

강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (2) : 광 디스크 드라이브 서보 시스템에의 적용 실험

Design of Disturbance Observer Considering Robustness and Control Performance (2) : It's Application for Optical Disc Drive Servo System

김홍록, 최영진, 서일홍, 정완균, 박명관, 이경호

(Hong Rok Kim, Youngjin Choi, Il Hong Suh, Wan Kyun Chung, Myung Kwan Park, and Kyung Ho Lee)

Abstract : The disturbance observer (DOB) has been widely utilized for high precision and high speed motion control application. However, it still lacks the analysis for the robustness brought by using DOB. This paper summarizes six guidelines for the design of DOB taking into account the robustness and control performance in case of the second order system. For effectiveness of the proposed guideline, the actual implementation and experimental results of the DOB is compared in the Optical Disk Drive(ODD) servo system. In the DVD player and DVD-ROM drive, the guidelines of DOB are useful, and the disturbance rejection performance is improved under the DOB system.

Keywords : disturbance observer, robustness, guideline, q-filter, optical disk drive

I. 서론

최근 디지털 고용량 데이터 저장 장치가 컴퓨터의 필수 장치로 인식되고, 컴퓨터의 사용 범위가 점점 넓어짐에 따라 이러한 장치는 더욱 널리 보급될 것으로 판단된다. CD와 LD를 시작으로 하여 최근 DVD의 출현을 맞이하여 고속 대용량의 광 디스크가 개발되고 있다. 이와 같은 광 디스크 드라이브 시스템에서는 다양한 분야의 첨단 기술이 요구되어 진다. 특히 디스크에 데이터를 기록하고 재생하기 위해 필요한 서보 제어 기술은 현재 사용 중인 제어 기술을 넘어서는 새로운 초정밀 제어 기술이 요구되어 진다. 먼저 광 디스크의 사용 범위가 다양해짐에 기인한 환경변화에서도 성능을 유지하는 정밀도를 고려하여야 한다. 고배속 대용량 드라이브의 경우는 지금까지 알려진 기계적인 공진, 스펙들의 이탈, 온도 및 습도의 변화에 대한 영향, 외부 충격 및 진동, 베어링의 불완전성, 디스크의 좌우 진동, 상하 진동 등의 문제가 더욱 심각해져, 디스크의 기록 밀도가 높아짐에 따라 요구되는 제어의 정밀도를 만족하는 것이 더욱 난제가 될 것으로 판단된다.

하지만, 전통적인 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차, 시스템의 시간에 따른 변화를 다루기 어렵다. 따라서 적응 제어, 최적 제어와 같은 현대 제어 이론들을 적절히 도입할 필요가 생기지만, 이러한 이론들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있기 때문에, 저 가격으로 고급 제어사양을 만족하는 제어

시스템을 구현하기는 쉽지 않았다. 하지만, 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)의 경우 그 구조가 간단하고 일반적으로 외란 제거에 뛰어난 성능을 보이고 있어, 이를 적용하기 위한 노력이 계속 되고 있다[1-5]. Ohnishi에 의해 처음 제안된 외란 관측기는 실제 시스템을 외란 관측기에 의해 설계된 시스템의 공칭 모델처럼 동작하게 하는 특징을 가지고 있다[1]. 이때, 시스템의 출력으로부터 역 공칭 모델과 저역 통과 필터를 사용하여 모델링 오차, 외란이 포함된 제어입력을 재생하게 되는데, 여기서 저역 통과 필터는 역 공칭 모델에서 생기는 구현 불가능함을 해결하고 외란 관측기의 동작 영역을 결정하기 위해 사용된다. 따라서 외란 관측기의 설계 인자는 시스템의 공칭 모델과 저역 통과 필터의 선정으로 요약되고 이들에 따라 외란 관측기의 성능이 결정되게 된다. 하지만, 외란 관측기에서 Q 필터로 불리우는 저역 통과 필터의 설계방법에 대한 이론적인 연구가 부족하여 체계적인 설계와 구현이 이루어지지 않았다. 최근 부분적으로 민감도 함수(sensitivity function) 최소화를 통한 Q 필터의 설계방법[6]과 Q 필터의 차수와 외란 제거 성능 사이의 관계[7]가 일부 밝혀져 있을 뿐이다.

따라서 본 논문에서는 외란 관측기의 수학적 구조 해석을 통해 제시된 여섯 가지 설계 가이드라인에 기준하여 광 디스크 드라이브 서보 시스템의 포커스 / 트랙 추종 제어에 적용 실험한 결과를 보여주고 있다. 여기에서 수학적 유도 과정과 가이드라인에 대한 상세한 설명은 선행 연구[8]에서 다루고 있으므로 생략한다. 본 논문을 통해 외란 관측기의 외란 제거 성능은 Q 필터의 차수에 의존되며, 강인성은 저역 통과 필터의 상대 차수와 분모 차수에 따라 결정됨을 실험적으로 보였다.

