

# 유연 링크 로봇의 제어 (Fuzzy-Logic Controller for Flexible-Link Manipulators)

강재용(한양대 대학원), 박종현(한양대)

Jae Yong Kang (Graduate School, Hanyang Univ.), Jong Hyeon Park (Hanyang Univ.)

## ABSTRACT

This paper describes the design process and the experimental results of a fuzzy logic controller to control the tip position of a flexible-link manipulator, directly driven by a AC motor, with a large payload. The joint angle fuzzy logic controller is designed without a costly nonlinear system analysis of the flexible manipulator and the AC motor drive system. The state variables for the fuzzy logic controller are joint angle, joint velocity, link deflection, and link deflection velocity. The simulation and experimental results show that the joint position control is not satisfactory when the controller is designed under the assumption of no link flexibility and that the stable joint position control and link vibration suppression can be achieved with the fuzzy logic controller suggested in this paper.

**Key Words** : flexible manipulator(유연 링크 로봇), fuzzy logic (퍼지 로직), fuzzification(퍼지화), rule base(룰베이스) DSP board(이산 신호 처리기)

### 1. 서론

산업용 로봇의 특징으로는 빠른 동작 속도와 높은 정밀도, 그리고 넓은 작업 반경 등을 들 수 있다. 로봇 링크의 강성(stiffness)은 링크의 진동을 줄이고 작업에서 요구하는 높은 정밀도를 유지하기 위해서는 매우 높은 값을 가져야 한다. 높은 링크의 강성을 위해서는 링크의 질량이 증가하게 되므로 고속의 작업에는 적합하지 않다. 작은 링크 질량과 링크의 유연함(flexibility)을 그 특징으로 하는 로봇의 제어를 위해 링크 진동을 감소시키고 정밀도를 증가시킬 수 있는 제어기의 설계가 요구된다. 그러나 그러한 제어기를 설계함에 있어서 시스템의 비선형성 때문에 해석적인 방법에 의해 제어기를 설계하는 데에 많은 어려움이 따르게 된다.

많은 경우에 있어서 인간은 부정확한 측정 능력과 수작업으로도 유연한 구조물의 진동을 어느 정도는 억제할 수 있다. Fuzzy-logic 제어기는 인간의 언어적인 개념을 기초로 하여 제어 작업을 인간의 작업 방식을 모방할 수 있도록 하고 있다. Kubic과 Wang[1]은 1-자유도(1-d.o.f)의 유연 링크 로봇(flexible-link manipulator)에 fuzzy-logic 제어기를 적용하였다. Mougall과 Passino, 그리고 Yurkovich[2]는 부가적인 감독 제어기(supervisor)를 사용하여 2-링크 유

연 링크 로봇의 제어를 구현하였다. 기존의 논문에서는 링크의 진동이 관절의 운동에 큰 영향을 미치지 않는 경우, 즉 payload의 값이 작아서 링크의 진동을 고려하지 않아도 관절의 위치 제어가 가능한 경우에 대해 진동을 없애기 위한 부가적인 제어기를 설계하는 방식이 대부분 연구되었다.

본 논문에서는 링크 끝단의 질량이 상대적으로 큰 경우에 대하여 링크 변형의 영향을 고려하여 관절의 위치를 제어하기 위한 제어기와 진동을 억제하기 위한 제어기를 fuzzy logic을 이용하여 설계하였으며, 실험을 통해 제안된 이 제어기의 성능을 검증하였다.

### 2. 시스템 모델

본 연구에서 사용된 유연 링크 로봇의 모델을 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1에서 X와 Y는 기준 좌표계이며 X'과 Y'은 관절을 따라 회전하는 좌표계이다.  $\theta_0$ 는 회전 좌표계에 대한 링크의 변위를 미소 변형을 가정하였을 때의 등가 각도(equivalent angle)이다. 위의 시스템의 운동 방정식은 식(1)과 같이 표시할 수 있다. 식(1)에서  $\tau$ 는 관절에서 가해지는 토크이며 J는 관절 부분의 inertia, m과 L은 각각 payload의 질량과 링크의 길이를 나타낸다. k는 유연 링크를

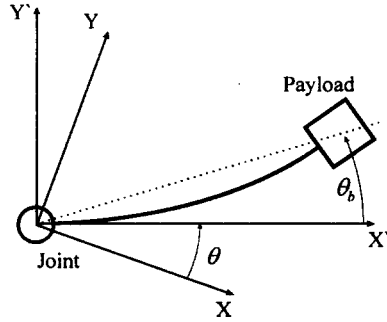


Fig. 1 Generalized coordinate system of a flexible link manipulator

$$\tau + k\theta_b = J\ddot{\theta} \quad (1-1)$$

$$-k\theta_b = mL^2(\ddot{\theta} + \ddot{\theta}_b) \quad (1-2)$$

Fig. 1에서 표시한 등가 각도에 비례하는 선형 스프링으로 가정하였을 때의 스프링 상수이다.

