

광디스크 드라이브 서보 시스템을 위한 수정된 외란관측기

Performance Enhancement of Optical Disk Drive Servo System using Dual modified Disturbance Observer

김 무 섭* , 정 정 주**
(Moo Sub Kim, Chung Choo Chung)

Abstract - The disturbance observer is effective in enhancing the performance of position control in high speed optical disk drive systems(ODDS). It is known that error based modified disturbance observer (EM-DOB) is more effective structure than general DOB. It has a simple structure and realization, but it loses robustness. We propose a dual modified disturbance observer(Dual mDOB). It consists of internal loop EM-DOB and external loop DOB. Those loops are designed for different objects. We see that the dual mDOB is an effective method for tracking performance.

Key Words :Tracking control, disturbance observer, optical disk drive, dual DOB

1. 서 론

외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 선형 시스템에서 외란을 관측하여 효과적으로 보상하는 원리의 제어기로 Ohnishi에 의하여 처음 제안되었다[1][2]. 그 후 외란관측기는 이론적 분석 되었으며[3], 최근 연구에서는 모델 불확실성, 토크, 출력 외란 그리고 플랜트에 존재하는 마찰력과 비선형성 등을 외란으로 간주하여 제거될 수 있음이 알려졌다[4]. CD 나 DVD 같은 광 디스크 구동시스템은 디스크 표면 진동, 디스크 편심 그리고 구동기 자체에 기인한 공진 등의 영향으로 구성되는 외란을 포함하게 된다. 트래킹 서보의 경우, 광 초점은 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 의 오차 범위 내로 트랙을 추정 해야 한다. 시스템에 내재된 외란은 ODD 시스템의 성능 향상에 있어서 제약이 된다[6]. 따라서 외란 관측기는 오차 범위 내로 트랙을 추정하는데 효과적인 방법이다. 일반적인 ODD 시스템은 기준 입력과 출력간의 오차(Tracking Error, TE)만이 측정 가능하다. 이는 일반적인 외란 관측기를 시스템에 적용함에 있어 문제가 된다. 이 문제를 해결하는 방법은 센서를 추가하여 기준 입력을 측정하여 외란 관측기에 적용하거나, 센서를 추가하지 않고 수정된 형태의 외란 관측기인 EDOB(Error Based DOB)를 적용 하는 것이다[7].

시스템에서 발생하는 외란에 대하여 민감도를 개선하는 방법으로 PAC(Passive Adaptive Controller), MPEC(Multi loop Perturbation Compensator), IMC(Internal Model Controller), EDOB(Error Based Disturbance Observer) 등의 다양한 형태의 외란 관측기 구조가 제안되었다[3][7]-[9]. 현재까지 제안된 DOB의 구조에서는 루프간 DOB의 교차결합(Cross-coupling) 발생 및 위상 뒤짐으로 인하여 과도응답의 성능이 저하되는 문제점이 있다[3]. 이는 주파수 영역에서의 민감도 개선과 시간 영역에서의 과도응답 성능 사이에 절충 관계(Trade Off)가 존재하기 때문이다. 각각의 외란 관측기마다

설계 기준을 다르게 한 Dual DOB는 외란 관측기 상호간에 교차결합의 영향을 줄일 수 있다. Dual DOB는 시간 영역에서 한 개의 외란 관측기에 비하여 과도응답의 특성의 저하가 없으며 주파수 영역에서의 민감도가 개선 될 수 있는 장점이 있다[5]. 그러나 구조가 복잡해지고 이로 인한 계산량의 증가는 피할 수가 없다. 오차를 기초로 한 외란 관측기(EM-DOB)는 기존 DOB 시스템에 비해 구조가 간편하고 쉽고 다양하게 구현할 수 있는 장점이 있으나, 모델 기반의 강인 제어 개념이 사라지게 되는 문제점이 있다[10].

