

오차 기반의 수정된 외란 관측기를 이용한 광디스크 드라이브의 트랙 추종 성능 향상

Tracking Performance Improvement for Optical Disk Drive Using Error-based Modified Disturbance Observer

김홍록*, 최영진, 서일홍, 정완균

(Hong Rok Kim, Youngjin Choi, Il Hong Suh, and Wan Kyun Chung)

Abstract : Generally, the tracking performance of optical disk drive(ODD) system can be improved using a disturbance observer(DOB). However, a DOB is not easily applied in an ODD system because an additional microprocessor, such as a digital signal processor(DSP), is needed. This paper shows how a DOB system can be replaced by the error-based modified disturbance observer(EM-DOB) when two mathematical conditions are satisfied. Due to the simplified structure of EM-DOB, the algorithm is easily implemented as an analog circuit, which is suitable for the ODD servo system. Additionally, in these algorithms, disturbances rejection performances can be tuned as Q filter parameters. Similar to a DOB system, three design guidelines of a Q filter can be applied. Experimental results of DOB and EM-DOB are evaluated under forced disturbances.

Keywords : optical disk drive, disturbance observer, error based modified disturbance observer, Q filter

I. 서론

최근 CD-ROM/RW, DVD-ROM과 같은 광디스크 드라이브(ODD: Optical Disk Drive)에서는 단위 저장용량이 증가하고 고속으로 디스크에 데이터를 기록하고 재생하기 위해 초정밀 서보 제어 기술이 요구되어진다. 특히 고배속 대용량 드라이브의 경우는 알려진 기계적인 공진, 스피들의 일탈, 외부 충격, 디스크의 상하 좌우 진동 등의 문제가 더욱 심각해져, 디스크의 기록 밀도에 따라 요구되는 제어의 정밀도를 만족하는 것이 더욱 난제가 된다. 대부분의 ODD에서는 hard-wired DSP를 사용하여 고전적인 lead-lag 제어기로 서보 제어를 수행한다. 이때, 전통적인 설계 기술인 보데 선도를 이용하여 위상과 게인에 적절한 여유를 두며 제어를 설계한다. 하지만, 기존 제어기만으로 디스크의 장착정도나 디스크 자체의 편심에서 발생하는 수평 진동과 같은 외란에 대응하는 것이 역부족이기 때문에 별도의 편심 보정 알고리즘을 채용하고 있다. 본 논문에서는 편심 보정 알고리즘으로 많이 사용하는 학습 알고리즘 대신에 기존의 고전 제어기에 쉽게 구현할 수 있는 외란 보상 알고리즘을 제안하였다. 이때 외란 보상 알고리즘은 가능한 한 적은 계산량을 가지고 쉽게 하드웨어로 구현 가능하여야 한다는 전제 조건을 지닌다.

현재까지 제안된 수많은 알고리즘들 중에서 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 좋은 대안이 될 수 있다. Ohnishi에 의해 처음 제안된 DOB는 실제 시스템을 공칭 모델처럼 동작하게 하고 모델링 오차, 시스템의 변화, 외부에

서의 원하지 않는 입력을 모두 외란으로 다루어 제거하는 특징을 가지고 있다[1]. 그리고 그 구조의 이해와 구현이 간단하여 하드 디스크를 비롯한 다양한 서보 시스템에 적용하기 위한 노력이 계속 되고 있다[2-5]. 현재는 ODD 시스템에 적용하기 위해 DOB 알고리즘을 계속 발전시켜[6] 오차 기반의 외란 관측기(Error-based Disturbance Observer, EDOB) 구조가 제안되었으며[9], 강인성과 제어 성능을 고려하여 Q 필터를 설계하는 방법이 개발되었다[7-9]. 또한, 내부의 DOB를 통하여 성능이 개선된 시스템에 외부의 DOB를 추가하여 시스템의 과도 응답 특성을 개선하고 주파수 영역에서의 민감도를 개선한 이중 구조의 외란 관측기(dual disturbance observer)가 제안되었다[10].

본 논문에서는 ODD 서보 시스템의 트랙 추종 성능 향상을 위해 적합한 강인 제어 알고리즘으로 DOB를 선택하였다. 그리고 ODD 시스템의 특성을 고려하여 기존의 DOB에 비해 구조적인 장점을 가지고 동일한 성능을 지니는 오차 기반의 수정된 외란 관측기(Error-based Modified Disturbance Observer, EM-DOB)를 제안하였다. 이때, 몇 가지 조건들을 만족할 경우 DOB는 EM-DOB과 동일한 특성을 지니고 있음을 증명하였다. 본 논문에서 실험 대상으로 하는 ODD 시스템은 이러한 조건들을 만족하기 때문에 EM-DOB의 적용이 가능하다. 제안한 EM-DOB 알고리즘은 기존의 강인 제어 알고리즘에 비해 그 구조가 더욱 간편하고 아날로그와 디지털 제어기 형태로 쉽게 구현 할 수 있는 장점을 가진다. 제안한 알고리즘의 효율성 검증을 위해 편심 디스크를 사용하여 ODD 서보 시스템의 트랙을 추종하는 능력을 평가하였다.

