

이득의 자유도와 주파수 적응성을 가진 외란 관측기를 사용한 새로운 트랙 추종 제어 기법

A New Track-following Control Method Using Disturbance Observer with the Freedom of Gain and Frequency Adaptation

정우민*, 김은태**
Woomin Jung, Euntae Kim

Abstract - This paper proposes a new track-following control method using disturbance observer with the freedom of gain and frequency adaptation in optical disk drive system. Recent ODDs use smaller track pits, higher rotation speed and broader rotational speed variations to increase the data capacity and data transfer rate. This cause the degradation of track-following performance by increasing the disturbance of the rotary system. In this paper, we discussed on a DOB structure that efficiently attenuate the disturbance without effecting the overall feedback loop characteristics on CLV type ODD which uses a higher and broader range of rotational speed. DOB structure uses two band pass filter. We analyzed the track-following performance sensitivity on rotational frequency variance and gain changes. This analysis is done on a computer simulation environment and actual ODD product.

Key Words : Track-following, CLV, Optical disk drive system, Disturbance Observer, Disk Eccentricity

1. 서 론

광 디스크 드라이브 시스템(Optical Disk Drive System : ODDs)은 데이터의 용량을 늘이기 위해, 정보가 있는 트랙 피트를 소형화하여 기록밀도를 높이고, 데이터의 처리 속도를 높이기 위해 디스크의 회전 속도를 점차적으로 높여 빠른 전송률을 이루어 왔다. 그러나 이러한 노력들은 회전 디스크의 외란 성분(편심:Eccentricity)의 크기와 주파수도 또한 증가시키게 되었다. 편심 성분은 디스크 제작 및 디스크 장착 과정에서, 회전의 중심과 실제 나선형 데이터 트랙의 중심이 일치하지 않아, 디스크 회전에 따라 데이터 트랙이 수평 방향으로 진동하는 것을 말한다[1]. 이것은 레이저 스팟이 목표 트랙을 추종하는데 가장 큰 외란이 되며, 디스크의 회전 주기와 같은 주기적인 성질을 가진다. 디스크의 회전 동안 데이터 트랙은, 이 외란에 따라 디스크의 안쪽과 바깥쪽을 회전 주파수에 맞게 반복적으로 움직이게 되며, 회전 주파수가 클수록 크기가 커져, 트래킹 액츄에이터가 움직이는 범위가 크게 되어, 제어 대역을 벗어나 제어하기가 힘들어진다.

이 외란을 억제하는 것이 ODDs의 트랙 추종 서보를 설계하는 데에 고려해야 할, 성능 향상의 가장 중요한 항목중의 하나이다[2]. 지금까지 외란을 억제하는 효과적인 제어기로서, ODDs에 대한 여러 가지 외란 관측기가 연구 되어져 와서, 트랙 추종 성능을 향상 시켜 왔다.

첫째, 회전 주파수가 고정된 CAV(Constant Angular Velocity)방식에서, 디스크 1회전 주기 동안 일정한 샘플링으로 외란의 성분을 측정, 메모리에 저장하여, 회전 저장 위치마다 그 값을 반복적으로 출력하여 보상하는 반복제어 방법

[3]과, 회전 주파수가 가변되어지는 CLV(Constant Linear Velocity)방식에서, 회전 주기에 대해 개선된 적응 반복제어 방법이 제안되었다[4]. 둘째, 저역통과필터를 이용한 외란 관측기가 제안되었다[5][6]. 이는 저역통과필터의 차단 주파수가 외란 주파수를 포함하도록 하여, 전체 시스템의 안정성을 유지하면서, 트랙 추종 성능을 향상 시켰다. 셋째, 대역통과필터를 사용한 외란 관측기가 제안되었다[7]. 대역통과필터를 사용하여 전체 시스템의 안정성을 훼손하지 않고, 점근적으로 회전 주파수 대역만을 보상하므로, 고정된 회전 주파수 방식인 CAV의 경우 트랙 추종 성능을 크게 향상했다.

