

광디스크 드라이브 시스템을 위한 비선형 제어를 이용한 Anti-Shock 제어기 설계

Anti-shock Controller Design for Optical Disk Drive Systems with Nonlinear Controller

백종식*, 정정주**

(Jong-Shik Baek · Chung Choo Chung)

Abstract - This paper presents a nonlinear controller design for optical disk drive systems to improve anti-shock performance. The nonlinear anti-shock controller is added parallel to the original linear servo control loop. In the previous work, dead-zone nonlinear element is used for nonlinear controller and PID control method is used for linear controller. Although this strategy improves anti-shock performance, it has a narrow stability bound. In this paper, we propose dead-zone with saturation nonlinear element for the nonlinear controller. Since this nonlinear element improves stability margin, we can use higher gain of dead-zone than the controller with dead-zone only. In the linear controller design, we show that lead-lag control has improved stability margin over PID control. Numerical simulation results show that the proposed method can get better performance to the external shock than previously proposed method.

Key Words : Optical disk drive, Anti-shock, Nonlinear control

1. 서론

대용량 정보 저장 매체의 구현을 위해서는 고밀도 고용량의 디스크가 요구되고, 데이터 전송 속도의 향상을 위해서는 고속의 회전이 가능하여야 한다. 따라서 고밀도 디스크의 서보를 위해서 서보 시스템의 위치 제어 정밀도가 더욱 향상되어야 한다. 또한 디스크 회전 속도가 빨라짐에 따라 디스크 편심이 증가하므로 증가하는 편심을 보상하는 서보 시스템의 설계가 요구된다. 효과적인 외란 제거를 위해 Output Regulator, 외란관측기(DOB)와 같은 연구가 진행 되어왔다 [4][5]. 편심에 의한 외란은 디스크 회전 주파수에 따라 주기적인 특성을 가지고 있다. 그래서 Output Regulator, 외란관측기(DOB)와 같은 제어기는 편심과 같이 주파수를 알고 있는 외란에 대해서는 아주 효과적이다. 그러나 광디스크 표면의 scratch나 시스템 외부에서 발생하는 shock와 같은 비주기적이고, 비교적 편심 보다 높은 주파수의 외란에 대해서는 강인하지 못하다. 특히 휴대용 기기에 장착되는 시스템의 경우 shock와 같은 비주기적인 외란이 빈번히 발생한다. 그러므로 주기적인 외란에 대한 제거 성능도 가지면서 shock와 같은 비주기적인 외란에도 강인한 제어기 설계가 요구된다. 이러한 시스템 외부에서 발생하는 shock에 강인한 제어기를 설계하기 위해 선형 피드백 제어기와 비선형 제어기를 병렬로 연결하는 구조를 이용하여 shock의 영향을 제거하는 연구가

있었다[3]. 이 연구에서는 PID로 설계한 선형 피드백 제어기로 주기적인 외란을 원하는 수준이하로 제거하면서, Dead-Zone을 사용한 비선형 제어기로 shock를 제거하여, 휴대용 시스템에 좋은 성능을 나타내었다. 그러나 선형 제어기로 PID를 사용하고, 비선형 제어기로 Dead-Zone만 사용함으로써 shock대응 성능을 더 개선하지 못한 측면이 있다. 그러므로 본 논문에서는 비선형 제어기로 Dead-Zone with Saturation을 사용하고, 선형 제어기로 Lead-Lag형태의 제어기를 사용해서, 시스템의 안정도 측면이나 shock 대응 성능 측면에서 향상된 강인한 제어기를 설계한다.

2. Anti-Shock 제어기 설계

2.1 Anti-Shock 제어기

Shock가 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위해 본 논문에서는 IEC 60068 표준을 따르는 shock를 정의하였다[3]. 3msec 동안 5g의 최대 가속도를 가지는 반사인파 형태로 shock를 정의 하였으며, 디스크의 편심에 의해 발생하는 주기적인 외란과는 달리 비주기적이고 반복적이지 않는 특성을 가지고 있다. 그림 1은 광디스크 드라이브 시스템에서 선형 피드백 제어기에 병렬로 비선형 제어기를 추가한 트래킹 제어 루프의 전체 블록도를 나타내고 있다. 그림 1에서 Plant $P(j\omega)$ 는 tracking actuator의 전달 함수를 나타내고 있고, 선형 제어기 $C(j\omega)$ 는 광디스크에 편심이 존재할 때 트래킹 에러가 원하는 수준 이하가 되도록 하는 역할을 수행한다. 기존의 Anti-shock 제어기 연구에서는 그림 1과 같이, 비선형 제어기로 Dead-Zone을 사용하고, 선형 제어기로 PID제어기

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

를 사용해서 shock에 대한 면역성을 가지도록 하는 연구가 있었다[3].

