

Pseudo-2축 로봇 모듈의 유전 알고리즘에 근거한 퍼지 제어

신승호*, 유영선** 강희준***

GA-Based Fuzzy Control of Pseudo-2 Axes Robot Module

Seung-Ho Shin*, Young-Sun Ryuh**, Hee-Jun Kang***

ABSTRACT

This paper presents the introduction of Pseudo-2 axes robot module and its GA-based fuzzy control implementation. Pseudo-2 axes robot module which use a single motor and controller for driving 2 joints of a robot mechanism, is devised towards a lower priced robot with its degree of freedom maintained. GA-based Fuzzy controller is considered for the better control implementation of the developed system than the conventional PID controller. Here, the scaling factors of the membership function with high fitness values are selected using a genetic algorithm for a pulse-type input trajectory. The obtained controller also shows better trajectory tracking performance than a PID controller.

Key Words : Pseudo-2 Axes Robot Module(Pseudo-2축 로봇 모듈), Genetic Algorithm(GA, 유전알고리즘), GA-based Fuzzy Control(유전 알고리즘에 근거한 퍼지 제어), Fitness(적합도)

1. 서론

최근들어 산업용 로봇을 이용한 공장 자동화에 대한 투자가 급증하고 있으나, 로봇의 가격이 상당히 고가이므로, 자동화를 원하는 많은 기업에서는 로봇의 잇점을 알면서도 투자대비 효과를 얻기 위한 투자 회수 기간이 길므로 선듯 투자가 어려운 현실이다. 따라서, 저가의 산업용 로봇의 개발은 필수적이다.

산업용 로봇트를 이용한 공장 자동화의 많은 사례 중에서 작업 공간 궤적을 추적하는 제어 기능보다는 위치 제어 기능을 이용하는 경우가 대부분이다. 즉, 산업용 로봇은 최종 작업 위치에 대한 범용성을 잃지 않는다면, 비록 연속 궤적 작업을 수행하지 못하더라도, 많은 경우의 자동화 작업에 이용될 수 있다. 따라서, 산업용 로봇의 제작 경비를 줄이기 위한 방안으로, 산업용 로봇의 2개 관절을 1개 모터로 제어하는 Pseudo-2축 로봇 모듈⁽¹⁾이 제시된

* 울산대학교 제어계측 공학과 대학원
 ** 삼주기계(주)
 *** 정희원, 울산대학교 제어계측 공학과

다. 2개 관절 대비 1개 모터 사용은 산업용 로봇 부품의 원가 구성비에서 많은 부분을 차지하고 있는 모터 및 모터 구동 장치의 수를 줄이고, 대신 상대적으로 저가인 클러치를 사용함으로써, 로봇의 연속적인 작업 공간 궤적 기능은 상실되지만, 저가이면서도 일반 산업용 로봇의 작업 공간이나 위치 정밀도 등에 동일한 수준의 유지가 가능토록한다.

퍼지 제어 알고리즘은 제어 시스템에 대한 정확한 수학적 모델링을 요구하지 않고, 제어 대상에 대한 작업자의 경험이나 제어기 설계자의 지식 등이 퍼지 제어 규칙 및 소속 함수의 스케일 값 등을 통하여 제어기 설계에 쉽게 적용될 수 있는 장점 때문에 널리 사용되고 있다^{(2),(3),(4)}. 하지만, 퍼지 제어기의 성능을 좌우하는 제어 규칙 및 소속 함수의 스케일 값의 결정이 반복적인 시행착오를 통하여 얻어지거나, 또 얻어진 제어 성능에 대한 평가도 적절한 제어라고는 할 수 있지만 최적화된 제어라고 할 수는 없다. 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 퍼지 제어기에 신경망(Neural Network)을 적용하여 학습을 통한 제어 규칙 및 소속 함수의 스케일 값을 결정하는 방법^{(5),(6)}이 제안되었으나, 이 또한 신경망의 단점인 국부 최소점에 빠지는 경우가 발생할 수 있다. 이에대한 보완으로 퍼지 제어 알고리즘에 70년대초 J. H. Holland⁽⁷⁾에 의해서 다윈의 자연선택의 과정과 진화론적인 유전학에서 착상을 얻어 소개된 유전 알고리즘(Genetic Algorithms)의 적용에 대한 연구⁽⁸⁻¹¹⁾가 진행되고 있다. 하지만, 대부분의 논문들이 컴퓨터상에서의 모의 실험을 통해서 그 사용 가능성을 확인하고 있다.

