

퍼지 제어를 이용한 유연한 로봇팔의 선단위치 제어에 관한 연구

정상철, 안영주, 이형기
부경대 전기·제어계측공학부

A Study on Position Control of a Flexible Robot Manipulator using Fuzzy Logic Controllers

S.C. Jeong, Y.J. An, H.K. Lee
Pukyong National University

Abstract - This paper deals with a single flexible link robot system using two fuzzy logic controllers(FLC). The one is used for controlling the rigid position of the beam while it is rotated from one position to another. The other is adopted to reduce the oscillation caused by the rigid body motion.

Many simulations are carried out to investigate characteristics of the controlled system. There are good results compared with other systems using PD controller. And also the system could be exactly controlled by the proper setting conditions for FLC.

1. 서 론

현재 산업 현장의 자동화와 생산성 증대 및 해양, 항공, 우주 등 여러 분야에서 강체 로봇이 많이 응용되고 있다. 그러나 강체 로봇 자체의 무게와 크기로 인하여 넓은 공간을 차지하고 구동 장치가 커지며 구동 에너지가 증가하는 많은 단점을 가지고 있다. 이러한 강체 로봇이 가지는 단점을 보완하기 위해 로봇의 무게를 보다 가볍게 함으로써 유연성, 에너지의 효율성 및 안정성 등을 증대시키는 유연한 로봇팔에 관한 연구가 필요하게 되었다. 그러나 유연한 로봇팔은 유연성으로 인해 동작시 진동을 일으키므로 정밀한 위치 제어나 궤적 제어를 위해서는 진동을 효율적으로 제어해야 한다는 문제점을 가지고 있다. 로봇의 경량화와 고속운전을 할 경우 탄성을 고려한 시스템 모델을 개발하여야 하며 정밀한 동역학 방정식과 효율적인 제어 알고리즘이 필요하게 된다.

본 논문에서는 유연한 로봇팔 시스템을 제어하기 위한 정확한 수학적 표현이 필요치 않는 제어방법인 퍼지 로직 제어를 도입하여 유연한 로봇팔의 위치제어를 하고자 한다. 이와 같은 제어 문제들은 숙련자의 경험적 지식과 제어 기술자의 지식을 제어 루프 안으로 삽입함으로써 해결된다.

유연한 단일 링크 로봇팔에 퍼지 로직 제어를 적용하여 시스템의 응답특성을 고찰하였다. 첫 번째 퍼지 제어(강체 제어)는 임의의 위치에서 다른 위치로 회전할 때 빔의 허브동작을 조절하도록 설계되고, 두 번째 퍼지 제어(탄성변형 모드제어)는 선단에 나타나는 진동을 허브에서 감소시키도록 설계해서 종래의 선형 고전 제어계의 PD제어를 이용해서 얻은 결과와 비교한다.

2. 유연한 로봇팔의 모델링

2.1 시스템의 구성

그림 1은 유연한 로봇팔의 구조를 나타낸다. 허브는 모터에 부착되어 회전하고, 가늘고 긴 유연한 로봇팔은 일정한 단면적과 물리적인 성질을 가지고 작동시 비틀림이 없이 굽힘 변형만 있는 것으로 가정한다. 로봇팔의 임의의 점 x 에 대한 탄성변형 $w(x, t)$ 는

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \tag{1}$$

로 표현하고, $\phi_i(x)$ 는 로봇팔의 i 번째 모드의 횡의 정도를 나타내는 고정-자유단 구조에서의 고유함수이며 다음 식으로 정의된다. [1][2]

$$\phi_i(x) = c_i [(\cosh \beta_i x - \cos \beta_i x) - \sigma_i (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x)] \tag{2}$$

$$\sigma_i = \frac{(\sinh \beta_i l - \sin \beta_i l)}{(\cosh \beta_i l + \cos \beta_i l)} \tag{3}$$

여기서 l 은 유연한 로봇팔의 전체길이, c_i 는 일정한 값을 갖는 임의의 상수이며, β_i 는 다음 식의 해이다.

$$1 + \cos \beta_i l \cdot \cosh \beta_i l = 0 \tag{4}$$

식(1)의 $q_i(t)$ 는 $\phi_i(x)$ 에 상응하는 시간의 함수인 i 번째 일반화 좌표이고, n 은 탄성변형을 나타내기 위해 사용되는 가정된 모드의 수로서 모델의 정확도를 향상시킬 때 증가되고, 고유진동수는 $\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{EI/\sigma}$ 이다.

