 한다. 그림 2는 제안한 제어방식의 블록선도이다.

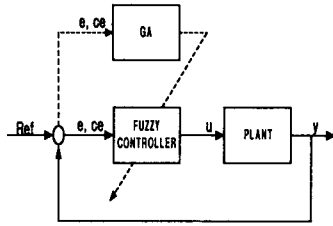


그림 2. 제안한 퍼지제어방식의 블록선도
Figure 2. The block diagram of proposed fuzzy control method.

그림 2에서 점선은 유전자알고리즘의 오프라인, 실선은 온라인 퍼지제어를 나타내며, Ref는 원하는 신호, y는 실제출력, e와 ce는 각각 오차와 오차의 변화율이며, u는 퍼지제어기에서 계산된 플랜트에 가하는 제어 입력이다.

표 2. 7가지 언어변수일 경우의 제어규칙
Table 2. Control rule table for 7 fuzzy labels

e \ ce	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL				NL	NM	NS	ZE
NM				NM	NS	ZE	PS
NS			NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS			ZE	PS	PM		
PM				PM			
PL				PL			

본 논문에서 사용하는 제어규칙은 일반적인 서보시스템의 위치 및 속도 시뮬레이션에 의해 시행착오적으로 구한 것으로 표 2는 규칙수가 25개인 경우, 표 3은 규칙수가 16개인 경우로서, 이를 이용하여 퍼지제어를 한다.

퍼지추론방식은 Mamdani의 Max-Min법을 사용하며, 비퍼지화의 방법은 일반적으로 가장 많이 쓰이는 무게중심법을 이용한다.

퍼지논리제어기의 변수를 최적화하기 위하여 두 가지 방식을 적용한다. 첫 번째 규칙수가 25개일 경우에는 소속함수의 중심값과 스케일링 팩터를, 두 번째 규칙수가 16개일 경우에는 소속함수의 중심값, 표준편차 그리고 스케일링 팩터를 유전자알고리즘을 이용하여 최적화한다.

표 3. 5가지 언어변수일 경우의 제어규칙
Table 3. Control rule table for 5 fuzzy labels.

e \ ce	NL	NS	ZE	PS	PL
PL			PL	PL	PL
PS		PS	PS	PS	PL
ZE	NL	NS	ZE	PS	PL
NS		NS	NS	NS	
NL			NL		

최적화를 시도하고자 사용하는 유전자알고리즘의 적합함수는 식 (5)와 같으며, 값이 작을수록 적합도가 높다.

$$F = \sum_{i=1}^n (y_d(i) - y(i))^2 \quad (5)$$

여기서 y_d 는 원하는 기준값이 되며, y 는 실제출력이다[6][7][8].

IV. 시뮬레이션

제안한 제어방식의 유용성을 입증하기 위하여 식 (6)으로 표현되는 단일 링크 매니퓰레이터에 대하여 시뮬레이션 한다[4].

$$m l^2 \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + m g l \cos(\theta) = \tau \quad (6)$$

여기서 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ 는 각각 단일 링크 매니퓰레이터의 각변위, 각속도, 각가속도를 나타내고, τ 는 매니퓰레이터의 관절에 가해지는 토크이며, m, l, B, g 는 각각 단일 링크 매니퓰레이터의 질량, 길이, 마찰 계수, 중력 가속도를 나타내며, 설정치는 각각 $m = 0.5[\text{kg}], l = 0.18[\text{m}], B = 0.4 [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}], g = 9.8[\text{m/s}^2]$ 이다. 식 (6)의 시스템에서 $(\theta \ \dot{\theta})^T = (x_1 \ x_2)^T$ 로 정의하면 식 (7)의 비선형 상태공간모델로 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{l} \cos(x_1) - \frac{B}{m l^2} x_2 + \frac{1}{m l^2} \tau \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에 대하여 Runge-Kutta fourth order 알고리즘을 이용하고 8.36[ms] 스텝 사이즈 간격으로 하여 비선형시스템의 동정과 제어방식에 대하여 기존의 퍼지제어기를 이용한 직접제어방식과 제안한 방식을 시뮬레이션 하여 제어성능을 비교 검토한다.

