

퍼지이론과 유전알고리즘의 합성에 의한 Flexible Manipulator 제어기 설계

Design of a Controller for a Flexible Manipulator Using Fuzzy Theory and Genetic Algorithm

이기성 · 조현철*

Kee-seong Lee and Hyun-Chul Cho*

홍익대학교 전자전기공학부

*경북전문대학 디지털전자정보과

요 약

본 논문에서는 Flexible Manipulator의 제어를 위해 퍼지제어의 제약인 멤버쉽 함수, 퍼지규칙을 유전알고리즘으로 조정, 최적화 하는 새로운 제어기를 설계하였다. 사용된 유전알고리즘은 Steady State Genetic 알고리즘과 Adaptive 유전 알고리즘의 합성이다. 제안한 제어기는 Flexible Manipulator의 끝점 무게 0.8kg, 최대속도 1m/s의 경우, 퍼지제어에 비해 오차가 90.8% 감소하고 신경회로망을 이용한 퍼지제어에 비하여는 31.8% 감소하였으며 진화전략과 퍼지제어합성에 의한 제어기 보다는 오차가 31.3% 감소하는 등 제어성능과 그 유용성이 우수함을 확인하였다.

Abstract

A position control algorithm for a flexible manipulator is studied. The proposed algorithm is based on a fuzzy theory with a Steady State Genetic Algorithm(SSGA) and an Adaptive Genetic Algorithms(AGA). The proposed controller for a flexible manipulator have decreased 90.8%, 31.8%, 31.3% in error when compared with a conventional fuzzy controller, fuzzy controller using neural network, fuzzy controller using evolution strategies, respectively when the weight and the velocity of end-point are 0.8kg and 1m/s, respectively.

Key words : Flexible Manipulator, ACFLC, SSGA-AGA Denetic Algorithm, ES-Fuzzy

1. 서 론

현대의 산업현장에서는 생산성 향상 및 인간의 안전을 위해 공장자동화에 대한 연구·개발이 활발히 추진되면서 무인운반차(Automatic Guided Vehicle: AGV), 자율주행로봇 등의 중요성이 크게 증대되고 있다. 현재 AGV나 자율주행로봇은 단순한 운반수단 또는 안내로봇으로만 사용되고 있으나, 작업환경이 복잡하고 극한의 경우에는 인간의 일을 대신하기 위해 자율주행로봇에 Manipulator의 장착이 불가피하다. 기존의 Manipulator는 자체의 크기와 무게로 인해 넓은 공간장치 및 큰 구동장치를 요구하며 운반효율도 낮기 때문에 자율주행로봇에 부착하는 것은 효율적이지 못하다. 이러한 점을 개선하기 위해 Manipulator 자체의 무게를 가볍게 함으로써 유연성 및 에너지의 효율성을 향상시키는 Flexible Manipulator가 연구되고 있으나, 이는 운동방정식이 복잡해서 제어하기가 까다롭다는 단점이 있다.

Flexible Manipulator는 비선형적인 특성을 가지고 있으므로 일정 이득의 PID 제어기로는 제어가 쉽지 않다. 또한 이득조정의 적응제어기는 시스템이 교차의 차수를

가지며, 매개변수가 증가하면 계산이 복잡하고 많은 계산시간이 요구된다. 그리고 신경회로망을 이용하여 제어를 할 경우에는 학습시간의 길다는 점과 국부수렴의 단점을 가진다[1, 2].

퍼지제어기의 경우에는 운동방정식을 정확히 모른다고 하더라도 작업을 능동적으로 수행할 수 있고, 환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다[3, 4]. 그러나 이는 퍼지추론시 멤버쉽 함수의 형태, 퍼지규칙에 의해 제약을 받으며 인간의 지식 등에 의존해서 결정, 동조해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 Flexible Manipulator의 제어를 위해 퍼지제어의 제약인 멤버쉽 함수, 퍼지규칙을 유전알고리즘으로 조정·최적화하는 제어기(ACFLC: Automatic Constructed Fuzzy Logic Control)를 설계하고, 이를 기존의 제어방식과 비교함으로써 Flexible Manipulator 제어기로서의 유용성을 검토한다. 사용된 유전알고리즘은 최적해의 검출속도가 빠른 SSGA(Steady State Genetic Algorithm)와 국부최소값에 잘 빠지지 않고 최적해를 찾는 적응유전알고리즘(Adaptive Genetic Algorithm: AGA)[5]을 합성하였다.

