

광디스크 드라이브 시스템의 트랙 추종 성능 향상 방법

論 文

54D-6-3

Tracking Performance Improvement of Optical Disk Drive System

金 洪 祿* · 徐 一 弘*
(Hong Rok Kim · Il Hong Suh)

Abstract - The tracking performance of optical disk drive(ODD) system can be improved using disturbance observer(DOB). But, DOB was not easily applied in the ODD system because the additional microprocessor was needed. In this paper, we propose an error-based modified disturbance observer(EM-DOB) for ODD system. Due to the simplified structure of EM-DOB, the system is easily implemented to the digital control algorithm or the analog circuit. In these algorithms, disturbances rejection performance of system can be tuned as Q filter parameters are selected. Based on analysis of sensitivity function, three guidelines of Q filter design are suggested. Experimental results of DOB and EM-DOB are evaluated under the forced disturbances.

Key Words : Optical Disk Drive, Tracking Performance, Disturbance Observer, Q Filter, Sensitivity Function

1. 서 론

최근 CD-ROM/RW, DVD-ROM과 같은 광디스크 드라이브(Optical Disk Drive, ODD)는 단위 저장용량의 증가와 사용 범위가 다양해짐에 따라 디스크에 데이터를 기록하고 재생하기 위한 초정밀 제어 기술이 요구되어 진다. 특히, 디스크의 면진동, 수평 진동과 같은 외란에 대응하는 기술을 개발하려는 노력이 계속되고 있다. Ohnishi에 의해 처음 제안된 DOB는 실제 시스템을 공칭 모델처럼 동작하게 하는 특징을 가지고 있다[1]. DOB의 경우 기존의 강인 제어 알고리즘에 비해 제어 구조가 간단하고 외란 제거에 뛰어난 성능을 보이고 있어, ODD를 비롯한 다양한 시스템에 적용되고 있다[2-5]. 그런데, DOB 알고리즘을 ODD 시스템에 적용하기 위해 오차 기반의 외란 관측기(Error-based Disturbance Observer, EDOB) 구조가 제안되었으며[2], 강인성과 제어 성능을 고려하여 Q 필터를 설계하는 방법이 개발되었다[3,4]. 또한, 내부의 DOB를 통하여 성능이 개선된 시스템에 외부의 DOB를 추가하여 주파수 영역에서의 민감도를 개선한 이중 구조의 외란 관측기(Dual Disturbance Observer)가 제안되었다[5].

실제로 ODD 서보 시스템에서 DOB를 적용할 경우 우수한 트랙 추종 성능을 보인다. 그런데, ODD 시스템과 같은 양산용 전자 제품에서 DOB를 구현하기 위해서는 대부분의 기존 제어기가 hard-wired DSP로 이루어져 있기 때문에 마이크로프로세서를 별도로 사용하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 DOB의 구조를 수정하여, 별도의 마이크로프로세서를

를 사용할 필요 없이 아날로그 형태로 구현이 가능한 오차 기반의 수정된 외란 관측기(Error Based Modified Disturbance Observer, EM-DOB)를 제안하였다.

2. 트랙 추종 제어 알고리즘

광디스크가 회전함에 레이저 스폿이 트랙의 중심에서 허용 오차 이내에서 항상 추종하도록 제어하는 데 ODD 서보 시스템의 목적이 있다. 이때 제어기는 입력을 잘 추종하도록 설계되어야 하고 외란의 영향을 최대한 줄이도록 설계되어야 한다. 트랙 추종 서보에서는 편심에서 발생하는 radial 진동을 다루고 있는데, 편심 이외의 진동 성분은 상대적으로 작고 불확실한 관계로 제어기 설계시에 편심만을 고려한다. 이때, ODD 서보 시스템을 2차식으로 근사화하여 플랜트의 공칭 모델로 식 (1)과 같이 표현한다.

$$P_n(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기에서 ω_n 는 공진주파수, ζ 는 감쇠비, K 는 액츄에이터, 모터 드라이버, RF-AMP를 포함한 DC 계인을 나타낸다.

2.1 외란 관측기

DOB의 특징은 기존의 제어 입력과 별도의 공칭 모델링 오차를 보상하는 제어 입력을 생성하는 구조에 의해 가능하다. 이때, 실제 시스템에서의 모델링 오차, 매개 변수의 변화량, 외부에서 인가되는 외란 신호등을 모두 오차신호로 간주하여 보상하게 된다. ODD 시스템의 경우 레이저 스폿에 의해 트랙에서 벗어난 정도를 RF-AMP로써 생성해 내기 때문에 기준 입력(r)과 출력(y)을 대신하여 오차 신호(e)를 기준으로 서보 시스템이 동작된다. 따라서 그림 1과 같이 DOB는 재구성될 수 있다.

