

유연 로봇 매니퓰레이터의 퍼지 제어기 설계

이승준, 이기성
홍익대학교 전기제어공학과

Design of a Fuzzy Logic Controller for the Flexible Manipulator

Seungjun Lee, Keeseong Lee
Department of Electrical & Control Engineering
Hong-Ik University

Abstract

A position control algorithm of the flexible manipulator is studied. The proposed algorithm is based on a Fuzzy Logic Control(FLC) method using the human's experiences. FLC does not need a dynamic modeling of a flexible manipulator. A Fuzzy logic controller is designed that the end-point of the flexible manipulator tracks the desired trajectory. The control input to the process is determined by the error and variation of error. Simulation result shows a robustness of FLC compared with the PID control algorithm.

1. 서론

현대 제조업 등 산업현장에서는 공장자동화가 점진적으로 실현되면서 인간의 작업을 대체할 수 있는 로봇 기술의 연구가 급속히 증대되고 있다. 현재 대부분의 공장에서는 인간비의 절감과 공정의 효율성을 위해 조인트 로봇, 용접 로봇 등이 이용되어 보다 정밀하고 신속한 작업을 수행하고 있으며 제품의 운반에는 무인 운반차(AGV : Automatic Guided Vehicle)가 도입되어 능동적인 운반수단으로 사용되고 있다. 이러한 무인 운반차나 스스로 작업 위치를 찾아갈 수 있는 자율주행 운반체의 경우 지금까지는 안내로봇 또는 단순한 운반 수단으로만 사용되어 왔다. 그러나, 극한 조건에서 인간의 일을 대신하기 위해서는 자율주행 운반체를 장착해야 한다. 기존의 매니퓰레이터는 매우 무겁고 견고한 재료로 제작되어 왔다. 이러한 무거운 매니퓰레이터는 자율주행 운반체에 장착하기 어렵고, 장착한다고 하더라도 자율주행 운반체의 운반 효율이 떨어져지게된다. 그러므로, 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위한 대안으로 유연 로봇 매니퓰레이터의 설치를 제안하였다. 유연 로봇 매니퓰레이터는 기존의 매니퓰레이터보다 가볍고, 싸고, 안전하며 고속으로 사용할 수 있다. 하지만, 유연 로봇 매니퓰레이터는 기존의 매니퓰레이터에 비해서 운동방정식이 복잡하기 때문에 제어기가 까다롭다는 단점이 있다.

기존의 제어기들은 제어 대상의 운동방정식을 알고 있을 때만 제어가 가능하다. 그러나, 유연 로봇 매니퓰레이터와 같이 비선형성적인 특성을 가지고 있는 경우 운동 방정식을 알고 있다고 하더라도 제어하기가 까다롭다. 더욱이, 전통적인 PID(Proportional, Integral, Differential) 제어기의 경우 각각의 제어성분에 대한 이득값이 고정되어 있기 때문에 비선형적인 특성에 적절히 대응하지 못하는 단점을 가진다. 하지만 퍼지제어기의 경우 환경변화에 대해서 능동적으로 대처할 수 있고 운동방정식을 모른다고 하더라도 작업 수행을 성공적으로 수행할 수 있다. 본 논문에서는 유연 로봇 매니퓰레이터 위치제어를 위해서 퍼지제어기를 설계하였고, 이 제어기의 성능을 PID제어와 비교해 보았고, 같은 부하를 바꾸어 가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 유연 로봇 매니퓰레이터 위치제어에 있어서 퍼지제어의 방법이 장인함을 보여준다.