그러나 디스크 표면에 지문이나 스크래치가 있으면, 메모리에 저장하는 방식은 측정 자체의 신뢰성이 떨어지며, 저역통과필터를 이용하는 방식은, 회전 주파수가 올라가면서 전체 시스템 두프의 안정성을 훼손할 수가 있다. 또한 대역통과필터의 사용은, 가변적인 회전 주파수 방식에선 한계가 있다.

본 연구에서 제안된 외란 관측기는, 전체 시스템의 특성과 안정성을 유지하고, 가변하는 회전 주파수를 추종하여 보상하며, 적용된 대역통과필터의 대역을 크게 변화시키지 않으면서 보상 이득에 대한 자유도를 가질 수 있는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 2장에서는 ODDs에 대한 정의와 외란 관측기에 대한 설명을 하고, 3장에서는 제안된 외란 관측기에 대한 설명을 한다. 4장에서는 제안된 외란 관측기의 실험 결과를 나타낸다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 트랙 추종 서보와 외란 관측기의 필요성

2.1 트랙 추종 서보

그림1.은 ODDs의 일반적인 트랙 추종 서보 시스템이다. R(s)는 디스크에서 반사되어지는 미세한 광을 분할된 포토 다이오드를 통해 받아 I-V 변환하고, 증폭하여, 트래킹 제어에 필요한 트래킹 에러를 생성한다. C(s)는 feedback 제어기이고, D(s)는 트래킹 액츄에이터 P(s)를 구동하기 위해 구동 신호를 변환한다. P(s)는 시스템의 특성과 성능을 결정하는

저자 소개

* 學生會員 : 延世大學 電氣電子工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 副教授 · 工博

중요한 기구로, 빠른 응답 특성을 갖는 voice coil motor (VCM)로 되어 있다.

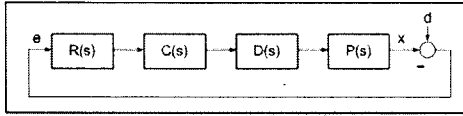


그림1. 트랙 추종 서보

ODDs에서 통상 내부의, 그리고 외부의 외란 d 를 포함한 채, 트랙 위치와 레이저 스폿 위치와의 차이, e 를 보상기 $C(s)$ 에서 feedback 제어를 하게 된다. 이를 통해 항상 에러 e 가 시스템에서 규정되어 있는 허용한도 내에 있도록 해야 한다.

2.2 외란 관측기의 필요성

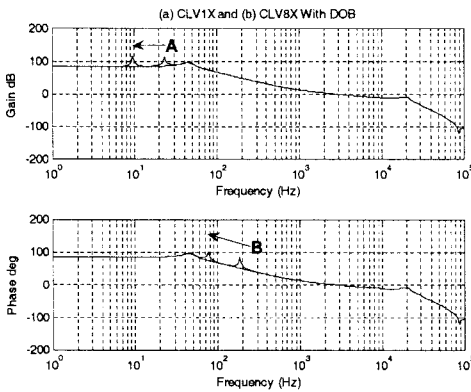


그림2. 전체 개루프 특성과 외란의 특성

$P(s)$ 는 스프링과 댐퍼로 되어 있어, 대물렌즈의 초점 x 의 수평방향을 결정한다. 보통 2차의 mass-spring-damper 모델로 표현되나, 코일 인덕턴스나 고주파의 부공진을 포함시키기 어려워 제어 대역에 제한이 생긴다. 또한 회전 주파수가 높아질수록 제어 대역도 올라가야 충분히 외란을 억제할 수가 있는데, 기구적으로 부공진 주파수를 올리는 것은 기술적인 어려움과 비용이 많이 들어, 제어 대역을 올리는 것이 불가능하다. 이러한 이유로 회전 주파수가 높을수록 더욱 커진 외란으로, 트랙 추종 서보의 성능이 떨어지게 된다.