2. Flexible Manipulator의 운동모델

Flexible Manipulator의 위치를 나타내기 위해 지역좌

접수일자 : 2001년 1월 15일

완료일자 : 2001년 12월 12일

표계($x-y$)와 전역좌표계($X-Y$)를 그림 1과 같이 정의한다. 또한 Flexible Manipulator의 운동 방정식은 Euler-Bernoulli 방정식으로 식 (1)과 같이 4차 편미분방정식으로 표현된다. 여기서 $y(x, t)$ 는 시간 t , 거리 x (지역좌표계)일 때 유연한 매니플레이터와 유연하지 않은 매니플레이터의 변위이고, θ 는 유연하지 않은 매니플레이터의 초기출발점과의 각도를 나타낸다. E 는 Modulus of Density, I 는 Moment of Inertia, ρ 는 Density of Material이다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial t^4} + \rho \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

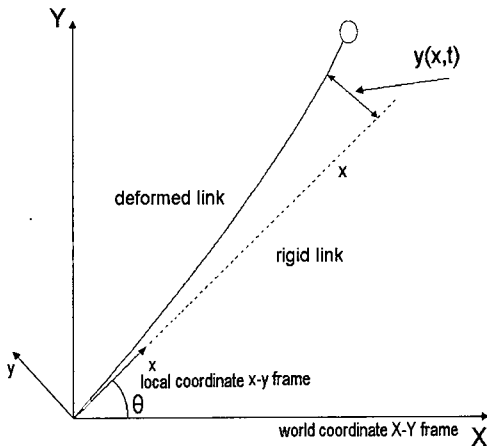


그림 1. Flexible Manipulator

$y(x, t)$ 는 시간 t 와 변위 x 에 의존하는 값으로서 변수 분리법에 의해 변위에 의존하는 $\Phi_i(x)$ 와 시간에 의존하는 $\zeta_i(t)$ 로 나타내서 해를 구할 수 있다. 본 논문은 4개의 기저 함수를 이용해 Flexible Manipulator의 횡단변위를 표현하고, 좌표중심에서 횡단변위는 무시할 정도로 영향이 미약하므로 생략한다.

따라서 지역좌표계의 횡단변위는 시간에 의존적인 일 반화된 좌표계에 허용함수를 곱한 항들의 선형조합으로 가정하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[6].

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^4 \Phi_i(x) \zeta_i(t) \quad (2)$$

식 (2)의 $\Phi_i(x)$ ($i = 1, 2, 3, 4$)는 식 (3)과 같은 경계조 건을 이용하면 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (3)$$

$$\Phi_1(x) = 1 - \frac{3}{L^2} x^2 - \frac{2}{L^3} x^3 \quad \Phi_2(x) = x - \frac{2}{L} x^2 + \frac{1}{L^2} x^3$$

$$\Phi_3(x) = \frac{3}{L^2} x^2 - \frac{2}{L^3} x^3 \quad \Phi_4(x) = -\frac{1}{L} x^2 + \frac{1}{L^2} x^3 \quad (4)$$

또한 전역 좌표계에서의 Flexible Manipulator의 위치 는 그림 1에서 보는 바와 같이 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_x &= x \cos \theta - y(x, t) \sin \theta \\ P_y &= y \sin \theta + y(x, t) \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

Flexible Manipulator의 동역학 방정식은 위치에너지와 운동에너지에 의한 Lagrange 방정식에 의해 식 (6)과 같이 표현되고, 여기서 T 는 위치에너지-운동에너지, q_i 는 i 번째 독립 변수, τ_i 는 외부 Torque를 나타낸다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \tau_i \quad (6)$$

본 논문에서는 Flexible Manipulator의 운동을 평면으로 제한하고, 끝점에 실리는 무게를 고려하므로 Flexible Manipulator의 동역학 방정식은 식 (6)에 의해 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} \rho L^3 + \zeta' M \zeta & H' \\ H & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - 2 \dot{\theta} \zeta' M \zeta \\ \dot{\theta}^2 M \zeta - K \zeta \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 M, H, K 및 ξ 는 다음과 같다.