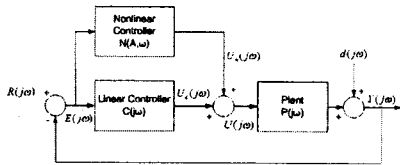


Figure 1. Block diagram of tracking control loop

기존의 연구에서 나타난 시스템의 안정도 측면이나 shock대응 성능 측면에서 한계점을 개선하기 위해 본 논문에서는 비선형 제어기로 그림 2와 같은 Dead-Zone with Saturation을 사용하고, 선형 제어기로 Lead-Lag형태의 제어기를 사용해서 제어기를 설계해 보겠다. 비선형 제어기를 선형 제어기와 병렬로 연결한 구조의 동작을 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

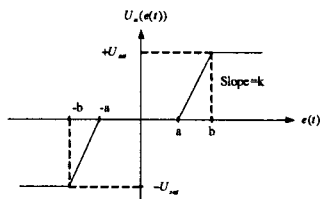


Figure 2. Characteristics of Dead-Zone with Saturation.

$$U(t) = \begin{cases} U_c(t) & \text{for } |e(t)| \leq a, \\ U_c(t) + k(e(t) - a) & \text{for } a < e(t) < b, \\ U_c(t) + U_{sat} & \text{for } b \leq e(t), \\ U_c(t) - U_{sat} & \text{for } e(t) \leq -b \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 shock가 발생해서 트래킹 에러가 갑자기 커지게 되면 Dead-Zone의 임계값 a 보다 트래킹 에러가 크게 된다. 이 때 비선형 제어기가 동작을 시작하게 되는데, 선형 제어기의 제어 출력에, 임계값을 넘는 에러에 대한 비선형 제어기의 제어 출력이 더해져서, 전체 제어기 출력이 플랜트로 입력되므로 트래킹 에러를 보다 빨리 원하는 수준 이내로 들어가게 할 수 있다.

2.2 시스템의 안정성과 shock 대응 성능 검증

이번 절에서는 이 논문에서 제안하는 비선형 제어기를 사용했을 때 나타나는 시스템 안정성과, 시스템의 shock대응 성능에 대하여 분석하고, 선형제어기 종류에 따른 시스템의 안정성과 shock 대응 성능을 비교 분석한다. 비선형 제어기의 주파수 응답 함수를 유도하기 위해 Describing Function Analysis를 사용하였고, 이를 이용하여 시스템의 안정성을 검증하기 위해 Limit Cycle Criterion과 Circle Criterion Analysis를 사용하였다[1][2]. Dead-Zone만 사용한 비선형 제어기의 Describing Function을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고, Dead-Zone과 Saturation을 같이 사용한 비선형 제어기의 Describing Function을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[1][2]. 식(2), (3)의 경우 입력 신호 진폭 A 만의 함수로, 주파수 독립적인 Describing Function 인 $N(A)$ 임을 알 수 있다. 그림 1에서 R에서 Y까지 전체 시스템의 페루프 전달함수를 구해보면 식 (4)와 같다. 그러므로 이 시스템의 특성 방정식은 식

(5)와 같다. 식 (5)를 다시 쓰면 식 (6)과 같다.

$$N(A) = \begin{cases} 0 & \text{for } A \leq a, \\ \frac{2k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{a}{A} \right) - \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A} \right)^2} \right] & \text{for } a < A \end{cases} \quad (2)$$

$$M(A) = \begin{cases} 0 & \text{for } A \neq a \\ \frac{2k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{a}{A} \right) - \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A} \right)^2} \right] & \text{for } a < A < b \\ \frac{2k}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{a}{A} \right) - \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A} \right)^2} \right] + \frac{U_{sat}}{A} & \text{for } b \leq A \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} = \frac{[N(A, \omega) + C(j\omega)]P(j\omega)}{1 + [N(A, \omega) + C(j\omega)]P(j\omega)} \quad (4)$$

$$1 + [N(A, \omega) + C(j\omega)]P(j\omega) = 0 \quad (5)$$

$$H(j\omega) = \frac{P(j\omega)}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} = -\frac{1}{N(A, \omega)} \quad (6)$$

