

로봇 관절의 백래쉬 보상을 위한 외란관측기 설계

A Disturbance Observer Design for Compensating Backlash at Robot Joint

안 원 기* · 허 욱 렬**
(Won Ki Ahn · Uk Youl Huh)

Abstract - In mechanical system, gear trains have backlash innately. With the presence of inherent backlash, the overall system performance is limited in many practical control systems. It has been reported that a disturbance observer has the property of effective removing disturbance and cutting measurement noise off. The plant is remodeled with modified disturbance observer to observe and compensate backlash characteristics. And this paper describes a method to design Q filter and to analyze the effects of disturbance and measurement noise to the output. It is shown that the vibration and tracking error caused by backlash were decreased and the time constant and relative degree are important factor to design Q filter.

Key Words : Disturbance Observer, Q filter, Backlash, Gear, Motor

1. 서 론

백래쉬는 기어로 이루어진 모든 시스템에 존재하며 시스템의 성능을 제한하는 비선형 요소로서 폐환 제어 시스템에서 시스템 응답의 지연, 진동 그리고 비정확성을 유발한다. 특히 정확성과 안정도가 요구되는 로봇 시스템에서 백래쉬 때문에 발생하는 진동은 심각한 문제이다. 백래쉬에 의한 영향들을 보상하기 위해 제시된 알고리즘 중 고전 제어 알고리즘에 입각한 제어 방법은 시스템의 파라미터 변화 및 모델링 오차 때문에 발생하는 문제에 대처하기 어려우며 Linear optimal control, LQG/LTR, H_∞ 과 같은 현대 제어 이론들은 알고리즘의 복잡성 때문에 실제로 구현하는 데에 어려움이 존재한다[1].

또 다른 접근 방법으로 플랜트의 공칭 모델과 그 역모델을 이용한 외란관측기가 제안되었다. 외란관측기는 구조가 간단하면서도 측정 잡음을 차단하고 외란을 추종 및 제거하는 성능이 뛰어나 시보제어 분야에서 많이 사용되는 알고리즘이다. 본 논문에서는 모델링된 플랜트에서 백래쉬의 영향을 관찰할 수 있는 외란관측기의 구조를 제안하고, Q 필터 설계 요소의 변화에 따라 외란관측기의 외란 및 잡음 차단 성능이 달라지게 됨을 보인다[2]. 이를 통해 시스템 출력에 나타나는 백래쉬의 영향을 보상함으로써 제안된 외란관측기의 효용성을 입증한다.

2. 시스템 모델링

대상 시스템은 이족 보행 로봇의 무릎 관절로서 그림 1과

같이 모델링할 수 있다. 모터에서 발생한 토크가 기어를 통해 축을 회전시키는 힘을 제공한다. 두 기어 사이의 상대변위와 백래쉬 차이로 인해 부하측에 전달되는 토크는 0 또는 임의의 값을 갖게 되며 이때 전달된 토크가 부하를 회전시킨다. 백래쉬는 모터측에서 부하측으로 전달되는 토크의 유무에 따라 dead-zone 형태로 모델링될 수 있다. 기존에 제안된 외란관측기는 시스템을 저차 플랜트로 모델링하여 플랜트 앞단에 인가되는 외란을 모델링 오차와 고려되지 않은 다른 비선형성이 포함된 등가 외란으로 간주하고 있다. 하지만 백래쉬는 엄밀히 시스템의 입력측이 아닌 플랜트 내부에 존재하는 요소로서, 기존에 제시된 방법으로는 백래쉬가 시스템 출력측에 미치는 영향을 파악하기 어렵다. 본 논문에서는 백래쉬에 의한 영향을 분석하고 보상하기 위해 다른 비선형적인 요소를 무시하고 백래쉬만을 외란으로 정의하였다. 플랜트 사이에 존재하는 백래쉬만을 외란으로 간주하고 전체 플랜트를 백래쉬가 없는 등가적인 시스템으로 재구성하여 그림 2와 같이 나타냈다.