4-1. 기존의 퍼지제어방식

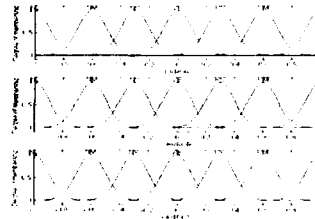
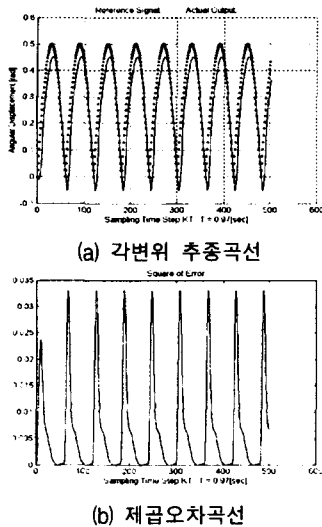
기존의 퍼지제어기를 사용하는 직접 제어방식에 2가지의 규칙수에 대하여 적용한다. 처음에는 퍼지제어기에 대한 입력인 오차와 오차의 변화량에 대한 소속함수의 수를 각각 7개로 하고 출력에 대한 소속함수의 개수도 7개로 하여 시행착오적으로 얻은 25개의 제어 규칙수를 적용한 경우와 그 다음은 소속함수의 개수를 각각 5개로 하여 시행착오적으로 16개의 제어규칙수를 적용한 경우이다. 소속함수의 형태는 가우시안 함수를 사용하였으며, 초기 중심값과 표준편차는 [-1 1] 사이의 간격을 소속함수의 수를 적용시켜 같은 간격으로 잡아주었다. 오차와 오차의 변화량에 대한 스케일링 팩터는 동일하게 1/15로 주었으며, 출력 스케일링 팩터는 1200으로 하였다. 식 (8)은 기준 궤적이며, 식 (9)는 오차 제곱의 합이다.

$$y_d = \frac{1}{2} \text{abs} \left(\sin \left(\frac{\pi}{12} t \right) \right) \quad (8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (e_i)^2 \quad (9)$$

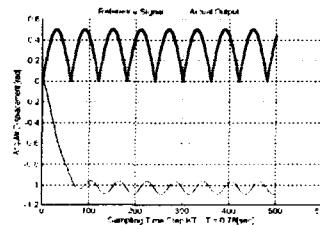
그림 3은 초기 상태의 값을 위치 0, 속도 0으로 한 경우의 시뮬레이션 결과이다.

그림 3의 (a)는 원하는 신호에 대한 추종제어특성이며, (b)는 제곱오차곡선으로 전체오차제곱의 합 SSE = 3.4037이다. (c)는 입력변수오차와 오차의 변화량 및 출력의 소속함수를 나타낸다.

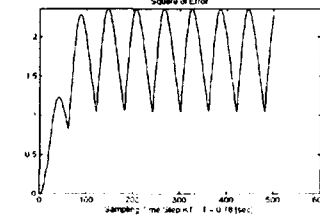


(c) 입력 및 출력의 소속함수
 그림 3. 25개의 규칙을 갖는 기존의 퍼지제어방식의 특성
 Figure 3. Characteristics of conventional fuzzy control method with 25 rules.

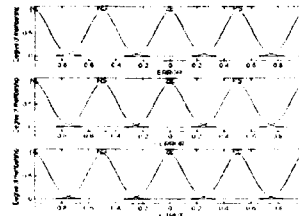
그림 4는 동일한 궤적을 상대로 입력 및 출력의 소속함수의 개수를 5개로 하여 16개의 제어규칙수를 적용한 후의 특성 곡선으로, 목표값을 제대로 추종하지 못하고 있으며, 오차제곱의 합인 SSE가 843.4073으로 매우 크다.



(a) 각변위 추종곡선



(b) 제곱오차곡선



(c) 입력 및 출력의 소속함수

그림 4. 16개의 규칙을 갖는 기존 퍼지제어방식의 특성
 Figure 4. Characteristics of conventional fuzzy control method with 16 rules.