$$M = \rho \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13L}{35} & -\frac{11L^2}{210} \\ 0 & -\frac{11L^2}{210} & \frac{L^3}{105} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{7L^2}{20} \\ -\frac{L^3}{20} \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}, \zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{bmatrix}$$

3. Flexible Manipulator의 제어기 설계

3.1 Flexible Manipulator 제어기 설계

일반적으로 퍼지제어는 퍼지추론시 멤버쉽함수의 형태와 퍼지규칙에 제약을 받으므로 이를 보완해야 한다. 본 논문에서는 Flexible Manipulator의 제어기(ACFLC) 설계를 위해 퍼지제어의 제약인 멤버쉽 함수, 퍼지규칙을 유전알고리즘으로 조정·최적화한다. 여기서 사용된 유전알고리즘은 최적해의 검출속도가 빠른 SSGA와 국부최소값에 잘 빠지지 않고 최적해를 찾는 적응유전알고리즘을 합성한 유전알고리즘이다.

본 논문의 제어기 구조는 그림 2와 같으며, 제어기 입력으로는 에러(e)와 에러변화량(ce), 출력은 진동을 최소화하며 기준 궤적을 추적하게 하는 토크 값이다. 또한 이 토크 값은 Flexible Manipulator의 운동 방정식에 인가되며, 끝점 위치가 Feedback되어 제어를 수행한다.

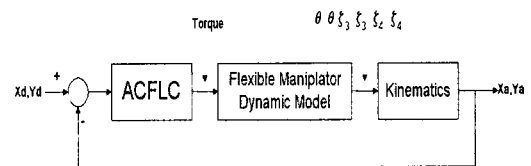


그림 2. 퍼지제어기의 구조

3.2 퍼지제어와 유전알고리즘의 합성

3.2.1 Steady State Genetic Algorithm(SSGA)

SSGA의 장점은 좋은 부모개체가 자손을 생성한 후 좋은 개체라면 계속해서 살아남으므로 개체 내에 좋은 개체만이 살아남는다. 그러므로 이는 SGA(Simple Genetic Algorithm)에 비해 최적해를 찾아가는 속도가 빠르며, Local minimum에 빠지지 않고 전역 최소점을 찾아가는데 그 알고리즘은 다음과 같다[7].

- step 1. 초기 개체군의 생성한다.
- step 2. 적합도가 가장 큰 2개의 부모개체를 선택한다.
- step 3. Uniform crossover를 수행하여 2개의 자식개체를 생성한다.
- step 4. 생성된 자식개체에 mutation을 수행한다.
- step 5. 개체군내에서 가장 낮은 적합도를 가지는 두 개의 개체를 개체군에서 삭제한다.
- step 6. 생성된 새로운 개체를 개체군에 추가한다.
- step 7. 그리고 step 2-6의 과정을 반복한다.

3.2.2 SSGA와 적응유전알고리즘의 결합

적응유전알고리즘(AGA)은 적합도에 따라서 교배확률(Pc)과 돌연변이확률(Pm)을 적응적으로 변화시키는 알고리즘이다. 즉, 높은 적합도를 가진 해에 대해서 Pm과 Pc는 낮은 값을 가지고, 평균 적합도가 최대 적합도와 유사해지면 Pm과 Pc는 높은 값을 가지도록 식 (8)과 (9)와 같이 정한다.

$$p_c = k_1(f_{max} - f') / (f_{max} - \bar{f}), \quad f' \geq \bar{f} \quad (8)$$

$$p_c = k_3, \quad f' < \bar{f}$$

$$p_m = k_2(f_{max} - f) / (f_{max} - \bar{f}), \quad f \geq \bar{f} \quad (9)$$

$$p_m = k_4, \quad f < \bar{f}$$

SSGA와 AGA의 결합은 SSGA에 적응유전알고리즘의 식 (8), (9)를 결합한다. 즉 SSGA 알고리즘에서 적합도에 따라 SSGA의 Crossover 확률과 돌연변이 확률을 변화시킨다.