II. 외란 관측기의 강인성과 제어 성능

외란 관측기는 실제 시스템을 시스템의 공칭모델처럼 동

논문접수 : 2001. 11. 10., 채택확정 : 2003. 2. 12.

김홍록 : 한양대 전자통신전파공학과 (hrkim@ihanyang.ac.kr)

최영진 : KIST 지능제어연구센터 (yjchoi@postech.edu)

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

정완균 : 포항공대 기계공학과 (wkchung@postech.edu)

박명관 : 동양대 컴퓨터제어공학과 (mkpark@phenix.dyu.ac.kr)

이경호 : 삼성전자 OMS사업부 (kyungho.lee@samsung.com)

※ 본 논문은 (주)삼성전자에서 지원하여 연구하였습니다.

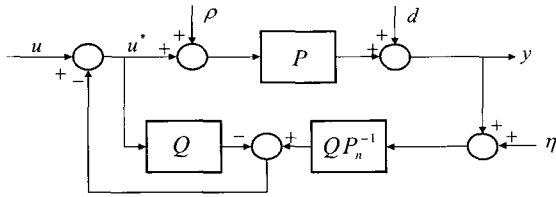


그림 1. 외란 관측기에 기초한 시스템.
Fig. 1. Disturbance observer based-system.

작하게 하는 특징으로 최근 강인 제어 및 외란 제거 제어에 리 적용되고 있다. 외란 관측기의 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 신호 등을 모두 오차신호로 간주하여 보상하게 된다. 일반적으로 외란 관측기를 적용한 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

여기에서 P 는 실제 플랜트, P_n 은 플랜트의 공칭 모델, Q 는 저역 통과 필터의 전달함수를 각각 의미한다. 그리고 u, ρ, d, η 는 각각 시스템에 인가되는 제어 입력, 입력 외란, 출력 외란, 노이즈를 나타내고, y 는 시스템의 출력 신호를 나타낸다. 이때, 시스템의 전달함수를 구하면 식 (1)과 같이 표현된다.

$$y(s) = \frac{1}{P_n(1-Q) + PQ} (PP_n(1-Q)\rho(s) + PP_n u(s) + P_n(1-Q)d(s) - PQ\eta(s)) \quad (1)$$

만약, Q 필터의 크기가 1일 경우 $\frac{y(s)}{u(s)} \approx P_n$, $\frac{y(s)}{\rho(s)} \approx 0$, $\frac{y(s)}{d(s)} \approx 0$, $\frac{y(s)}{\eta(s)} \approx -1$ 로 근사화 되고, Q 필터의 크기가 0인 구간에서는 $\frac{y(s)}{u(s)} \approx P$, $\frac{y(s)}{\rho(s)} \approx P$, $\frac{y(s)}{d(s)} \approx 1$, $\frac{y(s)}{\eta(s)} \approx 0$ 로 표현된다. 따라서 외란 관측기를 적용한 시스템에서는 Q 필터에 따라 입력 외란과 출력 외란에 대한 외란 제거 특성이 나타난다.

실제적으로 외란관측기의 성능을 판단하는 주요 파라미터는 Q 필터의 시정수와 필터의 차수로서, 선행 연구를 통해 외란관측기의 강인성에 대한 관계를 수학적으로 유도하였다[13]. 여기에서 사용한 Q 필터는 Lee 등에 의해 제안되었던 binomial 필터를 사용하였다[2].

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi} (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (2)$$

여기서 τ 는 필터 시정수, $a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)!i!}$ 는 binomial 상수, m 과 n 은 $m \geq n$ 을 만족하는 필터의 분모 차수와 분자 차수를 나타낸다. 대부분의 시스템은 2차 전달함수로서 근사화 되어 표현할 수 있기 때문에, (3)과 같은 공칭 시스템 모델을 가정하였다.

$$P_n(s) = \frac{k}{s^2 + s\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

여기서 ζ 는 감쇠 비율, ω_n 는 고유 주파수를 의미한다. (2)와 (3)의 가정으로부터 출발한 외란 관측기 시스템에서의 강인성과 제어 성능에 대한 6가지의 가이드라인은 다음과 같이 요약된다.

(가이드라인 1) Q 필터의 상대차수와 강인성

필터의 상대 차수가 커질수록 강인성 척도가 증가하게 되어 강인성은 오히려 나빠진다. 따라서 외란 관측기의 강인성을 증가시키기 위해서는 Q_{20}, Q_{31}, Q_{42} 등과 같은 작은 상대 차수를 가지는 Q 필터를 선택해야 한다.

