

외란 관측기를 이용한 동적 시스템의 성능 개선

오 경환, 정정주, 백문철
한양대학교 전자통신전파공학과, *한국전자통신연구원 정보저장소자팀
전화 : (02) 2282-5307 / 핸드폰 : 017-215-4846

Performance Enhancement of Dynamic Systems by Disturbance Observers

Kyoung Whan Oh, Chung Choo Chung, Mun Cheol Paek
Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University
*Information Storage Device Team Basic Research Lab., ETRI
E-mail : ctx208@hanmail.net, cchung@hanyang.ac.kr, *backmc@etri.re.kr

Abstract

Using disturbance observers is effective in enhancing the performance of systems in presence of disturbances. In this paper, we present a novel design of disturbance observers to achieve enhanced robust performance. In addition, we propose a new method of reducing the effect of measurement noise via modification of plant modeling in disturbance observer.

1. 서 론

외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 Ohnishi에 의하여 처음 제안된 것으로 내부루프에서 외란을 관측하고 그 값을 보상하여 줌으로써 우수한 추종 성능을 갖도록 하는데 매우 효과적이고 유용한 기술이다 [1]. 그 후 Umeno와 Hori에 의해서 외란 관측기의 이론적 분석이 강화되었으며[2], 외란 관측기는 민감도의 개선으로 인한 우수한 명령 추종 성능으로 운동 제어 시스템(Motion Control System)에서 널리 사용되고 있다. Ohnishi가 처음 외란 관측기를 제안한 이후 외란 관측기의 관측 대상을 단지 외부 외란이라는 의미에서 벗어나 그 해석의 범위를 확장하여 해석하는 방법들이 제안되었다[3]~[4]. 확장된 외란의 의미는 계수 변동을 내재하고 있는 모델 불확실성, 토크 및 출력 외란, 그리고 플랜트에서 존재하는 마찰력과 비선형성 등을 포함하는 추종 오차를 발생시키는 원인으로 해석될 수 있으며, 외란 관측기는 그러한 원인의 결과를 관측하고 보상함으로써 시간 및 주파수 영역에서 외란이 감쇠된 공칭 모델과 같은 선형적 결과를 얻을 수 있음이 검증되었다. 또한 외란에 대한 시스템의 민감도를 개선하는 다양한 외란 관측기 구조가 제안되었으나, 제안된 외란 관측기의 변형 및 확장된 구조에서는 [3]에 언급되어 있는 외란 관측기간 교차 결합(Cross-coupling)의 발생으로 인하여 과도응답의 성능이 저하되는 경향

이 있었다. 이는 주파수 영역에서의 민감도 개선과 시간 영역에서의 과도응답 성능 사이에 결충 관계(Trade Off)가 성립하고 있기 때문이다.

본 논문에서는 단일입력 단일출력(SISO) 시스템에서 외란 관측기 상호간에 설계 기준을 다르게 하여 교차 결합을 줄임으로써 시간 영역에서 우수한 과도 응답을 얻으면서 주파수 영역에서 민감도가 개선된 Dual DOB의 구조 및 설계 방법에 대하여 제안한다. 그리고 외란 관측기의 설계 시 새로운 공칭 모델 설정 방법을 통하여 외란의 감쇠뿐 아니라 측정 잡음의 영향도 감쇠시킬 수 있는 방법을 제안한다.

2. 외란 관측기의 원리 및 분석

2.1 외란 관측기의 원리

일반적인 외란 관측기는 그림 1에서와 같이 출력단에 공칭 모델의 역함수를 추가하여 제어 입력과 차로 외란을 추종하고 제어 입력단에 궤환함으로써 외란을 제거하는 방법이다. 궤환되는 양은 식(1)과 같이 표현될 수 있으며, 만약 모델 불확실성이 없다면 $\tilde{d} \cong d$ 가 되어 외란을 완벽히 제거할 수 있다. 그러나 일반적으로 공칭 모델의 역함수를 취할 때 순수미분 성분이 발생하여 실제적인 역함수의 존재가 불가능하므로 그림 1에서와 같이 Q 필터를 추가하여 공칭 모델의 역함수를 적용할 수 있도록 하고 측정 잡음의 영향도 제거하게 된다. 이러한 목적에서 Q 필터는 단일 이득을 가지는 저주파 통과 필터(LPF)의 형태를 지니게 된다.