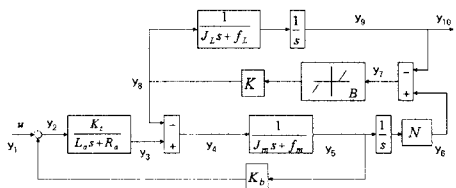


그림 1. 제어 대상 시스템

외란으로 정의한 백래쉬가 모델링된 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 전체 플랜트를 P_1, P_2, P_3, P_4 로 세분화하였다. P_1 은 y_2 에서 y_3 까지의 전달함수로 모터의 전기자 부

저자 소개

* 안원기 : 仁河大學校 電子電氣工學府 碩士課程

** 허욱렬 : 仁河大學校 電子電氣工學府 正教授 · 工博

분을 나타내는데, 백래쉬에 의한 영향을 직접적으로 받지 않는 부분이다. P_2 는 전체 전달함수 중 y_3 에서 y_5 까지의 전달함수를 나타낸다. P_3 는 y_5 에서 y_{10} 까지의 전달함수로 모터 쪽에서 본 부하측이 되며 P_4 는 모터의 역기전력을 고려하여 전체 전달함수와 동일성을 맞춰 주기 위해 고려한 항이다.

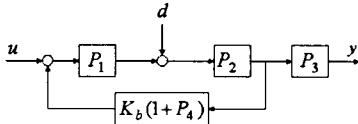


그림 2. 재구성된 등가 시스템

3. 외란관측기

재구성된 플랜트에서 외란을 검출하기 위해 그림 3과 같은 외란관측기를 구성하였다. 외란관측기에 사용된 저역통과 필터는 식(1)과 같은 Binomial filter를 사용하였고 로트 입력 궤적의 주파수 성분을 고려하여 대역폭을 설정하였다. 플랜트의 역모델인 P_3^{-1} 와 $(P_1P_2P_3)^{-1}$ 을 동시에 실현시키기 위해 최소 차수인 5차 필터를 사용하였다. 필터를 통해 검출된 외란은 플랜트에 존재하는 토크 성분의 백래쉬이며, 부시스템인 P_1^{-1} 을 통해 전압의 형태로 바뀌어 보상된다.

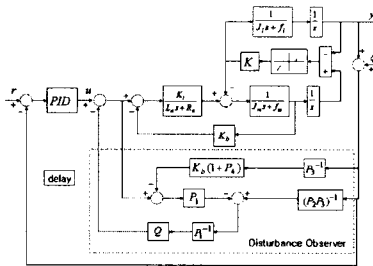


그림 3. 제한된 외란관측기 구조

$$Q_{mn} = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi}(\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m}, \quad a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)! i!} \quad \text{식(1)}$$

여기서 m 과 n 은 각각 필터의 분모, 분자의 차수를 의미하며, τ 는 필터 시정수를, a_{mi} 는 Binomial 계수를 의미한다. u 는 실제 플랜트에 인가되는 입력값이고, d 는 외란 입력 신호이고, ζ 는 측정잡음을 나타낸다. 3개의 외부 입력신호들로부터 출력 y 로의 전달함수를 구해보면 식(2)와 같다.

$$y = \frac{P_1P_2P_3}{1+P_1P_2K_b(1+P_4)}u + \frac{P_2P_3(1-Q)}{1+P_1P_2K_b(1+P_4)}d - Q\zeta \quad \text{식(2)}$$

3.1 외란 관측기의 외란 제거 성능

외란 관측기의 외란 제거 성능은 외란 d 부터 출력 y 까지의 전달함수를 이용하여 G_{dy} 의 크기를 주파수 영역에서 관찰

함으로써 확인할 수 있다.