II. 광디스크 드라이브 시스템

ODD 시스템은 일반 제어 시스템과는 달리 기준 입력이

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 4. 12., 채택확정 : 2006. 3. 3.

김홍록 : 임베디드소프트웨어협동연구센터(hrkim@escrc.re.kr)

최영진 : 한양대 전자정보시스템공학과(cyj@hanyang.ac.kr)

서일홍 : 한양대 정보통신대학원(ihsuh@hanyang.ac.kr)

정완균 : 포항공대 기계공학과(wkchung@postech.edu)

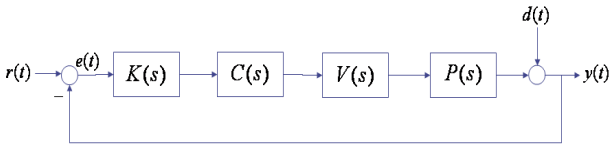


그림 1. ODD 서보 시스템의 블록도.
Fig. 1. Block diagram of ODD servo system.

존재하지 않는다. 광디스크가 회전함에 레이저 스팟이 트랙의 중심에서 벗어난 정도를 오차 신호로 발생시킨다. 따라서 ODD 서보 시스템은 오차 신호가 항상 허용오차 이내에서 추종하고 외란의 영향을 최대한 줄이도록 제어하는 데 그 목적이 있다. 트랙 추종 서보에서는 편심이나 기타 시스템에서 발생하는 radial 진동을 다루고 있는데, 편심 이외의 진동 성분은 상대적으로 작고 불확실한 관계로 제어기 설계시에 편심만을 고려한다. 그런데, 광디스크에서 오차 신호는 비선형성을 가지므로 선형성이 보장되는 구간인 트랙 피치의 $\pm 1/4$ 내에서 제어가 이루어져야만 설계한 성능이 보장된다.

그림 1은 ODD 서보 시스템의 구성을 나타낸 블록도이다.

여기에서 $d(t)$ 는 디스크의 편심으로 인해 발생하는 외란, $e(t)$ 는 트랙 추종 오차, $K(s)$ 는 RF 증폭기, $C(s)$ 는 제어기, $V(s)$ 는 드라이버, $P(s)$ 는 트랙 추종 구동기를 의미한다.

1. RF 증폭기의 모델링

트랙 추종 오차의 경우 대물렌즈가 한 트랙 이동할 때마다 하나의 정현파가 출력된다. RF 증폭기에는 픽업에서 서보 오차를 검출하는 오차 검출부분과 검출된 오차를 저주파로 필터링하는 2단 필터가 포함된다. 따라서 RF 증폭기의 모델링은 픽업의 검출 감도와 2단 저주파의 곱으로 나타난다. LPF의 절점 주파수를 ω_{ca} , ω_{cb} 라고 가정하면 RF 증폭기는 다음 식과 같이 표현된다.

$$K(s) = \frac{2\pi A/P}{(1 + s/w_{ca})(1 + s/w_{cb})} \tag{1}$$

여기에서 A 는 오차 신호의 최대-최소값이며, P 는 트랙 피치의 값으로서 CD의 경우 $1.6\mu\text{m}$, DVD의 경우 $0.74\mu\text{m}$ 값을 가진다.

2. 트랙 추종 구동기의 모델링

트랙 추종 구동기의 경우 드라이버의 출력단에 코일이 연결되어 있고 코일에서 발생하는 힘에 의해 구동기가 움직인다. 따라서 드라이버 출력단에 인가되는 전압을 입력으로 할 때 구동기의 모델링은 저항-코일(R-L)의 전기적 모델과 질량을 가지는 스프링-댐퍼 시스템으로 표현되는데, 2차 시스템으로 선형 근사화하여 사용한다.

$$P(s) \approx \frac{k_n w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \tag{2}$$

여기에서 k_n 은 DC 게인, ζ 는 댐핑 계수 그리고, w_n 은 고유 주파수를 의미한다.

3. 드라이버의 모델링

드라이버의 경우 단순히 1차 저역 통과 필터로서 표현된

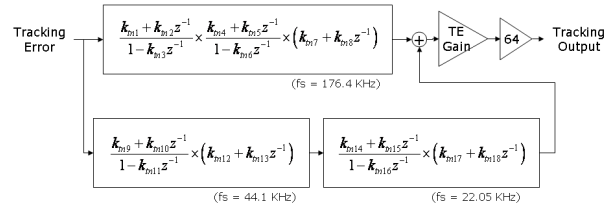


그림 2. Hard-wired DSP 제어기의 블록도.
Fig. 2. Block diagram of hard-wired DSP controller.

