

수정된 외란관측기를 이용한 광디스크 드라이브 서보 시스템

Optical Disk Drive Servo System using Modified Disturbance Observer

정종일*, 정정주**, 표현봉***, 박용우****

(Jong Il Jeong, Chung Choo Chung, Hyeon-Bong Pyo and Yong Woo Park)

* 한양대학교 전자통신전파공학과(전화:(02)2298-5307, 팩스:(02)2281-9912, E-mail : allday@ihanyang.ac.kr)

** 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(전화:(02)2290-1724, 팩스:(02)2281-9912, E-mail : cchung@hanyang.ac.kr)

*** 한국전자통신연구원 정보저장소자팀(전화:(042)860-6274, 팩스:(042)860-5202, E-mail : pyo@etri.re.kr)

**** 한국전자통신연구원 정보저장소자팀(전화:(042)860-6274, 팩스:(042)860-5202, E-mail : ywpark@etri.re.kr)

Abstract : Using disturbance observer is effective to enhance tracking performance of system in the presence of disturbances. Various types of disturbance observers have been proposed to improve sensitivity of systems, but they tend to bring poor transient response due to cross coupling of inter-loops. In this paper, we propose dual disturbance observer(Dual DOB) which is designed to reduce the cross coupling. Dual DOB is consist of an internal DOB and an external DOB, that are designed for different object. The Dual DOB is applied to Optical Disk Drive tracking system. It is shown that the Dual DOB has improved performance over conventional DOB via experimental result. There is good agreement between simulation and experimental results.

Keywords : Tracking control, disturbance observer, optical disk drives, dual DOB

I. 서론

외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 선형 시스템에서 외란을 관측하고 제거하는데 효과적인 것으로 알려져 있다[1][2][3]. 최근에는 일부 비선형 시스템에서의 계수 변동에 의한 모델 불확실성, 입출력 토크 외란, 플랜트에 존재하는 마찰력 같은 비선형성까지도 확장된 의미의 외란으로 해석하여 효과적으로 제거할 수 있음이 확인되었다[4]. 또한, DOB는 외부 외란의 제거 성능을 개선하기 위하여 민감도를 개선하는 여러 가지 형태가 제안되었다. 그러나, 현재까지 제안된 DOB의 구조에서는 루프간 DOB의 교차결합(Cross-coupling) 발생 및 위상 뒤짐으로 인하여 과도응답의 성능이 저하되는 경향이 있었다. 이에 주파수 영역에서의 민감도 개선과 시간 영역에서의 과도응답 성능 사이에 절충이 필요함이 제시되었다[3]. Dual DOB는 설계 목적이 다른 내부와 외부 두 개의 DOB로 구성된다. 이로 인하여 두 DOB 간 교차결합의 영향을 줄여 시간 영역에서 우수한 과도응답을 얻을 수 있으며 주파수 영역의 민감도 또한 개선될 수 있음을 보였다[5].

CD나 DVD같은 광디스크 시스템은 디스크의 표면 진동, 디스크의 편심, 스피들 모터의 진동과 같은 여러 가지 외란들을 포함한다. 이러한 상황에서 강인성과 정밀도가 요구되는 고배속 대용량의 광디스크 드라이브 시스템을 위해 DOB는 좋은 대안이 될 수 있다 [6][7][9]. 본 논문에서는 Dual DOB를 광디스크 서보 시스템에 적용하여 앞섬뒤짐보상기와 일반 DOB, 그리고 Dual DOB의 성능을 비교하여 이를 실험적으로 검증한 결과를 보인다.

II. Dual DOB의 구조

1. DOB의 배경

일반적인 DOB는 출력단에 공칭 모델의 역함수를 추가하여 제어 입력과의 차로 외란을 추종하고 제어 입력단에 제환함으로써 외란을 제거하는 방법이다[3]. 일반적으로 공칭 모델의 역함수를 취할 때 순수 미분 성분이 발생하여 실제적인 역함수의 존재가 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Q필터를 추가하여 공칭 모델의 역함수를 적용할 수 있도록 하고 측정 잡음의 영향도 제거하게 된다. 이러한 목적에서 Q필터는 단일 이득을 가지는 저대역 통과 필터(LPF)의 형태를 지니며 DOB의 특성을 결정짓는 가장 중요한 요소이다. 외란 제거 성능은 Q필터의 분자 차수에 의존하며, 강인성은 Q필터의 상대 차수와 분모 차수에 의존한다 [7].