본 논문에서는 2개 관절을 1개의 모터로 제어하는 Pseudo 2축 로봇 모듈의 구성과 작동 원리에 대하여 우선 기술하고, 그 시스템의 제어기로서, 유전 알고리즘에 근거한 퍼지 제어기를 구성하여 기존의 PID 제어기와 실험적으로 그 성능을 비교하고 검토하고자 한다.

2. Pseudo-2축 로봇 모듈의 구성과 작동 원리

Pseudo-2축 로봇 모듈의 구성시, 1개 액츄에이터를 이용하여 2관절 제어를 수행할 수 있어야 하므로, 고려된 메커니즘이 기본적으로 갖추어야 할 기능과 고려 사항은 다음과 같다.

1) 동력 전달 방향의 전환이 필요에 따라 가능해야 한다: 2 관절이 동시에 운동을 시작하여 동시에 운동을 끝내도록 고려하려면 관절 운동 구간내에서 기어의 변속비

를 변경하여야 하므로 고가의 무단 변속기가 필요하거나 변속에 따른 충격을 유발하는 등의 문제점이 발생시키게 된다. 이를 방지하기 위하여, 구성 메커니즘은 2개 관절이 동시에 운동을 시작하고 정해진 시간내에서 개별적으로 운동을 끝내도록 고려하였다.

동력 전달 구조에 On/Off 제어가 가능한 전자 마그네틱 클러치를 설치함으로써, 하나의 액츄에이터를 사용한 2 관절 제어가 가능하게 된다.

2) 동력 전달이 끊어진 경우, 해당 위치를 유지해야 한다: 산업용 로봇에서는 전원 인가시에는 위치 제어기의 중력 보상에 따라 현재 위치를 유지하고 있으나 본 메커니즘에서는 클러치 Off시 위치 제어기와 관절 축이 완전 분리되어 중력에 의한 운동을 보상할 수 없게 된다. 즉 동력 흐름상 상호 독립된 상태가 되므로 이를 위해 산업용 로봇에서 동력 절체시 브레이크의 작동에 의해 슬립이나 위치상실등을 막고 있듯이 백래쉬를 극소화 시킨 정밀 워엄과 워엄 휠을 이용하므로써 브레이크의 기능을 수행하도록 한다.

3) 동력의 전달 및 전환이 자유로우면서 동시에 역방향의 전환도 가능해야 한다: 위의 조건 1과 2를 충족시킨 범위내에서 동일 액츄에이터에 연결된 2축이 어느 한축의 방향으로만 독립적으로 위치제어가 이루어지므로, 따라서 3개의 클러치를 사용하므로써 2축의 회전방향을 다루게 할 수 있는 교차 동력전환장치를 구성 하여 하나의 액츄에이터를 이용한 2 관절 제어시 발생할 수 있는 작업 시간의 증가를 가급적 줄이고자 한다.

상기된 기본 기능을 고려하여 Fig. 1에 보여진대로 Pseudo-2축 로봇 모듈을 구성 제작하였다. 본 메커니즘의 주요 구성 요소는 모터 및 제어기 1 set, Electro-Magnetic Clutch 1 set, Worm 및 Worm Wheel 2 set, 액츄에이터 동력 분기용 Pulley 및 Timing Belt 1 Set, 관절 1축과 관절 2축의 기구학적 종속성 배제를 위한 Pulley 및 Timing Belt 1 Set, Bevel Gear 1 set 그리고 Spur Gear 1 set 등으로 구성된다(그 자세한 제원은 참고 문헌 (1) 참조).

메커니즘의 기본 작동 원리는 Table 1에 보여진대로 3 set의 클러치 On/Off 상태에 따라 6가지의 상태를 가지고 모터의 회전 방향까지 고려한다면 10가지의 상태를 갖게 된다. 클러치 1의 결합은 관절 1를 모터의 회전 방향에 따라 움직이게 하고, 클러치 2의 결합은 관절 2를 모터의 회전 방향에 따라 움직이게 하고, 클러치 3의 결합은 관절 2를 모터의 역방향으로 회전하게 한다. 이러한

토크 전달 구조는 다양한 구성방법이 있으나 여러 가지 방법을 검토한 결과 Fig. 1과 같은 방법으로 해당 구조를 구성 제작하였다.