그림2는 트랙 추종 서보와 외란의 관계를 나타낸다. 위의 그림은 회전 주파수가 낮은 1배속에서 디스크의 회전시 A처럼 트랙 추종이 내주에서 외주로 이동하는 것을 보여준다. 아래 그림은 회전 주파수가 높은 8배속에서 B처럼 내주에서 외주로의 움직임이다. 낮은 회전 주파수에선 외란이 시스템의 DC 이득에 포함 되므로 충분히 억제가 가능하나, 높은 회전 주파수에선 외란을 충분히 억제할만한 이득 범위에 있지 않으므로 $C(s)$ 제어기 외에 추가적인 보상기가 필요하게 된다.

3. 제안된 외란 관측기

3.1 이득의 자유도

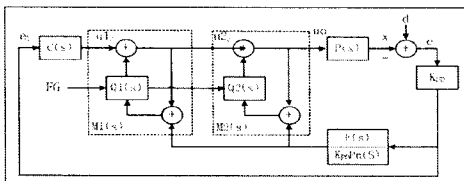


그림3. 제안된 외란 관측기

그림3은 Output feedback 형태의 2개의 가변적인 샘플링 주파수를 갖는 대역 통과 필터를 사용하여 구현된 DOB이다.

$Q1(s)$ 는 원래의 DOB의 기능을 하고, $Q2(s)$ 는 대역 및 위상에 최소한의 영향을 주면서 $Q1(s)$ 의 이득을 변화시키는 기능을 한다. 이 제안된 DOB의 전달함수는 (1), (2)와 같다.

$$Q(s) = \frac{2\zeta\omega_0 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

$$M(s) \times M2(s) = \frac{1}{1 - Q1(s)} \cdot \frac{1}{1 - Q2(s)} \quad (2)$$

위의 feedback 구조는 외란 주파수를 제외한 모든 대역의 이득과 위상에 영향을 주지 않으므로 점진적이다.

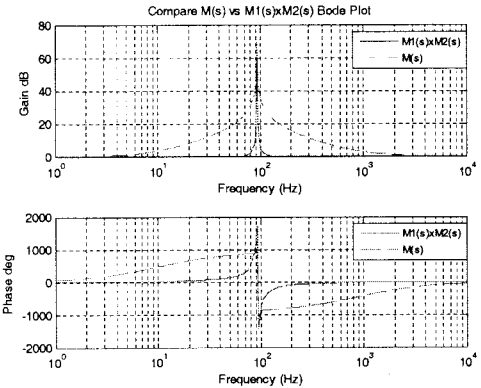


그림4. ζ 의 변화에 따른 $M(s)$ 의 주파수응답

그림4는 필요한 이득을 만족하기 위해, ζ 값과 대역의 변화 그리고 위상변화를 서로 비교한 것이다. $M(s)$ 는 대역 통과 필터를 1개 사용한다. 이상적으로 ω_0 주파수일때, 이득은 무한하게 커지므로, 비교하기가 어려워 $\omega_0 + (\omega_0 * 0.001)$ 의 위치에서 비교하였다. 여기에서 $M(s)$ 의 $\zeta=5.0$ 이고, $M1(s)$ 의 $\zeta_1=0.1$, $M2(s)$ 의 $\zeta_2=0.05$ 이다. 그림에서 보는 바와 같이, 외란 주파수에서 원하는 같은 이득을 얻기 위해 $M(s)$ 를 적용했을 때와 $M(s) \times M2(s)$ 를 적용했을 때, $M(s)$ 에선 큰 ζ 를 써야 하고, 이로 인해 원하지 않는 대역의 이득과 위상에 큰 영향을 끼친다. 그러나 $M1(s)$ 과 $M2(s)$ 의 ζ_1 과 ζ_2 를 조절하면 제어 대역과 위상에 영향을 거의 미치지 않고 원하는 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 주파수 적응성

CLV의 경우, 디스크의 최내주에서 23.1Hz*배속의 회전 주파수이고, 외주로 나갈수록 선형적으로 줄다가 디스크의 최외주에서 9.58Hz*배속의 회전 주파수를 갖게 된다. 즉 디스크의 데이터가 있는 영역의 가장 안쪽과 가장 바깥쪽의 회전 주파수가 약 2.42배 차이가 난다.