그림 1은 DOB를 적용한 시스템의 구조로 $P(s)$ 는 실제 플랜트, $P_n(s)$ 는 플랜트의 공칭 모델, $C(s)$ 는 기존의 제어기, $Q(s)$ 는 저주파 통과 필터의 전달함수를 각각

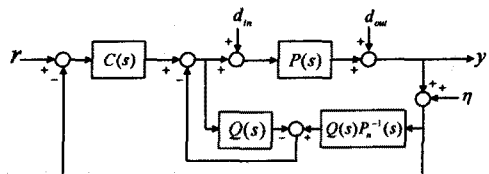


그림 1. DOB를 적용한 시스템의 구조.

Fig. 1. System Structure with DOB

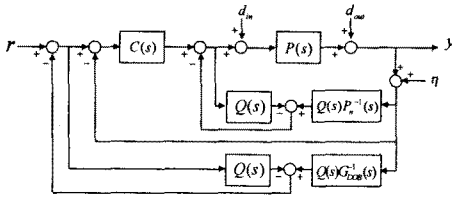


그림 2. Dual DOB를 적용한 시스템 구조
Fig. 2. System Structure with Dual DOB

의미한다. 그리고 r , d_{in} , d_{out} , n 은 각각 시스템에 인가되는 제어 입력, 입력 외란, 출력 외란, 측정 잡음을 나타내고, y 는 시스템의 출력 신호를 나타낸다.

2. Dual DOB의 성능 분석

PAC(Passive Adaptive Controller), MPEC(Multi-loop Perturbation Compensator), IMC(Internal Model Controller), EDOB(Error Based Disturbance Observer) 등 DOB의 성능을 향상시키기 위해 구조를 변형시키거나 확장하는 노력이 계속되어 왔다 [3][7][8][9]. 그러나, 보다 더 향상된 성능을 위한 변형 및 확장된 DOB 구조는 시간 영역에서의 과도응답 성능과 주파수 영역에서의 민감도 개선 성능 사이에서 상호 절충 관계가 성립하는 경향이 보이는데 이것은 DOB 상호간에 교차결합이 생성되기 때문이다[5].

교차결합은 DOB로 인하여 보상되는 양의 상호 중복으로 인한 것이며 Dual DOB는 이러한 중복을 피하기 위하여 각각의 DOB 설계 시 DOB의 성능 목표를 다르게 하여 적용한 구조이다. Dual DOB의 구조는 그림 2와 같이 내부의 DOB를 통하여 성능이 개선된 시스템에 외부의 DOB를 추가하여 내부에서 보상 및 개선하지 못한 외란을 추가적으로 제거하여 시스템의 성능 향상 및 민감도의 개선을 얻을 수 있다[5].

Dual DOB는 시스템 루프 내부에 그림 3(a)와 같이 일반적인 DOB를 가지고 있다. DOB의 성능 개선을 위하여 외부에 그림 3(b)와 같이 페루프 시스템을 공칭 모델로 설정하는 DOB를 추가한 것이 Dual DOB의 구조이다.

내부 DOB는 일반적인 DOB와 동일한 모델을 사용하고 외부 DOB는 원하는 페루프 전달함수의 특성방정식인 식(1)를 공칭 모델로 사용하여 설계한다.

$$G_{DOB}(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)P_n(s)} \quad (1)$$

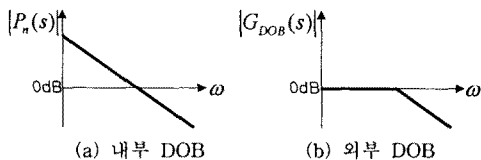


그림 3. Dual DOB에서 사용된 공칭 모델의 보드선도
Fig. 3. Bode Diagram of Dual DOB

이러한 Dual DOB는 모델의 불확실성이 존재하여도 강한 성능을 낼 수 있음이 확인되었으며 식(2)의 불확실성비 $\delta(s)$ 를 이용하여 전달함수의 특성방정식을 파악하면 Dual DOB의 성능을 분석할 수 있다.

$$\delta(s) = \frac{P_n(s) - P(s)}{P(s)} \quad (2)$$

시스템의 전체적인 입출력 관계는 제어 명령 (r), 토크 외란(d_{in}), 출력 외란(d_{out}), 측정 잡음(n)에서 출력까지를 각각 $TDual(s)$, $SDual-in(s)$, $SDual-out(s)$, $TDual-noise(s)$ 로 구분하여 나타낼 수 있으며 $\delta(s)$ 를 이용한 전달함수의 특성 방정식은 식(3)~(6)과 같다.