다. 따라서 드라이버의 게인을 K_d 라고 하며, 절점 주파수를 ω_{cd} 라고 하였을 때 아래의 식과 같다.

$$V(s) = \frac{K_d}{1 + s/w_{cd}} \tag{3}$$

4. 제어기의 모델링

트랙 추종 제어기는 보통 3차의 제어기가 사용되며 위상 보상 능력을 증가시키기 위해 lag-lead-lead 형태를 지닌다.

$$C(s) = K_c \frac{(1 + s/z_3)(1 + s/z_2)(1 + s/z_1)}{(1 + s/p_3)(1 + s/p_2)(1 + s/p_1)} \tag{4}$$

(4)와 같이 성능을 만족하는 아날로그 제어기 $C(s)$ 를 설계한 후에 디지털화하는 방법에 의해 디지털 제어기 $C(z)$ 로 변환하여 hard-wired DSP로 구현된다. Hard-wired DSP란 그림 2와 같이 시프트 레지스터와 같은 시간 지연 소자, 덧셈기, 곱셈기등으로 구현되어 제어기의 형태가 하드웨어적으로 고정되어 있는 것을 말한다.

그림 2에서는 $k_{m1} \sim k_{m18}$ 까지의 파라미터로서 디지털화된 lag-lead-lead 제어기의 극점과 영점들을 표현한다. 현재, 대부분의 ODD 서보 시스템에서는 가격적인 측면을 고려하여 대부분 hard-wired DSP를 채택하고 있다.

5. 시스템의 모델링

ODD 시스템에서 제어기를 제외한 드라이버, 구동기, RF 증폭기 부분을 합하여 플랜트로 간주하여 시스템의 공칭모델 P_n 을 구해야 한다. 이때, 드라이버와 구동기 전달 함수에서 각각의 LPF 절점 주파수가 시스템 대역폭으로부터 멀리 있기 때문에, 이를 무시하고 게인만을 반영하도록 하면, 플랜트의 공칭 모델은 (5)와 같이 2차식으로 근사화한다.

$$P_n(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \tag{5}$$

여기에서 w_n 는 공진 주파수, ζ 는 감쇠비, K 는 구동기, 모터 드라이버와 RF 증폭기를 포함한 DC 게인을 의미한다. 그리고 이때, 원래의 제어기 $C(s)$ 는 DOB에서 외부 루프를 관장하는 제어기로 설정한다면 ODD 서보 시스템의 구조에서 큰 변화 없이 DOB를 구현 할 수 있다.

III. 광디스크 드라이브를 위한 트랙 추종 알고리즘

1. 외란 관측기(DOB)

DOB는 실제 시스템을 시스템의 공칭모델처럼 동작하게 하는 특징으로 최근 강인 제어 및 외란 제거 제어에 널리

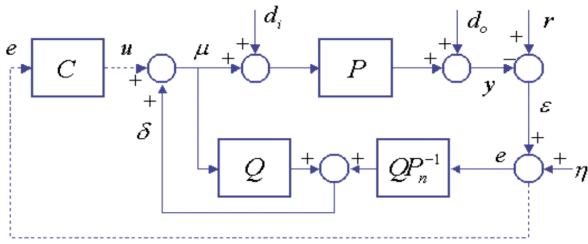


그림 3. 오차 기반의 외란 관측기.
Fig. 3. Error-based disturbance observer.

적용되고 있다. DOB의 외란 제거 특성은 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 대개의 서보 시스템과 달리 출력 신호(y)를 직접 관측할 수 없다. 즉, 레이저 스팩에 의해 트랙에서 벗어난 정도를 RF 증폭기로서 생성해 내기 때문에 기준 입력(r)과 출력(y)을 대신하여 오차 신호(e)를 기준으로 서보 시스템이 동작된다. 따라서 그림 3과 같이 DOB는 재구성 될 수 있다.

여기서 d_i , d_o , η 는 각각 입력 외란, 출력 외란, 측정 잡음이고, δ 는 관측된 외란이다. 그리고 P 는 실제 플랜트이고, P_n 은 공칭 모델이다. Q 는 저역 통과 필터로서 Q 필터라 한다. 이러한 구조 하에서 시스템의 입출력 함수는 다음과 같이 나타난다.

$$\epsilon = G_{r\epsilon}r + G_{d_i\epsilon}d_i + G_{d_o\epsilon}d_o + G_{\eta\epsilon}\eta \quad (6)$$

여기에서 각 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_{r\epsilon} = \frac{PP_nC + PQ}{\chi(s)}, G_{d_i\epsilon} = \frac{PP_n(1-Q)}{\chi(s)},$$

$$G_{d_o\epsilon} = \frac{P_n(1-Q)}{\chi(s)}, G_{\eta\epsilon} = \frac{PP_nC + PQ}{\chi(s)}, \quad (7)$$

where $\chi(s) = P_n(1-Q) + PQ + PP_nC$

이때, 이상적으로 Q 필터가 1인 주파수 영역에서는

$$G_{r\epsilon} = 1, G_{d_i\epsilon} = 0, G_{d_o\epsilon} = 0, G_{\eta\epsilon} = 1$$

으로 동작하고, Q 필터가 0인 주파수 영역에서는

$$G_{r\epsilon} = \frac{PC}{1+PC}, G_{d_i\epsilon} = \frac{P}{1+PC},$$

$$G_{d_o\epsilon} = \frac{1}{1+PC}, G_{\eta\epsilon} = \frac{PC}{1+PC}$$

으로 근사적으로 동작한다. 이는 Q 필터의 대역폭 내에서는 외란을 제거하고 기준 입력을 그대로 추종하지만, 대역폭 밖에서는 원래 시스템의 특성을 그대로 유지함에 따라 DOB로서의 성질을 지니고 있다.