따라서 본 논문에서는 Dual DOB의 복잡한 구조로 인한 계산 양을 줄이고 EM-DOB가 가지는 간편성을 살리면서 강인 제어 개념을 해결하고자 Dual mDOB 구조를 제안한다. 또한 이를 기존 광디스크 시스템에 적용하여 외란제거 성능과 민감도 개선을 검증하였다.

2. Dual MDOB의 구조

2.1 EM-DOB의 원리

외란관측기를 적용한 ODD 시스템에서 외란 관측기의 QP_n^{-1} 블록은 플랜트의 출력으로부터 제어 입력과 모델링 오차, 입·출력 외란 등을 추정 한다. ODD 시스템에서 플랜트의 DC 이득은 최소 60dB이며, 시스템의 출력으로부터 환산된 위치오차는 약 1V내외의 전압 레벨을 가진다. 이때의 QP_n^{-1} 블록은 -60dB의 전압감쇠가 일어난다. 따라서 1mV 정도의 전압으로부터 제어 입력과 외란이 생성 된다. 기존 제어 입력으로부터 1V 레벨의 전압이 외란 관측기에 인가 되므로 QP_n^{-1} 블록의 상대적 전압 값은 미미하다. 이는 ODD 서보 시스템 내부적인 오차 생성차계가 일부 구간을 제외하고 비선형적인 특성을 가지기 때문이다. 오차에 기초한 외란 관측기는 QP_n^{-1} 블록을 제외할 경우 그림 1과 같다. 이는 모델 기반의 강인 제어 개념이 사라지고 $1/(1-Q)$ 의 이득을 가지는 제어기로 구조가 변경된다. 즉, 특정대역(Q 필터의 절점 주파수 이내)에서 높은 이득을 가지는 제어기로 변화한다. 또한 일반DOB 시스템에 비해 그 구조가 더욱 간편하고 다양한 설계기법으로 쉽게 구현 할 수 있는 장점이 있다[10].

저자 소개

* 學生會員 : 漢陽大學校 電子通信電波工學科 碩士課程

** 正會員 : 漢陽大學校 電子電氣컴퓨터工學部 副教授·工博

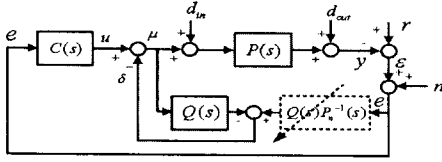


그림 1 EM-DOB의 구조

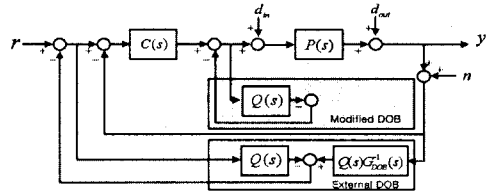


그림 2 Dual MDOB의 구조

2.2 Dual mDOB의 원리

앞에서 설명한 Dual DOB 구조는 시스템의 과도 응답 성능과 외란 제거 성능 사이의 절충 관계없이 두 가지 모두를 개선하는 구조이다. 그러나 내부 모델에 기초한 구조적인 복잡성이 존재한다. ODD 시스템의 EM-DOB 구조는 기존의 외란 관측기에 비하여 구조적인 성능 개선 효과를 볼 수 있으나, 모델 기반의 강인 제어 개념이 사라지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Dual DOB의 특성인 성능 목표를 다르게 하여 각각의 DOB를 설계 적용 하는 방법을 이용한다. 내부 루프에서는 EM-DOB의 특성인 $1/(1-Q)$ 의 이득을 가지며, 기존의 외란 관측기에 비해 구조적인 성능 개선 효과를 볼 수 있다.