### 3. Fuzzy logic controller 의 설계

Fuzzy logic 을 이용하여 유연 링크 로봇의 제어하는 방식은 우선 reference position 에 대한 관절각  $\theta$  의 오차인  $e_\theta (= \theta_d - \theta)$  와 strain gage 를 이용해 측정 한 링크의 변형 속도  $\dot{\theta}_b$  를 고려하여 fuzzy logic controller 1(FLC 1)을 설계하고, 관절각 오차의 속도  $\dot{e}_\theta$  과 링크 변형의 속도  $\dot{\theta}_b$  를 이용하여 FLC 2를 설계한다. FLC 1 과 FLC 2 에서는 각각 control input 1 과 control input 2 를 계산하며 두개의 control input 을 더한 값을 제어 입력으로 사용하였다. FLC 1 은 기본적으로 관절각 오차  $e_\theta$  를 줄이고 링크의 진동을 줄이는 역할을 하며 FLC 2 는 시스템 전체의 reference 추종 성능을 향상시키는 역할을 한다.

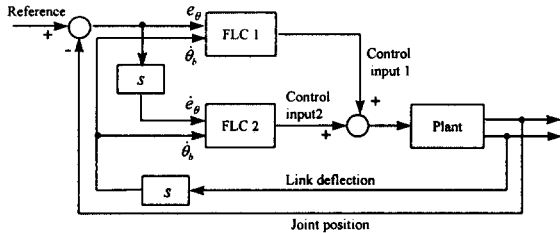


Fig. 2 Block diagram of the control system.

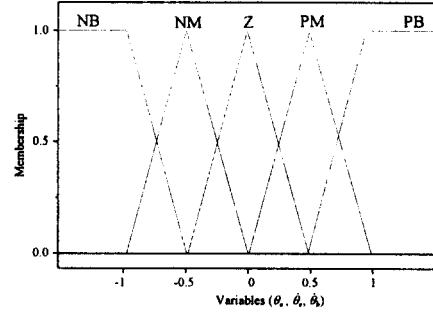


Fig. 3 The normalized membership functions.

### 3.1 Fuzzification

제어기의 설계에 사용되는  $e_\theta$ ,  $\dot{e}_\theta$ ,  $\dot{\theta}_b$  의 fuzzification 을 위해 PB(positive big), PM(positive medium), Z(zero), NM(negative medium), NB(negative big)의 5 개의 fuzzy 집합을 정의하였다. Positive, negative 의 방향의 정의는  $e_\theta$  의 경우 reference 의 값이 joint 의 위치  $\theta$  보다 CCW 에 있을 경우를 positive 로 정의하였으며  $\dot{\theta}_b$  의 경우는 CCW 의 방향을 positive 로 정의하였다. control input 1, control input 2 의 경우는 PB(positive big), PM(positive medium), PS(positive small), Z(zero), NS(negative small), NM(negative medium), NB(negative big)의 7 개의 fuzzy 집합을 정의하였으며 각각의 FLC 에서 계산된 torque 들의 부호들도 CCW 방향을 positive, CW 방향을 negative 로 정의하였다. Fig. 3 은  $e_\theta$ ,  $\dot{e}_\theta$  그리고  $\dot{\theta}_b$  에 대한 normalized 멤버쉽 함수들이다.

### 3.2 FLC 1 및 FLC 2 에 대한 rule base

FLC 1 에서는 기본적으로 관절각 오차  $e_\theta$  에 대한 control input 값을 계산한다. 그러나  $e_\theta$  만을 이용하여 제어기를 설계할 경우 reference 입력의 근처에서 system 이 심하게 가진 되는 현상이 일어나게 된다. 이러한 현상을 피하기 위해  $e_\theta$  와 링크의 진동 속도  $\dot{\theta}_b$  를 함께 이용하였다. FLC 1 은  $e_\theta$  에 비례하고  $\dot{\theta}_b$  에 반비례하는 제어 입력 control input 1 을 발생 시켜  $e_\theta$  와  $\dot{\theta}_b$  의 크기를 줄일 수 있도록 설계하였다. Table 1 에 설계된 rule 들을 정리하였다.