3. GA-based 퍼지 제어 알고리즘

퍼지 제어기의 입력변수는 설정치와 시스템 출력의 차이인 에러(e)와 에러의 변화율(Δe)로 설정하고, 출력변수는 모터에 의하여 발생하는 토크에 대한 전압(u)으로 설정하였다. 그리고, 각 퍼지 변수들은 LP(Large Positive), MP(Medium Positive), SP(Small Positive), ZO(Zero), SN(Small Negative), MN(Medium Neg-

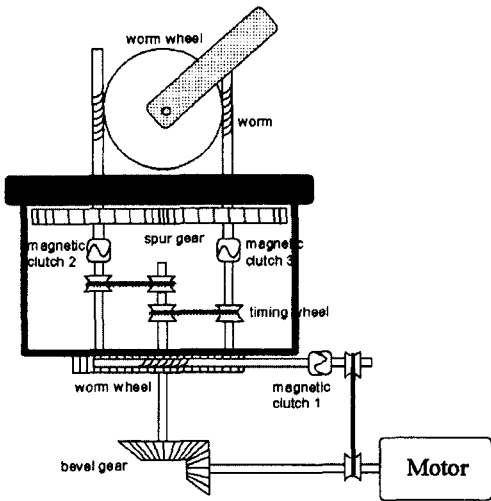


Fig. 1 Concept drawing of Pseudo-2 axes robot module

Table 1 Operation of Pseudo-2 axes robot module according to clutch state

상태	모터 회전 방향	관절 1	관절 2	클러치 1	클러치 2	클러치 3
State 0	No Rev.	No Rev.	No Rev.	Off	Off	Off
State 1	CW	No Rev.	CW	Off	On	Off
State 2		No Rev.	CCW	Off	Off	On
State 3		CW	No Rev.	On	Off	Off
State 4		CW	CW	On	On	Off
State 5		CW	CCW	On	Off	On
State 6	CCW	No Rev.	CCW	Off	On	Off
State 7		No Rev.	CW	Off	Off	On
State 8		CCW	No Rev.	On	Off	Off
State 9		CCW	CW	On	On	Off
State 10		CCW	CW	On	Off	On

ative), LN(Large Negative)와 같이 7개의 언어 집합을 사용하여 표현하였고, 유전 알고리즘을 적용하기 전의 각 소속함수는 동일 간격의 삼각형 형태의 소속함수를 사용하였다. 퍼지 제어 규칙은 일반적인 IF-THEN 형태로 표현되며, 추론은 Mamdani⁽¹²⁾가 제시한 최소 연산법을 사용하였고, 비퍼지화 방법으로 가장 널리 쓰이는 무게 중심법을 변환하여 사용하였다. 비퍼지화 방법의 변환 과정은 절 4에서 다시 설명하고자 한다.

Fig. 2에 보여진, GA-based 퍼지 제어 알고리즘은 시스템의 출력을 가지고 현재의 퍼지 제어기에 적용한 유전자(즉 소속함수, 스트링)의 적합도(Fitness)를 계산하게 된다. 한 세대의 모든 유전자에 대해서 적합도를 평가하고 이 적합도에 따라서 유전 알고리즘의 재생, 교배, 돌연변이 연산자를 사용하여 다음 세대의 유전자를 선택하게 된다. 이런 유전자를 입력변수의 퍼지 소속함수로 만들어서 퍼지 제어기에 적용한다.

본 논문의 GA-based 퍼지 제어 알고리즘의 개요는 다음과 같다. 유전 알고리즘에 사용하는 유전자(스트링)에 대해서 메모리를 할당하고, 퍼지 제어기의 입력, 출력 소속함수 및 퍼지 규칙을 정의한다. 먼저 부모세대를 나타내는 유전자들의 초기 집단을 만들어낸다. 그리고 그 유전자로부터 퍼지제어기의 입력에 대한 소속함수를 만들어 낸다. 원하는 입력에 대해서 퍼지 제어를 수행한다. 수행 후 미리 설정한 적합도에 맞추어 계산하면 그 유전자의 수행능력을 나타내는 값이 된다. 적합도가 원하는 값보다 작으면 그 다음 유전자에 대해서 위의 과정을 수행하여 모든 유전자에 대해서 수행하게 된다. 원래는 여러 세대를 지나가면서 최고의 적합도를 나타내는 유전자를 선택해야 하나, 이렇게 하면 수행하는 시간이 많이 걸리게 되므로 미리 원하는 값을 설정하여 그 값이 넘는 유전자를 선택하여 사용한다⁽¹³⁾. 모든 유전자에 대해서 적용했으면 다음 세대를 만들기 위해서 유전자들의 적합도를 바탕으로 재생, 교배, 돌연변이를 수행하고 만들어진 유전자 집합에 대해서 위의 과정을 다시 수행하여 원하는 적