ODDs의 회전 모터는 응답 속도가 느려, 시간적으로 급격히 변화하지 않는다. 그래서 (3)와 같이 1회전 회전 정보를 갖는 센서인 FG를 이용하여 디스크의 1회전을 카운터로 카운팅하거나 FG 펄스의 주기를 카운팅하여, 이 값을 시스템의 필요에 맞게 체배한다. 이것을 DOB의 샘플링 주기로 사용하면, 항상 외란 주파수가 DOB의 중심 주파수가 되어, 정확한 외란을 보상할 수 있게 된다.

$$S_f(t) = R_f(t-1) \times T \quad (3)$$

여기에서 $S_f(t)$ 는 현재의 DOB의 샘플링 주파수이고, $R_f(t-1)$ 는 전 시간의 외란 주파수이다. T는 사용자가 정할 수 있는 목표 샘플링 주파수를 위한 체배 계수이다.

그림5와 그림6은 (3)을 포함한 DOB를 적용한 결과이다.

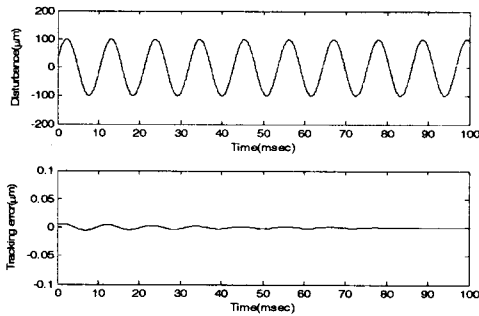


그림5. 최내주에서 제안된 DOB를 적용한 트래킹 에러

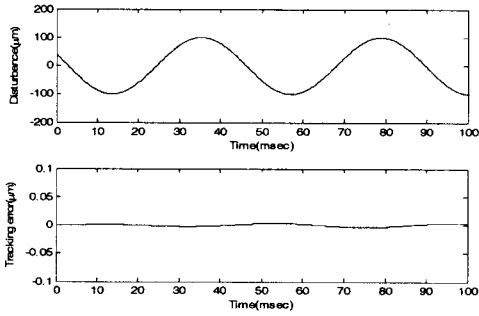


그림6. 최외주에서 제안된 DOB를 적용한 트래킹 에러

4. 실험

본 논문에서 제안된 DOB의 구현과 실험은 실제 DVD Recordable Player에있는 내부의 16bit fixed point DSP로 구현되어졌다. 실험은 $\zeta_1=0.5$ 를, $\zeta_2=0.25$ 를 사용하며, 디스크는 $100\mu m$ 의 편심을 가진 DVD-R 디스크로 실험하였다. 회전 방식은 4X CLV 방식으로, 외란 주파수의 변화에도 제안된 DOB가 외란을 효과적으로 억제하는지를 확인하였다.

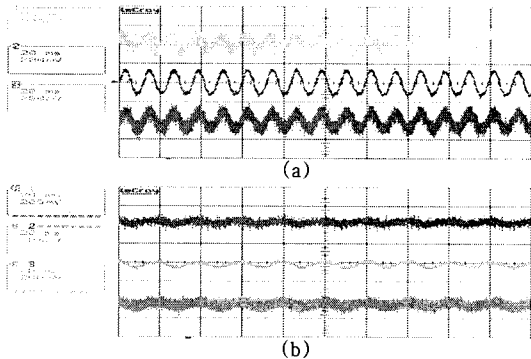


그림7. 4X CLV 외란 (a) 내주 (b) 외주

그림7은 회전하는 디스크에서 내주와 외주에서 측정된 외란 파형이다. 상위의 신호는 트랙 추종 에러이고, 중간 신호는 관측을 위해 상위의 신호를 저역통과필터를 통과시킨 후 신호를 3배한 것이다. 하위의 신호는 트래킹 액추에이터를 제어하는 C(s) 제어기의 출력이다. 그림에서 보듯이, 회전 주파수가 클수록 외란도 크다는 것을 알 수 있다.