전체 변위 $y(l, t)$ 는 다음 식과 같다.

$$y(l, t) = \theta(t)l + w(x, t) \tag{5}$$

2.2. 운동방정식의 유도

일반적으로 비감쇠계의 자유진동에서는 운동에너지와 위치에너지로 구분할 수 있으며, 운동에너지는 속도에 의하여 질량에 저장되며, 위치에너지는 탄성변형에 의한 탄성에너지의 형태로 저장되거나 중력장 등에서 행하여진 일의 형태로 저장된다. 또 보존계인 경우에는 모든 에너지의 합이 일정하므로 에너지 보존법칙을 이용하여 운동에 대한 미분방정식을 유도할 수 있다.

2.2.1. 운동과 위치에너지

시스템의 운동에너지는 허브 부분과 유연한 로봇팔 부분 및 로봇팔의 선단 부분 질량의 3부분으로 나타낼 수 있고, 여기서 선단을 제외한 로봇팔의 전체 운동에너지는 다음과 같다.

$$K_{tot} = K_{hub} + K_{link} = \frac{1}{2} [I_h \dot{\theta}^2 + \rho A \int_0^l (x^2 \dot{\theta}^2 + \dot{w}^2 + 2ux \dot{\theta} + w^2 \dot{\theta}^2) dx] \tag{6}$$

θ 는 로봇팔의 강체 운동을 나타내는 각속도이다. 또 위치에너지는 로봇팔의 위치에너지와 끝지점 질량의 위치에너지로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 끝지점 질량의 위치에너지와 중력에 의한 위치에너지는 무시한다. 그러므로 탄성변형에 의한 위치에너지는 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$V = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (7)$$

E 는 로봇팔의 탄성계수이고, I 는 로봇팔 횡단면의 중립축에 관한 면적 관성모멘트이다.

2.2.2 운동 방정식

유연한 로봇팔의 운동방정식의 유도는 시스템에 외력이 작용하는 경우 Euler-Lagrange 방정식을 적용할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau$$

τ 는 액추에이터를 통해 유연한 로봇팔을 구동하기 위해 모터의 출력 토크이며, $\tau = G \cdot K_t \cdot v$ 이고, G 는 서보 증폭기의 이득, K_t 는 모터의 토크 상수, v 는 모터에 공급되는 전압이다.

Lagrange 방정식은 $L=K-V$ 로써, 식(6)과 (7)을 식(8)에 적용하여 상태공간 방정식과 출력방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_i^2 a_i}{I_h} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_i^2 \left[1 + \frac{a_i^2}{I_h} \right] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{GK_t}{I_h} \\ 0 \\ -\frac{GK_t}{I_h} a_i \\ 0 \end{bmatrix} \times v \quad (9)$$

$$y = [0 \ 0 \ 0 \ \phi] [\dot{\theta} \ \theta \ \dot{q}_1 \ q_1]^T$$

이다.

3. 강제 제어를 사용한 위치제어 시스템

모든 제어기 설계에 있어서 제어 계획의 목표를 명확히 할 필요가 있으므로 먼저 전형적인 PD제어기를 사용하여 시스템의 안정도를 고찰하고 퍼지제어기를 도입하여 PD제어기와 비교한다. [6][7]

퍼지제어기는 퍼지화부, 퍼지추론부, 비퍼지화부의 3요소로 구성된다. 퍼지화부는 크리스프한 입력 수치를 퍼지집합 변수로 변환하며, 퍼지추론부는 전형적인 위치 제어 추론을 행하고, 비퍼지화부는 퍼지한 제어량을 무게 중심법에 의해 아날로그 값으로 변환한다. 또 시스템에 적용할 퍼지 제어기를 설계하려면 우선 시스템에 적합한 퍼지 제어규칙을 찾는 일이 우선되어야 하는데, 이는 시스템의 기본적인 응답특성을 먼저 얻은 후 이를 기초로 오차와 변화율에 대한 궤적에서 퍼지제어규칙을 구함으로써 가능해진다.

