

수정된 입력 변수를 이용한 퍼지제어기에 의한 다관절 로봇제어

이수한 · 임영순 · 강성웅
기계공학과

<요 약>

다관절 로봇을 제어하기 위하여 새로운 퍼지제어기를 제안한다. 제안된 퍼지제어기는 각각의 위치오차 및 속도오차와 SPR 전달함수를 가진 수정된 위치오차 및 속도오차를 사용한다. 2관절 로봇의 모의 전산 실험결과는 미분-비례 제어기와 수정되지 않고 동일한 규칙을 사용하는 퍼지제어기보다 본 연구에서 제안한 퍼지제어기가 궤적 추적 성능이 월등함을 보였다.

Control of a Multi-Link Robot with Fuzzy Logic using Modified Input Parameters

Lee, Soo Han · Lim, Young Soon* · Kang, Sung Woung*
Dept. of Mechanical Engineering

<Abstract>

A fuzzy controller is proposed to control a multi-link robot. The controller uses modified position errors and velocity errors, which have a strictly positive real transfer function to the position errors and the velocity errors respectively. Simulation results for 2 link robot show excellent trajectory tracking performance compared with the performance of a PD controller and a conventional Fuzzy controller.

* 기계공학과 대학원

1. 서 론

로봇의 운동은 매우 복잡한 비선형 방정식으로 표현되고 그 중에서 관절에서의 마찰력, 하중의 변화, 외부에서 가해지는 외력의 외란 등의 변수는 로봇 작동 중에 그 값을 측정하기가 매우 어렵다. 이의 제어를 위한 한 방법으로 인간의 경험과 지식을 이용하는 퍼지 제어(Fuzzy Control)를[1] 본 연구에서 사용한다.

L.A. Zadeh가 인간의 사고방식에서 영향을 받아서 퍼지집합론을 발표한 이후에 퍼지논리를 제어에 이용하고자 하는 많은 시도가 있었다[2]. Mamdani가 증기스팀엔진의 제어를 위하여 처음으로 퍼지제어기를 적용하였다[3]. M. Sugeno와 K. Murakami는 자동차 주차 제어에[4], Y.F. Li와 C.C. Lau는 DC 서보시스템의 제어에[5] 적용하였고, 로봇트의 역기구학문제와 조립작업[6,7,8]등에도 적용되었다.

퍼지제어기는 제어하고자 하는 계의 정확한 수학적 모델이 필요하지 않는 것이 큰 장점이다. 측정된 계의 입력변수를 가지고 퍼지논리를 사용한 추론의 과정을 거쳐서 출력값을 계산하므로 계산시간이 다른 제어기에 비하여 계산시간이 적다. 하지만 일반적인 퍼지 제어기는 입력변수인 오차값과 오차변화율의 값이 0부근에서 진동하는 현상과 정상상태 오차가 발생하는 문제점이 있고 또한 퍼지 룰을 만들 때 통상적으로 많은 시행착오가 따른다.

본 연구에서는 다관절 로봇의 제어를 위하여 새로운 있는 퍼지 제어기를 제안한다. 퍼지 제어에서 많이 사용되는 위치오차와 속도오차 값을 사용하지 않고 이들과 SPR(Strictly Positive Real) 전달함수를 가진 수정된 위치오차와 속도오차를 사용한다.

2. 이 론

2.1 퍼지 논리

기존의 상집합론의 개념에서는 참 또는 거짓의 두가지의 개념만을 가지고 있다. 이러한 이원적인 개념으로는 일반적으로 일어나는 모든 현상을 정확히 표현하는 것은 어렵다. 즉, '적당히 큰', '작은' 등과 같은 값을 표현하는 것이 불가능하다.

L.A. Zadeh가 발표한 퍼지집합론에는 그 수의 상대적인 크기를 나타내는 소속함수(Membership Function) $\mu_A(x)$ 을 사용하여 이러한 문제를 해결하였다. 위의 퍼지함수를 나타내는 형태로는 삼각형, 사다리꼴형, 종형등의 여러가지 형태를 사용한다. 삼각형은 계산상의 편리성 때문에 많이 사용되어지고 있다[10].

2.2 퍼지 제어기

로봇의 제어를 위해서 토오크 계산제어[11], 적응제어[12,13,14], 강건제어[15,16]등의 비선형 제어기 등이 연구되고 있으나 대부분의 연구가 로봇의 운동모델에 의존하거나 한계를 이용하는 등의 문제점이 있고 계산량이 비교적 많은 단점도 있다.