그런데, DOB에서 P_n^{-1} 블록을 proper하게 만들어 주는 역할을 하는 Q 필터는 공칭 모델의 상대 차수를 고려하여 설계된다. 실제적으로 외란관측기의 성능을 결정하는 Q 필터

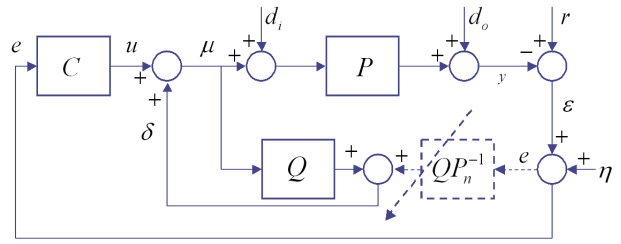


그림 4. EM-DOB의 구조.
Fig. 4. Configuration of EM-DOB.

는 DOB의 강인성, 외란 제거성능에 대한 관계가 수학적으로 유도되었다[7,9]. 따라서 Q 필터의 시정수, 분자/분모 차수, 상대 차수는 적절히 결정되어야 한다. 여기에서 사용한 Q 필터는 Lee 등에 의해 제안되었던 binomial 필터를 사용하였다[2].

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi}(\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad \text{where } a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)!i!} \quad (8)$$

여기에서 τ 는 필터 시정수, m 과 n 은 $m \geq n$ 을 만족하는 필터의 분모 차수와 분자 차수를 나타낸다.

2. 오차 기반의 수정된 외란 관측기(EM-DOB)

DOB에서 QP_n^{-1} 블록은 플랜트의 출력으로부터 제어 입력과 외란으로 간주 될 수 있는 모델링 오차, 입력 외란, 출력 외란 등을 추정하는 역할을 수행한다. 그런데, ODD 서보 시스템의 경우 플랜트의 DC 이득이 최소 80dB에 이르는 시스템인데, 시스템의 출력으로부터 환산된 위치 오차의 경우 약 1V 내외의 전압 레벨을 유지하기 때문에 QP_n^{-1} 블록에 의해 반대로 -80dB의 전압 감쇠가 일어나므로 0.1mV 정도의 전압으로부터 제어 입력과 외란을 재생하여야 한다. 반면에 기존 제어 입력으로부터는 1V 레벨의 전압이 DOB에 인가되므로 QP_n^{-1} 블록의 상대적 전압 값이 미미하다. 따라서 오차 기반의 외란 관측기에서 QP_n^{-1} 블록을 제외한 외란 관측기(EM-DOB)를 구현한다. 그림 3에서 오차에 기초한 외란 관측기에서 QP_n^{-1} 블록을 제외할 경우 그림 4와 같은 구조를 지닌다. 이는 모델 기반의 강인 제어 개념이 없어지고 $1/(1-Q)$ 의 높은 이득을 가지는 제어기로 그 구조가 변경됨을 의미한다.

이러한 구조 하에서 각 부분의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_{r\epsilon} = \frac{PC}{1-Q+PC}, G_{d_i\epsilon} = \frac{P(1-Q)}{1-Q+PC},$$

$$G_{d_o\epsilon} = \frac{1-Q}{1-Q+PC}, G_{\eta\epsilon} = \frac{PC}{1-Q+PC} \quad (9)$$

3. DOB와 EM-DOB의 비교

DOB와 EM-DOB의 수학적 연관성을 분석하기 위해 DOB, EM-DOB의 전달 함수를 비교하였다. 이때, DOB의 전달 함수 (7)에서 분자/분모를 P_n 으로 나눈 후, EM-DOB의 전달 함수 (9)와 정리하면 표 1과 같다.

표 1. DOB와 EM-DOB의 전달 함수.

Table 1. Transfer functions of DOB and EM-DOB.