$$T_{Dual}(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (3)$$

$$S_{Dual-in}(s) = \frac{[1 - Q(s)]^2 P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (4)$$

$$S_{Dual-out} = \frac{[1 - Q(s)]^2 [\delta(s) + 1]}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (5)$$

$$T_{Dual-noise}(s) = \frac{[1 - Q(s)]^2 - 1 - C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1 - Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (6)$$

각각의 전달함수는 불확실성비 $\delta(s)$ 에 $[1 - Q(s)]^2$ 가 곱해진 형태로 표현될 수 있으며, 이로 인해 DOB에 비하여 $\delta(s)$ 의 변화에 더욱 둔감한 시스템이 된다. 또한, 식(4)와 (5)에서 분자항 일부가 $[1 - Q(s)]^2$ 으로 변화되어 일반적인 DOB보다 더욱 효과적인 민감도 개선을 얻을 수 있다[5].

3. Dual DOB의 확장성

Dual DOB 구조는 이론적으로 외부의 DOB를 병렬로 추가하여 무한 확장이 가능하다. 추가되는 DOB는 추가되기 전의 안정된 시스템을 전제로 설계되며, DOB간의 교차결합의 영향을 줄여서, 외란의 보상 성능을 더욱 개선시킬 수 있다. 첫 번째로 추가되는 외부 DOB는 Dual DOB를 적용한 시스템을 기반으로 설계하여 적용하는 것이 이상적이다. 그러나 공칭 모델은 모델 불확실성을 고려하지 못하기 때문에 $\delta(s) \approx 0$ 으로 가정한다면, 결과적으로 확장되는 모든 외부 DOB의 공칭 모델은 GDOB(s)가 된다. 확장된 Dual DOB의 구조는 그림 4와 같다.

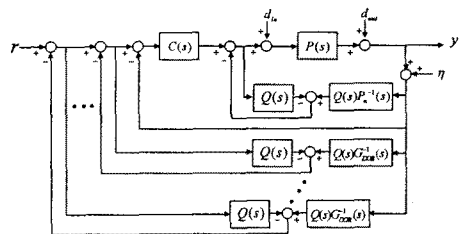


그림 4. Dual DOB의 확장된 구조
Fig. 4. Extended Structure of Dual DOB

4. 광 디스크 드라이브 시스템(ODD System)

Dual DOB의 모의실험을 위해 현재 양산되고 있는 LG DVD Combo 플레이어의 기판으로 하여 제어기를 설계/구현하였다. 대부분의 광디스크 드라이브의 픽업은 거친 운동 구동기(Coarse Actuator)와 정밀 운동 구동기(Fine Actuator)로 구성되어 있다. 트래킹 제어 방향에 대해서 스테핑 모터는 거친 운동 구동기로 사용되고 있고 VCM(Voice Coil Motor)은 정밀 운동 구동기로 사용되고 있다. DOB에 필요한 플랜트의 공칭 모델을 선정하기 위해 VCM Driver 입력으로부터 RF-Amp의 출력까지를 시스템의 공칭 모델로 선정하였다. 따라서 트랙 추종 시스템의 공칭 모델은 다음식(7)과 같이 2차식으로 근사화된다.

$$P_n(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

여기에서 ω_n 는 공진 주파수, ζ 는 감쇠비, K는 VCM Driver 입력으로부터 RF-Amp의 출력까지의 DC Gain을 의미한다. 매개변수 ω_n 는 326.72rad/sec, ζ 는 0.158, K는 4.003×107이다. 선정된 시스템 공칭 모델을 실험적으로 검증하기 위해 HP35670A Dynamic Signal Analyzer를 이용하여 패루프 시스템의 주파수 특성을 나타내는 보드 선도를 구할 수 있다. 그림 5는 실험적으로 구한 트랙 추종 제어 시스템의 패루프 보드 선도와 공칭 모델의 패루프 보드 선도를 나타내고 있다.