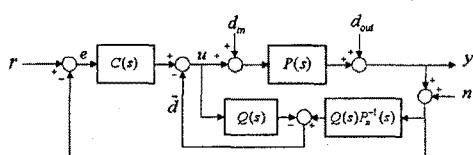


그림 1. 외란 관측기를 적용한 시스템의 구조

$$\bar{d} = (u + d)P\bar{B}_n^{-1}(s) - u \quad (1)$$

2.2 외란 관측기를 적용한 시스템의 분석

전달함수의 특성방정식을 파악하면 외란 관측기의 성능을 분석할 수 있다. 그러나 일반적인 전달함수의 전개는 그 해석이 난해하다. 그러나 [3]에 언급되어 있는 매개변수 $\delta(s)$ 를 이용하여 각각의 전달함수에서 실제 플랜트를 소거하면 직관적이고 용이한 해석이 가능하다. $\delta(s)$ 는 식(3)과 같이 표현되며, 곱셈형 모델 불확실성 $\Delta_M(s)$ 과 밀접한 관계를 가지고 있다.

$$\delta(s) = \frac{P_n(s) - P(s)}{P(s)} = \Delta_M(s) \cdot \frac{-P_n(s)}{P(s)} \quad (3)$$

시스템의 전체적인 입출력 관계는 제어 명령(r), 토크 외란(d_{in}), 출력 외란(d_{out}), 측정 잡음(n)에서 출력까지를 각각 $G(s)$, $S_{in}(s)$, $S_{out}(s)$, $T(s)$ 로 구분하여 식(4)과 같이 나타낼 수 있으며 $\delta(s)$ 를 이용한 각 전달함수의 특성 방정식은 식(5)~(8)과 같다.

$$y = G(s)r + S_{in}(s)d_{in} + S_{out}(s)d_{out} + T(s)n \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{y}{r} = \frac{C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)] + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (5)$$

$$S_{in}(s) = \frac{y}{d_{in}} = \frac{[1 - Q(s)]P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)] + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (6)$$

$$S_{out}(s) = \frac{y}{d_{out}} = \frac{[1 - Q(s)][\delta(s) + 1]}{\delta(s)[1 - Q(s)] + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (7)$$

$$T(s) = \frac{y}{n} = \frac{[-Q(s) + C(s)P_n(s)]}{\delta(s)[1 - Q(s)] + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (8)$$

각각의 전달함수를 통하여 외란 관측기는 공칭 모델 시스템과 같은 우수한 명령 추종과 저주파 성분의 외란에 효과적인 제거 성능을 가지며 고주파 성분의 측정 잡음에 큰 영향을 주지 않는 구조임을 알 수 있다.

3. Dual DOB의 구조 분석 및 확장

3.1 Dual DOB 구조

일반적으로 외란 관측기 보다 더 향상된 성능을 위한 변형 및 확장된 외란 관측기 구조는 시간 영역에서의 과도응답 성능과 주파수 영역에서의 민감도 개선 성능 사이에서 상호 결충 관계가 성립하는 경향이 있다. 이것은 외란 관측기 상호간에 교차 결합이 생성되기 때문이다. 본 논문에서는 외란 관측기 상호간에 설계목표를 다르게 하여 교차 결합을 줄임으로써 주파수 영역에서의 민감도 개선 및 시간 영역에서의 과도응답 성능 향상을 모두 얻을 수 있는 Dual DOB를 제안한다. Dual DOB의 구조는 그림 2와 같이 내부의 외란

관측기를 통하여 성능이 개선된 시스템에 외부의 외란 관측기를 추가하여 내부에서 보상 및 개선하지 못한 외란을 추가적으로 제거하여 향상된 시스템의 성능 및 민감도의 개선을 얻을 수 있다.