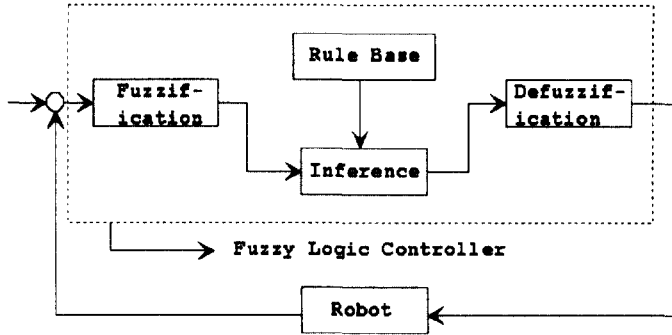


Fig 1. Block diagram of the Fuzzy Logic Controller

이런 문제점을 해결하기 위하여 비교적 계산량이 작고 단순한 Fig 1에 나타난 것과 같은 퍼지제어기를 사용하였다. 퍼지제어기는 크게 3가지의 부분으로 나누어진다. 퍼지화(Fuzzification)부분, 규칙베이스(Rule Base)와 비퍼지화(Defuzzification)부분으로 구성된다.

2.2.1 퍼지화부분

측정된 입력값을 적절한 퍼지 값으로 변환이 필요하다. 측정된 입력값을 전체의 대역(Universe of discourse)으로 이산화(Quantize), 일반화(Normalize)한다. 입력변수는 각 관절의 수정된 위치오차와 속도오차를 설정하였고, 출력변수로는 관절의 제어 토크를 설정하였다. Fig 2에서는 각변수들의 소속함수를 보여주고 있다.

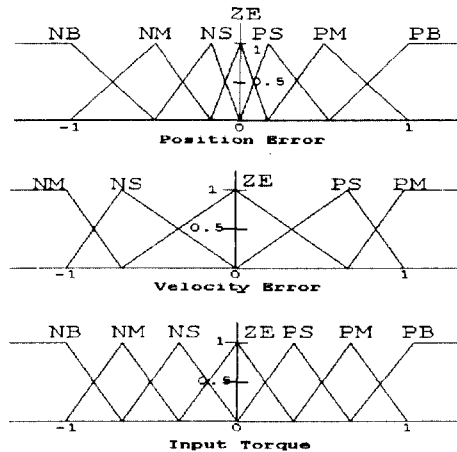


Fig 2. Fuzzy Membership Function for input/output variables

2.2.2 규칙베이스

퍼지화된 입력값을 가지고 정의된 퍼지규칙에 의해서 추론을 하여 출력을 결정하는 부분이다. 규칙의 정의는 IF ~ THEN의 언어적인 형태로 이루어져있다. 즉, 'IF (특정 조건을 만족하면) THEN (특정 결과를 출력하라)' 과 같이 구성된다. 이러한 규칙은 하나만 있는 것이 아니라 설계자의 주관에 따라 적절히 정할수 있다. 규칙의 형태는 다음과 같다.

$$R_n : \text{IF } x_n \text{ is } a_n \text{ and } y_n \text{ is } b_n \quad (1) \\ \text{THEN } z_n \text{ is } c_n$$

본 연구에서 사용된 규칙베이스는 Table 1과 같다. 위에서 정의한 규칙에 의한 추론으로 결과치를 결정한다. 추론의 방법에는 여러 가지의 방법이 있지만 본 연구에서는 가장 간단하면서도 많이 사용되는 Mamdani의 MIN연산을 사용하였다. Fig 3에서와 같이 입력 변수의 소속함수 값을 비교하여 그 중에서 작은 값을 가지는 것이다.

$$\mu_{A \cdot B}(u, v) = \min\{ \mu_A(u), \mu_B(v) \} \quad (2)$$

| e/de | NM | NS | ZE | PS | PM |
|------|----|----|----|----|----|
| NB | PB | PB | PM | PM | PS |
| NM | PB | PM | PM | PS | PS |
| NS | PM | PS | PS | ZE | ZE |
| ZE | PS | ZE | ZE | ZE | NS |
| PS | ZE | ZE | NS | NS | NM |
| PM | NS | NS | NM | NM | NB |
| PB | NS | NM | NM | NB | NB |