2. 유연 로봇 매니퓰레이터의 운동 모델

본 연구는 1995년 한국과학재단 핵심 전문 연구과제의 지원에 의하여 이루어졌음

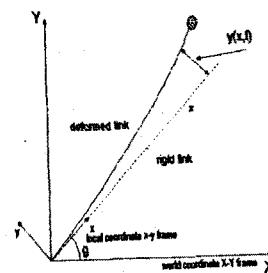


그림1. 유연로봇 매니퓰레이터의 구조

유연 로봇 매니퓰레이터의 위치를 나타내기 위해서는 지역 표기(x-y)와 전역좌표기(X-Y)를 정의해야 한다(그림1). $y(x, t)$ 는 시간 t , 거리 x (지역좌표기)일 때 유연한 매니퓰레이터와 유연하지 않은 매니퓰레이터와의 변위를 말하고, $\theta(t)$ 는 유연하지 않은 매니퓰레이터의 기준선과의 각도를 말한다. 유연 로봇 매니퓰레이터의 운동 방정식은 Euler-Bernoulli 방정식으로 알려진 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

E : Modulus of Density

I : Moment of Inertia

ρ : Density of Material in kg/m

$y(x, t)$: Transverse Displacement

위의 $y(x, t)$ 은 시간 t 과 변위 x 에 의존하는 값이다. $y(x, t)$ 는 변수 분리법에 의해 시간에 의존하는 $\Phi_i(x)$ 와 시간에 의존하는 $\zeta_i(x)$ 로 나타냄으로 해를 구할 수 있다. 그리하여, $y(x, t)$ 를 표수 형태로 나타내면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

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

많은 과거의 연구사례를 통해서 식(2)의 유한한 수의 항을 이용해서도 유연 로봇 매니퓰레이터의 동작을 표현할 수 있음을 알수있다. 본 논문에서는 4개의 기저함수를 이용해서 유연 로봇 매니퓰레이터의 횡단변위를 표현하였다. 좌표중심에서의 횡단변위는 무시할 정도로 영향을 미치지 않으므로 본 논문의 시뮬레이션 과정에서는 생략하였다. 그러므로, 지역 좌표계에서 횡단변위는 아래 식과 같이 나타난다[2].

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^4 \Phi_i(x) \zeta_i(t) \quad (3)$$

여기서 $\Phi_i(x), i=1, 2, 3, 4$ 는 다음의 경계조건에 의해서 구할 수 있다[3].

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

식(4)의 해는 다음의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$y(x, t) = c_1(t) + c_2(t)x + c_3(t)x^2 + c_4(t)x^3 \quad (5)$$

시간에 의존하는 함수인 $\zeta_1(t), \zeta_2(t), \zeta_3(t), \zeta_4(t)$ 는 유연 로봇 매니퓰레이터의 경계조건을 의미한다.

$$y(0, t) = \zeta_1(t) \quad \frac{\partial y(0, t)}{\partial x} = \zeta_2(t)$$

$$y(L, t) = \zeta_3(t) \quad \frac{\partial y(L, t)}{\partial x} = \zeta_4(t) \quad (6)$$