3.2 Dual DOB를 적용한 시스템의 분석

Dual DOB의 설계는 내부 외란 관측기 설계와 외부 외란 관측기 설계로 구성이 된다. 내부 외란 관측기는 일반적인 외란 관측기와 동일하고 외부 외란 관측기는 외란 관측기를 적용한 폐회로 전달함수의 특성방정식인 식(5)를 공칭 모델로 적용하여 설계한다. 그러나 식(5)를 공칭 모델로 활용 시 모델 불확실성을 고려할 수 없기 때문에 $\delta(s) = 0$ 으로 가정한다면 실제 적용 가능한 외부 외란 관측기의 공칭 모델은 식(9)와 같이 $G_{DOB}(s)$ 로 정의할 수 있다. Dual DOB를 적용한 시스템을 외란 관측기를 적용한 시스템 분석과 같은 방법으로 확인한 전달함수의 특성방정식은 식(10)~(13)과 같다.

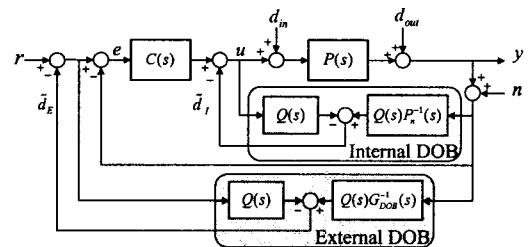


그림 2. Dual DOB를 적용한 시스템 구조

$$G_{DOB}(s) = \lim_{\delta(s) \rightarrow 0} G(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)P_n(s)} \quad (9)$$

$$G_{Dual}(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (10)$$

$$S_{Dual_in}(s) = \frac{[1 - Q(s)]^2 P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (11)$$

$$S_{Dual_out}(s) = \frac{[1 - Q(s)]^2 [\delta(s) + 1]}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (12)$$

$$T_{Dual}(s) = \frac{Q(s)[Q(s) - 2] - C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (13)$$

각각의 모든 전달함수는 분모항의 $\delta(s)$ 에 $[1 - Q(s)]^2$ 가 곱해진 형태를 가지며, 이로 인하여 외란 관측기에 비하여 $\delta(s)$ 의 변화에 더욱 둔감한 시스템이 된다. 또한 식(11)과 식(12)에서 분자항의 일부가 $[1 - Q(s)]^2$ 으로 변화되어 더욱 효과적인 외란 제거가 가능해 진다. 따라서 Dual DOB는 우수한 과도 응답을 전제로 일반적인 외란 관측기 보다 더욱 효과적인 민감도 개선을 얻을 수 있다.

3.3 Dual DOB의 확장

Dual DOB 구조는 외부의 외란 관측기를 병렬로 추가하여 이론적으로 무한 확장이 가능하다. 추가되는 외란 관측기는 추가되기 전의 안정된 시스템을 전제로 설계되며, 외란 관측기간의 교차 결합이 발생하지 않으면서, 외란의 보상 성능을 더욱 개선시킬 수 있다. 첫 번째로 추가되는 외부 외란 관측기는 Dual DOB를 적용한 시스템을 기반으로 설계하여 적용하는 것이 이상적이다. 그러나 공칭 모델은 모델 불확실성을 고려하지 못하기 때문에 $\delta(s) \equiv 0$ 으로 가정한다면, 결과적으로 확장되는 모든 외부 외란 관측기의 공칭 모델은 식(9)과 같은 $G_{DOB}(s)$ 가 된다. 외부 외란 관측기를 추가한 Dual DOB의 확장 구조는 그림 3과 같다.

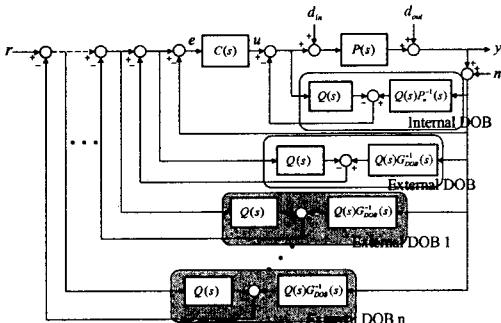


그림 3. Dual DOB의 확장된 구조

4. Dual DOB의 성능평가

4.1 시스템 구성

시스템의 플랜트 모델링과 제어기 그리고 Q 필터는 시스템 구조의 객관성을 확보하기 위하여 Shahruz가 사용한 조건을 이용하였다[4]. 플랜트인 DC 모터 1차 모델링은 식(14)과 같다. K_t 는 토크 상수이고 J 는 관성이며 B 는 마찰 계수로 각각 $K_t = 0.809 Nm/A$, $J = 0.006 kg \cdot m^2$, $B = 0.005 Nm \cdot s$ 이다.

