

백래쉬 현상의 보상을 위한 퍼지 보상기 설계

Design of fuzzy compensator for compensate the backlash effect

김남훈, 허옥렬, 김진걸, 김병윤

Nam hoon KIM, Uk youl HUH, Jin geol KIM, Byung yoon KIM

Abstract - In rotating systems, backlash imposed limitations on the quality of control. System with gear is an example where this is a well-known limitation. In order to increase the controller performance, we design a fuzzy system to compensate the backlash effect. We prove that under certain conditions the fuzzy compensator guarantees that the backlash output converges to the desired trajectory. Simulation results show that the fuzzy compensator is robust to the backlash parameter.

Key Words : Fuzzy, Backlash, Compensator, Gear

1. 서론

백래쉬는 궤환 제어 시스템의 실행을 제한하는 요소이다. 백래쉬는 지연, 진동 그리고 비정확성을 유발한다. 이러한 문제는 정확도를 요구 하는 시스템에서 중요하게 작용한다. 백래쉬가 있는 시스템에 대한 접근방법 중에 최근에 Tao와 Kokotovic은 퍼지 적응제어 접근 방법을 사용하였다[1][2].

기어가 달려있는 회전하는 시스템에서 백래쉬 현상은 항상 나타난다. 백래쉬 현상이 있는 시스템을 제어하고자 할 때, 백래쉬 현상을 보상할 수 있는 방법은 중요하다. 본 논문의 제어대상 플랜트는 감속기가 달린 직류 모터를 사용한 로봇 관절이다.

대상시스템은 백래쉬 이외의 모터의 마찰력이나 각변위를 측정하는 인코더의 해상도의 문제 그리고 그 밖에 모델링 할 때 고려하지 않은 불확실한 요소도 가지고 있다. 백래쉬의 영향을 제어하기 위해서는 다른 비선형적 요소를 무시하고 백래쉬 만을 고려하겠다. 맞물리는 두 기어의 분리가 일어날 때 백래쉬 만큼의 변위를 움직이기 위한 최대 에너지를 최대한 시간동안 가하여 두기어가 항상 맞물려 있도록 하는 것이 백래쉬 제어의 기본 개념이다.

2장에서는 백래쉬 보상을 위해 우리는 4개의 IF-THEN 룰을 갖는 퍼지제어기를 소개한다. 이 4개의 룰을 사용해 퍼지 보상기를 구성한다. 3장에서는 시뮬레이션 블록 선도 및 결과를 다룬다. 마지막 4장에서는 시뮬레이션 결과 및 향후 연구 과제에 대해 언급한다.

2. 본론

우리가 제어하고자 하는 시스템은 그림 1과 같다. 모터에 입력전압 u 가 가해지면 그에 따라 토크가 만들어 진다. 이때 만들어진 토크가 축을 회전시키는 힘을 제공하게 된다. 백래쉬는 기어 부분에 존재하게 된다. 백래쉬 현상에 기인해 2차 축에 전달되는 토크가 0또는 임의값을 갖는다. 이때 전달된 토크가 2차축을 회전시키게 된다. 본 논문에서는 다른 비선형 성을 무시하고 비선형 백래쉬에 대한 퍼지 로직 선 보상기를 구성하고자 한다. 본 논문에서는 모터에 대한 동적 방정식은 표시하지 않았으며 논문[3]와 참고서적[4]을 참고하기 바란다. 전문가의 지식이 존재하는 경우에는 이를 언어적인 형태의 퍼지 규칙으로 표현할 수 있다[5][6]. 본 논문에서는 전문적인 지식체계를 가지고 4개의 언어적인 퍼지 규칙을 표현하였다.

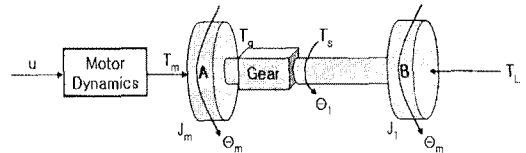


그림 1. 제어 대상 시스템

2.1 비선형 백래쉬 모델

식(1)의 $\theta_m, \theta_n/N, b$ 는 각각 출력축 부하의 위치, 구동축 모터축의 위치/기어비 그리고 상대적인 백래쉬 간격을 나타낸다. 전형적인 백래쉬 모델은 그림 2와 같으며 θ_1 과 θ_m/N 사이의 관계를 나타낸다. 식(1)은 θ_m 의 미분값과 θ_m/N 과 θ_1 의 차 조건을 사용해서 출력축 각변위를 표현하였다. 식(1)을 시각적으로 나타내면 그림 2와 같다. 이것은 입출력에 대한 비선형 속도 그래프이다.