* 교신저자, 正會員: 漢陽大學校 電子通信電波工學科 博士課程

E-mail : hrkim@ihanyang.ac.kr

正會員: 漢陽大學校 情報通信大學院 教授 · 工博

接受日字: 2005年 2月 24日

最終完了: 2005年 4月 18日

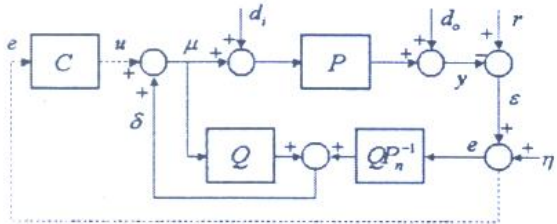


그림 1. 오차 기반의 외란 관측기
Fig. 1. Error-based disturbance observer

이때, d_i , d_o , η , 각각 입력 외란, 출력 외란, 측정 잡음이고, δ 는 관측된 외란이다. 그리고 P 는 실제 시스템이고, P_n 은 공칭 모델이다. Q 는 저역 통과 필터로서 Q 필터라 한다. 만약 $\eta=0$ 을 가정하여 시스템의 입출력 함수는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= G_{re}r + G_{doe}d_o + G_{die}d_i \\ \text{where} \\ G_{re} &= \frac{PP_nC + PQ}{P_n(1-Q) + PQ + PP_nC}, \\ G_{die} &= \frac{PP_n(1-Q)}{P_n(1-Q) + PQ + PP_nC}, \\ G_{doe} &= \frac{P_n(1-Q)}{P_n(1-Q) + PQ + PP_nC}. \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 오차 기반의 수정된 외란 관측기

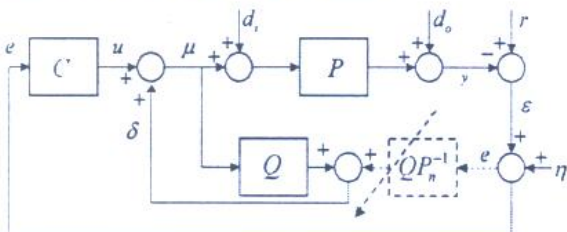


그림 2. EM-DOB의 구조
Fig. 2. Configuration of EM-DOB

DOB에서 QP_n^{-1} 블록은 플랜트의 출력으로부터 제어 입력과 출력 신호(ODD의 경우 오차 신호)로부터 외란을 추정하는 역할을 수행한다. 그런데, ODD 서보 시스템의 경우 플랜트의 DC 이득이 80dB에 이르기 때문에 QP_n^{-1} 블록에서는 반대로 -80dB의 전압 감쇠가 일어나므로 0.1 mV의 작은 전압으로부터 제어 입력과 외란을 재생하여야 한다. 반면에 기존 제어 입력으로부터는 1V 내외의 전압이 Q 필터에 인가되므로 QP_n^{-1} 블록의 상대적 전압 값이 미미하다. 따라서 그림 2와 같이 오차에 기초한 외란 관측기에서 QP_n^{-1} 블록을 제외한 외란 관측기(EM-DOB)를 구현할 경우 모델 기반의 장인 제어 개념이 없어지고 $1/(1-Q)$ 의 높은 이득을 가지는 제어기로 변경됨을 의미한다. 이러한 구조하에서 각 부분의 전달 함수를 구하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} G_{re} &= \frac{PC}{1-Q+PC}, \quad G_{die} = \frac{P(1-Q)}{1-Q+PC}, \\ G_{doe} &= \frac{1-Q}{(1-Q)+PC}. \end{aligned} \quad (2)$$

그런데, DOB에서 P_n^{-1} 블록을 proper하게 만들어 주는 역할을 하는 Q 필터는 공칭 모델의 상대 차수에 맞추어 Q 필터의 분모/분자 차수와 상대 차수를 적절히 결정할 수 있다[4,5]. DOB, EM-DOB 실험에 사용되는 Q 필터는 식 (3)과 같은 Binominal 필터로써, 필터의 시정수 τ 는 1.989×10^{-4} sec로 설정하였다.

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi}(\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad \text{where } a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)!} \quad (3)$$

여기에서 m 과 n 은 $m \geq n$ 을 만족하는 필터의 분모 차수와 분자 차수를 나타낸다.