	DOB	EM-DOB
G_{re}	$\frac{PC + PP_n^{-1}Q}{1 - Q + PC + PP_n^{-1}Q}$	
$G_{d\kappa}$	$\frac{P(1 - Q)}{1 - Q + PC + PP_n^{-1}Q}$	$\frac{P(1 - Q)}{1 - Q + PC}$
$G_{d\omega}$	$\frac{1 - Q}{1 - Q + PC + PP_n^{-1}Q}$	$\frac{1 - Q}{1 - Q + PC}$
$G_{\eta\epsilon}$	$\frac{PC + PP_n^{-1}Q}{1 - Q + PC + PP_n^{-1}Q}$	$\frac{PC}{1 - Q + PC}$

표 1에서 DOB의 전달 함수에서 다음의 조건을 만족한다면 EM-DOB 전달함수로 근사화할 수 있다.

$$|1 - Q + PC| \gg |PP_n^{-1}Q| \tag{10}$$

$$|PC| \gg |PP_n^{-1}Q| \tag{11}$$

이때, (10)에서 공칭 모델과 실제 플랜트가 동일하다고 가정한다면 $(1+PC)$ 는 원래 시스템의 민감도 함수의 역수와 같으므로 다음과 같다.

$$|Q| \ll |1 - Q + PC| = \left| \frac{1}{S_n} - Q \right|$$

이를 양변에 $|S_n|$ 을 곱하면

$$|S_n||Q| \ll |1 - S_nQ|$$

여기에서 Q 는 저역 통과 필터이므로 크기가 1인 주파수대역과 0인 대역으로 나누면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} |1 - S_nQ| \gg |S_n| & \text{if } |Q| = 1 \\ |1 - S_nQ| \gg 0 & \text{if } |Q| = 0 \end{cases} \tag{12}$$

따라서 주어진 시스템에 대해 민감도 함수를 구한 후 $(1 - S_nQ)$ 의 크기가 많이 커지도록 즉, (12)의 조건을 만족하도록 Q 필터를 선정하여야 한다.

또 다른 조건인 (11)에서는 양변을 $|P|$ 로 나눈다면 (13)과 같이 된다.

$$|C| \gg |P_n^{-1}Q| \tag{13}$$

(13)은 주어진 제어기 C 의 크기가 DOB에서 피드백 역할을 수행하는 QP_n^{-1} 블록보다 크다는 조건을 의미한다. 즉, 플랜트 공칭모델의 DC 게인이 매우 커서 QP_n^{-1} 블록의 크기가 제어기보다 상대적으로 많이 작아진다는 것을 나타낸다. 이는 앞서 설명한 ODD 시스템의 물리적 특성에 근거하여 DOB에서 QP_n^{-1} 블록을 제거하여 EM-DOB를 제안하였던 것을 수식적으로 뒷받침해 준다. 따라서 실제 플랜트와 공칭모델을 동일하게 사용하고 (12)와 (13)을 만족하는 시스템에 대해서는 DOB를 EM-DOB로 대체할 수 있다.

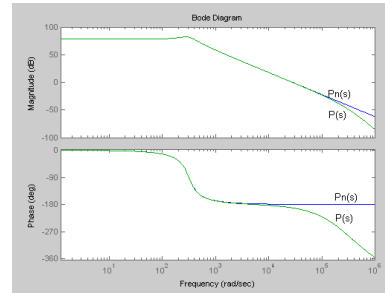
IV. 모의실험 및 실험 결과

앞에서 제시한 DOB, EM-DOB의 모의실험과 성능 실험을 위해 현재 양산되는 DVD-ROM 드라이브를 대상으로 하

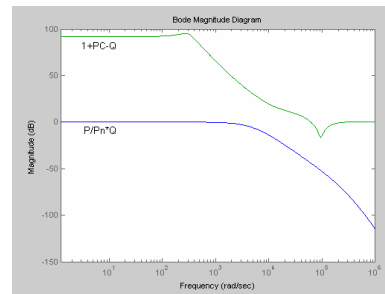
였다. ODD 서보 시스템의 공칭 모델은 (5)와 같이 선정하였고, 이때, 매개 변수 ω_n 는 314.16 rad/sec, ζ 는 0.3155, K 는 1.0677×10^8 이다. 기존의 Lag-Lead-Lead 제어기를 외부 루프의 피드백 제어기로 그대로 사용하기 때문에 공칭 모델이 플랜트와 유사하도록 설정하였다. 모의실험에서 사용한 제어기의 전달 함수는 다음과 같다.

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

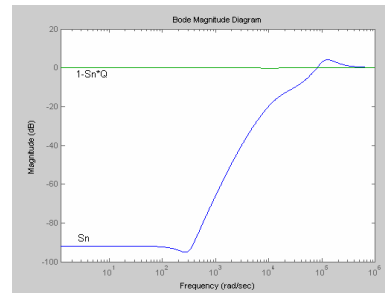
DOB, EM-DOB에서 사용하는 Q 필터는 (8)과 같으며, 필터의 시정수 τ 는 1.989×10^{-4} sec로 동일하였다.



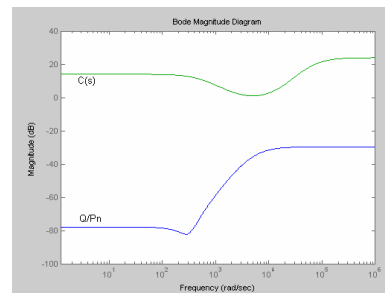
(a) $P(s)$ vs. $P_n(s)$



(b) $(1 - Q + PC)$ vs. $PP_n^{-1}Q$



(c) $(1 - S_nQ)$ vs. S_n



(d) $C(s)$ vs. QP_n^{-1}

그림 5. 전달 함수들의 보데 선도.