(가이드라인 2) Q 필터의 분모차수와 강인성

필터의 분모 차수가 커질수록 강인성 척도가 감소하기 때문에 강인성은 향상되게 된다. 따라서 외란 관측기의 강인성을 향상시키기 위해서는 필터의 분모 차수를 크게 하여야 한다. 예를 들어, Q_{31} 필터는 Q_{20} 필터보다 외란 관측기를 더욱 강인하게 만들고, 또한, Q_{42} 필터는 외란 관측기의 강인성을 더욱 향상시킨다.

(가이드라인 3) Q 필터의 분자차수와 외란제거 성능

시스템의 외란 제거 효과는 Q 필터의 분모 차수와는 관계가 거의 없고 단지 분자 차수에 비례하게 된다. 따라서 분자 차수가 큰 필터는 외란 제거 성능을 향상시킨다. 또한 분자 차수가 같은 필터의 경우에 외란 제거 성능은 필터의 특정 계수에 따라서 변하게 된다.

(가이드라인 4) Q 필터의 시정수와 외란 제거 성능

필터 시정수는 효과적인 외란 제거를 위한 주파수 대역에 의해서 결정된다. 2차 플랜트는 공진 주파수보다 높은 고주파수에 대해서 -40db/decade 의 감쇠 성질을 갖는다. 따라서 필터 시정수는 적어도 공진 주파수를 고려하여 결정한다.

(가이드라인 5) Q 필터의 상대차수와 센서 잡음

만약 Q 필터의 상대 차수가 2일 경우, 측정된 센서잡음은 일정한 증폭 비율로 제어 입력에 영향을 미치게 된다. 그러나 만약 상대 차수가 증가하게 되면, 센서 잡음의 영향은 줄어들게 된다.

(가이드라인 6) Q 필터 시정수와 센서 잡음

필터 시정수가 작을 경우 센서 잡음에 대해 더 민감하게 되고, 증폭 비 또한 Q 필터의 형태에 의해 결정되는 특정 계수에 비례하게 된다.

이상에서 언급한 바와 같이 Q 필터의 설계 파라미터, 즉 필터 시정수와 분자, 분모의 차수, 상대 차수에 대한 6개의 가이드라인을 제시하였다. Q 필터의 분모 분자 차수를 결정할 때 가이드라인 1, 2, 3, 5는 반드시 고려되어야 한다. 특히, 1과 5는 서로 상반되는 가이드라인이다. 따라서 여섯 개의 가이드라인 중에서 센서 잡음에 대한 고려, 외란 제거 성능과 파라미터 변동에 따른 강인성 중에서 그 중요성에 따라 가이드라인을 선택한다. 시정수의 경우, 저주파수에 대한 가이드라인 4와 고주파수에 대한 가이드라인 6이 서로 보충적이 되기 때문에, 시정수 설계에 도움을 준다.

III. 광디스크 드라이브 서보시스템에서 외란 관측기의 설계

앞서 제안한 외란 관측기의 설계지침을 입증하기 위해 현재 양산되고 있는 DVD 플레이어의 기반으로 하여 제어기를 설계/구현하였다. DVD 플레이어의 경우 트랙 추종 / 포커스 제어 시스템은 디스크의 포커스 위치 오차를 생성해 주는 RF-Amp부, 위치 오차로부터 제어 입력을 생성해주는 DSP 서보 제어기, 제어 입력을 픽업 구동부에 전달하는 드라이버, 그리고, 실제 구동을 담당하는 구동기들로 구성되어 있다.

외란 관측기에 필요한 플랜트의 공칭 모델을 선정하기 위해 제어입력으로부터 출발해서 마지막 위치에러를 생성하는 경로인 Driver / Actuator / RF-Amp를 시스템의 공칭 모델로 선정하였다. 따라서 트랙 추종 / 포커스 제어 시스템에서 공칭 모델은 다음 식과 같이 2차식으로 근사화된다.

$$P_n(s) = \frac{K}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (4)$$

where $a_1 = \sqrt{2 \times a_2 - 2 \times \omega_p^2}$, $a_2 = \frac{M_p^2 \times \omega_b^4}{\sqrt{M_p^2 - K^2}}$

여기에서 ω_p 는 공진 주파수, M_p 는 공진 최대값, K 는 RF-Amp / Actuator / Driver에서의 각 DC Gain의 곱을 의미한다. 또한, 이러한 값들은 트랙 추종 제어시스템과 포커스 제어 시스템의 경우 각기 다른 값을 가지게 된다. 앞서 선정된 시스템 공칭 모델을 실험적으로 검증하기 위해 HP3562A Dynamic Signal Analyzer를 이용하여 페루프 시스템의 주파수 특성을 나타내는 보데 선도를 구할 수 있다. 그림 3은 실험적으로 구한 트랙 추종 제어 시스템과 포커스 제어 시스템에서의 페루프 보데 선도를 나타내고 있다. 이를 모델링으로 구한 트랙 추종 제어 시스템과 포커스 제

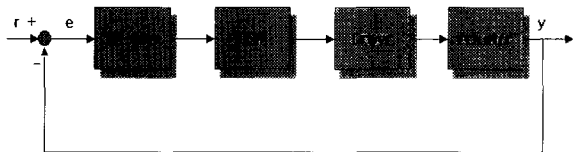


그림 2. DVD Player에서 서보 시스템의 구성.
Fig. 2. Configuration of the servo system in DVD Player.