DOB와 EM-DOB의 민감도 함수에 (3)과 같은 다양한 형태의 Q 필터를 적용하면 그림 3과 같은 외란 제거 성능을 얻을 수 있다. EM-DOB의 여민감도 함수가 DOB의 여민감도 함수와는 수식적인 형태가 상이함에도 불구하고 비슷한 주파수 응답 특성을 나타내는데, 이는 ODD 시스템에 대해 EM-DOB에서의 $1/(1-Q)$ 의 높은 이득이 DOB와 유사한 외란 제거 성능을 가지게 함을 알 수 있다.

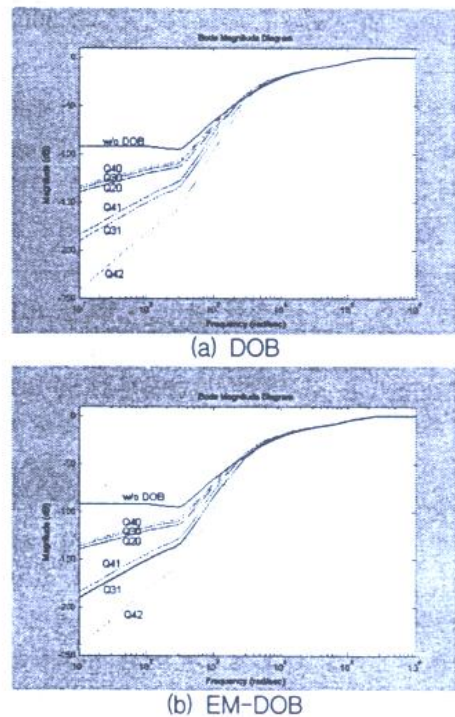


그림 3. Q 필터에 따른 외란 제거 성능
Fig. 3. Disturbance rejection performance according to Q filter

그리고 참고 문헌[4,5]에서 제시한 DOB의 설계 가이드라인이 EM-DOB에도 공통으로 적용될 수 있다.

(가이드라인 1) Q 필터의 상대차수
필터의 상대 차수가 커질수록 외란 제거 성능은 오히려 나빠진다. 따라서 제어기의 외란 제거 성능을 증가시키기 위해서는 Q_{20} , Q_{31} , Q_{42} 등과 같은 작은 상대 차수를 가지는 Q

필터를 선택해야 한다.

(가이드라인 2) Q 필터의 분자차수

시스템의 외란 제거 효과는 분자 차수에 비례하게 된다. 따라서 분자 차수가 큰 필터는 외란 제거 성능을 향상시킨다.

(가이드라인 3) Q 필터의 분모차수

필터의 분모 차수가 작을수록 외란 제거 성능은 좋아진다. 만약 분자 차수가 0일 경우, Q_{20} , Q_{30} , Q_{40} 필터 중에서 Q_{20} 필터가 가장 좋은 외란 제거 성능을 나타낸다.

3. 모의실험 및 실험 결과

앞에서 제시한 DOB, EM-DOB의 모의실험과 성능 실험을 위해 현재 양산되는 DVD-ROM 드라이브를 대상으로 하였다. ODD 서보 시스템의 공칭 모델은 식 (1)과 같이 선정하였고, 이때, 매개 변수 ω_n 은 314.16 rad/sec, ζ 는 0.3155, K 는 1.0677×10^8 이다. Hard-wired DSP로 구현된 lead-lag 보상기를 외부 루프의 피드백 제어기로 그대로 사용하기 때문에 공칭 모델이 플랜트와 유사하도록 설정하였다. 모의실험과 실험에서 사용한 제어기의 전달 함수는 다음과 같다.