Dual mDOB는 내부의 EM-DOB를 통하여 성능이 개선된 시스템에 외부의 외란 관측기를 추가하여 구성한다. 이를 통해 기존의 Dual DOB 구조보다 단순하면서 EM-DOB가 지닌 문제점을 해결할 수 있다. 그리고 Dual DOB와 같이 기존의 다중 루프 외란 관측기와 시간 영역에서 동일한 과도응답을 보이지만 주파수 영역에서는 외란에 대한 민감도가 개선됨을 보인다. 또한 Dual mDOB는 모델의 불확실성이 존재하여도 강인한 성능을 낼 수 있음이 확인되었으며 식(1)의 불확실성비 $\delta(s)$ 를 이용하여 전달함수의 특성 방정식을 파악하면 Dual mDOB의 성능을 분석할 수 있다.

$$\delta(s) = \frac{P_n(s) - P(s)}{P(s)} \quad (1)$$

시스템의 전체적인 입출력 관계는 제어 명령 (r), 토크 외란 (d_{in}), 출력 외란 (d_{out}), 측정 잡음 (n)에서 출력까지를 각각 $G_{Dual}(s)$, $S_{Dual-in}(s)$, $S_{Dual-out}(s)$, $T_{Dual-noise}(s)$ 로 구분하여 나타낼 수 있으며 $\delta(s)$ 를 이용한 전달함수의 특성 방정식은 식(2)~(5)와 같다.

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

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

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

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

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 $[1-Q(s)]^2$ 로 변화되어 일반적인 DOB보다 더욱 효과적인 민감도 개선을 얻을 수 있다[5].

2.3 광 디스크 드라이브 시스템(ODD System)

Dual mDOB의 모의실험을 위해 플랜트는 현재 양산되고 있는 삼성ODD를 기반으로 하여 제어기를 구현하였다. 대부분의 광디스크 드라이브의 픽업은 거친 운동 구동기(Coarse Actuator)와 정밀 운동 구동기(Fine Actuator)로 구성되어 있다. 트랙 추종 제어 방향에 대하여 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 다음 식(6)과 같이 2차식으로 근사화된다.

$$P_n(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

여기에서 ω_n 는 공진 주파수, ζ 는 감쇠비, K 는 VCM Driver 입력으로부터 RF-Amp의 출력까지의 DC Gain을 의미한다. 매개변수 ω_n 는 1885rad/sec, ζ 는 0.158, K 는 3.089×10^9 이다.

3. 모의실험 및 실험결과

3.1 모의실험

앞에서 언급한 바와 같이 선형제어기는 DOB의 공칭모델에 근거하여 설계하였다. 선형 제어기는 위상 앞섬 뒤짐 보상기를 사용하여 식(7)과 같이 설계하였다. Q필터는 Binomial 저주파 필터로 분모가 2차인 Q_{20} 필터를 사용하였으며, τ 는 0.0031로 하여 식(8)과 같다. 이렇게 구해진 제어기는 Bilinear 방법을 이용하여 이산 시간 영역의 제어기로 변환하였다.

$$C(s) = \frac{9.911s^2 + 8.918 \times 10^4 s + 2.006 \times 10^8}{s^2 + 9 \times 10^4 s + 3.677 \times 10^8} \quad (7)$$

$$Q_{20}(s) = \frac{1}{9.61 \times 10^{-6} s^2 + 6.2 \times 10^{-3} s + 1} \quad (8)$$

외란 관측기의 특성은 시스템의 민감도와 여민감도를 분석함으로써 파악할 수 있다. 그림 3은 민감도 함수를, 그림 4는 여민감도 함수를 나타낸 것으로 Dual mDOB가 시간영역에서 과도응답 특성이 개선되었으며 주파수 영역에서 민감도가 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한 민감도 개선시 발생 되는 민

감도의 첨두치가 증가하는 효과도 고주파에서 발생하지 않고 있음을 알 수 있다.

모의실험에 사용된 출력 외란의 특성으로는 최대 $\pm 60\mu\text{m}$ 에 77Hz로 인가되었으며 Optic Gain은 $0.32\mu\text{m}/\text{V}$ 가 적용되었다. 그림 5(a)는 선형 제어기, EM-DOB, Dual mDOB를 적용한 제어기 위치 오차 모의실험 결과이다. CD 규격에 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 CD 규격을 만족하지 못하나, EM-DOB, Dual mDOB는 규격에 만족함을 확인할 수 있다.