Table 1. Rule Base

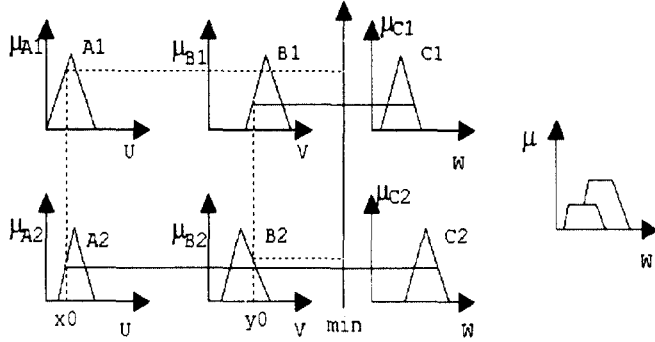


Fig 3. Mamdani's Minimum Operation

2.2.3 비퍼지화 부분

추론의 결과는 퍼지화된 값으로 출력된다. 그러나 실제의 제어 출력의 값은 명확한 값이 요구되므로 퍼지 출력의 값을 명확한 비퍼지의 값으로 변환하여야 한다. 이 과정이 비퍼지화 부분이다.

방법은 여러 가지가 있는데 여기서는 각각의 출력된 퍼지 집합의 무게중심을 구하여 사용하는 무게중심법(Center of Gravity Method)[1]을 사용하였다.

$$u_0 = \frac{\sum_1^n (\mu_n \times U_n)}{\sum_1^n \mu_n} \tag{3}$$

여기서, μ_n 은 소속함수를 나타내고 U 는 대역(Universe of discourse)를 나타낸다.

3. 오차의 수정

계의 측정 입력값으로는 일반적으로 위치오차와 속도오차가 사용된다. 오차, e ,는 각 관절의 위치오차이고, 오차변화율, \dot{e} ,은 각 관절의 속도오차로서 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} e &= \theta - \theta_d \\ \dot{e} &= \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 θ 는 현재의 위치, $\dot{\theta}$ 은 현재의 속도, θ_d 는 원하는 위치, 그리고 $\dot{\theta}_d$ 는 원하는 속도를 뜻한다.

본 연구에서는 오차와 오차변화율을 바로 사용하지 않고 아래와 같이 이들과 SPR 전달 함수를 가진 수정된 오차, e_r ,과 오차변화율, \dot{e}_r ,을 사용한다.

$$\begin{aligned} e_r &= \theta - \theta_r \\ &= e + \Lambda \int_0^t e dt, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_r &= \dot{\theta} - \dot{\theta}_r \\ &= \dot{e} + \Lambda e, \end{aligned} \quad (6)$$

단, Λ 는 양의 상수이고,

$$\theta_r = \theta_d - \Lambda \int_0^t e dt, \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_d - \Lambda(\theta - \theta_d) \quad (8)$$

을 뜻한다.

4. 모의 실험 및 결과

수정된 오차와 오차변화율을 사용한 퍼지제어기의 성능 확인을 위하여 전산 모의 실험을 하였다. 모의 실험한 로봇의 모델은 Fig 4와 같이 2개의 회전 관절을 가진 2관절 로봇이다. 모델의 변수값은 Table 2에 보인다.

위치제어를 위하여 원하는 궤적은 3차원의 다항식을 사용하였다. 식의 형태는 다음과 같다.

$$\theta_d = \begin{cases} 1.1781t^2 - 0.3927t^3 & (0 < t \leq 2) \\ 0.7850 & (t > 2) \end{cases}$$

설계된 퍼지 제어기의 제어 성능을 비교하기 위하여 선형제어기인 비례-미분제어기(PD Controller), 그리고 설계된 제어기와 동일한 퍼지 규칙을 가지되 입력변수를 오차와 오차변화율을 사용한 퍼지제어기를 선정하였다. 전산 모의 실험중 식(5)와 (6)에 보인 상수 Λ 는 20으로 선택하였다. 선형제어기에 사용된 비례-미분 제어이득, $k_p=100$, 및 $k_v=20$ 을 사용하였다. 이들 이득은 추적할 궤적보다 4배 이상의 밴드 폭을 가질 정도로 충분히 크을 유의할 필요가 있다. 제어시간 간격은 5ms로 하였다.