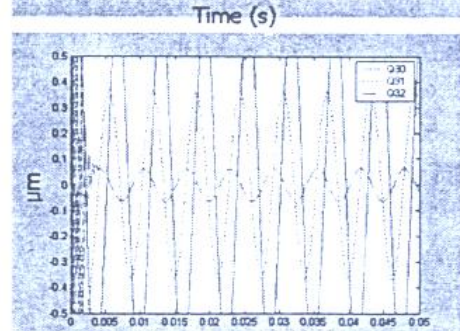
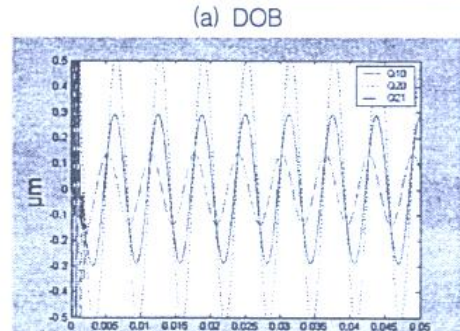
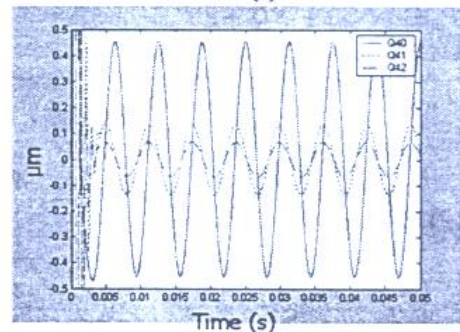
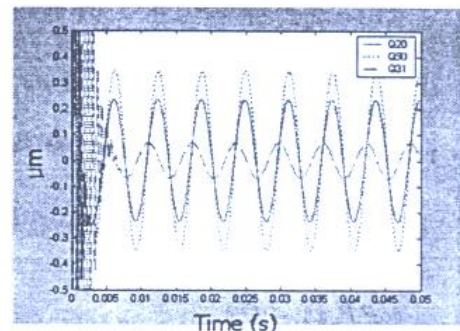
$$C(s) = \frac{9.44 \times 10^{-12} s^3 + 2.88 \times 10^{-7} s^2 + 0.00025s + 5}{5.99 \times 10^{-13} s^3 + 7.09 \times 10^{-7} s^2 + 0.00021s + 1}$$

모의실험은 Matlab에서 DVD-ROM 서보 시스템에 대해 DOB와 EM-DOB를 구현하였고, Matlab의 simulink를 이용하여 수행되었다. 이때, 사용한 출력 외란은 최대 $\pm 150\mu\text{m}$ 크기로 200Hz의 주기를 가진다. 그림 4는 DOB, EM-DOB를 적용한 모의실험 결과로서, 사용하는 Q 필터에 따라서 다른 외란 제거 특성을 보임을 알 수 있다. 그런데, DOB Q 필터의 경우 공칭모델의 상대 차수 때문에 상대 차수가 2이상인 필터를 사용하여야 하지만, EM-DOB Q 필터의 경우 별도의 제약 사항이 없기 때문에 상대 차수가 1인 필터의 적용이 가능하다.

본 실험에서는 강제로 트랙 추종 시스템 내에 외란을 인가하기 위해 $150\mu\text{m}$ 편심 DVD 디스크를 사용하여 기존의 선형 제어기, DOB, EM-DOB에 대해 편심을 보상하는 능력을 평가하였다. DVD-ROM 드라이브에서 제어 신호(오차, 제어 입력)를 측정하고 DOB에서의 외란 추정치를 계산하고 전달하기 위해 Innovative사의 DSP 보드 M44를 사용하였다. 이때, hard-wired DSP 칩을 채택하고 있는 lead-lag 보상기의 제어주파수는 176.4Khz에 이르지만, DOB의 제어주파수는 계산량을 고려하여 20KHz로 설정되었다. 모의실험을 통해 DOB에서 우수한 외란 제거 성능을 보였던 Q_{31} 필터를 적용하여 실험을 수행하였다. EM-DOB의 경우 Q_{32} 필터가 Q_{31} 필터보다 더 뛰어난 외란 제거 성능을 보이지만, DOB와의 성능 비교를 위해 Q_{31} 필터가 채택되었다. 이때, EM-DOB는 그 구조가 간단하여 별도의 제어 전용 보드가 필요 없기 때문에, 그림 5와 같이 OP-AMP를 사용하여 하드웨어로 구현 가능하다. 아날로그 EM-DOB는 Q 필터를

구성하는 OP-AMP 2개와 가산기를 구성하는데 필요한 2개 정도의 OP-AMP로 구성할 수 있다.

그림 6에서는 기존 제어기에서 오차 신호가 최대-최소 640mV인 반면에 DOB와 EM-DOB는 모두 500mV 이내로 감소하였음을 알 수 있다. 선형 제어기에서 디스크의 편심 성분 따라 오차 신호가 주기성을 가지는 반면에, DOB, EM-DOB에서는 편심 주파수에 따라 보상하는 제어 입력이 생성되기 때문에 오차 신호에 편심 성분을 찾아보기 어렵다. 제안한 EM-DOB의 경우 제어 구조가 간단하고 아날로그나 디지털 형태로 모두 구현이 가능하기 때문에 트랙 추종 알고리즘으로서의 효용성을 가진다.