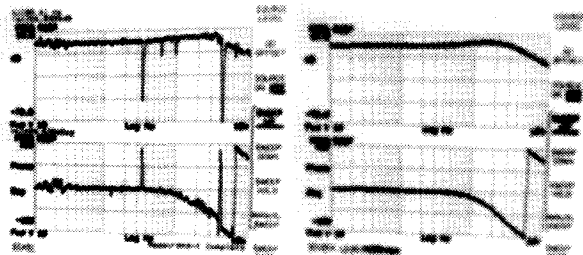


그림 3. 실험적으로 구한 트랙 추종 제어시스템과 포커스 제어 시스템의 페루프 보데선도.
Fig. 3. Closed-loop bode plot of the tracking control system and the focusing control system based on experiment.

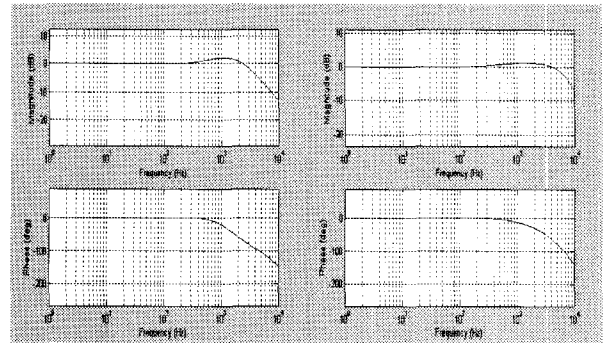


그림 4. 모델링에 의한 트랙 추종 제어시스템과 포커스 제어 시스템의 페루프 보데선도.
Fig. 4. Closed-loop bode plot of the tracking control system and the focusing control system based on modeling.

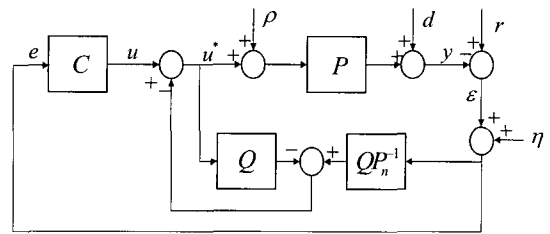


그림 5. 오차 신호에 기초한 외란 관측기의 구성.
Fig. 5. Configuration of the Disturbance Observer based on the error signal.

어 시스템에서의 페루프 보데 선도(그림 4)을 비교해보면 시스템의 공칭 모델이 근사적으로 구해졌음을 알 수 있다. 본 연구에서는 기존의 DSP 서보 제어기를 그대로 둔 상태에서 외란 관측기의 성능만을 비교하기 위해 시스템의 공칭모델을 실제 시스템을 근사화하여 사용하였다.

DVD 플레이어에서는 일반적인 서보 시스템과 달리 기준입력(r)과 출력(y)를 직접 관측할 수 없다. 즉, 레이저 스팟에 의해 트랙에서 벗어난 정도를 RF-Amp를 통과시켜 생성해 내기 때문에 위치 오차(e)를 기준으로 한 서보 시스템이 되기 때문이다. 따라서 기존의 DOB 구조를 그림 5와 같이 오차 신호에 기초한 구조로 재구성할 수 있다.

그림 5에서, P 는 실제 플랜트, C 는 기존 DSP 제어기, P_n 은 플랜트의 공칭 모델, Q 는 저역 통과 필터의 전달 함수를 각각 의미한다. 그리고, u, ρ, d, η 는 각각 시스템에 인가되는 제어 입력, 입력 외란, 출력 외란, 노이즈를 나타내고, y, ϵ 는 시스템의 출력, 오차 신호를 나타낸다. 이 때, 시스템의 전달함수를 구하면 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon(s) = & \frac{P_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ} r(s) \\ & - \frac{P_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ} d(s) \\ & - \frac{PP_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ} \rho(s) \\ & - \frac{P_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ} u(s) \\ & - \frac{PQ}{P_n(1-Q)} \eta(s) \end{aligned} \quad (5)$$

Q 필터의 크기가 1로 근사화될 경우, 각 전달함수들은 $\frac{\epsilon(s)}{\gamma(s)} \approx -1$ 로 근사화되고, Q필터의 크기가 0인 구간에서는 $\frac{\epsilon(s)}{\rho(s)} \approx -1, \frac{\epsilon(s)}{d(s)} \approx -P, \frac{\epsilon(s)}{u(s)} \approx -P, \frac{\epsilon(s)}{r(s)} \approx 1, \frac{\epsilon(s)}{\gamma(s)} \approx 0$ 로 근사적으로 표현된다. 이는 외란 관측기의 원래의 특성을 그대로 유지하고 있음을 나타낸다. 따라서 DSP 제어를 제외한 드라이버, 구동기, RF amp부분을 하나의 플랜트 $P(s)$ 로 간주하여 시스템의 공칭 모델 $P_n(s)$ 을 구하고, DSP 제어를 외부 루프 제어기 $C(s)$ 로 취급하여 원래 제어 구조를 큰 변화 없이 외란 관측기를 구현할 수 있다.