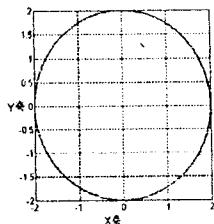


그림 8. 기준 궤적

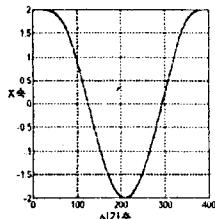


그림 9. x축 기준궤적

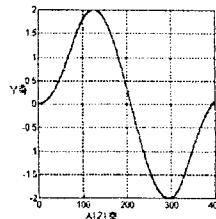


그림 10. y축 기준궤적

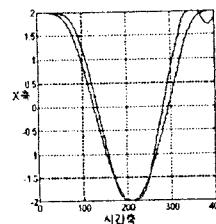


그림 17. PID제어 추종결과

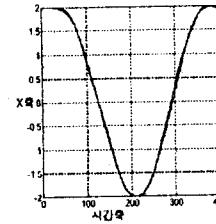


그림 18. 퍼지제어 추종결과

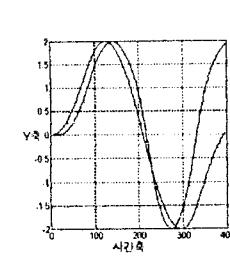


그림 19. PID제어 추종결과

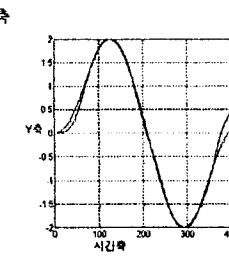


그림 20. 퍼지제어 추종결과

속도 : 1m/s
끌점무게 : 0.5 Kg

X축

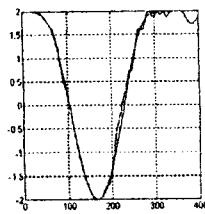


그림 11. PID제어 추종결과

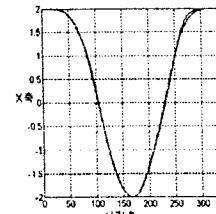


그림 12. 퍼지제어 추종결과

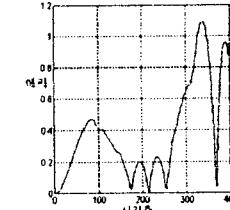


그림 21. PID제어 추종결과

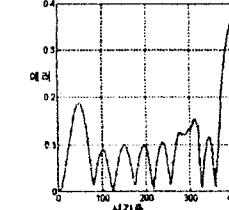


그림 22. 퍼지제어 추종결과

5. 결론

빔의 끝에 부하가 없는 경우이거나 속도가 느리고 끌점무게가 가벼울 경우에는 PID제어와 퍼지제어기는 성능의 차이를 보이지 않지만, 속도가 빠르거나 끌점 무게가 무거운 경우에는 퍼지제어기의 경우 모델이 변하더라도 예리에 따라 동적으로 대처하기 때문에, 전 세 빔의 무게가 0.14Kg인 베니큐레이터의 3배정도의 부하(0.5Kg)에서도 퍼지제어기의 경우 기준궤적을 추종함을 볼 수 있다. 하지만 퍼지제어의 경우 규칙을 추출하기가 쉽지 않고 우수한 성능을 보이기 위해서는 많은 실험 결과가 필요하다. 그러므로 후에는 규칙을 자동 생성하는 퍼지제어기와 멤버십함수 중심값 조정을 위한 적용제어기를 설계해서 적용해야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] C. H. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller Part I and Part II", *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, VOL. 20, NO. 2, pp 404-435, March/April 1990.
- [2] A. Midha, A.G. Erdman, and D.A. Froehrib, "Finite Element Approach to Mathematical Modeling of High Speed Elastic Linkages", *J. of Mechanism and Machine Theory*, pp. 603-618, VOL. 13, 1978
- [3] H. I. Laursen, "Structural Analysis", McGraw-Hill, New York, 1969.
- [4] A. J. Koivo, K.S. Lee, "Self-tunning Control of a Non-rigid Planar Manipulator", *IMACS/IFAC Int. Symp. on Modeling and Simulation of Distributed Parameter Systems*, pp. 593-598, Hiroshima, Japan, Oct. 6-9 1987.
- [5] M. Figueiredo, F. Gonide, A. Rocha and R. Yager, "Comparison of Yager's Level Set Methode for Fuzzy Logic Control with Mamdani's and Hasen's Methode", *IEEE Trans. Fuzzy System*, VOL. 1, NO. 2, May 1993.
- [6] 황인호, "신경회로망을 이용한 퍼지시스템의 자동구축", 용인대학교 석사학위 논문, 1993.
- [7] 이기철, "밀티플 베이스 구조의 퍼지 적용제어기", 연세대학교 석사학위 논문, 1992.
- [8] 윤윤장, 조성원, 최경삼, "퍼지 교통 신호 제어에 관한 연구", 한국 퍼지 시스템 학회 춘계학술대회 논문집, 1994.
- [9] 이광형, 오길록, 공지, "퍼지 이론 및 응용 1.2", 흥동과학출판사, 1992