AGA는 결합과정에서 Crossover연산자, Uniform crossover와 One-point crossover 중 실험에서 Uniform crossover가 더 나은 성능을 나타내었다. 그리고 일반 SGA에 비해 탐색속도 측면에서는 유사하지만, 국부 최소 값에 빠지지 않고 최적 값을 찾는 성능이 우수하였다. Crossover확률과 돌연변이 확률을 적합도에 따라 적절히 변경시켜 해집단의 분포가 다양해짐으로써 최적해 탐색능력이 향상되어 국부 최소 값에 수렴하는 경우가 줄어들었다

3.2.3 SSGA-AGA합성에 의한 멤버쉽함수와 퍼지들의 동조

Flexible Manipulator는 비선형특성을 가지고 있으므로 이득조정 적응제어기를 이용할 경우에는 시스템이 고차의 차수를 가지며, 매개변수가 증가하면 계산이 복잡해지고 계산시간이 많이 요구된다. 또한 퍼지제어기를 이용할 경우에는 운동방정식을 정확히 모른다고 하더라도 작업을 능동적으로 수행할 수 있고, 환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이는 퍼지추론시 멤버쉽 함수의 형태, 퍼지규칙에 의해 제약을 받으며

인간의 지식 등에 의존해서 결정, 동조해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 Flexible Manipulator의 제어를 위해 퍼지제어의 제약인 멤버쉽 함수, 퍼지규칙을 자동으로 조정하고 최적화시키기 위해 SSGA-AGA 합성 유전알고리즘을 사용하였다.

일반적인 퍼지모델 규칙은 식 (10)과 같으며, 본 논문의 유전알고리즘에 의한 멤버쉽 함수와 퍼지규칙의 동조를 위한 개체 표현은 그림 3과 같다.

규칙: if x is A_n and y is B_n than z is C_n (10)

L1	C1	R1	...	L2	C2	R2	...	L3	C3	R3	...	r1	...
----	----	----	-----	----	----	----	-----	----	----	----	-----	----	-----

그림 3. 개체의 표현

그림 3에서 L1은 x의 멤버쉽함수의 왼쪽 넓이, C1은 x의 멤버쉽함수의 중심 위치, R1은 x의 멤버쉽함수의 오른쪽 넓이, L2는 y의 멤버쉽함수의 왼쪽 넓이, C2는 y의 멤버쉽함수의 중심 위치, R2는 y의 멤버쉽함수의 오른쪽 넓이, L3은 z의 멤버쉽함수의 왼쪽 넓이, C3은 z의 멤버쉽함수의 중심 위치, R3은 z의 멤버쉽함수의 오른쪽 넓이, r1은 규칙1의 후건부를 뜻한다. 만약 입력 변수가 n개이고 퍼지 라벨의 개수가 m개일 때, 문자열길이는 총 $9n + n^m$ 이다. 또한 여기서 사용한 적합도 함수는 식 (11)과 같다. 여기서, N은 샘플링한 data의 개수, error는 기준체적-실제 체적을 나타낸다.

$$\text{적합도함수} = 1 / \left(1 + \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |\text{error}_i| \right) \quad (11)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션 방법

본 논문에서 제안한 ACFLC의 유용성을 증명하기 위해 Flexible Manipulator를 이용하여 시뮬레이션하였다. 그리고 기존의 퍼지제어 방식, 신경회로망을 이용한 퍼지제어 방식 및 ES(Evolution Strategies)-퍼지제어합성 방식과 그 성능을 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 Flexible manipulator의 운동방정식은 식 (7)을 이용하였고, 경로는 그림 4와 같이 반지름이 2m인 원모양의 경로이다. 또한 Manipulator 끝점의 속도는 1m/s에서 3m/s까지, 끝점 무게는 0.3kg에서 0.8kg까지 변화시켰다. 이 때 끝점의 속도가 1m/s인 경우에는 원 궤적을 1바퀴 회전, 3m/s인 경우에는 2바퀴 회전시켰다. 여기서 Flexible Manipulator의 파라미터로는 E는 7.17e-10 N/m², I는 3.758e-10m⁴, ρ는 7.706e-2 Kg/m, 길이는 2m, 재질은 알루미늄, Sampling Time은 12.4msec 이다.

