

로봇 관절의 백래쉬 보상을 위한 퍼지 제어기 설계

A Fuzzy Controller Design for Compensating Backlash at Robot Joint

안 원 기* · 김 병 른** · 김 진 환**** · 허 욱 렬***
 (Won Ki Ahn · Byung Yoon Kim · Jin Hwan Kim · Uk Youl Huh)

Abstract - Backlash between meshing gear teeth causes impact, tracking error and undesired vibrations. It is usually minimized by precision gear, spring-loaded anti-backlash gears and precise mechanical adjustment. Although these techniques can help to reduce the backlash gap, its cost is relatively high and performance is limited. And the classic controller is insufficient to control the dynamic system with nonlinearity. For these reason, a fuzzy controller is proposed to compensate the backlash effect at a robot system. The input variables are position error and change in error. The output variable can be defined by input voltage of motor. The performance of a fuzzy controller is verified by comparing with a PID controller. The results show that the undesired vibration is suppressed. And then diminishing the position error is observed.

Key Words : Fuzzy Controller, Backlash, Gear, Motor, Nonlinearity

1. 서 론

백래쉬는 기어로 이루어진 동력 전달 장치에서 항상 나타나는 현상이다. 기어 사이에 존재하는 백래쉬는 제어 시스템의 성능을 제한하는 비선형 요소로서 시스템 응답의 지연, 진동 그리고 비정확성을 유발한다. 특히 로봇 시스템에서 백래쉬 때문에 발생하는 진동은 안정도와 정밀도를 요구하는 시스템에서 중요한 문제점으로 부각된다. 백래쉬가 있는 시스템에 대한 접근 방법 중에 Tao와 Kokotovic은 퍼지 적응 제어 접근 방법을 사용하였다[1][2].

본 논문에서는 감속기를 갖는 로봇의 독립 관절을 대상으로 한다. 하체만으로 구성된 이족 보행 로봇의 무릎 관절로서, 모터의 마찰력 등 모델링 할 때 고려하지 않은 불확실한 요소도 갖고 있다. 기어 백래쉬에 의한 영향을 보상하기 위해 백래쉬를 제외한 다른 비선형적 요소를 무시하고 백래쉬에 의한 영향만을 고려하도록 한다.

맞물리는 두 기어의 분리가 일어날 때 백래쉬 만큼의 변위를 움직이기 위한 최대 에너지를 최단 시간동안 가하여 두 기어가 항상 맞물려 있도록 하는 것이 백래쉬 제어의 기본 개념이다. 퍼지 제어기를 사용하여 백래쉬로 인한 영향을 감소시킴으로써 로봇 관절의 궤적 추종 오차 및 진동을 줄이고 시스템의 정밀도와 안정성을 높일 수 있음을 입증한다.

2. 본 론

대상 시스템은 그림 1과 같다[3]. 모터에서 발생한 토크가 기어를 통해 축을 회전시키는 힘을 제공하며 두 기어 사이의 상대 변위와 백래쉬의 차이 때문에 부하축에 전달되는 토크는 0 또는 임의의 값을 갖는다. 이때 전달된 토크가 2차축을 회전시킨다.

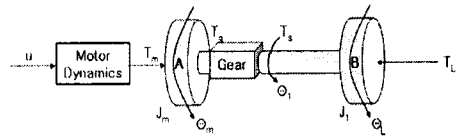


그림 1. 제어 대상 시스템

2.1 비선형 백래쉬 모델

기어의 상대적 변위와 백래쉬 간격에 따라 출력축에 전달되는 위치값은 수식적으로 식(1)과 같이 표현되며, 식(1)의 θ_1 , θ_L , θ_m/N , b , β 는 각각 출력축 기어의 위치, 출력축 부하의 위치, 기어비를 고려한 모터의 위치, 백래쉬 간격, 두 기어 사이의 상대 변위를 나타낸다. 전달된 위치값에 따른 출력축의 토크는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \begin{cases} \theta_L & , |\beta| < b/2 \\ \frac{\theta_m}{N} - b/2 & , |\beta| > b/2 \\ \frac{\theta_m}{N} + b/2 & , |\beta| < -b/2 \end{cases} \quad \text{식(1)}$$

저자 소개

- * 안원기 : 仁河大學 電氣工學科 碩士課程
- ** 김병른 : 仁河大學 電氣工學科 博士課程
- *** 허욱렬 : 仁河大學 電氣工學科 正教授 · 工博
- **** 김진환 : 仁河專門大學 電氣情報學科 副教授 · 工博