(b) EM-DOB

그림 4. 외란 제거 모의실험 결과

Fig. 4. Simulation results for disturbance rejection

4. 결 론

본 논문에서는 ODD 서보 시스템의 제어 성능 향상을 위해 적합한 강인 제어 알고리즘으로 DOB를 실험하였다. 그런데, ODD 시스템과 같은 양산용 전자 제품에서 DOB를 구현하기 위해서는 별도의 마이크로프로세서를 사용하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 별도의 마이크로프로세서를 사용할 필요 없이 아날로그 형태로 구현이 가능한 EM-DOB를 제안하였다. DOB와 EM-DOB의 민감도 함수를 이용하여 두 가지 알고리즘의 외란 제거 성능이 유사하며, 또한 설계시에 다양한 형태의 Q 필터에 대해 동일한 설계 가이드라인을 사용할 수 있음을 보였다. 그리고 제안한 알고리즘의 효용성 검증을 위해 ODD 서보 시스템의 편심 보상하는 능력을 평가하였다.

참 고 문 헌

- [1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," Transactions Japanese Society of Electrical Engineering, vol. 107-D, pp.83-86, 1987.
- [2] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 43, no. 1, pp. 48-55, 1996.
- [3] K. Fujiyama, M. Tomizuka and R.Katayama, "Digital tracking controller design for CD player using disturbance observer," Proc. of the 5th International Workshop on AMC, pp. 598-603, Jul., 1998.
- [4] 최영진, 양광진, 정완균, 김홍록, 서일홍, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (1) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석," 제어 자동화 시스템 공학회 논문지, vol. 8, no. 8, pp. 655-664, 2002.
- [5] 김홍록, 최영진, 서일홍, 정완균, 박명관, 이경호, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (2) : 광디스크 드라이브 서보 시스템에의 적용 실험," 제어 자동화 시스템 공학회 논문지, vol. 9, no. 4, pp. 270-276, 2003.
- [6] 정종일, 정정주, 표현봉, 박용우, "수정된 외란관측기를 이용한 광디스크 드라이브 서보 시스템," 정보 및 제어 학술회의, pp. 372-375, 2003.

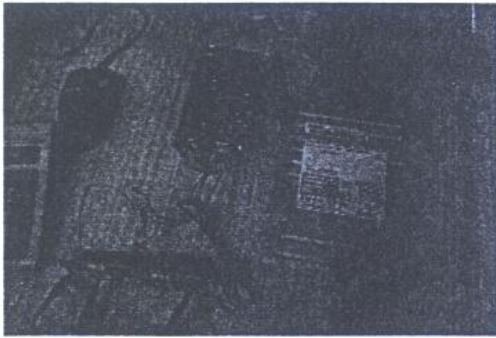
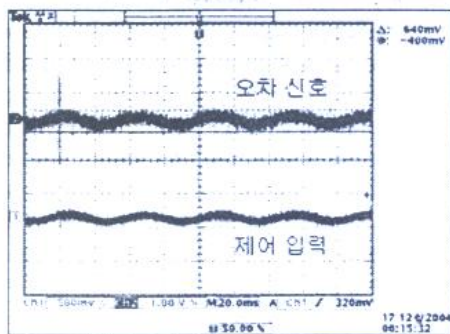
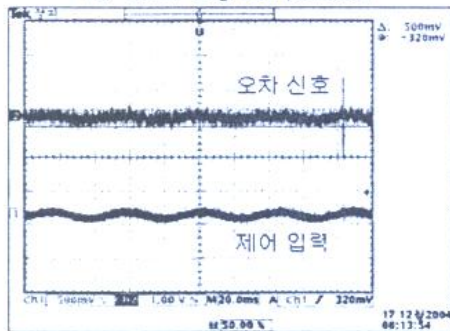


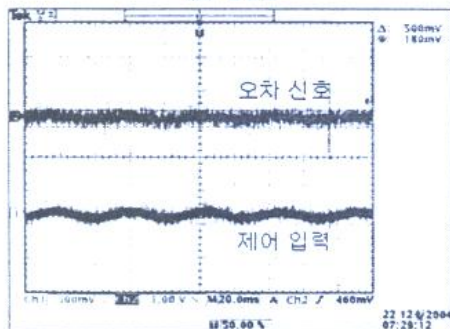
그림 5. 아날로그 EM-DOB 실험 세트
Fig. 5. Experimental apparatus of analog EM-DOB



(a) Lead-Lag compensator



(b) DOB



(c) EM-DOB

그림 6. 편심 보상 실험 결과
Fig. 6. Experimental Result of Eccentricity Compensation