성능비교실험을 위해 사용된 신경회로망을 이용한 퍼지제어 방식에서는 Node가 10개인 히든층을 갖는 Back Propagation Neural Network(BPNN)를 이용하였고, BPNN의 입력으로는 에러와 에러미분값, 출력으로는 Torque이다. 또한 ES-퍼지제어합성 방식은 퍼지의 멤버쉽함수의 중심값을 개체(individual)로 구성하여 ES에 의해 조정한다.

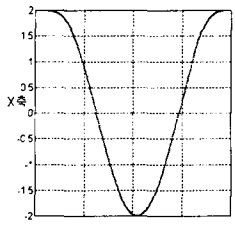
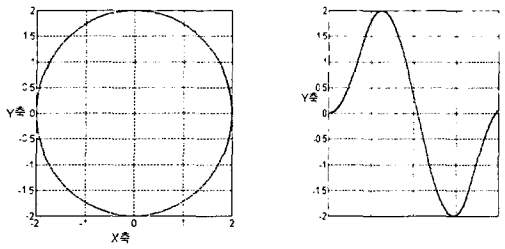


그림 4. 시뮬레이션에 사용된 기준 궤적

4.2 시뮬레이션 결과

Flexible Manipulator의 위치제어를 위해 제안한 ACFLC 성능을 퍼지제어기와 신경회로망을 이용한 자동구축 퍼지제어기의 성능과 비교하였다. 이를 위해 본 논문에서는 x, y축의 위치 값과 위치에러를 나타내었다. 표 1, 2는 각 제어방식의 평균오차를 나타낸다. 표에서 보듯이 본 논문에서 제안한 제어기는 퍼지제어에 비해 오차가 91%감소하였는데, 여기서 고전적인 퍼지제어의 경우에는 퍼지룰을 추출하기가 쉽지 않음을 알 수 있다. 신경회로망을 이용한 퍼지제어에 비하여는 오차가 31.8%(표 1의 경우), 69%(표 2의 경우) 감소하였다. 또한 신경회로망을 이용한 퍼지제어에서는 끝점 부하가 무거운 경우가 가벼운 경우보다 기준궤적을 잘 추종함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방식은 끝점 부하 0.8kg, 0.3kg에서 타 방식에 비해 적은 오차를 보이고 있는데, 이는 입출력데이터로부터 적절한 퍼지함수를 찾았고 그 결과로 인해 기준 궤적을 잘 추종함을 보여주고 있다.

표 1. 끝점의 무게 0.8kg, 끝점의 최대속도 1m/s 인 경우의 평균오차

제어 방식	평균 오차(m)
퍼지제어	2.272722
신경회로망을 이용한 퍼지제어	0.304005
제안한 방식	0.207298

표 2. 끝점의 무게 0.3kg, 끝점의 최대속도 3m/s 인 경우의 평균오차

제어 방식	평균 오차(m)
퍼지제어	2.304490
신경회로망을 이용한 퍼지제어	0.691110
제안한 방식	0.211673

표 3. 끝점의 무게 0.8kg, 끝점의 최대속도 1m/s 인 경우의 평균오차

제어 방식	평균 오차(m)
ES와 퍼지제어 합성	0.301862
제안한 방식	0.207298

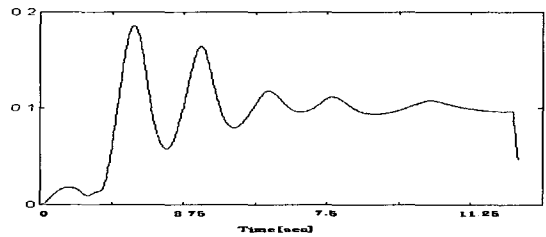
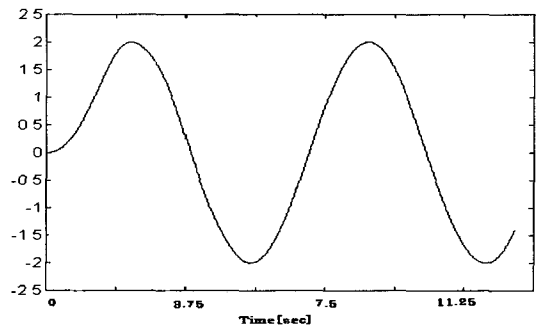
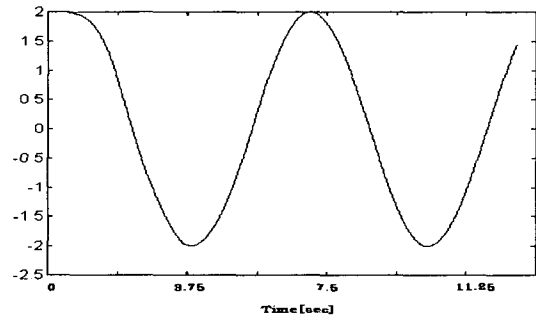