IV. 모의실험 및 실험 결과

외란 관측기의 모의실험을 위해 앞서 식(4)과 같은 시스템의 2차 공칭 모델을 가정하였으므로 2차 이상의 상대차수를 가지는 Q 필터를 실험대상으로 선정하였다. 이때, Q 필터는 제한한 외란 관측기 설계 가이드라인의 효용성을 입증하기 위해 필터 시정수 $\tau = 0.0016\text{sec}$ 로 고정하고, (2)과 같은 binomial filter 형태를 가지는 $Q_{20}, Q_{30}, Q_{31},$

Q_{40}, Q_{41}, Q_{42} 에 대해 실험하였다. 그리고 외란 제거 성능을 비교하기 위해 $150\mu\text{m}$ 크기를 가지는 20Hz 정도의 정현파를 강제로 인가하였다. 이는 실제 DVD 플레이어에서 $150\mu\text{m}$ 편심을 가지는 실험용 디스크를 사용하는 것과 동일한 환경을 의미한다. 그림 6은 기존 제어기와 서로 다른 Q 필터를 사용한 외란 관측기의 외란 제거 성능을 비교한 그림이다. 그림에서 점선으로 표시된 부분은 기존 제어기를 사용한 경우의 위치오차를 표시한 것이고 실선은 외란 관측기에서의 위치오차를 나타내고 있다.

외란 관측기가 상대적으로 우수한 외란 제거 성능을 가질 뿐 아니라 외란 관측기의 Q 필터에 따라 그 성능 또한 다름을 알 수 있다. 앞서 설명한 바 있는 가이드라인 1, 2, 3에 따르면 2차 시스템에서의 강인성과 외란 제거 성능은 Q 필터의 분모 차수가 크게 하고 분자 차수 또한 크게 할수록 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 실험에 사용한 6가지의 Q 필터들 중에서 Q_{42}, Q_{31} 가 상대적으로 Q_{20}, Q_{30}, Q_{40} 에 비해 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었다. 그림 6에서는

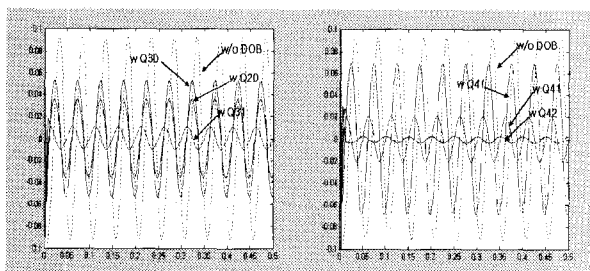


그림 6. 외란 관측기에서의 Q 필터에 따른 외란 제거 성능의 모의실험 비교.

Fig. 6. Comparison of disturbance rejection performance between conventional controller and DOB using the Q filters.

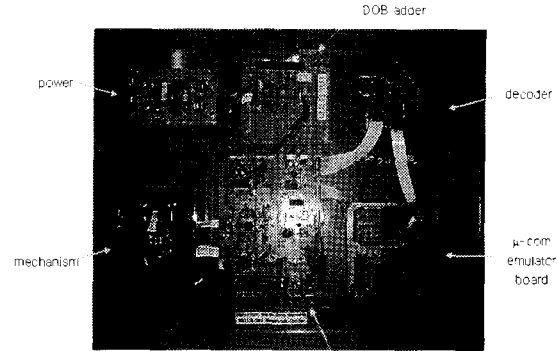


그림 7. 외란 관측기 실험을 위한 DVD 플레이어 실험 세트. Fig. 7. Test set of disturbance observer for DVD Player.

이러한 이론적 분석을 DVD Player에서 트랙 추종 제어 시스템에 대한 모의실험을 통해 입증하고 있다.

본 논문에서는 이론적 분석과 모의실험을 토대로 DVD 플레이어에 외란 관측기의 직접 구현을 위해 TI사의 TMS320C44 DSP 프로세서를 이용하였다. 그리고 기존 DVD Player와의 인터페이스를 위한 회로가 추가적으로 구현되었다. 그림 7에서는 실험에 이용한 DVD Player 실험 세트를 보여주고 있다. 본 실험에서는 강제로 트랙 추종 시스템 내에 외란을 인가하기 위해 $150\mu\text{m}$ 편심 DVD 디스크를 사용하였다.