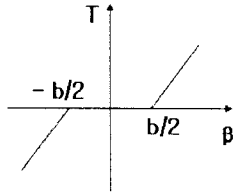


그림 2. 백래쉬 효과

2.2 제어기 구성

그림 3은 제어 대상 시스템을 나타낸다. DC모터와 출력측은 베벨 기어로 연결되어 있으며, 모터의 회전운동이 베벨 기어에 의해 수직방향으로 바뀌게 된다. 제어 대상 시스템은 베벨 기어 사이에 백래쉬를 포함하며 백래쉬 값은 베벨 기어의 한쪽 이에 맞물렸을 때의 출력 위치 값과 반대쪽 이에 맞물렸을 때의 출력 위치 값의 차로 계산한다. 계산된 백래쉬 값은 약 3.09도이고 감성계수는 20.944 Nm/rad 이다.

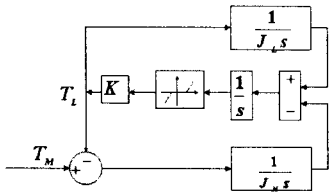


그림 3. 제어 블록선도

로봇의 관절을 이루는 모터의 위치를 제어하기 위한 일반적인 퍼지 제어기의 설계는 입력 변수의 퍼지화, 퍼지추론, 비퍼지화의 단계를 거친다. 기준 위치 입력과 출력 위치값의 오차 그리고 오차의 변화율을 입력 변수로, 출력 변수는 제어기의 출력 전압으로 선정하였다. 멤버십 함수는 제어규칙에 이용되며 설계자의 주관에 의해 정의되므로 모든 가능한 입출력 변수에 대한 언어변수를 NVB(Negative Very Big), NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big), PVB(Positive Very Big)로 하고 상대적으로 계산이 용이한 삼각형 형태를 이용하여 정의하였다[4].

그림 4, 그림 5, 그림 6은 각각 위치오차, 위치오차의 변화율, 제어기 출력에 대한 멤버십 함수를 나타낸다.

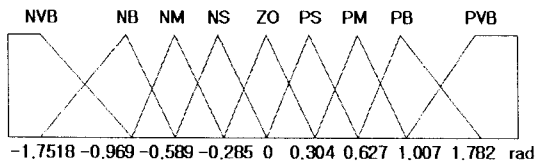


그림 4. 오차에 대한 멤버십 함수

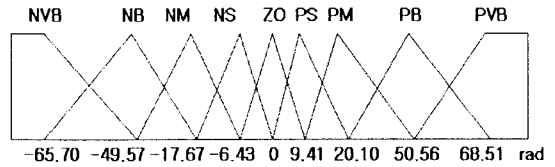


그림 5. 오차의 변화율에 대한 멤버십 함수

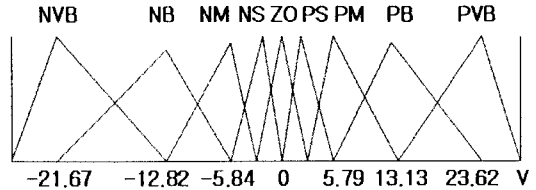


그림 6. 제어기 출력에 대한 멤버십 함수

제어규칙은 IF-THEN 으로 구성되며 표1과 같이 제어 입력 변수인 오차와 오차의 변화율에 대해 제어규칙을 설계하였다. 이 규칙에 의한 출력의 추론법은 Mamdani의 Min-Max법을 사용하였고 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 사용하였다.

표1 퍼지 제어기의 룰 베이스

제어기 출력	e									
	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	
e	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NB	NVB	NVB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
	NM	NVB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	NS	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	ZO	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
	PS	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PM	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PVB
	PB	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PVB	PVB
	PVB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PVB	PVB	PVB

3. 모의실험

그림 7은 백래쉬가 존재하는 시스템에 PID 제어기를 사용했을 때 로봇 무릎 관절의 기준 궤적값에 대한 부하의 궤적을 나타낸다. 기어이가 서로 맞물려 있지 않은 상태에서 시작한다고 가정하고 10초간 시뮬레이션을 수행하였다. 입력 기준치를 추종하고 있지만 궤적값의 변화가 작은 구간에서는 진동을 일으킴을 확인할 수 있다.(P=4.3, I=0.01, D=0.25)