FLC 2 에서는 관절의 속도와 링크의 변형 속도를 이용하여 payload 의 X-Y 좌표계에 대한 속도를 추정하고 그 속도 성분에 비례하는 control input 2 를 결정하는 rule 을 적용하였다. 예를 들면  $\dot{e}_\theta$  과  $\dot{\theta}_b$  가 같은 크기를 갖고 부호가 같은 경우 payload 의 속도는

거의 Z(zero)인 경우에 해당한다. 이와 같은 방식으로 payload의 속도를 대략적으로 추정하고 계산된 속도 성분과 reference의 속도와의 차이를 계산하여 계산된 속도 차에 비례하는 control input 2를 계산하였다. 그러나  $\dot{e}_\theta$ 과  $\dot{\theta}_b$ 의 부호가 같은 경우에는 계산된 payload의 속도가 정확도에 민감하게 반응하므로 이 경우에 대해서는 control input 2 값을 Z(zero)로 결정하였다. Table 2는 FLC 2에 대한 rule base를 정리한 것이다.

Table 1 Rule base for FLC 1

$e_\theta \backslash \dot{\theta}_b$	NB	NM	Z	PM	PB
NB	NS	NS	NM	NM	NB
NM	Z	Z	NS	NS	NM
Z	PS	PS	Z	NS	NS
PM	PM	PS	PS	Z	Z
PB	PB	PM	PM	PS	PS

Table 2 Rule base for FLC 2

$\dot{\theta}_b \backslash \dot{e}_\theta$	NB	NM	Z	PM	PB
NB	Z	Z	PS	PM	PB
NM	Z	Z	Z	PS	PM
Z	NS	Z	Z	Z	PS
PM	NM	NS	Z	Z	Z
PB	NB	NM	NS	Z	Z

### 3.3 Defuzzification

Rule base에 의해 결정된 control input 1과 control input 2의 defuzzification에는 식(2)와 같이 표현되는 weighted average method를 사용하였다.

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{O_i} \bar{z}_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{O_i}} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 출력에 대한 membership 함수들(NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB)을 나타내며  $\bar{z}_i$ 는 각 membership 함수들의 중심값이다.  $\mu_{O_i}$ 는 rule base에 의해 결정된 출력의 멤버십 함수들에 대한 귀속도이다.  $z^*$ 는 defuzzification에 의해 계산된 물리량이다.

## 4. 실험 및 실험 결과

실험을 위해 1축 유연 링크 로봇을 제작하였는데 구조는 Fig. 5와 같다. 각 부위의 재원은 Table 3에 정리하였다. AC motor의 encoder 신호와 strain gage의 신호를 이용하여 제어 입력을 계산하는 과정은 DSP-board를 이용하였으며 data의 sampling과 제어 신호의 계산, 출력을 매 1 msec마다 수행하였다.

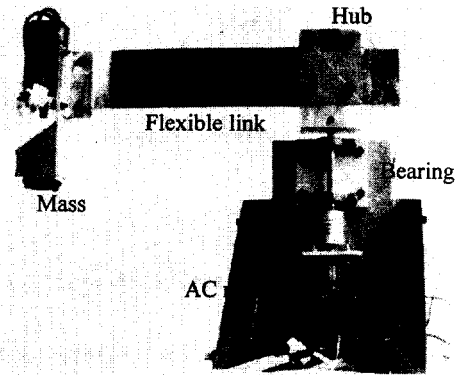


Fig. 5 The flexible manipulator

실험은 먼저 사다리꼴의 속도 profile을 갖는 reference input을 이용하여 120°를 회전하도록 하였다. Fig. 6, Fig. 7은 링크의 진동을 고려하지 않은 rigid 링크를 가정하여 설계된 PD controller를 적용한 경우의  $\theta$ 와  $\theta_b$ 의 응답이다. 각각의 graph에서  $\theta$ 의 단위는 degree로 표시하였고  $\theta_b$ 의 경우 링크 끝단의 처짐을 meter 단위로 표시하였다.  $\theta$ 와  $\theta_b$ 가 심한 진동을 하며 발산하는 현상을 볼 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 본 논문에서 제안된 fuzzy logic 제어를 이용하여 실험한 결과이다. Fig. 8은 reference 입력을 추종하는 성능이 매우 향상되었음을 보여주며 Fig. 9는 링크의 진동이 감쇄하는 응답을 보여준다. 그러나 링크의 진동이 완전히 감쇄되지 못하는 데 이는 strain gage 신호에 섞인 noise의 영향으로 제어 입력이 noise에 의해 미약하나마 계속해서 발생하기 때문이다.