그림 8과 표 1은 외란 관측기의 실험결과를 보여 주고 있다. 실험 결과에서도 기존 제어기에 비해 외란 관측기가 보다 우수한 편심 보상 능력을 가지며, 실험에 사용한 6가지의 Q필터들 중에서 Q_{20}, Q_{31}, Q_{41} 가 상대적으로 $Q_{30},$

Q_{40}, Q_{42} 에 비해 우수한 성능을 가짐을 실험적으로 확인할 수 있었다. 이는 앞서 제시한 강인성과 외란 제거 성능을 규정한 가이드라인 1, 2, 3과 상반되며, 모의실험 결과와도 일치하지 않는다. 모의실험에서는 $Q_{40}, Q_{30}, Q_{20}, Q_{41}, Q_{31},$

Q_{42} 의 순서로 외란 제거 성능을 확인할 수 있었으나, 실험에서는 $Q_{40}, Q_{30}, Q_{20}, Q_{42}, Q_{41}, Q_{31}$ 의 순서 결과를 얻을 수 있었다. 이는 모의실험에서 고려하지 않은 시스템의 측정 잡음이 시스템의 전체 성능에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, Q 필터의 상대 차수가 클수록, 센서 잡음에 대해 좋은 성능을 얻을 수 있다는 가이드라인 5가 추가적으로 설계 시에 고려되어야 한다.

실제로, 광 디스크 드라이브 시스템에서는 위치 오차 신호에 측정 잡음 성분이 많기 때문에, Q_{42} 필터의 경우 잔여 외란에 비해 노이즈가 상대적으로 크게 작용하여 잔류 오차가 오히려 Q_{41}, Q_{31} 에 비해 위치 오차가 오히려 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 현재의 시스템에서 외란 관측기의 최적 Q 필터는 Q_{31} 로서, 4차 필터에 비해 상대적으로 적은 계산 량을 가지고 있으며 우수한 외란 제거 성능을 지님을 알 수 있다. 광 디스크 드라이브 시스템에서 좋은 외란 제거 성능을 얻기 위해서는 강인성과 외란제거 성능에 따른 가이드라인 1, 2, 3과 함께 센서 잡음에 의한 가이드라인 5를 함께 반영해야 한다.

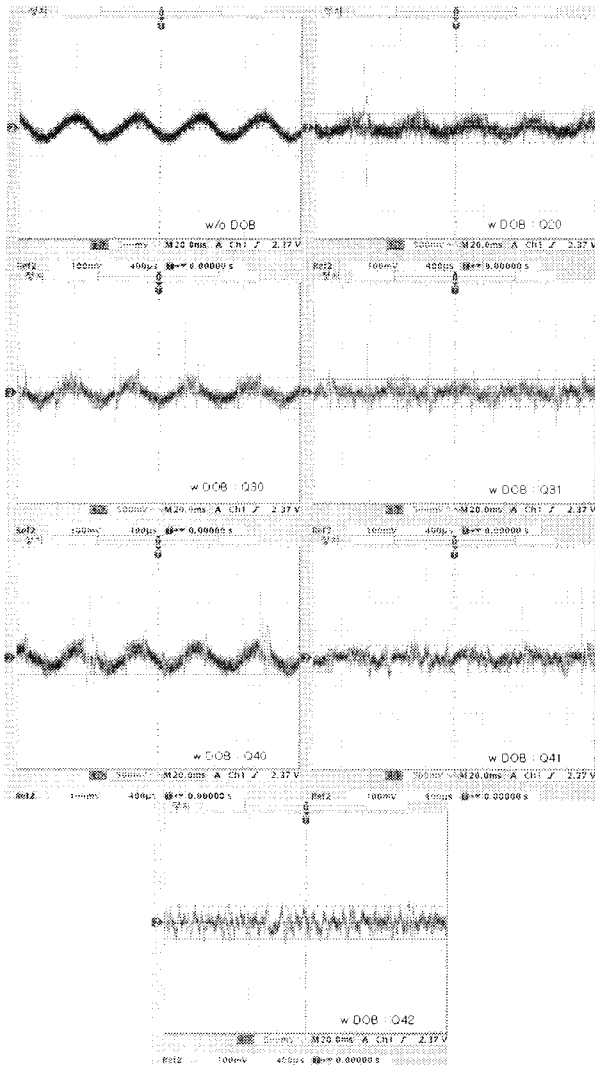


그림 8. 외란 관측기의 Q 필터에 따른 편심 보상 실험(X축 : 20ms, Y축 : 500 mV 단위).

Fig. 8. Experimental results of DOB using Q filters for eccentricity compensation(X axis : 20msec/grid, Y axis : 500 mV unit/grid).