4-2. 제안한 제어방식

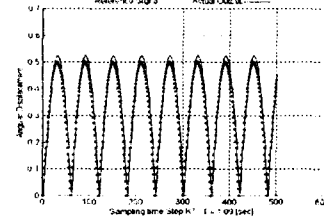
제안하는 퍼지제어방식은 오프라인으로 유전자알고리즘을 이용하여 퍼지소속함수의 중심값과 표준편차를 구한 후에 온라인으로 퍼지제어기를 사용하는 직접 제어방식으로 규칙수는 25개와 16개를 적용하여 최적화한다. 입력변수에 대한 소속함수가 7개일 경우, 유전자알고리즘으로 최적화하는 요소는 기존의 중심값을 기준으로 편차값, 오차와 오차의 변화율 및 출력에 대한 스케일링 팩터가 되며, 소속함수가 5개일 경우, 즉 규칙수를 16개 적용할 경우에는 위의 요소에 추가하여 소속함수의 표준편차도 유전자알고리즘을 이용하여 최적화한다.

유전자알고리즘에 적용하는 제어 파라미터인 교배율(Pc)과 돌연변이율(Pm)은 온-라인 및 오프-라인 성능이 우수한 Dejong의 값을 이용하게 되는데, $P_c = 0.6$, $P_m = 0.001$ 을 사용하게 된다[9]. 개체군의 크기는 소속함수가 7개 일 경우에 24개의 최적변수를 8 비트씩 하여 총 192비트, 소속 함수가 5개일 경우에는 33개의 최적변수가 8 비트씩 하여 264비트 크기의 50개 개체, 종료조건인 세대수는 30 세대까지 하며, 적합도함수는 식 (5)를 사용하며 최소화 될수록 적합도가 높은 것이 된다. 앞에서의 기존 퍼지제어기의 SSE가 3.4037 이므로 종료 적합도 조건을 이보다 낮은 $SSE = 2$ 로 하여 시뮬레이션을 수행한다.

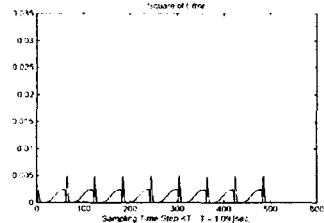
그림 5는 입력 및 출력 변수의 소속함수의 개수가 7개, 규칙수 25개인 경우의 제어특성으로, 유전자알고리즘으로 최적화 한 이후에 기존의 퍼지제어특성보다 추종이나 제곱오차가 향상되었음을 알 수 있다. 그림 5의 (c)는 유전자알고리즘으로 최적화한 이후에 소속함수의 위치를 나타낸다.

규칙수가 25개인 경우에는 중심값과 스케일링 팩터만 최적화 하였기에 기존의 퍼지제어기의 소속함수와 표준편차는 동일하다. 유전자알고리즘으로 구한 각 스케일 팩터는 $GE = 0.0882$, $GC = 0.0875$, $GU = 887.0588$ 로, 여기서 GE는 오차에 대한 스케일 팩터, GC는 오차의 변화량에 대한 스케일링 팩터, GU는 제어입력을 계산하기 위한 스케일링 팩터이다. 이 경우에 제곱오차의 합은 $SSE = 0.6014$ 이다. 그림 6은 입력 및 출력 변수의 소속함수의 개수가 5개, 제어규칙의 개수 16개인 경우의 제어특성으로 훨씬 더 양호함을 알 수 있다. 즉, 제곱오차의 합 $SSE = 0.3196$ 으로서

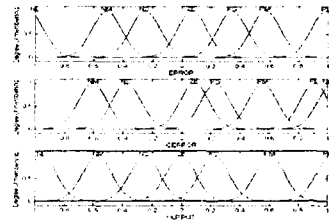
규칙수 25개를 사용한 경우보다 특성이 더 좋아진 것을 알 수 있다.



(a) 각변위 추종곡선

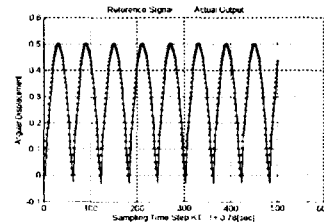


(b) 제곱오차곡선

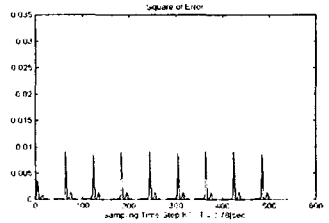


(c) 입력 및 출력의 소속함수

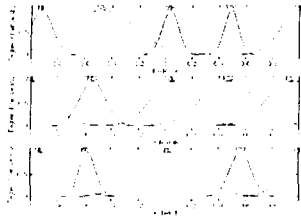
그림 5. 25개의 규칙을 갖는 제안한 퍼지제어방식의 특성
Figure 5. Characteristics of proposed fuzzy control method with 25 rules.