저자 소개

- * 金南勳 : 仁荷大學校 工科大学 碩士課程
- ** 許旭烈 : 仁荷大學校 工科大学 教授·工博
- *** 金振傑 : 仁荷大學校 工科大学 教授·工博
- **** 金丙倫 : 仁荷大學校 工科大学 博士課程

$$\hat{\theta}_L = \begin{cases} \hat{\theta}_m / N, & \text{if } \hat{\theta}_m > 0 \text{ and } \frac{\theta_m}{N} - \theta_L \geq b \\ & \text{or } \hat{\theta}_m < 0 \text{ and } \frac{\theta_m}{N} - \theta_L \leq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

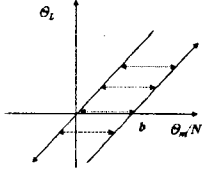


그림 2. 백래쉬 효과

2.2 퍼지 로직 백래쉬 선 보상기 설계

그림 1에서 동적 부분 A의 회전 방향이 변하게 되면 B부분의 회전은 시간 지연을 갖고 회전하게 된다. 이 시간 지연은 백래쉬 현상에 기인한다. 이러한 현상을 최소화 하기 위해서 우리는 퍼지 선보상기를 구성하였다. 그림 4와 같이 배치하였다. 그림 4에서 dp는 백래쉬 출력에 대한 기준 입력을 나타낸다. 퍼지룰은 경험과 지식을 바탕으로 해서 만들었다. 만든 룰은 다음 식 (2)~(5)와 같다.

$$\text{if } (\hat{\theta}_r > 0 \text{ and } \theta_m / N - \theta_L \neq b), \text{ then } (\theta_{cr} \text{ is positive}) \quad (2)$$

$$\text{if } (\hat{\theta}_r > 0 \text{ and } \theta_m / N - \theta_L = b), \text{ then } (\theta_{cr} \text{ is zero}) \quad (3)$$

$$\text{if } (\hat{\theta}_r < 0 \text{ and } \theta_m / N - \theta_L \neq b), \text{ then } (\theta_{cr} \text{ is negative}) \quad (4)$$

$$\text{if } (\hat{\theta}_r < 0 \text{ and } \theta_m / N - \theta_L = 0), \text{ then } (\theta_{cr} \text{ is zero}) \quad (5)$$

θ_{cr} 은 퍼지 로직 백래쉬 선보상기의 출력 멤버십 함수를 나타낸다. 식(2)는 부하부분이 정방향으로 회전되기가 요구하는 상황이다. 그러나 피니언과 기어가 서로 맞물려있지 않다. 그래서 고안된 퍼지 선보상기의 출력 θ_{cr} 은 피니언과 기어 두 부분이 가능하면 빨리 맞물릴 수 있도록 만들어 줘야한다. 식(2)에 틀은 A부분에 정방향 토크를 더 발생시켜 주기위해 PD 제어기에 들어가는 에러값을 더 크게 만들어 준다. 이때 출력 멤버십 함수중 positive 멤버십 함수가 출력된다. 식(3)은 부하가 정방향으로 회전되길 요구되는 상태이며 기어와 피니언이 서로 맞물려 있을 때에 관한 퍼지룰을 나타낸다. 이때 퍼지 보상기의 출력 멤버십 함수는 Zero 멤버십 함수가 된다. 식(2)와 식(3)의 퍼지 룰을 만들어낸 방식과 유사하게 식(4)와 식(5)가 만들어진다. 식(3)과(4)는 B부분이 정방향으로 회전하도록 요구되는 상태의 퍼지룰을 나타내며 식(5)와 (6)은 역방향으로 회전하도록 요구하는 상태의 퍼지룰을 나타낸다. 이러한 룰 베이스를 갖고 퍼지화, 추론, 비퍼지화 과정이 수행되게 된다. 퍼지 보상기는 두개의 입력과 하나의 출력을 갖는다. 입력 변수는 기준입력의 미분(θ_r 의 미분)과 상대적인 백래쉬 간격($\theta_m/N - \theta_L$)이며 출력 변수는 보상 각(θ_{cr})이 된다. 본 논문에서 사용한 멤버십 함수를 수학적으로 표현하면 아래 식(6)~(14)와 같다.

퍼지 집합의 "positive", "negative", "not equal to b", "not equal to zero", "equal to b", "equal to zero" 는 아래 첨자로 각각 "P", "N", "NEC", "NEO", "EB" and "EO"로 표시했다. 그리고 ε 는 작은 수를 나타내며, b는 백래쉬 갭의 실험 추정값을 나타낸다. σ_0 와 σ_0 은 평활 계수이다.