그림8은 DOB의 적용 결과로, 외란 주파수에 비례하여 중심 주파수가 잘 연동하기 때문에, 보상이 잘되어, 트랙 추종

에러가 충분히 작고, 허용 범위안에 들어옴을 알 수 있다.

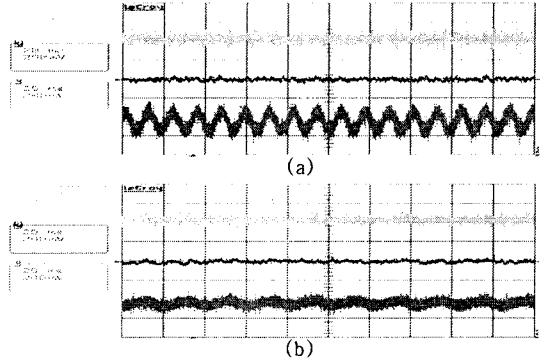


그림8. DOB 적용 결과 (a) 내주 (b) 외주

4. 결론

본 논문에서 제안된 간단한 구조와 적은 비용으로도 구현이 가능한 DOB는 시뮬레이션과 실험을 통하여, 여러 가지 우수한 성능을 입증하였다. 시스템의 안정성을 유지하면서, 점근적인 이득의 자유로운 변화를 가져갈 수가 있었고, 큰 외란 주파수의 변화에도, 시스템의 안정성을 유지한 채, 만족할 만한 외란 성능을 볼 수 있었다. 실험 결과적으로 보면, 어느 정도 트래킹 액추에이터의 기구적인 특성만 따라 준다면, CAV, CLV 방식에 상관없이 다른 모든 광 디스크 드라이브에 적용해서 우수한 성능을 나타낼 수 있다. 또한 트랙 추종에 대한 외란 억제뿐만 아니라 포커스의 외란인 편향성분에 대해서도 제안된 DOB를 사용하여 똑같이 억제 가능하다.

참고 문헌

- [1] K.-S. Kim, "Analysis of Optical Data Storage System's Tracking Performance With Eccentricity" IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 4, Aug. 2005.
- [2] T. H. Akkermans and S. G. Stan, "Digital servo IC for optical disc drives," Contr. Eng. Pract., vol. 9, no. 11, pp. 1245-1253, 2001.
- [3] Y. Yamamoto and S. Hara, "Relationships between internal and external stability for infinite-dimensional systems with applications to a servo problem" IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 33, no. 11, pp. 1044-1052, 1988
- [4] T. Y. Doh, J. R. Ryoo and M. J. Chung, "Repetitive controller design for track-following servo system of optical disk drive" IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 176-181, 2002.
- [5] K. Fujiyama, R. Katayama, T. Hamaguchi, and K. Kawakami, "Digital controller design for recordable optical disk player using disturbance observer," in Proc. Adv. Mot. Contr., 2000, pp. 141-146
- [6] M. T. White, M. Tomizuka, and C. Smith, "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer," IEEE/ASME Trans. Mechatron., vol. 5, no. 1, pp. 3-11, March 2000
- [7] J. R. Ryoo, K. B. Jin, J. H. Moon and M. J. Chung, "Track-Following Control using a Disturbance Observer with Asymptotic Disturbance Rejection in High-Speed Optical Disk Drives" IEEE Trans. Consumer Electron, vol. 49, no. 4, Nov. 2003