그림 13. PID제어 추종결과

그림 14. 퍼지제어 추종결과

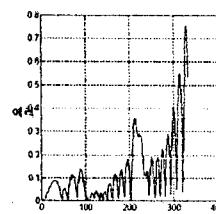


그림 15. PID제어 추종결과

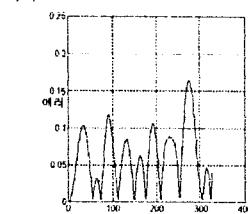


그림 16. 퍼지제어 추종결과

속도 : 3m/s
끌점무게 : 0.5 Kg

X축

식(3), 식(5)과 식(6)을 이용하여 $\Phi_i(x)$, $i=1, 2, 3, 4$ 를 구하면

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

$$\Phi_3(x) = \frac{3}{L^2}x^2 - \frac{2}{L^3}x^3, \quad \Phi_4(x) = -\frac{1}{L}x^2 + \frac{1}{L^2}x^3 \quad (7)$$

그림 1에서 유연 로봇 메니퓰레이터의 전역 좌표계에서의 위치를 구하면

$$P_x = x \cos \theta - y \sin \theta \quad P_y = y \sin \theta + y(x, t) \cos \theta \quad (8)$$

유연 로봇 메니퓰레이터의 동역학 방정식은 위치에너지와 운동에너지에 의한 Lagrange 방정식에 의해 유도 할 수 있다. Lagrange 함수 T 는 위치에너지와 운동에너지의 차로 표현한다.

$$T = V - P \quad (9)$$

여기서 V 는 위치에너지를 나타내고 P 는 운동에너지를 나타낸다.

Lagrange 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial q_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} = r_i \quad (10)$$

r_i : i번째 토크 변수

r_f : 외부 Torque

위의 식(9)에 의해서 본 논문에서 시뮬레이션한 동역학 방정식을 구할 수 있다. 다음 식은 유연 로봇 메니퓰레이터의 동역학식을 나타낸다[4].

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3}\rho L^3 + \zeta' M \zeta & H \\ H & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\zeta} \\ \ddot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - 2 \theta \zeta' M \zeta \\ \theta^2 M \zeta - K \zeta \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $\zeta = [\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4]^T$, τ 는 외부 토크이고,

$$M = \rho \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13L}{35} & -\frac{11L^2}{210} \\ 0 & 0 & -\frac{11L^2}{210} & \frac{L^3}{105} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L^3} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{7L^2}{20} & -\frac{L^3}{20} \end{bmatrix}^T$$

3. 퍼지제어기(FLC : Fuzzy Logic Control)

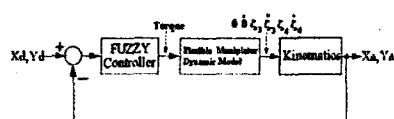


그림 1 퍼지제어기 구조

유연 로봇 메니퓰레이터의 위치제어를 수행하기 위해 FLC 사용하였고 이때 제어기의 구조는 그림2와 같다. FLC의 입력값으로는 에리(현재 위치-원하는 현재 위치)와 에리의 변화량을 사용하였고 출력은 진동을 최소화하며 기준 궤적을 추종하게 하는 토크값이다. 토크 값은 유연 로봇 메니퓰레이터의 운동 방정식에 인가되어 점점의 위치가 Feedback되어 Servo제어를 수행한다. 주분법은 if~, then 규칙을 이용하여 서술하였으며 Min, Max연산을 사용하였다. 비퍼지화 방법은 Yager 의 레벨 집합방법을 이용하였다. 이방법은 무게 중심법에 비해 성능이 우수하고 계산양도 작아진다(그림3)[5][6].