Fig. 5. Bode diagrams of several transfer functions.

DOB 시스템을 구현하기 위해 사용한 실제 플랜트와 공칭 모델을 비교하면 그림 5(a)와 같다. 근사화한 공칭 모델이 일부 고주파 영역을 제외하고는 일치함을 알 수 있다. 그리고 EM-DOB 시스템을 적용할 수 있는 조건을 확인하기 위해 (10), (12), (13)을 도시하면 그림 5(b)-(d)와 같다. 그림 5(b)에서 (10)의 조건을 만족한다는 것을 확인할 수 있고, 그림 5(c)처럼 실제 플랜트와 공칭 모델이 일치하는 주파수대에서는 (12)의 조건을 만족함을 알 수 있다. 또한, ODD 시스템의 DC 게인이 거의 80dB 정도로 크기 때문에 (13)의 조건에서처럼 제어기의 크기가 QP_n^{-1} 블록보다 훨씬 커짐을 그림 5(d)에서 확인할 수 있다. 따라서 제시한 ODD 시스템은 DOB를 적용하는 대신에 EM-DOB를 대체 적용할 수 있다. 실제로 DOB를 적용한 경우와 EM-DOB를 적용한 경우에 그림 6과 같이 민감도 함수를 비교해 보면 동일함을 알 수 있다.

그림 6의 민감도 함수를 보면 DOB와 EM-DOB 시스템의 경우 Q 필터가 바뀌에 따라 외란 제거 성능이 차이가 있음을 볼 수 있다. 참고 문헌[7]에서 제시한 DOB의 설계 가이드라인을 EM-DOB에 적용할 수 있음을 모의실험을 통해 검증할 수 있었다.

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.

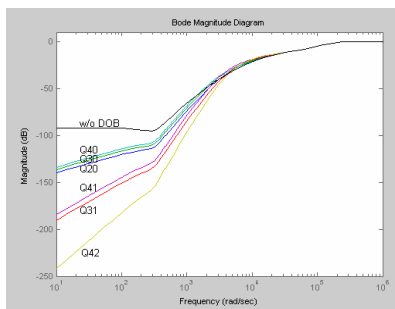
가이드라인 3: Q 필터의 분모차수

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.

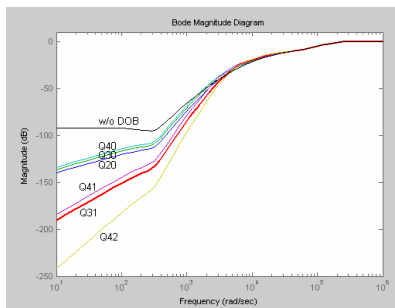
모의실험은 Matlab에서 DVD-ROM 서보 시스템에 대해 기존의 lead-lag 제어기, DOB, EM-DOB를 구현하였고, Matlab의 simulink를 이용하여 수행하였다.

그림 7은 lead-lag 제어기, EM-DOB 시스템에 대해 최대 $\pm 150\mu\text{m}$ 크기의 200Hz 출력외란을 인가하였을 때의 모의 실험 결과를 보여준다. Lead-lag 제어기에 비해, EM-DOB를 적용한 실험에서 오차 신호가 작아지는 것을 알 수 있다. 그런데, 일반적으로 DOB를 사용할 경우 Q 필터를 선택할 때 공칭모델의 상대 차수 때문에 상대 차수가 2이상인 필터를 사용하여야 하지만, EM-DOB Q 필터의 경우 상대 차수가 1인 필터의 적용이 가능하므로 Q 필터의 선택의 폭이 넓다.

실험에서는 DVD-ROM 드라이브에 대해 제어 신호(오차, 제어 입력)를 측정하고 제어 알고리즘에서 계산한 외란 추정치를 전달하기 위해 Innovative사의 DSP 보드 M44를 추가로 사용하였다. 그리고 가산회로를 구성하여 기존의 제어 입력과 외란 추정치를 합하여 서보 시스템에 인가하였다.

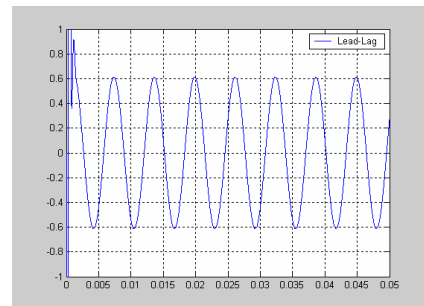


(a) DOB

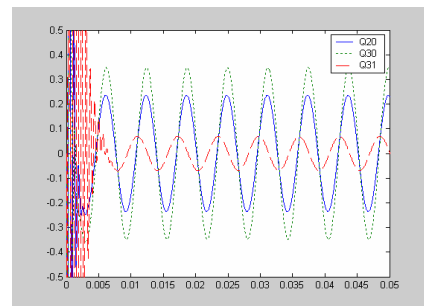


(b) EM-DOB

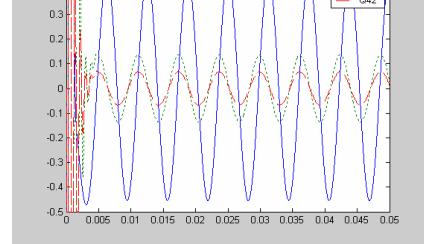
그림 6. DOB와 EM-DOB의 민감도 함수.
Fig. 6. Sensitivity functions of DOB and EM-DOB.