θ_{cr} 은 퍼지 선보상기의 출력값을 나타낸다. 퍼지 선보상기의 출력값은 식(2)~(5)의 룰로부터 얻어지며, COA 비퍼지화 방법을 사용했다. y_n 과 y_p 는 퍼지 보상기의 출력값이 취할 수 있는 가장 큰 음과 양의 값을 나타낸다. 퍼지 보상기를 구성하기 위해서 우리는 위 식(6)~(14)의 멤버십 함수를 사용한다.

$$\mu_P(r) = \frac{1}{1 + e^{-b/r}} \quad (6)$$

$$\mu_N(r) = \frac{1}{1 + e^{b/r}} \quad (7)$$

$$\mu_{NEO}(\theta_m / N - \theta_L) = 1 - e^{-\left(\frac{\theta_m / N - \theta_L - b}{\sigma_0}\right)^2} \quad (8)$$

$$\mu_{EB}(\theta_m / N - \theta_L) = e^{-\left(\frac{\theta_m / N - \theta_L - b}{\sigma_0}\right)^2} \quad (9)$$

$$\mu_{NEO}(\theta_m / N - \theta_L) = 1 - e^{-\left(\frac{\theta_m / N - \theta_L}{\sigma_0}\right)^2} \quad (10)$$

$$\mu_{EO}(\theta_m / N - \theta_L) = e^{-\left(\frac{\theta_m / N - \theta_L}{\sigma_0}\right)^2} \quad (11)$$

$$\mu_{PL}(\theta_{cr}) = e^{-(\theta_{cr} - y_p)^2} \quad (12)$$

$$\mu_{NL}(\theta_{cr}) = e^{-(\theta_{cr} - y_n)^2} \quad (13)$$

$$\mu_0(\theta_{cr}) = e^{-\theta_{cr}^2} \quad (14)$$

식(6)~(7)의 기준입력을 미분한 값에 대한 멤버십 함수에서 변수 ε 은 "positive"와 "negative"의 멤버십 함수의 폭을 변화시켜준다. 이 값의 변화는 백래쉬에 작은 영향을 끼친다. 시뮬레이션 과정에서는 ε 를 0.1로 잡았다. 상대적인 백래쉬 간격의 멤버십 함수에서 σ_0 와 σ_0 를 사용해 얼마나 빨리 퍼지 보상기의 y_n 이나 y_p 가 0으로 수렴하는지를 조절하게 된다. 우리는 $\sigma_0 = \sigma_0 = b/4$ 로 정하거나 그 근방의 값으로 정하였다. 사용한 백래쉬 갭 b값은 실제 실험으로 측정된 값을 사용하였으며 측정값은 본 논문에서 언급하지 않겠다. 위의 식들을 사용해 멤버십 함수를 그려보면 다음 그림3와 같다. 그림3에서 (a)는 퍼지 보상기의 기준 입력의 미분에 대한 멤버십 함수를 나타낸다. (b)는 상대적인 백래쉬 갭에 대한 멤버십 함수를 나타낸다. (c)는 실제 퍼지 보상기의 출력을 만들어내기 위한 보상각에 대한 멤버십 함수를 나타낸다.

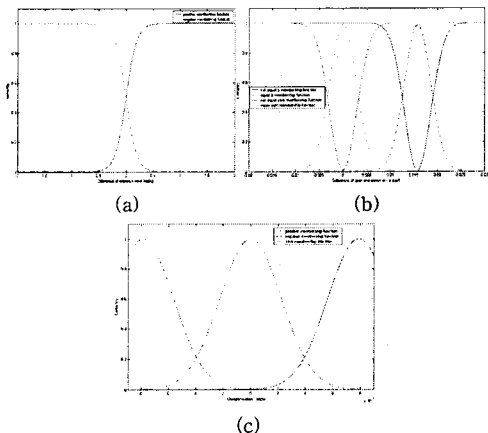


그림 3. 퍼지 선보상기의 멤버십 함수들
(a) 기준입력을 미분한 값에 대한 멤버십 함수.
(b) 상대적인 백래쉬 갭에 대한 멤버십 함수.
(c) 보상되는 각 값에 대한 멤버십 함수

3. 시뮬레이션

3.1 제어 블록선도

제어 블록선도는 다음 그림 4와 같다. 보상 알고리즘의 출력은 퍼지제어기의 출력에서 부하의 위치값을 뺀값이다.