Table 3 Manipulator parameters

링크 재질	Aluminum
링크 치수	2 × 100 × 300 (mm)
hub inertia	0.00075 kg m <sup>2</sup>
payload	1.3 kg

## 5. 결 론

본 연구에서는 유연한 링크를 갖고 있는 로봇에 대해서 링크의 위치 제어와 진동을 억제하는 제어를 fuzzy logic 을 이용하여 설계하였다. 그리고 실제로 제작된 시스템에 제안된 제어를 적용하여 성능을 검토하였다. 기존의 joint 만의 위치 제어를 기본으로 하는 제어의 경우는 링크 끝부분의 질량이 상대적으로 큰 경우에 대해서는 적용할 수 없었다. 본 논문에서 제안한 fuzzy logic controller 의 경우에는 reference input 을 추종하고 링크의 진동을 억제하는 효과를 동시에 나타낼 수 있음을 실험을 통해 보였다. 하지만 sensor noise 의 영향으로 인한 미세한 제어 입력의 영향으로 관절각의 오차와 링크의 진동이 완전히 제어 되지는 못하였으므로 이점에 대한 연구가 진행 되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Eric Kubica and David Wang, "A Fuzzy Control Strategy for a Flexible Single Link Robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, Atlanta, Georgia.
- [2] Vivek G. Moudgal, Kevin M. Passino, and Stephen Yurkovich, "Expert Supervisory Control a Two-Link Flexible Robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994, San Diego, California.
- [3] Patrizio Tomei and Antonio Tornambe, "Approximate Modeling of Robots Having Elastic Links," IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 18, No. 5, 1988.
- [4] Estiko Rijanto, Antonio Moran and Minoru Hayase, "Experimental Positioning Control of Flexible Arm Using Two-Degrees-Of-Freedom Controller," AIM'97, Tokyo, Japan, 1997
- [5] Timothy J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications, McGraw-Hill, 1995.

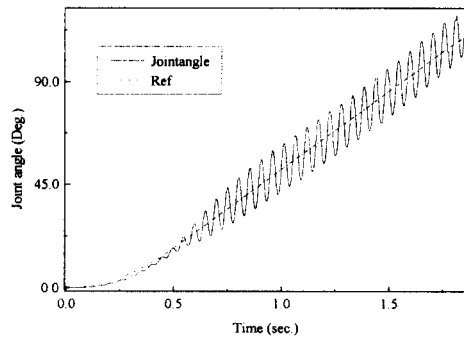


Fig. 6 Response of joint angle.(rigid body controller)

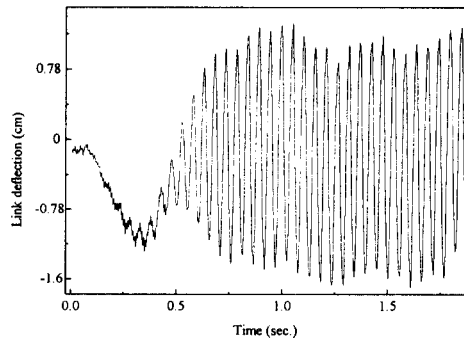


Fig. 7 Response of link deflection (rigid body controller)

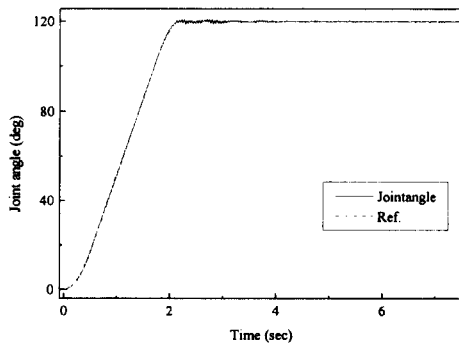


Fig. 7 Response of joint angle(FLC)

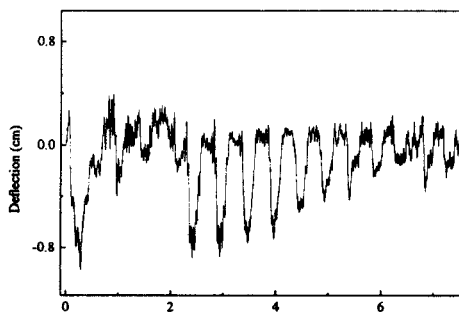


Fig. 7 Response of joint angle.(FLC)