Fig 5와 Fig 6은 각 관절을 본 연구에서 제안한 퍼지제어기와 비례-미분 제어기로 제어한 결과를 나타낸다. 제안된 퍼지제어기는 원하는 궤적을 잘 따르고 있지만 비례-미분 제어기는 많은 오차를 보임을 알 수 있다. Fig 7과 Fig 8은 각 관절을 수정된 오차와 오차변화율을 사용한 퍼지제어기와 일반적인 오차와 오차변화율 만을 사용한 퍼지제어기를 비교하였다. 오차와 오차변화율을 사용한 퍼지제어기는 정상상태에서 큰 오차를 보이지만 제안된 퍼지제어기는 원하는 궤적을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. Fig 9는 입력 토크를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 오차 및 오차변화율과 SPR 관계가 있는 수정된 오차 및 오차변화율을 사용하여 퍼지제어기를 구성하였다. 제안된 퍼지제어기는 선정된 비례-미분 제어기에 비하여 궤적 추적 성능이 월등하였고, 또 오차와 오차변화율 만을이용하는 퍼지제어기에 비하여도, 동일 퍼지 룰을 사용하더라도, 그 제어 성능이 우수함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, C.C., 1990, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller Part I and Part II", IEEE Trans. Syst., Man and Cyber., pp 404-435.
- [2] L.A. Zadeh, 1965, "Fuzzy Sets", Inform. Control 8, pp 338-353.
- [3] E.H. Mamdani, 1974, "Application of Fuzzy Alogrithms for Control of a Simple Dynamic Plant", Proc. IEEE, Vol 121, pp. 1585-1588.
- [4] M. Sugeno and K. Murakami, 1985, "An Experimental Study of Fuzzy Parking Control using a Model Car", Industrial Applications of Fuzzy Control, pp. 125-138.
- [5] Y.F. Li and C.C. Lau, 1989, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control Systems Magazine, pp. 65-75.
- [6] Dr. Ashok Nedungani, 1992, "Application of Fuzzy Logic to Solve the Robot Inverse Kinematic Problem", Porc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, pp 1325-1339.
- [7] 박용길, 조형석, 1994, "퍼지 및 신경회로망을 이용한 면취가 없는 부품의 자동결합작업에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 18호. 제1호, pp. 1-11.
- [8] E.M. Scharf and N.J. Mandic, 1985, "The Application of Fuzzy Controller to the Control of a Multi-Degree-of-Freedom Robot Arm", Industrial Applications of Fuzzy Control, pp. 41-61
- [9] 이광형 & 오길록, 1991, "퍼지 이론 및 응용", 홍릉 과학 출판사, pp. 6:15 - 6:26.
- [10] J.Y.S. Luh and M.W. Walker and R.P.C. Paul, 1980, "Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol AC-25, No 3, pp. 468-474.

- [11] Slotine, J.J.E., and Li, Weiping, 1987, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No3, pp. 49-58
- [12] J. Craig, 1985, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators". Addison-Wesley.
- [13] R. Ortega & M. Spong, 1988, "Adaptive Motion Control of Rigid Robots: a tutorial", Proc. IEEE Conf. Decision Control, Austin, TX.
- [14] D.M. Dawson et al., 1990, "Robust Control for the Tracking of Robot Motion", Int. J. Control, Vol. 52, pp. 581-595.

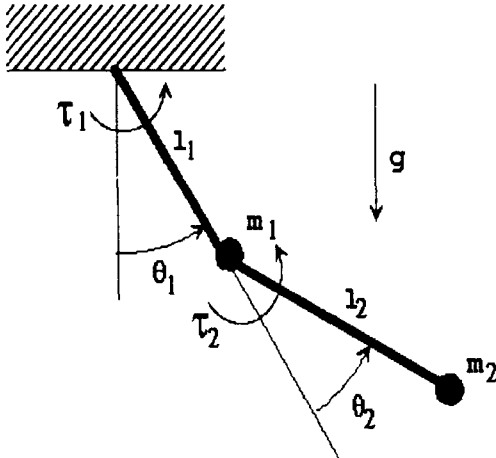


Fig 4. Configuration of the Robot Manipulators

| | Link 1 | Link 2 |
|-----------|--------|--------|
| Mass(kg) | 1 | 1 |
| Length(m) | 1 | 1 |