$$G_{dy}(s) = \frac{P_2P_3(1-Q)}{1+P_1P_2K_b(1+P_4)} \quad \text{식(3)}$$

Q 필터의 시정수와 상대차수에 따라 식(3)과 같은 전달함수의 크기를 그림 4와 그림 5에 나타냈다. 그림 4는 Q 필터의 차수를 Q_{30} 으로 고정시키고 시정수를 변화시키면서 구한 G_{dy} 의 크기를 나타낸다. Q 필터의 시정수가 작아질수록 대역폭이 증가하여 동일한 주파수 성분에 대한 G_{dy} 의 크기가 작아지고 그에 따라 외란제거 성능이 좋아지게 된다. 그림 5는 필터의 시정수를 일정하게 고정시킨 상태에서 필터의 차수를 변화시키면서 구한 G_{dy} 의 크기를 나타낸다. Q 필터 분자의 차수가 같을 때에는 분모의 차수가 작을수록 G_{dy} 의 크기가 작아지고, 분모의 차수가 동일할 때에는 분자의 차수가 커질수록 G_{dy} 의 크기가 작아져서 외란을 제거하는 성능이 좋아진다. 또한 필터의 상대차수가 같을 때에는 분자의 차수가 커질수록 외란 제거 성능이 좋아짐을 확인할 수 있다.

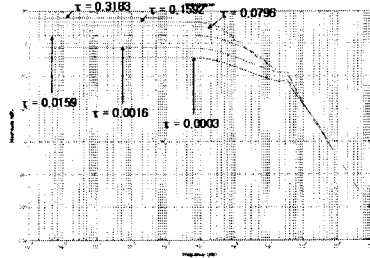


그림 4. Q 필터의 시정수에 따른 외란 제거 성능 추이

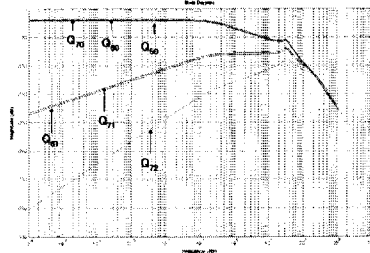


그림 5. Q 필터의 차수에 따른 외란 제거 성능 추이

3.2 외란관측기의 측정 잡음 차단 성능

외란관측기의 측정 잡음 억제 성능은 잡음 ζ 부터 출력 y 까지의 전달함수를 이용하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{\zeta y} = -Q\zeta \quad \text{식(4)}$$

Q 필터의 시정수와 상대차수에 따라 식(4)와 같은 전달함수의 크기를 그림 6과 그림 7에 나타냈다. 그림 6은 Q 필터의 차수를 Q_{30} 으로 고정시키고 시정수를 변화시키면서 구한 $G_{\zeta y}$ 의 크기를 나타낸다. Q 필터의 시정수가 작아질수록 대역

폭이 증가하여 고주파 성분인 측정 잡음에 의한 영향이 커진다. 따라서 G_{cy} 의 크기가 커지고 잡음 차단 성능이 나빠지게 된다. 그림 7은 필터의 시정수를 고정시킨 상태에서 필터의 차수를 변화시키면서 구한 G_{cy} 의 크기를 나타낸다. Q 필터 분자의 차수가 같을 때에는 분모의 차수가 작아질수록 G_{cy} 의 크기가 커지고, 분모의 차수가 일정할 때에는 분자의 차수가 커질수록 G_{cy} 의 크기가 커져서 잡음을 차단하는 성능이 나빠진다. 또한 필터의 상대차수가 같을 때에는 분자의 차수가 작아질수록 잡음 차단 성능이 좋아짐을 알 수 있다.