5. 모의실험

앞에서 언급한 바와 같이 DOB의 성질을 이용하여 공칭 모델에 근거한 선형 제어기를 설계하였다. 선형 제어기는 위상 앞섬뒤집보상기를 사용하여 식(8)과 같이 설계하였다. Q필터는 Binomial저주파 필터를 선택하여 분모가 2차인 Q20필터를 사용하였으며 τ 는 0.0031로 하여 식(9)와 같다[7].

$$C(s) = \frac{9.911s^2 + 8.918 \times 10^4 s + 2.006 \times 10^8}{s^2 + 9 \times 10^4 s + 3.677 \times 10^8} \quad (8)$$

$$Q_{20}(s) = \frac{1}{9.61 \times 10^{-6} s^2 + 6.2 \times 10^{-3} s + 1} \quad (9)$$

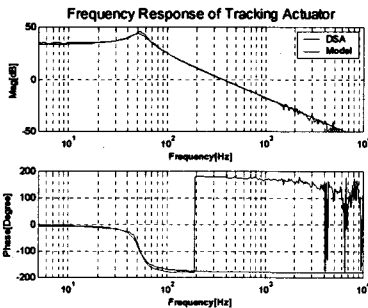


그림 5. 구동기의 주파수 특성

Fig. 5. Frequency Response of Actuator

이렇게 구해진 제어기는 Bilinear 방법을 이용하여 이산 시간 영역의 제어기로 변환하였다.

외란 관측기의 특성은 시스템의 민감도와 여민감도를 분석함으로써 파악할 수 있다. 그림 6은 민감도 함수를, 그림 7은 여민감도 함수를 나타낸 것으로 Dual DOB가 시간영역에서 과도응답 특성이 개선되었으며 주파수 영역에서 민감도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한 민감도의 개선시 발생하는 민감도의 첨두치

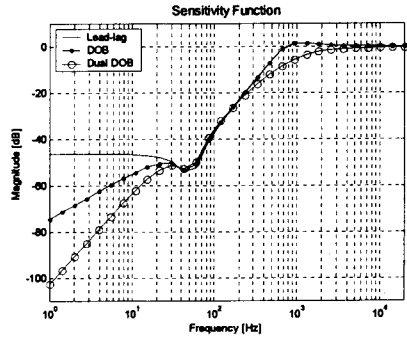


그림 6. 민감도 함수

Fig. 6. Sensitivity Function

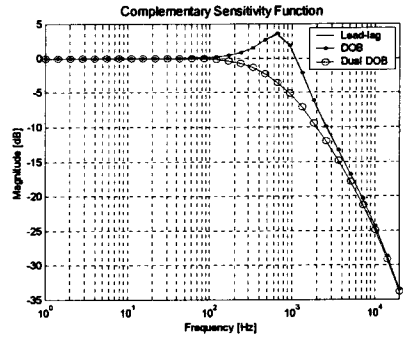
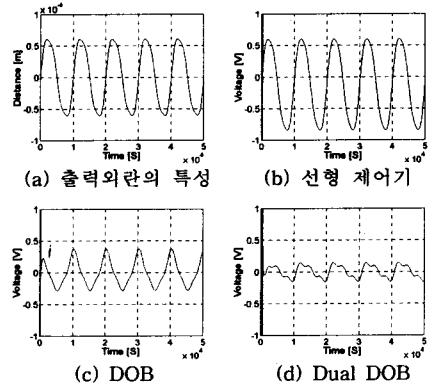


그림 7. 여민감도 함수

Fig. 7. Complementary Sensitivity Function



(c) DOB

(d) Dual DOB

그림 8. 출력 외란과 위치 오차

Fig. 8. Output Disturbance and Tracking Error

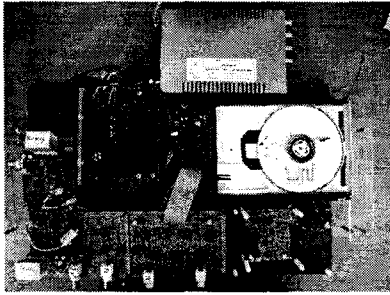


그림 9. 실험장치
Fig. 9. Experimental Setup

가 증가하는 효과도 고주파에서 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 그림 8(a)는 모의실험에 사용된 출력 외란의 특성으로 최대 $\pm 60\mu\text{m}$ 가 10Hz로 인가되었으며 Optic Gain은 $0.32\mu\text{m}/\text{V}$ 가 적용되었다. 그림 8(b),(c), (d)는 선형 제어기, DOB, Dual DOB를 적용한 제어기 위치 오차 모의실험 결과이다. CD규격에 의하면 $\pm 70\mu\text{m}$ 의 편심이 존재할 때 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 의 정밀도로 트래킹이 수행되어야 한다. 모의 실험결과에서 선형 제어기만으로는 CD규격을 만족하지 못하나 DOB 및 Dual DOB는 규격을 만족함을 확인할 수 있다.