표 1. 실험적으로 측정된 오차 신호의 P-P값 비교.

Table 1. P-P Comparison of the measurement error signal for experiment.

	e_{pp} (mV)
w/o DOB	700
w Q ₂₀	530
w Q ₃₀	550
w Q ₃₁	480
w Q ₄₀	600
w Q ₄₁	500
w Q ₄₂	520

이와 같은 실험 결과를 토대로 외란 관측기를 DVD 플레이어에서 포커스 제어 시스템에 동일하게 적용한 결과 앞서 실험한 트랙 추종 제어 시스템과 유사한 결론에 도달할 수 있었다. 실험에서는 포커스 제어 시스템에 강제로 외

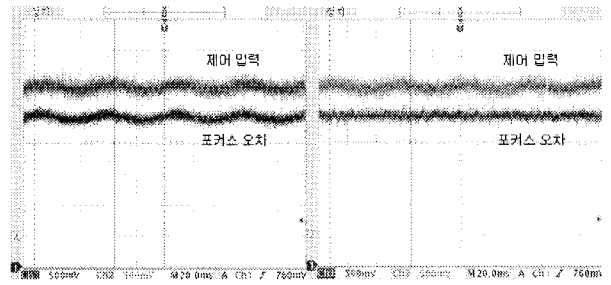


그림 9. 포커스 오차와 제어 입력 (a) 기존 DSP 제어기를 적용한 경우 (b) 외란 관측기를 적용한 경우.

Fig. 9. Focus error and control input signal (a) under the conventional DSP controller (b) under the DOB system.

란을 인가하기 위해 1mm 먼 진동 디스크를 사용하였고, 그림 9에서는 기존 제어기와 Q₃₁ 필터를 이용한 외란 관측기의 실험결과를 보여주고 있는데, 외란 관측기의 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

따라서 모든 광 디스크 드라이브 시스템에 외란 관측기의 적용이 가능해지고, 기존의 편심/면 진동 보상을 위해 사용되는 학습 기능을 가지는 제어기를 대체함에 따라 그 활용범위를 넓힐 수 있게 되었다. DVD 플레이어의 경우 빠른 데이터 전송량이 필요하지 않은 오디오 CD나 DVD 재생을 목적으로 하기 때문에 저속에서 회전하기 때문에 편심 디스크를 이용하여 20Hz 내외의 정현파 외란만을 인가할 수 있다. 하지만, 다른 광 디스크 드라이브 시스템인 DVD-ROM 드라이브의 경우에는 DVD 16배속에서는 9600rpm으로 회전하기 때문에, 160Hz 이상의 편심 외란이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제안한 시스템의 효용성을 확인하기 위해 DVD-ROM 드라이브에 대한 실험을 추가적으로 실시하였다.

여기에서는 제시한 외란 관측기의 설계 가이드라인과 실험에 의거하여 최적의 성능을 확인한 Q₃₁ 필터를 사용하여 실험하였다. 그림 10에서는 상대적으로 높은 고주파수의 외란에 대해서도 외란 관측기를 적용한 시스템에서는 우수한 외란 억제 성능을 보였다. 또한, 기존 제어기와와의 추가

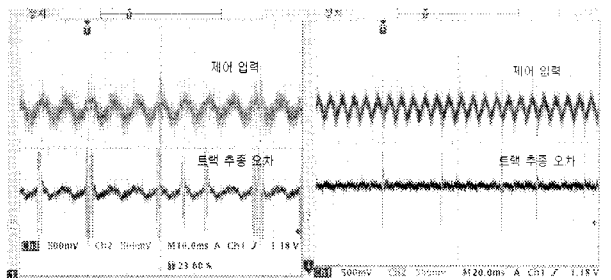


그림 10. DVD-ROM 드라이브에서의 트랙 추종 오차와 제어 입력 (a) 기존 DSP 제어기를 적용한 경우 (b) 외란 관측기를 적용한 경우.

Fig. 10. Tracking error and control input signal in the DVD-ROM drive (a) under the conventional DSP controller (b) under the DOB system.

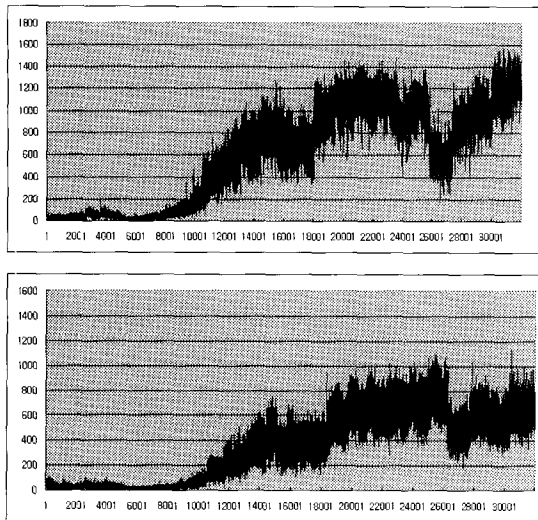


그림 11. DVD-ROM 드라이브에서의 데이터 Readability 오차 (a) 기존 DSP 제어기를 적용한 경우 (b) 외란 관측기를 적용한 경우.