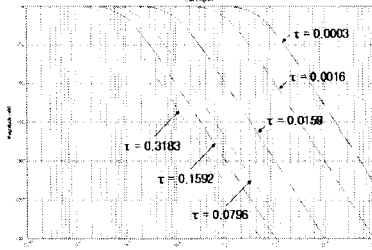


그림 6. Q 필터의 시정수에 따른 잡음 차단 성능 추이

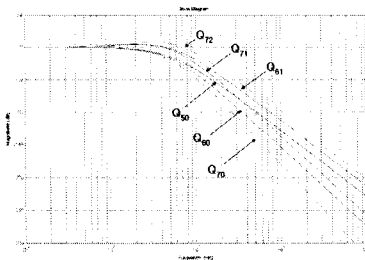


그림 7. Q 필터의 차수에 따른 잡음 차단 성능 추이

4. 모의실험

외란으로 정의한 백래쉬는 기어 열이 맞물릴 때 특히 부하의 회전방향이 바뀌는 시점에서 기어 사이의 충격량이 커지므로 시스템의 입력 궤적 주파수 성분에 의존하여 출력쪽에 진동을 일으키는 특성을 갖는다. 로봇 무릎 관절의 입력 궤적 주파수 성분은 대략 0~30Hz이다. 이때 검출된 백래쉬의 주파수 특성은 0~30Hz 사이의 신호가 지배적이지만 약 200Hz의 성분까지 검출됨을 FFT를 통해 확인하였다. Q 필터의 시정수를 줄여 대역폭은 200Hz로 그리고 필터의 차수는 전체 시스템의 차수를 줄이기 위해 Q_{50} 으로 설정하였다. 백래쉬 값에 의해 발생하는 시간지연 문제를 보정하기 위해 그림 3과 같이 구성된 시스템에 인위적으로 delay를 추가하여 모의실험을 수행하였고 결과를 그림 8과 그림 9에 나타냈다. PID 제어기만을 사용한 경우는 백래쉬에 의한 영향 때문에 시스템 출력단에 작은 진동이 발생하지만, PID 제어기와 외란관측기를 함께 사용하는 경우에는 외란관측기가 대부분의 외란신호를 보상해주고 제어기는 궤적추종의 역할을 주로 하게 되므로 제어기의 부담이 줄어들게 되어 전체적으로 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. [표 1]에 PID 제어기만을 사용한

경우와 외란관측기를 함께 사용한 경우의 RMSE(Root Mean Square Error)를 나타내었다. 외란관측기를 함께 사용한 결과 전체적으로 오차가 감소되었음을 확인할 수 있다.

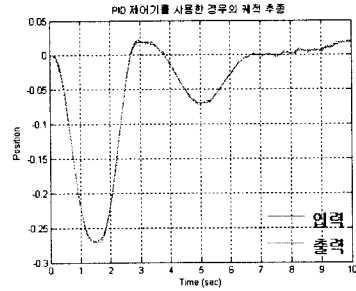


그림 8. PID 제어기를 이용한 모의실험 결과

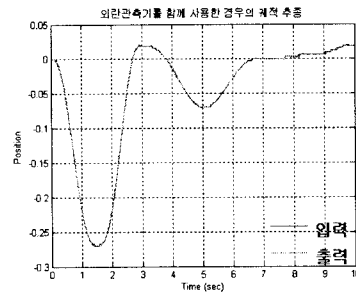


그림 9. 외란관측기를 함께 이용한 모의실험 결과

[표 1.] 무릎 관절의 RMSE

	PID	PID + 외란관측기
RMSE	0.21	0.15

5. 결 론

저차 플랜트에 적용되는 외란관측기와는 달리 백래쉬를 갖는 시스템을 실제 시스템과 좀 더 유사한 고차 시스템으로 모델링하였고, 백래쉬가 시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 등가적으로 재구성하였다. 재구성된 플랜트에 외란관측기를 구성하여 Q 필터의 시정수와 상대차수에 따라 외란과 측정 잡음이 시스템 출력에 미치는 영향을 파악하였다. 향후 고차시스템에서 외란을 효과적으로 보상할 수 있는 최적의 필터 설계 방법과 시간지연 및 모델링 오차를 고려하여 보상할 수 있는 방법들을 정량적으로 분석해 나갈 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] S. H. Song, J. K. Kim, "Robust Control of Motor Systems via a Novel Disturbance Observation Technique," Proc. of the 12th KACC, pp. 199-202, 1997.
- [2] 양광진, 최영진, 정완균, "2차 시스템에 대한 이산시간 외란 관측기의 분석", Journal of Control, Automation, and systems Engineering, Vol. 9, No. 6, June, 2003.6