(a) Lead-lag controller



(b) EM-DOB



(b) EM-DOB

그림 7. 모의실험 결과.
Fig. 7. Simulation results.

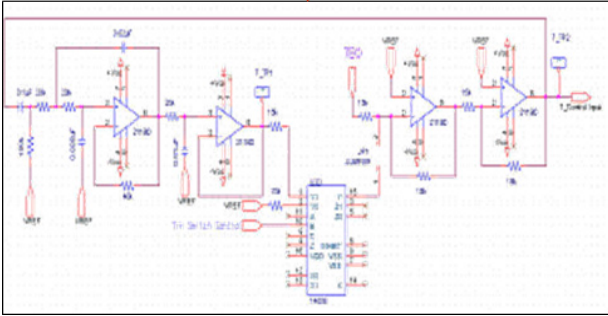
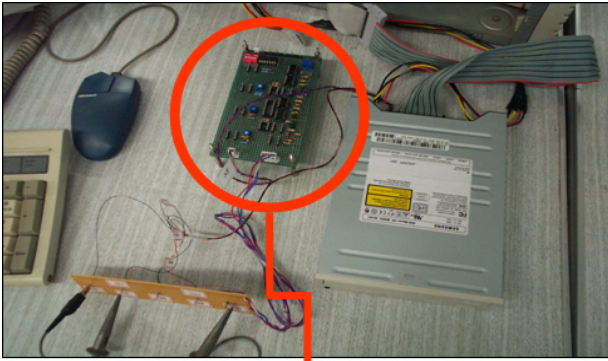


그림 8. 아날로그 EM-DOB 실험 장치.

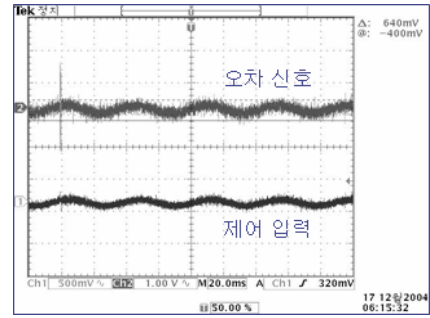
Fig. 8. Experimental apparatus for analog EM-DOB.

하지만, EM-DOB의 경우 그 구조가 간단하여 별도의 제어 보드가 필요 없고, 그림 8과 같이 OP-AMP를 사용하여 하드웨어로 구현이 가능하다.

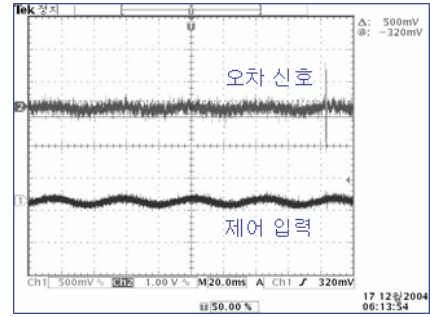
아날로그 EM-DOB는 그림 8과 같이 아주 간소화된 회로로 구성된다. Q 필터를 구성하는 OP-AMP 2개와 가산기를 구성하는데 필요한 2개 정도의 OP-AMP로 전체 회로를 나타낼 수 있다. 여기에 추가적으로 제어 입력 단에서 30Hz 미만의 저주파 DC 성분이 통과할 수 있도록 고주파 통과 필터를 추가로 구현하였다. 이는 오차 신호의 저주파 성분에 연동하여 거친(coarse) 구동기가 구동할 수 있도록 하기 위함이다.

본 실험에서는 강제로 트랙 추종 시스템 내에 외란을 인가하기 위해 150 μ m 편심 DVD 디스크를 사용하여 기존의 선형 제어기, DOB, EM-DOB에 대해 트랙을 추종하는 능력을 평가하였다. 모의실험을 통해 DOB, EM-DOB 모두에서 우수한 외란 제거 성능을 보였던 Q_{31} 필터를 적용하여 평가 실험을 수행하였다. 그리고 드라이브의 회전 속도에 따라 편심 주파수 성분이 최고 160Hz까지 바뀌기 때문에 이를 고려하여 Q 필터의 차단 주파수 800Hz로 높여 구현하였다.