Fig. 11. Readability error in the DVD-ROM drive (a) under the conventional DSP controller (b) under the DOB system.

적인 성능 비교를 위해서 디스크의 전 영역에 대해 순차적인 데이터 전송 실험을 수행하였다. DVD 16배속 모드에서 150 μ m 편심 디스크를 이용하여 디스크의 안쪽부터 바깥쪽으로 이동하며 데이터의 Readability를 측정하는 실험으로서 향상된 서보 시스템이 전체 시스템 성능에는 어떠한 영향을 미쳤는지를 알 수 있었다. 그림 11에서는 실험에서 측정된 Readability 오차를 디스크의 번지수에 따라 도시한 것이다. 외란 관측기를 적용한 시스템의 경우 Readability 오차가 최대치 비교에서는 24.2%, 평균값 비교에서는 38.3% 감소하였음을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 일반적인 2차 시스템에 대한 외란 관측기의 체계적인 설계지침을 제안하였다. 외란 관측기의 설계 파라미터로서 Q 필터의 분자/분모 차수와 상대 차수 그리고, 필터 시정수를 결정하기 위해 강인성과 외란 제거 성능, 센서 잡음 영향 등의 제어 성능을 고려한 Q 필터의 가이드라인을 요약 제시하였다. 실제로, 외란 관측기의 외란 제거 성능이 Q 필터의 차수에 의존하고, 강인성은 상대 차수와 분모 차수에 따라 결정되며, 외란 관측기의 센서 잡음 효과는 상대 차수와 필터 시정수에 의해 영향을 받게 됨을 2차 시스템에서의 적용 실험을 통해 증명하였다. 그리고, 기존의 DVD 플레이어와 DVD-ROM 드라이브에서 트랙 추종/포커스 제어를 위한 서보 DSP를 외부 제어기로 사용하고, 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 내부 루프에 외란 관측기를 사용하는 방법에 대해 제안하였다. 마지막으로, 편심 및 먼진동 디스크를 이용한 트랙 추종/ 포커스 제어 적용 실험을 통해 기존 제어기에 비해 우수한 외란 제거 성능을 입증하였다.

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, Feb. 1996.

[3] K. Ohnishi, M. I. Shibata and T. Murakami, "Motion control for advanced mechatronics," *IEEE/ASME Trans. On Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 56-67, Mar. 1996.

[4] M. Iwasaki, T. Shibata and N. Matsui, "Disturbance-observer-based nonlinear friction compensation in table drive system," *IEEE/ASME Trans. On Mechatronics*, vol. 4, no. 1, pp. 3-8, Mar. 1999.

[5] 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, Sept. 1999.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] W. H. Kim, K. S. Youn, and W. H. Kwon, "Robust controller design in the linear model following controlled introduction motor," *J. of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 411-41, May 1999.

[10] K. Yamada, S. Komada, M. Ishida, and T. Hori, "Analysis and classical control design of servo system using high order disturbance observer," *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. On Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, pp. 4-9, 1998.

[11] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co., 1992.

[12] B. K. Kim, W. K. Chung, H. T. Choi, I. H. Suh and Y. H. Chang, "Robust optimal internal loop compensator design for motion control if precision linear motor," *Proc. 1999 IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1045-1050, 1999.

[13] R. Bickel and M. Tomizuka, "Passive-based versus disturbance observer based robot control: equivalent and stability," *Trans. ASME J. of Dyn. Syst., Meas. And Contr.*, vol. 121, pp. 41-47, 1999.

김 홍 록

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 8 권 제 8 호 참조.

최 영 진

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 8 권 제 8 호 참조.

서 일 흥

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 8 권 제 8 호 참조.

정 완 균

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 8 권 제 8 호 참조.

박 명 관

1959년 11월 18일생. 1983년 광운대학교 전자공학과 졸업(학사). 1985년 동대학원 졸업(석사). 1984-1991년 대우중공업 기술연구소 재직, 1991-1994년 한국생산기술연구원 선임연구원. 1997년 한양대학교 전자공학과 졸업(박사). 현재 동양대학교 컴퓨터제어공학과 교수. 관심분야는 마이크로프로세서 응용, 지능제어, 비선형 제어.

이 경 호

1959년 10월 3일생. 1982년 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1982년 삼성전자 입사. 1984년 한국과학기술원 자동제어 전공(석사). 1994년 동대학원 자동제어 전공(박사), 현재 삼성전자 DM 총괄 OMS 사업부 개발팀장 (연구임원, 상무). 관심분야는 자동 제어.