$$P(s) = \frac{K_t}{Js + B} \quad (14)$$

제어기는 PI 제어기로 설계하였으며 식(15)과 같다. 위치이득 $K_p = 2.0159$ 이고 적분이득 $K_i = 1.6799$ 이다. 이 시스템은 극점과 영점의 상쇄가 있는 BIBO 안정 시스템이다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (15)$$

$$Q_{21}(s) = \frac{a_1(\tau s) + 1}{a_2(\tau s)^2 + a_1(\tau s) + 1} \quad (16)$$

Q 필터는 식(16)과 같이 2차 필터를 이용하였으며, $Q(s)$ 의 밀첨자는 분모항과 분자항의 차수를 의미한다.

시정수 $\tau = 0.003 [s]$ 이고, $a_1 = 6$, $a_2 = 1$ 을 사용한다. 마지막으로 플랜트의 공칭 모델은 실제 플랜트와 동일하게 $P_n(s) = P(s)$ 로 설정한다.

4.2 시간 및 주파수 영역에서의 Dual DOB 성능비교

그림 4는 구조별 민감도를 비교한 시뮬레이션 결과로 PI 제어기나 외란 관측기를 적용한 시스템과 비교하여 Dual DOB를 적용한 시스템의 민감도 개선을 확인할 수 있다. 저주파 영역의 민감도의 개선으로 인하여 고주파에서 민감도 첨두치가 증가하는 워터 효과(Water Effect)도 발생되지 않음을 확인할 수 있다.

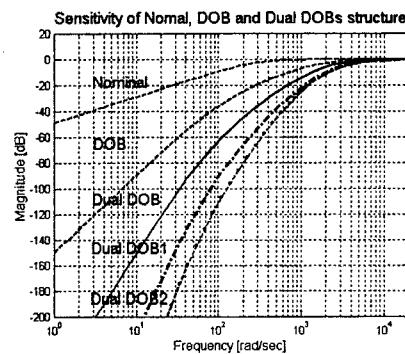


그림 4. 각 시스템별 출력 외란에 대한 민감도 비교

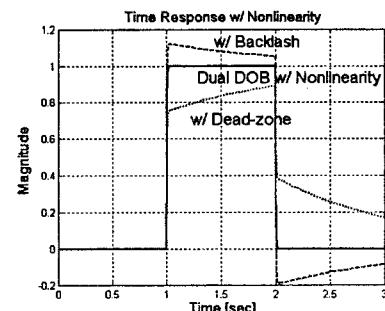


그림 5. 비선형성을 고려한 경우의 과도응답 비교

그림 5는 Dual DOB를 적용한 시스템의 플랜트에 비선형성이 있는 부동영역(Dead-zone)과 백래시(Backlash)를 각각 고려하여 얻은 과도 응답을 PI 제어기를 적용한 시스템의 응답과 비교한 시뮬레이션 결과이다. Dual DOB를 적용한 시스템의 과도 응답은 제어 명령으로 인가한 펄스를 매우 잘 추종하고 있으며, 교차 결합으로 인한 과도 응답의 저하가 발생되지 않는 것을 시사하고 있다. 또한 Dual DOB 및 그 확장 구조는 주파수 영역에서 이득 여유, 위상 여유, 이득교차 주파수, 민감도 및 여민감도의 첨두치 및 구조화된 랍셈형 섭동에 대하여 시스템의 성능 및 안정성을 확인 할 수 있다.