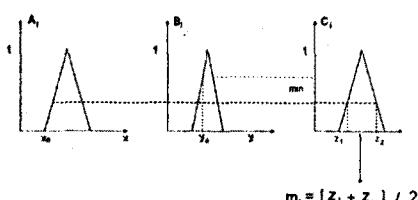


그림 2 Yager의 비퍼지화법

$$r_i = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \quad (12)$$

$$Z_0 = \sum_i m_i r_i \quad (13)$$

r : 규칙의 수

m_i : 멤버십 함수의 중심

위치 제어를 수행하기 위해 제안된 추론 규칙은 그림 4와 같다. 아래의 규칙은 기준 궤적을 추종하도록 만들어졌다. 입력 변수로는 에리와 에리의 변화량을 사용하였다. 규칙의 예를 들면, 에리가 크면 세어량은 기준 입력을 충분히 따라가도록 해야한다. 그리고 만약 에리가 작고 에리의 변화율이 크다면 세어량은 시스템 출력이 원하는 값으로 발산하지 않도록 충분히 억제되어야 한다. 또한 출력 응답이 이미 기준 입력을 지나 더 증가하려고 한다면 세어량은 출력의 기준을 따라 가게 충분히 작아야 한다. 이와 같은 관찰을 토대로 아래의 제어규칙을 만들었다 [1][7][8].

ERROR의 변화

LN MN SN ZE SP MP LP

LP	MN	MN	MN	MN	LN	LN	LN
MP	SN	SN	SN	MN	MN	LN	NN
ZE	SP	SP	ZE	ZE	ZE	SN	SN
SN	LP	MP	MP	MP	MP	SP	SP
MN	LP	LP	MP	MP	SP	SP	SP
LN	LP	LP	LP	MP	MP	MP	MP

그림 4. 추론 규칙

LP : Large Positive MP : Medium Positive
SP : Small Positive ZE : Zero Equal
SN : Small Negative MN : Medium Negative
LN : Large Negative

총 49개의 규칙을 사용하였고 에리와 에리의 변화에 대한 멤버십값은 아래 그림5에서 나타내 주었다. 그림7은 토크의 멤버십함수이다. 토크의 멤버십 함수는 유연 로봇 메니퓰레이터의 속도의 빠르고 늦음에 따라 전체 멤버십 함수의 폭이 선형적으로 변화한다. 그림7은 그중 가장 작은 값을 표시한 것이다.

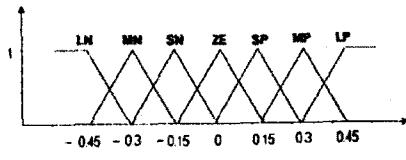


그림 5. 에리의 멤버십함수

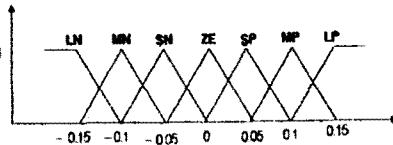


그림 6. 에리 변화량의 멤버십함수

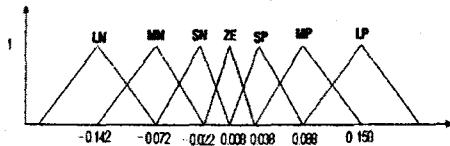


그림 7. 토크의 멤버십함수

4. 실험 결과 및 검토

시뮬레이션에 사용한 경로는 반지름이 2m인 원모양의 경로이며 속도가 1m/s일 때는 샘플 Data 의 개수는 335개(샘플시간 50ms)이고, 3m/s인 경우에는 샘플 Data 의 개수는 400개(샘플시간 12.5ms)이다(그림 8). 절정의 속도는 최대속도를 1m/s에서 3m/s로 늘려가면서 실행하였다. 유연 로봇 메니퓰레이터의 링크제로는 ρ 가 0.07Kg/m인 많은 암무미늄빔을 사용하였고, 길이는 2m이다. PID제어기와 퍼지제어기의 성능비교 결과는 그림 11~22에서 보여준다. PID제어기의 이득성분의 값은 한계감도법(Ultimative Sensitive Method)을 사용하였다.