그림 5. 본 논문에서 제안한 제어방식

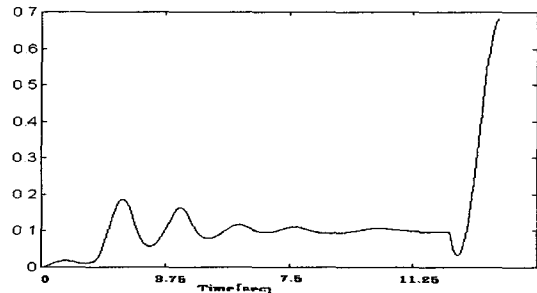
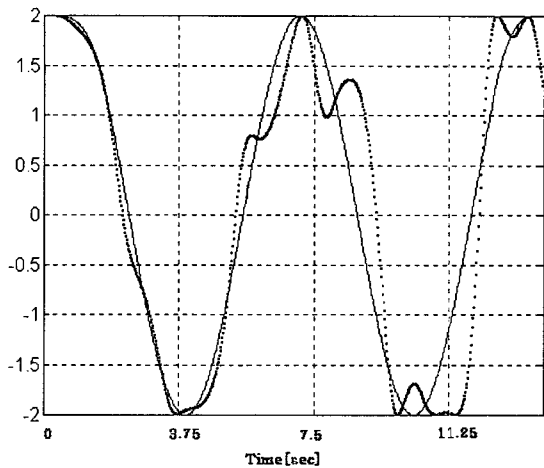
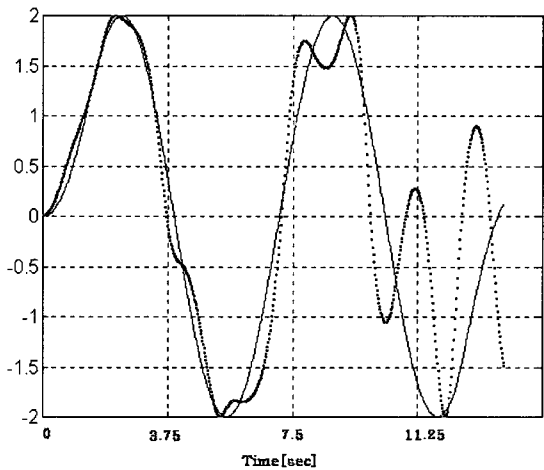


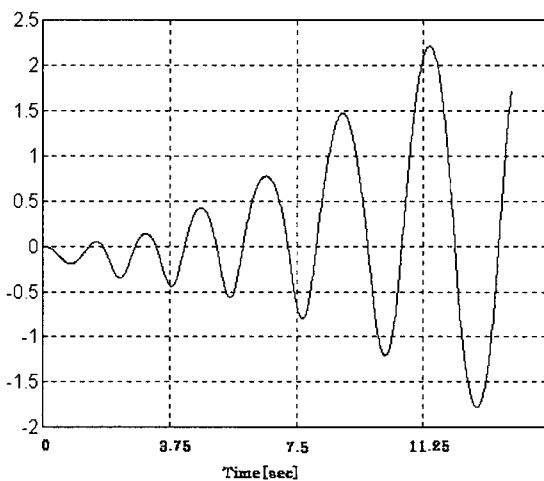
그림 6. 퍼지제어방식에 의한 추종에러



(a) x축 추종결과



(b) y축 추종결과



(c) 추종에러

그림 7. 신경회로망을 이용한 퍼지제어방식

또한 ES와 퍼지제어의 합성방법으로 Flexible Mani-

pulator를 표 1의 궤적을 사용하여 시뮬레이션한 결과와의 비교는 표 3과 같다. 표 3에서 보듯이 본 논문에서 제안한 제어기는 ES와 퍼지제어합성에 의한 제어기보다 오차가 31.3% 감소하였다.