(a) 각변위 추종곡선



(b) 제곱오차곡선



(c) 입력 및 출력의 소속함수

그림 6. 16개의 규칙을 갖는 제안한 퍼지제어방식의 특성
Figure 6. Characteristics of proposed fuzzy control method with 16 rules.

이 경우에는 소속함수의 중심값뿐만 아니라 표준편차도 유전자알고리즘을 이용하여 최적화 하였다. 여기서 스케일링 팩터는 $GE = 0.0835$, $GC = 0.0867$, $GU = 1792.9$ 이다.

이상과 같이 기존의 퍼지제어방식과 본 논문에서 제안한 방식을 비교 검토한 결과를 정리하면 표 4와 같다.

표 4에서 알 수 있듯이 제안한 제어방식은 시행착오적인 제어규칙에서 소속함수와 스케일링 팩터를 유전자알고리즘으로 최적화하면 제어규칙의 감소(제어규칙 개수 16개)에도 제어성능이 우수함을 알 수 있다.

표 4. 제어방식의 비교
Table 4. Comparison of control method.

종류	제어방식	제안한 제어방식		기존의 퍼지제어방식	
		25	16	25	16
제어규칙 개수		25	16	25	16
스케일링 팩터	GE	0.0882	0.0835	1/15	1/15
	GC	0.0875	0.0867	1/15	1/15
	GU	887.0588	1792.900	1200	1200
유전자 알고리즘 적용 파라미터	표준편차	비적용	15	비적용	비적용
	중심값	21	15		
	스케일링 팩터	3	3		
	총 개수	24 (192비트)	33 (264비트)		
제곱오차의 합		0.6014	0.3196	3.4037	843.407

V. 실험 및 검토

단일 링크 매니퓰레이터에 대하여 제작한 실험장치 블록선도는 그림 7과 같으며, 이에 관련한 사양은 표 5와 같다.

그림 7에서 인터페이스 카드는 1개의 8255를 사용하여 8비트 병렬 입출력 포트가 최대 3개, D/A 변환기와 전력 증폭기 회로는 포토커플러로 연결되어 있다. 매니퓰레이터의 각변위를 측정하기 위한 센서로는 1회전당 1000[pulse]의 출력을 갖는 로타리 엔코더를 사용하였고, 이 엔코더로 부터 발생하는 펄스의 방향을 판별하기 위해 D 플립플롭 2개, AND 게이트 2개를 사용하여 방향을 판별하는 UP/DOWN 펄스를 발생시켰다.

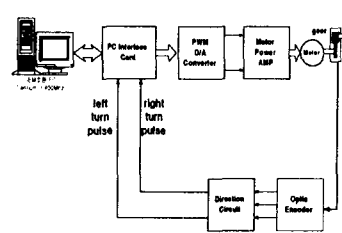


그림 7. 실험장치 블록선도
Figure 7. Block diagram of the experiment set.

표 5. 매니퓰레이터의 사양
Table 5. Specification of the manipulator.

Actuator inertia(Ja)	28×10^{-6}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Back-emf constant of motor(Kb)	67×10^{-3}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Torque constant of motor(KI)	68×10^{-3}	$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$
Motor static friction torque(Bm)	10×10^{-3}	$\text{N} \cdot \text{m}$
Motor armature resistance(Ra)	5.5	Ω
Motor armature inductance(La)	7.2×10^{-3}	H
Servo Amp.(Current limit)	2	A
Gear ratio(N)	1/30	
Link length(l)	0.18	m
link mass(m)	0.5	kg
Gravity constant(g)	9.8	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