Tabel 2. Link Parameters

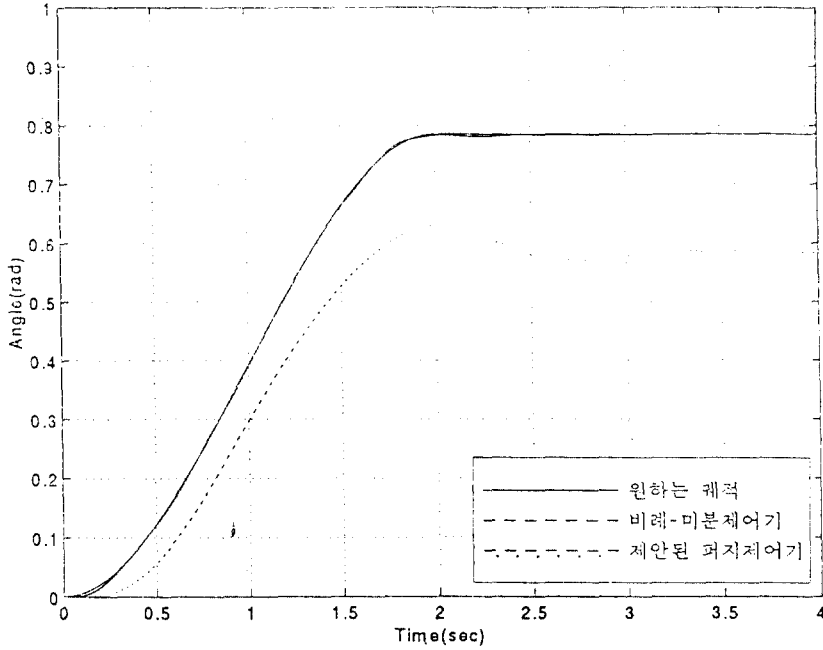


Fig 5. 제안된 퍼지제어기와 비례-미분제어기의 첫째 관절의 궤적제어

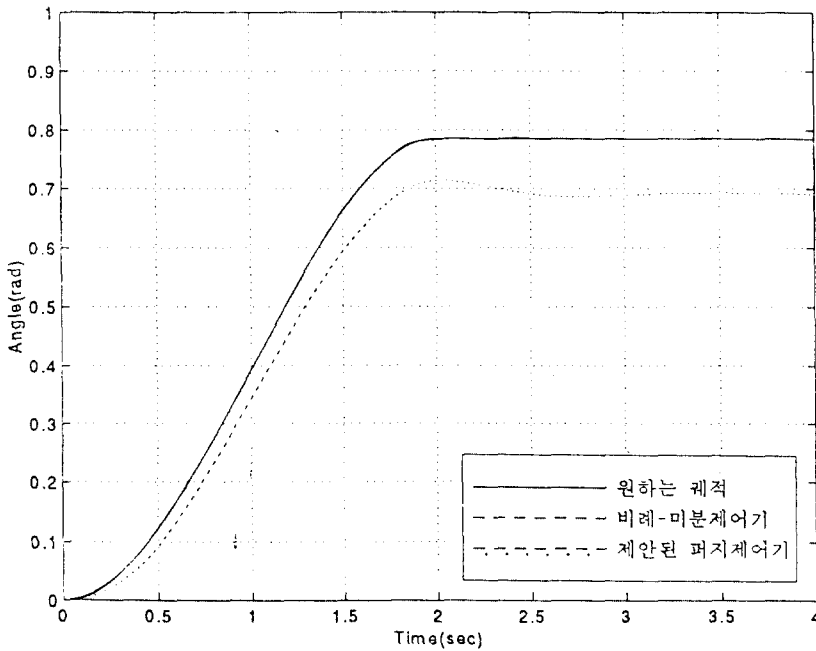


Fig 6. 제안된 퍼지제어기와 비례-미분제어기의 둘째 관절의 궤적제어