식 (6)에서, 좌변 $H(j\omega)$ 와 우변 $-1/N(A, \omega)$ 의 궤적을 복소평면 위에 그렸을 때, 서로 만나는 점이 존재할 경우, Limit Cycle Criterion에 의해 그 점에서 Unstable한 limit cycle이 존재할 수 있다[1]. 식 (2), (3)에 의해 복소평면 위에서 $-1/N(A)$ 의 궤적은 실수 축 위를 움직인다. 그러므로 $H(j\omega)$ 와 $-1/N(A)$ 가 만나는 점이 발생하면 시스템이 불안정해짐을 알 수 있다.

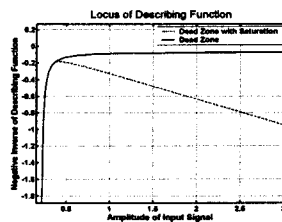


Figure 3. Input signal A 의 크기에 따른 $-1/N(A)$ 값 변화. (단, $a=0.2$, $b=0.3625$, $sat=2.5$, $k=sat/(b-a)=15.4$).

그림 3은 비선형 제어기에 들어가는 입력신호 진폭 A 가 커짐에 따라 변하는 $-1/N(A)$ 값을 나타낸 것이다. 비선형 제어기의 게인 k 값을 크게 할수록 $-1/N(A)$ 의 경도가 원점에 가까워진다. 그림 3에서 알 수 있듯이 같은 k 값 15.4를 사용했을 때, Dead-Zone with Saturation을 비선형 제어기로 사용할 경우 $-1/N(A)$ 의 궤적이 Dead-Zone만 사용한 경우보다 원점과의 거리가 훨씬 멀기 때문에 $H(j\omega)$ 의 궤적과 접할 가능성이 감소하여 시스템이 unstable해질 가능성이 현저히 감소한다. 따라서 안정도를 보장하는 범위 내에서 사용할 수 있는 k 값이 더 커서 shock대응 성능도 향상된다.

다음으로, 선형 제어기 $C(j\omega)$ 를 설계하는 방법에 따라, 비선형 제어기의 안정성과 shock 대응 성능이 어떻게 달라지는지 지금부터 살펴보자. 식 (7)은 모의실험에 쓰인 플랜트의 전달함수이다. 식 (8)은 $C(j\omega)$ 를 PID기법으로 설계한 선형 제어기의 전달함수이고, 식 (9)는 $C(j\omega)$ 를 Lead-Lag형태로 설계한 선형제어기의 전달함수이다.

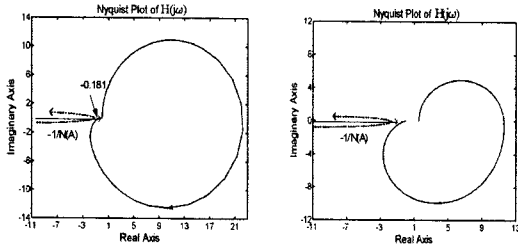


Figure 4. 선형 제어기 종류에 따른 $H(j\omega)$ 의 궤적과 $-1/N(A)$ 의 궤적.(왼쪽: PID, 오른쪽: Lead-Lag)

$$P(s) = \frac{1.023 \times 10^9}{s^2 + 64.73s + 166800} \quad (7)$$

$$C_1(s) = \frac{109976(s + 1786)(s + 909.1)}{s(s + 106800)(s + 59690)} \quad (8)$$

$$C_2(s) = \frac{62.4663(s + 7143)(s + 101)}{(s + 5208000)(s + 13.33)} \quad (9)$$