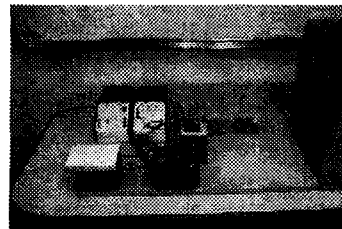
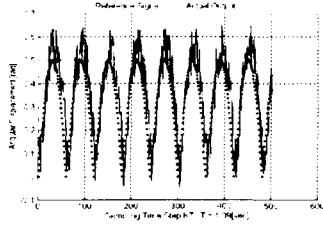


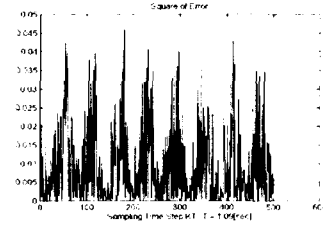
그림 8. 실험 장치 사진
Figure 8. Photograph of experiment set.

실험장치에 대한 사진은 그림 8과 같다. 구성된 실험장치를 사용하여 표 5의 사양을 갖는 단일 링크 매

니플레이터를 제어대상으로 기존의 퍼지논리제어방식과 제안한 제어방식의 유용성을 비교 검토하기 위해서 추종제어실험을 하였다.

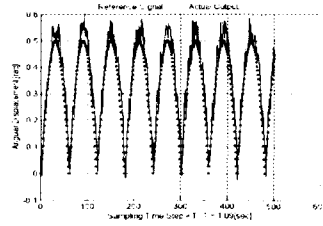


(a) 각변위 추종곡선

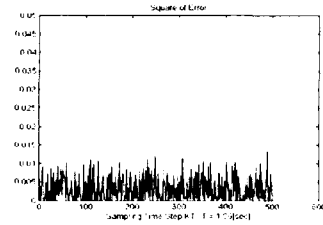


(b) 오차제곱곡선

그림 9. 25개의 규칙을 갖는 기존의 퍼지제어방식의 특성
Figure 9. Characteristics of conventional fuzzy control method with 25 rules.



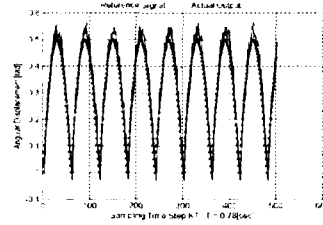
(a) 각변위 추종곡선



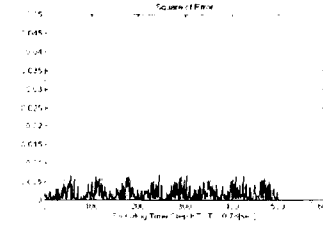
(b) 오차제곱곡선

그림 10. 25개의 규칙을 갖는 제안한 퍼지제어방식의 특성
Figure 10. Characteristics of proposed fuzzy control method with 25 rules.

그림 9는 기존의 제어방식에 대한 특성곡선이다. 제안한 방식에 대한 특성곡선은 그림 10, 그림 11과 같다. 시뮬레이션에서 비교 대상이었던 16개의 규칙을 가진 기존 퍼지제어방식은 제어특성이 고려할 만한 것이 못되기에 실험에서는 제외하였다.



(a) 각변위 추종곡선



(b) 오차제곱곡선

그림 11. 16개의 규칙을 갖는 제안한 퍼지제어방식의 특성
Figure 11. Characteristics of proposed fuzzy control method with 16 rules.

표 6. 실험상의 제어방식의 비교

Table 6. Comparison of control method in experiment.

종류	제어방식		제어방식	
	제안한 제어방식	기존 제어방식	제안한 제어방식	기존 제어방식
규칙 개수	25	16	25	16
SSE	1.5333	0.8673	4.5789	미적용

제곱 오차의 합에 대한 실험결과를 정리하면 표 6과 같다.

실험결과 제안된 제어방식이 시뮬레이션에서 확인했던 것처럼 기존의 방식보다 제어특성이 우수함을 확인할 수 있었다. 기존 궤적에 대하여 출력이 진동을 하는 현상은 사용한 실험 장치의 구성중 D/A 변환기가 8비트를 사용하였기에 정밀성의 문제로 인하여 발생한 것으로 생각된다.