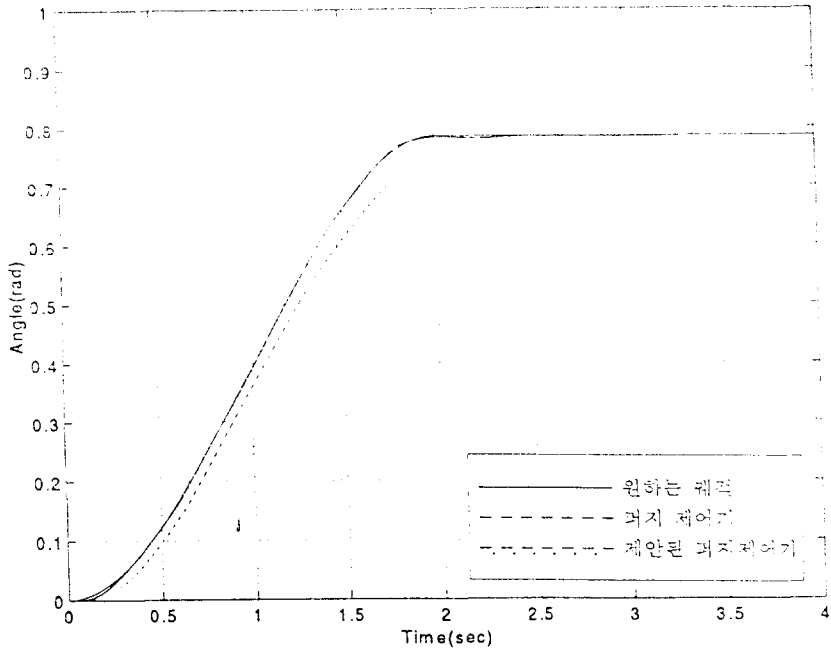


Fig 7. 제안된 퍼지제어기와 퍼지제어기의 첫째 관절의 궤적제어

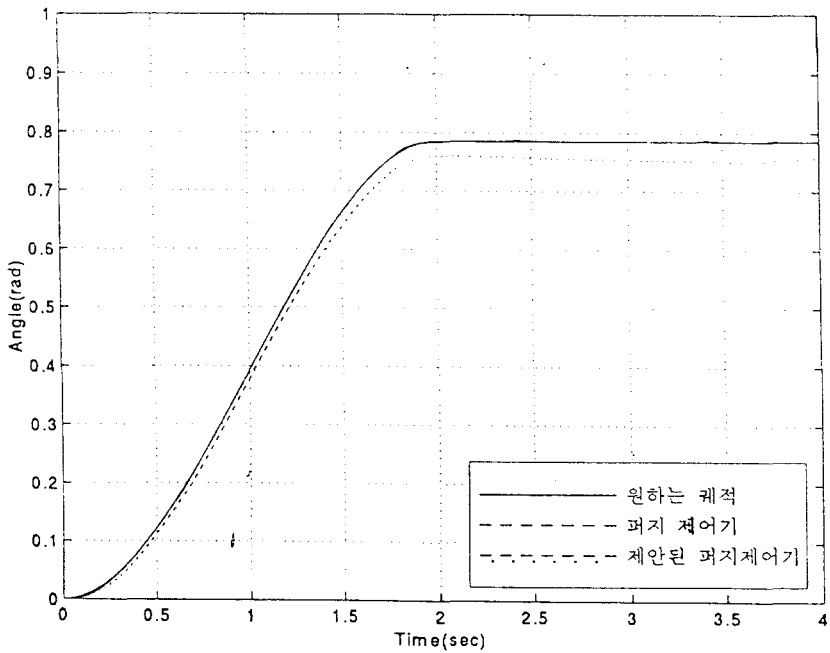


Fig 8. 제안된 퍼지제어기와 퍼지제어기의 둘째 관절의 궤적제어

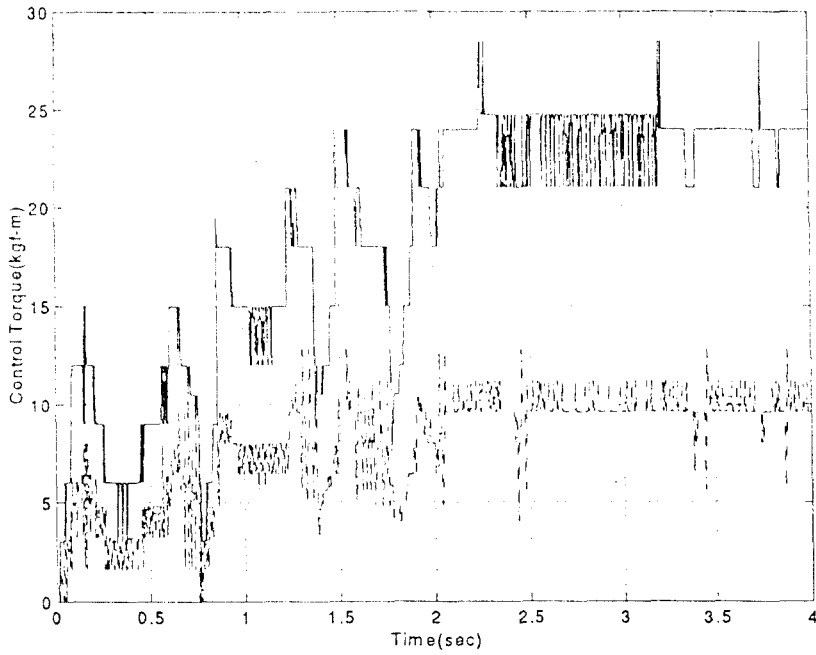


Fig 9. 제안된 퍼지제어기의 제어 토크