그림 4는 선형 제어기 종류에 따른 $H(j\omega)$ 의 궤적과 $-1/N(A)$ 의 궤적을 그린 것인데, $-1/N(A)$ 의 궤적 중 실선은 Dead-Zone만 사용한 경우이고, 점선은 Dead-Zone과 saturation을 같이 사용한 경우이다. 그림 4에서 선형 제어기를 PID로 설계한 경우 $H(j\omega)$ 의 궤적이 음의 실수축의 -0.181 지점을 Cross하지만, 선형제어기를 Lead-Lag로 설계한 경우 $H(j\omega)$ 의 궤적이 음의 실수축을 지나지 않는다. 그러므로 선형제어기를 Lead-Lag로 설계할 경우 PID로 설계한 경우보다 비선형 제어기의 게인 k 를 더 크게 사용할 수 있으므로 shock 대응 성능을 높일 수 있다. 비선형 제어기로 들어오는 Error값이 Dead-Zone 영역보다 현저히 큰 값이라는 가정 하에 비선형 제어기의 shock 대응 성능을 주파수 영역에서 살펴보도록 하자. 그림 5는 모두 비선형 제어기에 Dead-Zone과 Saturation을 같이 사용한 경우이고, 선형 제어기의 종류에 따라 트래킹 루프의 보드선도를 그린 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 선형 제어기를 Lead-Lag 형태로 설계한 경우가 k 값을 가장 크게 사용할 수 있어서 보드선도의 magnitude가 가장 높으므로, shock에 대한 대응력이 가장 우수함을 알 수 있다.

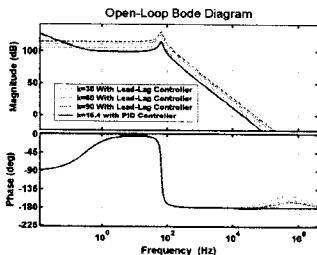


Figure 5. 비선형 제어기를 Dead-Zone과 Saturation을 같이 사용할 경우 선형 제어기의 종류에 따른 트래킹 루프의 보드선도.

2.3 모의실험 결과

앞에서 분석한 내용을 바탕으로 컴퓨터 모의실험을 수행하였

다. 그림 6은 비선형 제어기로 Dead-Zone과 Saturation을 같이 사용할 경우, 선형제어기를 PID로 사용했을 때 k 의 최대값 15를 사용한 것과, 선형제어기를Lead-Lag를 사용했을 때, k 값의 한계가 없으므로 임의로 $k=90$ 을 사용했을 때의 결과를 보인 것이다. Shock가 발생했을 때, 트래킹 에러가 벗어나는 크기와 수렴 속도 면에서 약 50% 정도 성능이 개선되었음을 알 수 있다.

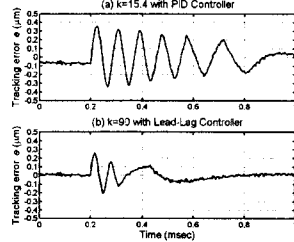


Figure 6. 비선형 제어기로 Dead-Zone과 Saturation을 같이 사용할 경우, shock 발생시 선형 제어기의 종류에 따른 Tracking error signal.

3. 결론

광디스크 드라이브 시스템에서 선형 제어기 $C(j\omega)$ 는 광디스크에 편심이 존재할 때 트래킹 에러가 원하는 수준 이하가 되도록 하는 역할을 수행하지만 shock와 같은 특정한 형태의 외란에 대해서는 원하는 성능을 얻기가 힘들다. 이러한 shock에 대응할 수 있는 제어기로 시스템의 안정도와 shock 대응 성능 측면에서 유리한 Dead-Zone과 Saturation을 같이 사용하는 비선형 제어기를 제안하였다. 그리고 비선형 제어기와 같이 병렬로 연결되어 사용되는 선형 제어기를 어떻게 설계하느냐에 따라 비선형 제어기의 안정도와 shock 대응 성능이 달라지게 되는데, 선형 제어기로 기존 연구에서 사용하고 있는 PID 제어기 보다 본 논문의 Lead-Lag 형태의 선형 제어기를 사용하는 것이 시스템 안정도 측면에서 좋을 뿐만 아니라, shock 대응 성능 측면에서 성능이 약 50% 향상되었음을 이론과 모의실험을 통해 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] Slotine, J. J. E. and Li, W. Applied non-linear control, Prentice-Hall International, 1991.
- [2] Khalil, H. K., Nonlinear Systems. Prentice-Hall, 1996.
- [3] Y. Zhou, M. Steinbuch, M. Aa and H. Ladegaard, "Anti-shock controller design for optical drives", Control Engineering Practice 12 (2004) 811-817.
- [4] H. Shim, H. Kim, and C. C. Chung, "Design and Experiment of Add-on Track Following Controller for Optical Disc Drives based on Robust Output Regulation", Proc. of the 2004 ACC Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004.
- [5] K. Fujiyama, M. Tomizuka and R. Katayama, "Digital Tracking Controller Design for CD player using Disturbance Observer", Proc. Of the 5th. Int. Workshop on Advanced Motion Control, AMC'98-COIMBRA, pp. 598-603, June 1998.