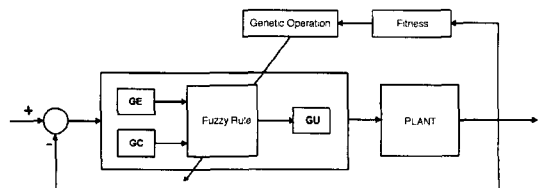


Fig. 2 Diagram of GA-based fuzzy controller

합도가 나올 때까지 계속한다. 위의 유전 알고리즘을 끝내게 되면 현재 소속함수의 스케일 값들이 좋은 성능을 나타내는 것이므로 이것들을 가지고 퍼지제어를 수행하게 된다. 위 과정의 순서도는 Fig. 3에 제시된다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험 장치

구현된 Pseudo-2축 로봇 모듈 시스템의 실험 장치 구성은 Fig. 4와 같다. 주제어기로 75MHz Pentium PC를 사용하여 주어진 시간에 원하는 궤적값을 계산하고, 2개 관절에 각각 부착된 광학 인코더 및 펄스 카운터에서 입력된 현재 위치와의 차를 이용하여 퍼지 제어기에서 필요한 제어량을 계산하게 된다. 이 계산된 제어량은 8bit

D/A를 통하여 Yaskawa 200W급 AC 서보 드라이버의 입력 속도량으로 공급된다. AC 서보 드라이버의 최고 속도는 4500rpm이고, 그에 대응하는 D/A의 디지털값은 127 또는 -127로 설정되나, 이 값이 순간 위치 제어 입력으로 지나치게 크고, 퍼지 제어기의 비퍼지화 과정에서 얻어진 정규화된 출력값(u)에 대한 디지털값의 비례적 적용은 유전 알고리즘의 세대간의 천이 과정이 수렴되지 않음을 실험을 통해 확인되므로, 정규화된 출력값(u)에 대한 디지털값이 식 (1)의 지수 함수 형태로 변환되도록 하였다.

$$v = \begin{cases} 20 (e^{2u} - 1) & \text{for } u \geq 0 \\ -20 (e^{-2u} - 1) & \text{for } u < 0 \end{cases} \quad (1)$$

위와 같은 변환의 근거는 AC 드라이버에 대한 입력 속도량의 갑작스런 변화는 제어 토크의 과도한 증가를 이루어 전체 시스템을 불안정하게 하므로 가능한 넓은 영역에서 입력 속도량의 변화를 감소시키는 것이 바람직하다. 제어 프로그램은 움직임하고자 하는 궤적을 만들고 그 결과를 보여주는 주 프로그램과 인터럽터에 의한 제어 루틴으로 구성되어 있는데, 주프로그램에서 사용한 유전 알고리즘은 Goldberg^{(13),(14)}의 방법을 C 언어로 작성하여 본 시스템에 적용하였다.

4.2 제어 실험

유전 알고리즘에 근거한 퍼지 제어기의 소속함수의 스케일 값을 구하는 방법으로 식 (2)에 보여진 펄스 형태의 궤적을 사용하였다. 이는 한 방향 계단 함수 궤적⁽¹¹⁾을 사