6. 실험 결과

실험은 Actuator Driver, RF-Amp회로를 자체 제작하여 그림 9와 같이 시스템을 구성하였다. 제어기 구현에 사용된 DSP는 TI사의 TMS320VC33 DSP이며 16 비트 ADC, DAC를 사용하여 100KHz로 샘플링을 하였다. 그림 10은 실제 실험 결과로 그림 10(a)는 선형 제어기만을 적용한 결과이고, 그림 10(b)는 일반 DOB, 그림 10(c)는 Dual DOB를 적용한 결과이다. Optic Gain은 $0.32\mu\text{m}/\text{V}$ 이며 CD는 600rpm으로 회전하여 실험을 하였다. 실험결과는 선형 제어기, 일반 DOB, Dual DOB의 순서로 트랙 위치 오차가 줄어든다. 이는 모의실험과 일치하는 경향으로 Dual DOB의 경우 CD 규격을 만족함을 알 수 있다. 이로써 Dual DOB가 외부 외란 제거에 효과적인 제어기임을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 강인한 트랙 추종 성능을 보장할 수 있도록 수정된 구조의 Dual DOB를 기존 ODD 시스템에 적용을 하였다. Dual DOB는 교차결합의 영향을 줄인 두 개의 DOB로 구성되며 민감도가 개선된 주파수 특성과 우수한 과도응답을 얻을 수 있다. Dual DOB의 성능 확인을 위해 선형 제어기와 일반 DOB, Dual DOB를 비교하였다. 마지막으로, 각각의 제어기에 대하여 모의실험을 수행하고, 실험적으로 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년 정보통신부 선도기술사업지원의 일환으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

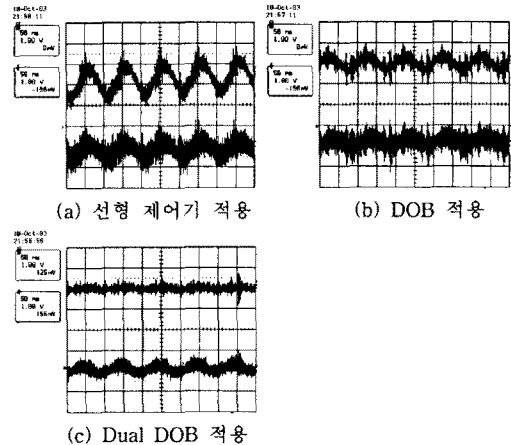


그림 10. 트래킹 실험 결과
(上:트랙 위치 오차, 下:제어신호)

Fig. 10. Experimental Results
(Upper:Tracking Error, Lower:Control Signal)

참고문헌

- [1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics", Trans. Jpn. Soc. Elect. Eng., vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [2] K. Ohishi, M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi, "Microprocessor controlled DC motor for load insensitive position servo system", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-34, pp. 44-49, Feb. 1987.
- [3] K. Ohishi, K. Ohnishi and K. Miyachi, "Adaptive DC Servo Drive Control Tracking 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 Trans. on Mechatronics, vol. 5, pp. 319-323, Sep. 2000.
- [5] K. W. Oh, C. C. Chung, M. C. Paek, "Performance Enhancement of Dynamic Systems by Disturbance Observers", 대한전자공학회 시스템 및 제어분야 합동추계학술대회 논문집, pp. 241-244, 2002.
- [6] K. Fujiyama, M. Tomizuka, R. Katayama, "Digital Tracking Controller Design For CD Players Using Disturbance Observer", Proc. of the 5th International Workshop on AMC, pp. 598-603, Jul. 1998.
- [7] K. J. Yang, Y. J. Choi, W. K. Chung, I. H. Suh, and S. R. Oh, "Robust tracking control of optical disk drive systems using error based disturbance observer and its performance measure", Proc. of ACC, pp. 1395-1400, 2002.
- [8] S. J. Kwon, W. K. Chung, "Robust performance of the multiloop perturbation compensator", Mechatronics, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 7, pp. 190-200, Jun. 2002.
- [9] H. T. Choi, I. H. Suh, "Disturbance Observer based Internal Model Controller Design : Applications to tracking Control of Optical Drive", Trans. KIEE., vol. 48A, No. 2, Feb. 1999.