5. 측정 잡음 제거 방법

외란 관측기의 설계 목적은 외란의 감쇠에 국한되어 있으며, 일반적으로 민감도가 개선되는 반면에 여민감도의 고주파 영역에서 이득이 증가하여 측정 잡음에 민감해진다. 본 논문에서는 일반적인 외란 관측기 설계 시 민감도를 유지하면서 측정 잡음에 둔감한 특성을 얻을 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 잡음은 일반적으로 측정 시 발생하는 것으로 고주파 성분으로 가정할 수 있으며, 고주파 영역에서 Q 필터의 이득이 0에 가까워지므로 식(8)은 고주파 영역에서 식(19)와 같이 근사화 될 수 있다.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} T(s) \cong \frac{C(s)P_n(s)}{\delta(s) + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (19)$$

$$P_n(s) = \frac{K_t \left(\frac{1}{z} s + 1 \right)}{js + B} \quad (20)$$

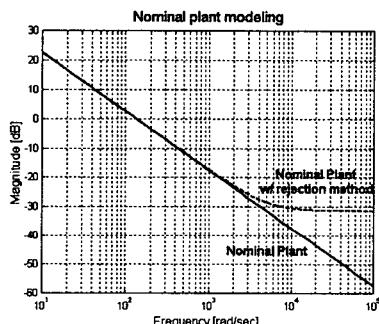


그림 6. 측정 잡음 감쇠를 위한 플랜트 모델링

만약에 식(19)에서 고주파 영역의 $\delta(s)$ 값이 크다고 가정한다면 주파수가 증가할수록 $C(s)P_n(s)$ 의 이득이 감소한다는 것을 고려해볼 때 우수한 잡음 제거 효과를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시하는 측정 잡음 제거 방법은 외란 관측기 설계 시 시스템의 공칭 모델로 식(20)을 적용하는 것으로, 그림 6과 같이 공칭 모델에 영점을 추가하여 고주파 영역의 $\delta(s)$ 값을 크게 함으로써 측정 잡음의 제거 성능을 개선하는 것이다. 이 때 z 는 영점의 위치로 $z = 5000 \text{ rad/sec}$ 로 가정한다.

그림 7은 새로운 공칭 모델 설정 방법을 적용하여 변화 없는 민감도와 개선된 여민감도를 비교하고 있다. 교환 관계가 성립하는 민감도와 여민감도 함수에서 최소의 희생으로 최대의 효과를 얻기 위한 최적의 모델링 방법은 영점의 위치 선택에 있다. 외란 관측기 설계 시 공칭 모델 설정의 기준은 시스템의 특성을 파악하여 외란과 측정 잡음의 주파수 대역을 확인하고 시스템을 불안정하게 만드는 주된 성분을 효율적으로 제거

하는데 두어야 할 것이다.

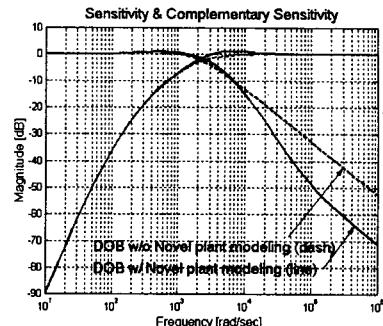


그림 7. 시스템의 민감도와 여민감도 특성

6. 결 론

본 논문에서는 시스템의 과도 응답 성능과 외란 제거 성능 사이의 절충 관계 없이 두 가지 모두를 더욱 개선하는 Dual DOB를 제안하였다. 또한 무한 확장의 가능성과 외란 관측기의 공칭 모델 설정 방법을 변형하여 측정 잡음의 개선을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다.

외란 관측기는 일반적인 외란의 의미를 단지 외부 외란이라는 것에서 벗어나 그 의미를 폭넓게 확장하여 해석이 가능하므로 그 적용 및 응용 범위가 매우 넓으며, 현재 제안한 Dual DOB를 이용하여 이력 현상(Hysteresis) 형태의 비선형성을 가지는 PZT 구동기를 제어하는 방법을 연구하고 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 정보통신부 선도기술사업지원의 일환으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," Trans. Jpn. Soc. Elect. Eng., vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [2] T. Umeno and Y. Hori, "Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two Degrees of Freedom Controller Design," IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 38, pp. 363-368, Oct., 1991.
- [3] K. Ohishi, K. Ohnishi and K. Miyachi, "Adaptive DC Servo Drive Control Taking Force Disturbance Suppression into Account," IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. 24, NO.1, pp. 171-176, Jan./Feb. 1988.
- [4] S. M. Shahruz, "Performance enhancement of a class of nonlinear systems by disturbance observers," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, pp. 319-323, Sept. 2000.