그림 8은 퍼지 제어기를 사용한 경우 기준 궤적값과 부하의 궤적을 나타낸다. 입력 변수의 수를 줄이고 오차값을 누적시켜 정상상태 오차량을 줄이기 위해 시뮬레이션 시간동안의 평균 오차값을 상수로 넣어 주었다. 제안된 퍼지 제어기를 사용하여 궤적 오차값이 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 시스템의 안정성 측면에서는 PID 제어기를 사용했을 경우보다 오차의 변화율이 작기 때문에 진동의 크기가 작아지므로 상대적으로 안정하다고 판단할 수 있다. 기어로 이루어진

로봇 관절에서는 백래쉬로 인한 로봇의 진동, 궤적 추종 오차 등의 문제가 발생하지만 퍼지 제어를 이용하여 이런 문제점을 줄일 수 있음을 모의실험을 통해 보였다.

그림 9는 각 제어기를 사용했을 경우의 위치오차 값으로, PID 제어기로는 비선형 요소를 가진 시스템에서 궤적 추종오차와 진동을 효과적으로 억제할 수 없음을 보여준다. 또한 퍼지 제어를 통하여 백래쉬에 기인한 등적으로 변화하는 오차값을 줄이고 오차의 변화율을 억제하여, 시스템의 진동폭이 PID 제어기에 비하여 1/2 정도 감소되었음을 보여준다.

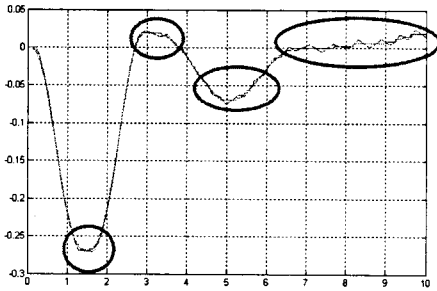


그림 7. PID 제어기에 의한 기준 궤적과 부하의 궤적

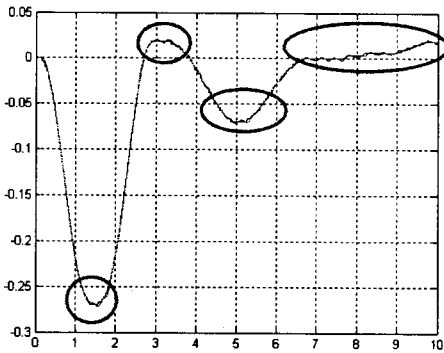


그림 8. Fuzzy 제어기에 의한 기준 궤적과 부하의 궤적

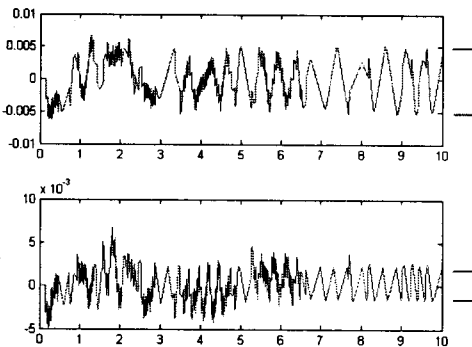


그림 9. PID 제어기(상)와 Fuzzy 제어기(하)의 위치 오차

4. 결 론

본 논문에서는 비선형 백래쉬를 보상하기 위해 퍼지 제어를 사용하였다. 시스템에서 발생하는 진동은 오차의 변화량이 급격히 변화하는 부분에서 발생하므로 오차 변화량에 대한 멤버십 함수의 정교한 조정을 통해 궤적 추종오차와 시스템에서의 진동을 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 멤버십 함수의 개수를 줄이고 폭을 조정하여 연산 속도를 향상시키고 실제 로봇 관절에 적용하여 검증하는 일이 향후 과제로 남아있다.

참 고 문 헌

- [1] G. Tao and P.V. Kokotovic, "Adaptive control of plants with unknown output backlash," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol 40, no.2, pp.200-212, Feb. 1995.
- [2] G. Tao and P.V. Kokotovic, "Continuous-time adaptive control of systems with unknown backlash," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol 40, no.6, pp.1083-1087, June 1995.
- [3] 김남훈, 허욱렬, "기어의 백래쉬 보상을 위한 퍼지 보상기 설계", 대한 전기학회 논문지, 12호, 제 53권, pp. 799-803, 2004. 12.
- [4] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control system: Fuzzy logic controller Part I", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, vol.20, pp.404-418, Apr. 1990