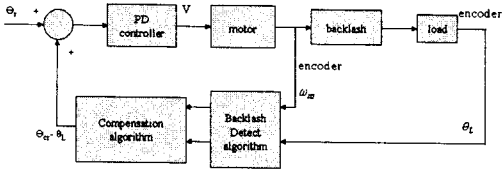
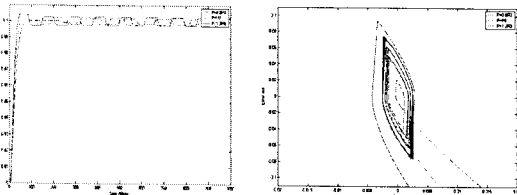


그림 4. 시뮬레이션 블록 선도

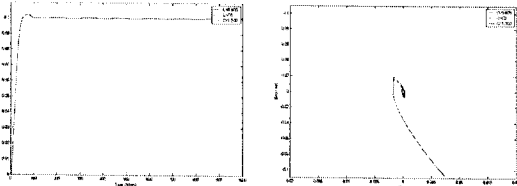
3.2 계단 응답

기준입력(θ_r)은 크기가 0.1인 계단입력을 넣어줬다. 기어이 서로 맞물려 있지 않은 상태에서 시작한다고 가정하였다. 퍼지 보상기를 사용했을 경우와 사용하지 않았을 경우의 시뮬레이션 결과는 그림5,그림6과 같다.



(a) 계단 응답 (b) 위상 선도

그림 5. 서로 다른 PD 이득값을 사용한 계단응답

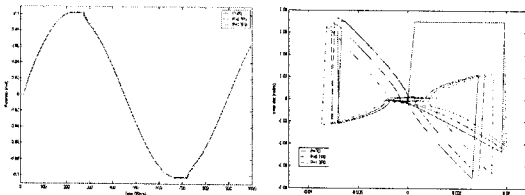


(a) 계단 응답 (b) 위상 선도

그림 6. 서로 다른 백래쉬 간격에 대해 퍼지 보상기와 PD 제어기를 같이 사용한 결과 (계단 응답)

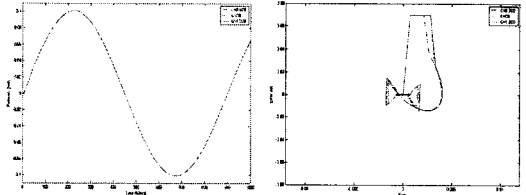
3.3 정현파입력 응답

정현파 응답 시뮬레이션도 그림 4의 폐루프 시스템에서 실행했다. 기준입력(θ_r)에는 크기가 0.1이고 주파수가 0.7 rad/sec 인 정현파를 사용하였다. 퍼지 보상기를 사용했을 경우와 사용하지 않았을 경우의 시뮬레이션 결과는 그림7,그림8과 같다.



(a) 정현파 응답 (b) 위상 선도

그림 7. 서로 다른 PD 이득값을 사용한 정현파 응답



(a) 정현파 응답 (b) 위상 선도

그림 8. 서로 다른 백래쉬 간격에 퍼지 보상기와 PD 제어기를 같이 사용한 결과 (정현파 응답)

4. 결론

본 논문에서는 비선형 백래쉬를 보상하기 위해 4개의 보편화된 물을 사용하였다. PD 제어기만 가지고는 백래쉬 현상을 보상시킬 수 없다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 백래쉬 현상을 보상하기 위한 퍼지 제어기를 제안하고 있다. PD 제어기와 퍼지 보상기를 결합함으로써 계단입력에서는 PD제어기만 사용했을 경우보다 최대오차가 1/4정도 감소시켰다. 그에 따라 limit cycle의 영향도 감소되게 되었다. 그리고 정현파 입력의 경우에는 최대 오차가 1/2정도 감소하게 되었다. 현재 시뮬레이션 과정에서 사용된 백래쉬 값은 실제 실험을 통해 입력력 히스테리시스 곡선을 그렸을 때 최대 백래쉬 값으로 결정하여 시뮬레이션 하였다. 하지만 실제 시스템에서는 부하의 위치, 마찰, 열 그리고 충격등에 의해 백래쉬 값이 변하게 된다. 그렇기 때문에 현재는 그러한 가변되는 백래쉬 값을 추정하기 위한 알고리즘에 관해 연구중이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 지원으로 수행되었습니다. (R01-2003-000-10364-0)

참고 문헌

- [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,허옥렬,김진걸, "백래쉬가 있는 기어 시스템의 퍼지제어에 관한 연구," Information and control symposium 논문집, pp.47-49, May 2004.
- [4] Benjamin C. Kuo and Farid Golnaraghi, Automatic Control Systems, Wiley, 2003.
- [5] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Inf. Control., vol. 8, pp. 338-353, June 1995.
- [6] 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.