그림 5-7은 끝점의 무게 0.3kg, 끝점의 최대속도 3m/s인 경우 각 제어방식의 추종결과를 나타낸다. 그림 5는 본 논문에서 제안한 방식으로 (a)는 x축 추종, (b)는 y축 추종, (c)는 추종에러를 나타내고, 그림 6은 퍼지제어방식에 의한 추종에러를 나타낸다. 또한 그림 7은 신경회로망을 이용한 퍼지제어방식으로 (a)는 x축 추종, (b)는 y축 추종, (c)는 추종에러를 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 Flexible manipulator의 위치제어를 위해 퍼지제어의 제약인 멤버쉽함수, 퍼지규칙을 유전알고리즘으로 조정, 최적화하는 제어기(ACFLC)를 제안하고 그 성능을 시뮬레이션하였다. 고전적인 퍼지제어인 경우에는 본 논문에서 제안한 방식에 비해 오차가 상당히 컸으며, 또한 우수한 퍼지룰을 추출하기가 쉽지 않고 좋은 결과를 얻기 위해서는 많은 실험이 요구되었다. 신경회로망에 의한 퍼지제어의 경우에는 끝점의 부하에 따라서 기준궤적을 추종하는 정도가 달랐다. 즉 끝점의 부하가 무거울수록 기준궤적을 어느 정도 추종하지만 부하가 가벼울 경우에는 기준궤적을 잘 추종하지 못함을 알 수 있었다. 그러나 본 논문에서 제안한 ACFLC의 경우에는 입출력데이터로부터 적절한 퍼지함수를 찾았고, 그 결과 기준궤적을 우수하게 추종함을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 ACFLC는 Flexible Manipulator의 끝점 무게 0.8kg, 최대속도 1m/s의 경우, 퍼지제어에 비해 오차가 91%감소, 신경회로망을 이용한 퍼지제어에 비하여 31.8% 감소하였고, ES와 퍼지제어합성에 의한 제어기보다 오차가 31.3% 감소하는 등 제어성능과 그 유용성이 우수함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J.M. Zurada, Introduction to Artificial Neural Networks, West Publishing Company, 1992.
- [2] K.J. Åström and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison Wesley, 1992.
- [3] G. V. S. Raju and J. Zhou, "Adaptive Hierarchical Fuzzy Controller," IEEE Trans. on S. M. C., vol. 23, no. 4, July 1994.
- [4] B.M. Chung and J.H. Oh, "Auto-tuning Method of Membership Function in a Fuzzy Learning Controller," J. of Intelligent and Fuzzy System, vol. 1, 1994.
- [5] M. Srinivas, L.M. Patnaik, "Genetic Algorithms: Survey", IEEE Computer, vol. 27, no. 6, pp. 17-26, 1994.
- [6] 이승준, "Flexible Manipulator제어를 위한 자동 구축 퍼지 제어기 설계", 홍익대학교 석사학위 논문, 1995.
- [7] P.D. Wasserman, Advanced Methods in Neural Computing, Van Nostrand Reinhold, 1993.

저 자 소 개

이기성(李基聖)

1958년 7월 12일생

1980년: 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1983년 오하이오 주립
대학 전기공학과 졸업(석사).

1989년: Purdue대학 전기공학과 졸업(공학). 현재 홍익대학교
공대 전자전기공학부 부교수

Tel : 02-320-1670

E-mail : leeks@wow.hongik.ac.kr

조현철(趙玄哲)

1961년 11월 19일생

1985년: 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업
(석사). 1997년 동 대학원 졸업(공학).

현재: 경북전문대학 디지털전자정보과 부교수

Tel : 054-630-5041

E-mail : chc@mail.kbc.ac.kr