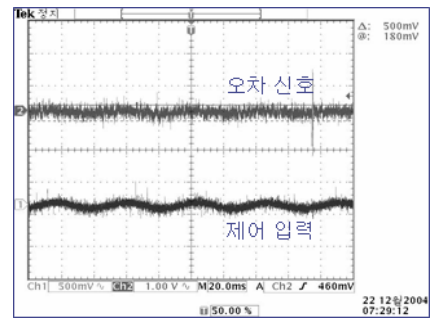
그림 9에서는 lead-lag 제어기에서 오차 신호의 최대-최소 값이 640mV인 반면에 DOB, EM-DOB는 모두 500mV 이내로 감소하였음을 알 수 있다. 즉, lead-lag 제어기에서 디스크의 편심 성분에 따라 오차 신호가 주기성을 가지는 반면에, DOB, EM-DOB에서는 편심 주파수에 따라 보상하는 제어 입력이 생성되기 때문에 오차 신호에 편심 성분을 찾아보기 어렵다. 따라서 DOB, EM-DOB 모두 우수한 편심 보상 능력을 지니지만, 제안한 EM-DOB의 경우 제어 구조가



(a) Lead-lag controller



(b) DOB



(c) EM-DOB

그림 9. 편심 디스크를 이용한 트랙 추종 실험 결과.

Fig. 9. Tracking experimental results using an eccentricity disk.

간단하고 아날로그나 디지털 형태로 모두 구현이 가능하기 때문에 좋은 편심 보상 알고리즘으로서의 효용성을 가진다.

V. 결론

본 논문에서는 ODD 서보 시스템의 트랙 추종 성능 향상을 위해 적합한 강인 제어 알고리즘으로 DOB를 선택하였다. DOB에서는 시스템의 공칭 모델을 사용하여 외부에서 인가되는 외란이나 모델링 오차 등을 추정해 내는 유사한 제어 구조를 가진다. 또, ODD 시스템의 특성을 고려하여 DOB 구조를 수정한 EM-DOB를 제안하였다. 이때, 몇 가지 조건들을 만족할 경우 DOB는 EM-DOB과 동일한 특성을 지니고 있음을 증명하였다. 본 논문에서 실험 대상으로 하는 ODD 시스템은 이러한 조건들을 만족하기 때문에 EM-DOB의 적용이 가능하다. 제안한 EM-DOB 알고리즘은 기존의 강인 제어 알고리즘에 비해 그 구조가 더욱 간단하고 아날로그와 디지털 제어기 형태로 쉽게 구현할 수 있는 장점을 가진다. 제안한 알고리즘의 효용성 검증을 위해

편심 디스크를 사용하여 ODD 서보 시스템의 트랙을 추종하는 능력을 평가하였다. 기존의 선형 제어기에 비해 DOB, EM-DOB 모두 모의실험과 실제 실험에서 우수한 트랙 추종 능력을 가지고 있음을 보였다.

참고문헌

[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] C. J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 513-526, 1999.
 [4] A. Tesfaye, H. S. Lee, and M. Tomizuka, "Sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control system," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 32-38, 2000.
 [5] S. Komada, N. Machii, and T. Hori, "Control of redundant manipulators considering order of disturbance

observer," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 413-420, 2000.
 [6] 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.
 [7] 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.
 [8] 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.
 [9] K. Yang, Y. Choi, and W. K. Chung, "On the tracking performance improvement of optical disk drive servo systems using error-based disturbance observer," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 270-279, 2005.
 [10] 정종일, 정정주, 표현봉, 박용우, "수정된 외란관측기를 이용한 광디스크 드라이브 서보 시스템," *정보 및 제어 학술회의*, pp. 372-375, 2003.



김 홍 록

1992년 한양대 전자공학과 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 1994~1998년 삼성테크윈 정밀기기연구소 전임연구원. 2005년 한양대 전자통신전파공학과 박사. 2005년~현재 임베디드소프트웨어 협동연구센터 선임연구원. 관심분야는

강인제어 알고리즘, 로봇 및 자동화 시스템 개발.



최 영 진

1994년 한양대 정밀기계공학(학사). 1996년 포항공대 기계공학(석사). 2002년 포항공대 기계공학(박사). 2002년~2005년 한국과학기술연구원(KIST) 지능로봇연구센터 선임연구원. 2005년~현재 한양대학교 안산캠퍼스 전자컴퓨터공학부 조교수. 관심분야는 휴머노이드 로봇 보행 제어, 휴머노이드 로봇 전신공조 제어, 선형/비선형 강인 제어, 자동조정 PID제어, 디스크 구동 시스템의 제어.



서 일 홍

1977년 서울대 전자공학과 졸업. 1979년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1982년 동 대학원 박사. 1982~1985년 대우중공업 기술연구소. 1985년~현재 한양대학교 정보통신대학원 교수. 관심분야는 인공지능 알고리즘, 센서기반의 로봇 제어.

즘, 센서기반의 로봇 제어.



정 완 균

1981년 서울대학교 기계설계학(학사). 1983년 한국과학기술원 기계공학(석사). 1987년 한국과학기술원 생산공학(박사). 1987년~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 여유자유도 로봇의 제어, 이동로봇 및 수중로봇의 설계 및 제어, 기계 시스템의 강인제어 등.

로봇의 설계 및 제어, 기계 시스템의 강인제어 등.