임의의 시각 t 에서 측정된 유연한 로봇팔의 선단위치를 $\theta(t)$ 라 할 때, 선단위치의 변화량 ce 는 식(10)과 같이 표현된다.

$$ce = \theta(t) - \theta(t-1) \quad (10)$$

퍼지 제어기의 입력변수를 e 와 ce 로 하고, 출력 제어

변수를 $f(t)$ 라 하면 이들의 관계는 다음과 같다.

만일 e 가 $\circ\circ$ 이고 ce 가 $\circ\circ$ 이면, $f(t)$ 는 $\circ\circ$ 이다. 예를 들어 목표치에 빨리 도달하고 진동을 억제하는 제어규칙의 한 가지를 작성하면 " $e=PB$ 이고 $ce=AZ$ 이면, $f(t)=PZ$ 이다"로 된다.

이와 같은 방법으로 하여 나머지 다른 상황에 대해서도 제어규칙을 작성하여 유연한 로봇팔의 위치 제어를 위한 퍼지 제어기의 제어규칙을 정리하면 표 1과 같다.

표1 제어규칙

		error								
		PB	PM	PS	PZ	AZ	NZ	NS	NM	NB
△	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PZ
	PM	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	AZ
	PS	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	NZ	NM
	PZ	PM	PM	PS	PS	PZ	PZ	NZ	NS	NM
	AZ	PZ	PS	PS	PZ	AZ	NZ	NS	NS	NZ
	NZ	PM	PS	PZ	NZ	NZ	NS	NS	NM	NM
	NS	PM	NZ	NS	NS	NS	NM	NM	NB	NB
	NM	AZ	NS	NM	NB	NM	NB	NB	NB	NB
	NB	NZ	NM	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

표 1을 바탕으로 변수들에 대한 소속함수를 정의하면 그림 1로 된다.

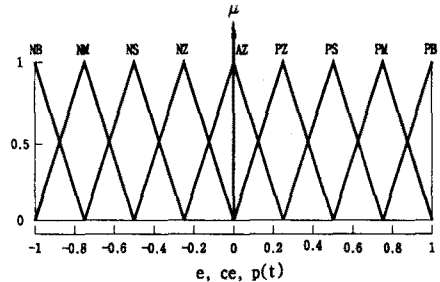


그림 1. 퍼지제어의 소속함수

4. 강제 제어기와 탄성변형 퍼지제어기를 이용한 위치제어 시스템

효과적인 위치제어를 위하여 선단 진동을 제어 계획에 포함시킨다. 이를 위해 빔의 선단 진동을 억제하는 궤환 루프를 추가하여 제어대상의 입력으로 이용한다. 그러므로 제어대상인 모터에 대한 입력은 두 개의 제어기 출력으로 표현되고, 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = G_1(e, \dot{e}) + G_2(w, \dot{w}) \quad (11)$$

또한 이를 블록도로 나타내면 그림 2이다.

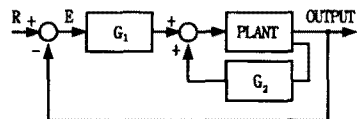


그림 2. 탄성변형모드제어기가 추가된 블록도

탄성변형모드의 제어규칙은 제어하고자 하는 빔의 진동에 의한 속도와 탄성변형을 근거로 작성하며, 이에 관한 규칙은 다음과 같다.

선단이 (-)로 변형되면 선단을 정상위치로 되돌아오도록 하기 위해 토크는 감소되어야한다. 이와는 반대로 선단이 (+)로 변형되면 허브 동작이 선단을 따라 잡기 위해 토크가 증가되어야한다. 그림3은 계단입력에 대한 각 제어기의 출력 및 조작량 변화를 나타낸 것이다.

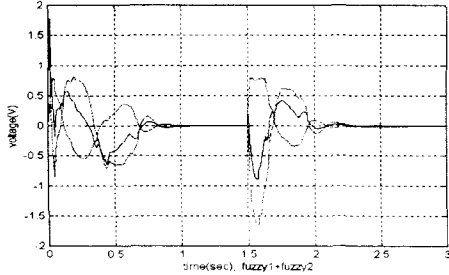


그림 3 계단 입력의 조작량 변화

5. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 적용한 제어기의 성능 평가를 위하여 PD 제어기, PD+퍼지제어기, 퍼지제어기 및 퍼지+퍼지제어기의 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하였다. 시스템의 입력으로는 계단 입력과 0.2초까지 점진적인 증가입력을 사용하였다. 그림 4는 계단입력을 인가한 경우를 비교한 결과이다.