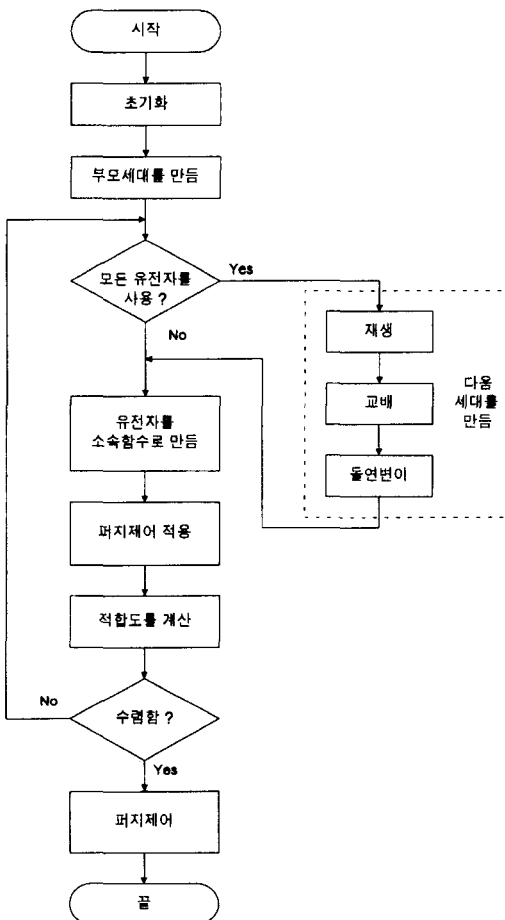


Fig. 3 Flowchart of GA-based fuzzy controller

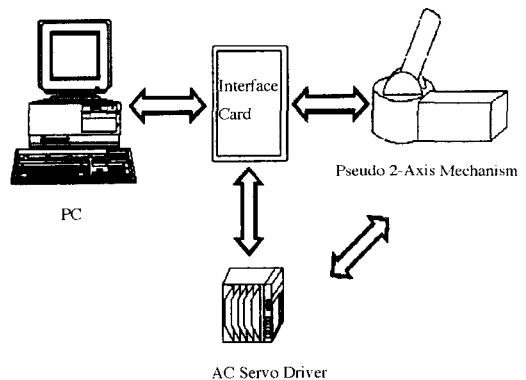


Fig. 4 Experimental setup

출할 수 있으나, 이를 사용한 결과 한쪽 방향으로의 제어가 잘되나 다른 방향에 대해서는 잘 제어가 되지 않아서 두 방향에 대해서 좋은 성능을 발휘할 수 있도록 펄스 형태의 궤적을 사용하였다. 그 원인은 제작된 시스템의 마찰력이 운동 방향에 따라 달라지기 때문으로 고려된다.

$$\theta_d(t) = \begin{cases} 5^\circ & \text{for } 0 < t < 0.75 \\ 0^\circ & \text{for } 0.75 < t < 1.5 \end{cases} \quad (2)$$

유전 알고리즘을 이용하여 탐색하는 기준이 되는 적합도는 다음과 같은 특징을 나타내도록 정의하였고^[11], 그것은 식 (3)과 같다.

- ① 오차를 감소시키고자 한다.
- ② 임계제동(Critical damping)이 되도록 한다.
- ③ 빨리 원하는 값으로 도달하게 한다.

$$fitness = \frac{k1}{1 + k2 \times STime + k3 \times ITAE + k4 \times Overshoot} \quad (3)$$

여기서 k_1, k_2, k_3, k_4 는 일정한 상수로 각각 1, 1, 5000, 1를 사용하였다.

고려된 적합도의 의미는 빠르게 수렴하면 STime(Setting Time)과 ITAE(Integral of Time Multiplied Absolute Error)의 값이 감소하고, 정상상태에서 오차의 감소는 ITAE를 감소시키고, 여기에 임계제동이 되면 Overshoot의 값이 없어지게 된다. 따라서, 분모의 값이 작소하므로 자연히 전체적으로는 큰 값을 가지게 된다.

실험에 사용된 k_1, k_2, k_3 및 k_4 값들의 선정 배경은 각 인자들의 효과가 동일하게 나타나도록 각각 크기의 Order 7-0에서 1사이가 되도록 하였다. 제안된 Pseudo-2축 시스템에서는 궤적 추적 성능 보다는 최종 위치로의 도달 성능인 Settling Time, Overshoot 그리고 Steady-State Error 등이 보다 강조되나 Steady-State Error를 직접 고려하지 않은 이유는 이 인자가 강조될 경우 유전 알고리즘의 학습과정에서 전반적인 제어 성능의 왜곡을 가져오는 경우가 많음을 시뮬레이션을 통해서 확인하였기 때문이다. 대신에 IAE(Integral of Absolute Error) 보다는 ITAE를 고려함으로써 Steady State Error를 줄이도록 하였다.