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 기존의 제어방식 보다 강인성이 우수한 퍼지논리제어방식에서 전문가의 지식없이 시행착오법에 의한 최적화되지 않은 제어규칙을 이용하여, 오프라인 상에서 소속함수관계와 스케일링 팩터를 유전자알고리즘으로 최적화한 후, 온라인으로 퍼지제어기를 구성하는 지능제어방식을 제안하였다. 제안한 방식은 오프라인 상에서 유전자알고리즘을 이용하여 퍼지소속함수의 중심값과 표준편차 그리고 오차와 오차의 변화량에 대한 스케일링 팩터를 최적화한 값으로 구하고, 이 값들을 퍼지제어기의 초기값으로 하여 온라인으로 제어하는 방식이다.

유전자알고리즘으로 최적화된 파라미터를 가진 퍼지제어기를 단일 링크 매니플레이터의 추종제어에 대한 시뮬레이션 및 실험을 하여 기존 퍼지제어방식과 비교 검토한 결과, 다음과 같은 유용성을 확인할 수가 있었다.

1. 제안한 제어방식이 기존의 퍼지제어방식보다 추종특성이나 제곱오차합의 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.
2. 최적화되지 않은 제어규칙에서도 유전자알고리즘으로 최적화하여 우수한 제어성능을 얻었다.
3. 퍼지소속함수의 중심값, 표준편차 및 스케일링 팩터의 최적화로 퍼지제어규칙의 개수를 간소화할 수 있었다.

이상과 같이 퍼지제어방식의 큰 문제점인 전문가의 지식을 이용한 퍼지제어규칙과 소속함수의 결정에 있어서 이제는 전문가의 지식없이도 시행착오적으로 구성하여 소속함수 관계와 스케일링 팩터를 최적화하면 동일하거나 그 이상의 성능을 얻을 수 있다. 앞으로는 제안한 방식을 제어분야뿐만 아니라 패턴인식, 음성합성 등 다른 분야에도 적용할 계획이다.

참고 문헌

- [1] A.Bryson and Y.Ho, "Applied Optimal Control Optimization, Estimation, and Control", John Wiley & Sons. Inc., 1975.
- [2] K.Astrom and B.Wittenmark, "Adaptive Control",

Addison-Wesley Publishing, 1989.

- [3] I.D.Landau "System Identification and Control Design", Prentice Hall. Inc., 1990.
- [4] A. Isidori, "Nonlinear Control Systems", Springer-Verlay, 1989.
- [5] D. Driankov, et al., "An Introduction to Fuzzy Control", Springer, 1996.
- [6] Li-Xin Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control", Prentice-Hall. Inc., 1994.
- [7] H.Ying, "Practical Design of Nonlinear Fuzzy Controllers with Stability Analysis for Regulating Processes with Unknown Mathematical Models", Automatica, Vol.30, No.7, pp. 1185-1195, 1994.
- [8] J.Wesley, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", John Wiley & Sons, 1997.
- [9] G.Winter, et al., "Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science", John Wiley & Sons., 1995.
- [10] M.Gen, R.Cheng, "Genetic Algorithms & Engineering Design", John Wiley & Sons. Inc., 1997.

저 자 소 개



엄기환(Ki-hwan Eom)

1972년 2월 동국대학교 전자공학 (공학사)

1975년 8월 인하대학교 제어계측 (공학석사)

1986년 2월 동국대학교 제어계측 (공학박사)

1978.3~1994.2 유한 대학 전기과 교수

1989.6~1990.6 일본동방대학 정보공학과 연구교수

1994.3~현재 동국대학교 전자공학과 정교수

1999.3~현재 중소기업청 전문위원

1998.3~현재 대한주택공사 심의위원



김주웅(Joo-Woong Kim)

1996년 2월 동국대학교 전자공학과
(공학사)

1998년 2월 동국대학교 전자공학과
(공학석사)

2000년 2월 동국대학교 전자공학과
박사수료

1997년 ~ 현재 뉴파워전자(주) 근무

※관심분야 : 퍼지·신경회로망, 전력전자, SMPS

이승형(Seong-Hyung Lee)

1997년 2월 동국대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 8월 동국대학교 전자공학과(공학석사)

1999년 8월 ~ 현재 인터엠 근무

※관심분야 : 퍼지제어, 음향설비