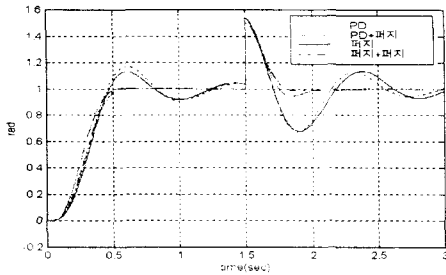


그림 4 계단 입력과 외란에 대한 응답 특성

그림 4로부터 알 수 있듯이 강체 제어기만을 사용한 시스템의 경우 계단 입력에 대한 초기응답과 외란에 대한 응답은 모두 큰 오버슈트를 보인 후 감쇠진동을 하지만, 탄성변형모드제어기를 도입한 경우는 1%이내의 오버슈트 및 언더슈트를 가지면서 정상상태에 도달하였다.

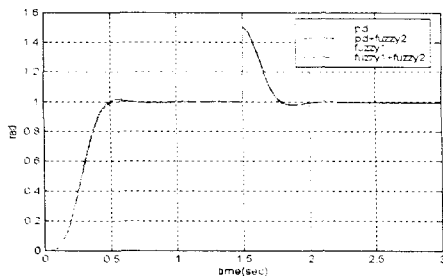


그림5 0.2초까지 증가 입력과 외란에 대한 응답 특성

그림 5는 0.2초까지의 점진적인 증가입력을 사용한 경우의 결과이다. 그림 5에서는 4가지 제어기의 경우 모두 비슷한 응답특성을 나타내고 있다. 이상의 시뮬레이션 결과로부터 탄성변형부분에 퍼지제어기를 적용하여 선단 변형에 대한 보상을 함으로써 강체 제어기만을 사용한 경우에 비하여 개선된 응답 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

또한 고전적인 제어기(PD제어기)와 비교하면 탄성변형 모드에 퍼지제어기의 도입은 비교적 잘 동작함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서 퍼지 제어기는 강체 제어기 모드와 탄성 변형 모드에서 매우 만족스러운 응답을 나타내었다. 이 제어기를 사용해서 얻어진 선단의 최대 탄성변형은 고전적인 PD제어기를 사용한 시스템보다 우수한 결과를 나타내었다. 탄성변형에 대한 모드 제어기의 추가는 초기 안정도와 외란에 대해서도 응답 특성을 개선시켰다. 퍼지 제어기가 제어시스템에 관한 정확하고 이론적인 분석이 없는 것을 감안하면, 제안된 퍼지 제어 방법이 유연한 로봇팔 시스템에 여러 가지 부하 변화에도 잘 적용되고, 모델링이 어려운 다른 비선형 시스템에 대해서도 퍼지제어기를 사용하면 제어가 가능하다는 것을 보여주고 있다.

본 제어기에 뉴로퍼지를 사용하여 학습기능을 부여하면 여러 가지 파라미터에 잘 적응하는 시스템이 될 것이며, 단순한 시스템 및 계속적인 수정이 필요한 경우에는 퍼지제어기를 사용하여 안정된 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Leonard Meirovitch, "Analytical Methods in Vibrations", Macmillan Publishing Co, pp.126-166, 1996
- [2] 신효필, 정영무, 강이석, "적용 입력다듬기기를 이용한 유연한 조작기의 진동제어", 제어, 자동화, 시스템공학 논문지, 제5권 2호, pp220-227, 1999
- [3] Spong/Vidyasagar저, 강철구, 권인소, 윤중선, 정완균, 역, "로봇 동역학과 제어", 회중당, 1998
- [4] 이장무, 이종원, 박영필, "기계진동-이론과응용-", 회중당, 1998
- [5] Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall, pp126-166, 1994
- [6] Erin Kubica, David Wang, "A FUZZY CONTROL STRATEGY FOR A FLEXIBLE LINK ROBOT", University of Waterloo, 1998
- [7] 채석, 오영식, "퍼지 이론과 제어", 청문각, 1997