입·출력 퍼지 변수에 대한 유전자 표현은 Fig. 5와 같이 표현된다^[11]. 1의 위치는 삼각형 소속함수의 꼭지점을 나타내고 옆 소속함수의 꼭지점이 이 소속함수의 밑변이

된다. Fig. 3의 GA-based 퍼지 제어기의 순서도에 따라서 식 (3)의 적합도를 최고로 하는 소속함수의 최적 스케일 값을 찾는 과정 중 10번째 세대, 30번째 세대 60번째 세대 그리고 100번째 세대의 소속 함수에 대한 제어 성능을 Fig. 6에 제시하였다. 세대가 지나가면서 처음 10 세대에서는 오차가 크게 나왔으나 60 세대에서는 어느정도 궤적을 따라가 있음을 보여주며 100 세대에서는 거의 목표 궤적을 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 유전 알고리즘에 의하여 최적화된 소속 함수의 모양은 Fig. 7에 제시된다. 이때 사용된 퍼지 제어기의 퍼지 규칙을 Table 2에 제시된다.

유전 알고리즘 통하여 결정된 소속 함수를 가진 퍼지 제어기의 제어 성능을 다음의 두가지의 궤적에 대하여 PID 제어기와 비교 검토하고자 한다. 여기서, 선정된 PID 제어기의 이득들은 위에 언급한 펄스 형태의 궤적과 제시된 적합도에 근거하여 고려된 시스템의 동력학 모델에 대한 시뮬레이션 및 실 제어 실험을 통하여 조정함으로써 선정되었다.

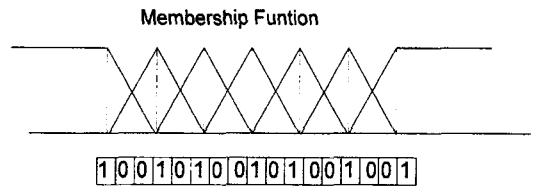


Fig. 5 String representation of fuzzy membership function

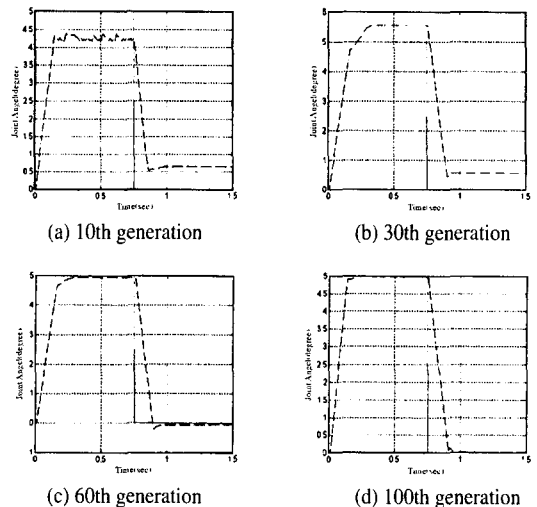


Fig. 6 Control results from evolving generations

그 첫 번째 궤적은 제단 입력으로서, Table 1의 Pseudo-2축 모듈의 동작 상태 3에 해당하는 관절 1에 대하여 적용하였다. 제어 성능 결과는 Fig. 8에 제시된 대로, PID 제어의 경우 0.30초의 정착시간(Settling time)을 가지는데 비해 퍼지 제어기는 0.2초의 정착시간을 가지는 것을 볼 수 있었다. GA-based-퍼지 제어기가 PID 제어기 보다 빠른 응답을 보임을 알 수 있다.