3.2 실험결과

실험은 Actuator Driver, RF-Amp 회로를 제작하여 시스템을 구성하였다. 제어기 구현에 사용된 DSP는 TI사의 TMS320VC33 DSP이며 16비트 ADC, DAC를 사용하여 100KHz로 샘플링을 하였다. 그림5는 모의실험과 실제 실험 결과로 그림 5(b)는 선형 제어기만을 적용한 결과이고 그림 5(c)는 EM-DOB를 적용한 결과이다. 그림 5(d)는 Dual mDOB를 적용한 결과이다. Optic Gain은 $0.32\mu\text{m}/\text{V}$ 이며 CD는 6000 rpm으로 회전시켜 실험을 하였다. 실험결과를 선형 제어기, EM-DOB, Dual mDOB의 순서로 트랙 위치 오차가 줄어든다. 이는 모의실험과 일치하는 경향으로 Dual mDOB의 경우 CD 규격을 만족하고 오차 범위 내에서 안정된 추정을 함을 알 수 있다. 이로써 Dual mDOB가 외부 외란 제거에 효과적인 제어기임을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 외란 관측기에 비해 구조적으로 간단한 EM-DOB를 바탕으로 수정된 구조를 가지는 Dual mDOB 구조를 제안하였다. 이는 Dual DOB 구조의 내부 모델을 기존의 외란 관측기에 비하여 간략화된 형태인 EM-DOB를 기반으로 하여 구조의 복잡성을 감소 시켰으며, Dual 구조를 통하여 EM-DOB의 단점인 모델 기반의 강인성을 보완하였다. 또한 Dual DOB의 특성인 주파수 영역에서의 외란에 대한 민감도 개선과 교차결합의 영향의 감소의 특성을 보였고 이를 모의 실험과 실험을 통하여 검증 하였다.

참고 문헌

- [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. Industrial Electronics, 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 Industrial 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.

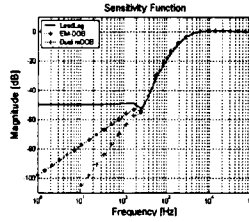


그림3. 민감도 함수

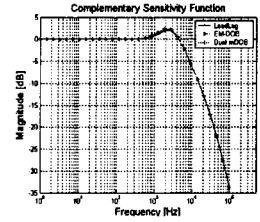
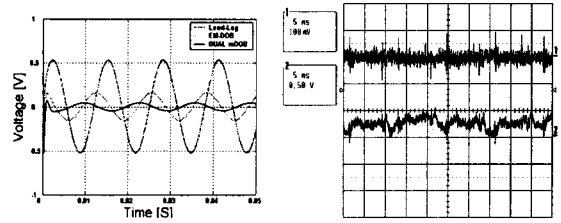
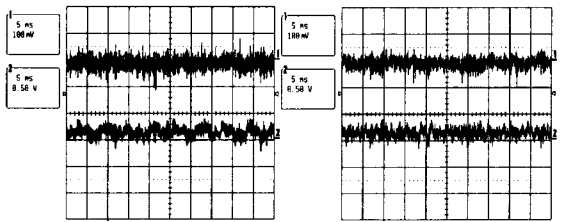


그림4. 여민감도 함수



(a) 모의 실험

(b) 선형제어기 적용



(c) EM-DOB 적용

(d) Dual mDOB 적용

그림 5. 모의실험 및 실험결과(上:제어신호, 下:트랙 위치오차)

- [5] K. W. Oh, C. C. Chung, M. C. Paek, "Performance Enhancement of Dynamic Systems by Disturbance Observers," 대한전자공학회 시스템 및 제어분야 학동추계학술대회 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," Proceeding of American Control Conference, vol.2, 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 Disk Drive," Trans. KIEE., vol. 48A, No. 2, Feb. 1999.
- [10] I. H. Kim, H. R. Kim, Y. J. Choi, I. H. Suh, "Error-based Modified Disturbance Observer for Optical Disk Drive," 대한 전기학회 하계학술대회 논문집. 2002.