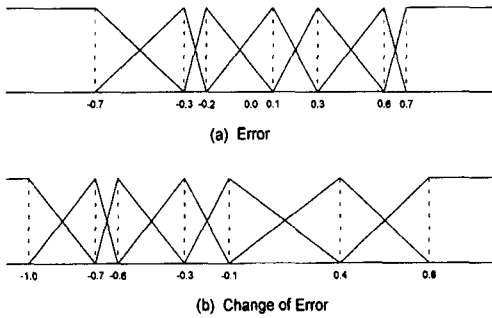


Fig. 7 Fuzzy membership function from genetic search procedure

Table 2. Fuzzy rules

e	LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
LN	MN	LN	MN	MN	MN	LN	MN
MN	LN	SN	SN	SN	SN	SN	LN
SN	MN	SN	SN	ZE	SN	SN	MN
ZE	MN	SN	ZE	ZE	ZE	SP	MP
SP	MN	SP	SP	ZE	SP	SP	MP
MP	LP	MP	SP	SP	SP	MP	LP
LP	MP	LP	MP	MP	MP	LP	MP

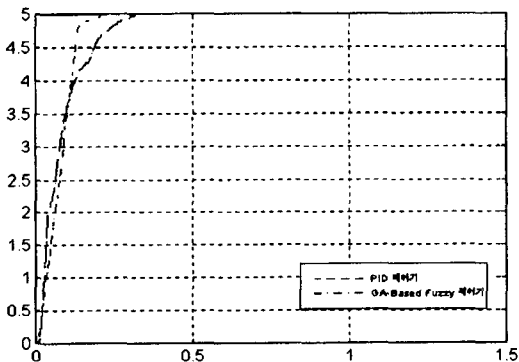


Fig. 8 Control response of joint 1 to step input

두 번째 궤적으로는 관절 1을 30° 움직이고 관절 2를 20°를 움직이고자 한다. 이 경우 Pseudo-2축 로봇 모듈은 Fig. 9에 나타낸대로 처음 20°까지는 관절 1과 관절 2를 동시에 움직이게 되고, 안전한 클러치 변속 시간을 가진 후 관절 1이 나머지 10°를 움직이게 한다. 그

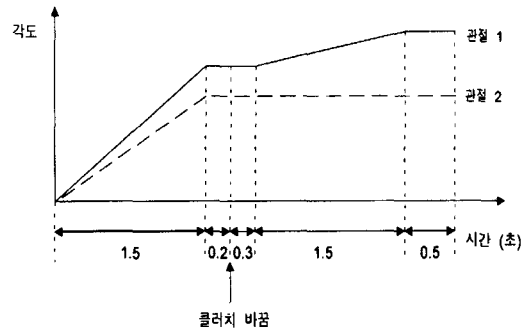
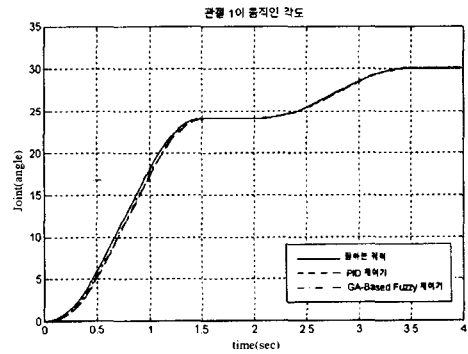
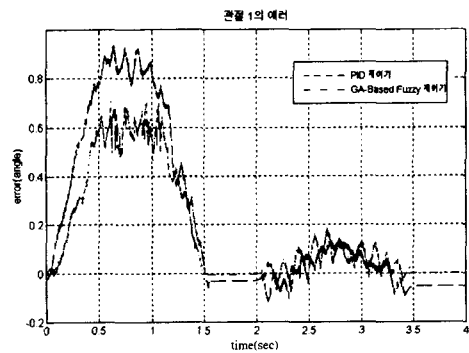


Fig. 9 A trajectory of Pseudo-2 axes robot module



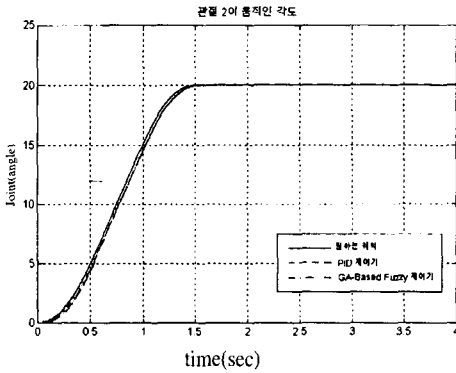
(a) Joint position



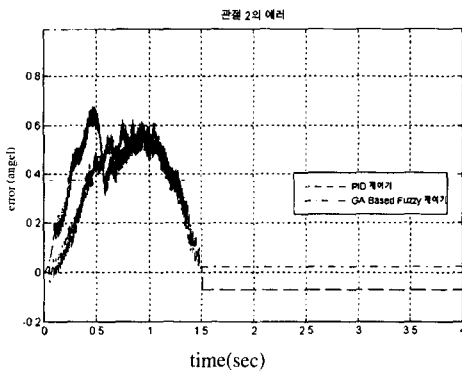
(b) Error of joint position

Fig. 10 Control results: joint 1(30°)

제어 결과로 Fig. 10과 Fig. 11은 관절 1이 20° 움직이는 각궤적과 그 제어 오차 그리고 관절 2가 30°를 움직이는 각궤적과 그 오차를 각각 나타낸다. 관절 1과 관절 2 두 경우 제안된 제어기가 발생 최대 오차나 정상 상태 오차에 있어서 보다 나은 제어 성능을 보임을 알 수 있다.



(a) Joint position



(b) Error of joint position

Fig. 11 Control results: joint 2(20°)

5. 결 론

본 논문에서는 저가형 로봇 제작의 기본 모듈로서 사용될 수 있는 Pseudo-2축 로봇 모듈의 구성과 기본 동작 원리 등을 제시하고, 그 구현된 시스템에 GA-based 퍼지 제어 알고리즘을 적용하여, 기존의 PID 제어기에 비교하여 보다 나은 제어 성능을 입증하였다. 모터 회전 방향과 역방향 모두 포함하는 펄스 형태의 궤적에 대하여 유전 알고리즘을 적용함으로써 퍼지 소속 함수의 스커일 값을 최적화하여 보다 나은 성능의 퍼지 제어기를 구현하였고 계단 입력과 궤적 입력에 대한 제어 실험 결

과, PID 제어기와 비교하여 보다 빠른 응답과 적은 오차를 발생함을 보였다. 제안된 방법으로 퍼지 제어기의 단점이었던 최적화된 제어기 설계의 어려움과 전문적인 지식 또는 경험이 필요함을 유전 알고리즘의 재생, 교배, 돌연 변이의 과정을 통해서 극복할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. 신승호, 강희준 외 3명, "Pseudo-2축 제어 시스템 개발", 대한기계학회 1996 춘계 학술 대회 논문집 (A), pp. 330-335, 1996.
2. Kumbala, K. K. and Jamshidi, M., "Control of Robotic Manipulator using Fuzzy Logic", IEEE Fuzzy System, pp. 518-523, 1994.
3. Murakami, S., et al., "Fuzzy Control of Dynamic Biped Walking Robot", IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp. 77-82, 1995.
4. Hwang, W. R. and Thompson, W. E., "An Improved Method for Designing Fuzzy Controller for Position Control Systems", 2nd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, San Francisco, 1990
5. Shibata T., Fukuda T., Arai F., Tokita M. and Mitsuoka T., "Skill Based Control by Using Fuzzy Neural Network for Hierarchical Intelligent Control", Proc. of the Int. Joint Conf. on Neural Networks, Vol. II, pp. 81-86, 1992.
6. Horikawa, S., et al., "A Fuzzy Controller using a Neural Network and its Capability to Learn Control Rules", Proc. of Int. Conf. on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp.103-106, 1990.
7. Holland J. H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, 1975.
8. Lee, M. A. and Takagi, H., "Dynamic Control of Genetic Algorithms using Fuzzy Logic Techniques", Proc. of 5th Int. Conf. on Genetic Algorithms, pp. 76-83, 1993.
9. Park, Sae-Hie, et al., "Self-Organization of Fuzzy Rule Base using Genetic Algorithm",

- Fifth IFSA World Congress. pp. 881-886, 1993.
10. Xuet, H., Chong, N. T. and Jamshidi, M., "Fuzzy Associative Memory Optimization Using Genetic Algorithms", IEEE Fuzzy System, pp. 509-513, 1994.
 11. Hwang, W-R and Thompson, W. E., "Design of Intelligent Fuzzy Logic Controllers Using Genetic Algorithms", IEEE Fuzzy System, pp. 1383-1388, 1994.
 12. Mamdani, E. H. and Gaines R. R., Fuzzy Reasoning and Its Application, Academic Press, 1981.
 13. Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989.
 14. Smith, R. E., Goldberg, D. E. and Earickson, J. A., "SGA-C: A C-language Implementation of a Simple Genetic Algorithm", The University of Alabama TCGA Report No.91002.