

광디스크 시스템에서의 충격 대응 제어기 설계와 검출 방법

최병호*, 최가형*, 라원상*, 윤태성**, 박진배*
 *연세대학교 전기전자공학과, **창원대학교 전기공학과

Shock Detection Method and Anti-shock Controller in Optical Disc System

Byoung Ho Choi*, Ga Hyoung Choi*, Won Sang Ra*, Tae Sung Yoon**, Jin Bae Park*

*Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei Univ., **Dept. of Electrical Engineering, Changwon National Univ.

Abstract - There are various large shocks in optical disc drive system like human touch and speak sound. In this paper, a nonlinear controller and a detection method are proposed. First, a relay nonlinear controller with dead zone is introduced. The structure of this nonlinear controller is simple and has a small amount of calculation. However, this controller has chattering problem when it is working. We suggest a disturbance detection algorithm using Kalman filter in this paper and it shows effective reduction of chattering. The proposed nonlinear controller using this detection algorithm had good performance for the shock..

1. 서 론

최근 사용상의 편리성과 가격적인 장점을 이용한 DVD/BD 캠코더의 등장으로 일반 사용자들은 촬영이 끝남과 동시에 바로 디스크를 개인용 컴퓨터나 DVD/BD 플레이어(player)등에서 바로 촬영한 동영상상을 볼 수 있다. 또한 가정에서 DVD나 BD 플레이어를 이용한 가정용 극장 시스템(홈시어터)은 별도의 플레이어를 이용한 방식과 더불어 스피커 시스템과 플레이어가 일체형의 형태로 제품화하는 경우도 많다. 이러한 경우, 광픽업이 광디스크로부터 정확한 정보를 읽어내고 원하는 정보를 에러없이 기록하기 위해서는 짧은 시간에 발생하는 외부 충격에 대해 강한 서보 추종능력을 갖추어야 한다. 여기서, 주기적인 외란에 대해서는 다양한 이론 바탕위에 많은 연구결과들이 있다.[1],[2] 그러나, 일반 제어 알고리즘으로 이에 대응한다면 소음과 더불어 소비전력의 증가를 고려하지 않을 수 없다. 특히, 모바일 기기의 경우는 배터리 사용시간과 관계가 있기 때문에 외부의 충격(shock)이 발생한 때만 대응하는 것은 당연하다고 하겠다. 또한, 이러한 외부의 큰 충격은 선형시스템에 있어서 비선형 동작이므로 선형 제어기로 대응하는 데는 한계가 있기 때문에 다양한 비선형 제어 방법에 대한 이론이 알려져 있다.[3],[4]

이러한 이론을 배경으로 실질적인 연구들이 많이 진행이 되었는데, 특히 비주기적인 충격과 같은 외란에 대해서도 트랙(track)의 한계치를 벗어나지 않으면서 트랙 중심을 잘 추종할 수 있도록 Y. Zhou는 dead zone을 갖는 비선형 제어기를 제안하였다[5]. 또한 J.S.Baek은 dead zone과 더불어 saturation을 갖는 영역을 추가한 비선형 제어기와 더불어 병렬로 lead-lag 선형 제어기를 사용하여 매우 큰 이득을 사용할 수 있으면서도 시스템의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다[6]. 본 논문에서는 [6]에서처럼 안정성 확보 차원에서 lead-lag 선형 제어기를 사용하였고, 큰 제어 이득을 사용하지 않는 대신 고정된 출력을 이용하고 dead zone이 있는 relay 비선형 제어기를 사용하였다. 이 방법의 특징은 매우 큰 이득(gain)을 사용하지 않으므로 해서 안정도 측면에서 여유를 가질 수 있고 보다 큰 외란에 대응할 수 있는 장점이 있다. 반면, 이 비선형 제어기를 사용시 채터링(chattering)으로 인한 제어의 한계를 가지게 되는데 이것을 해결하는 방안으로 Kalman 필터를 이용한 외란 추정기[7]를 도입하였다. 본 논문에서는 본 논문에서 제안한 방법에 대해 알아보고 모의실험 결과를 보임으로써 실제 시스템에 적용될 수 있는지의 가능성에 대해 논의한다.

2. 본 론

2.1 비선형 제어 알고리즘 설계

광디스크 드라이브를 이용한 캠코더의 경우, 충격량이 일반 거치형 광디스크 드라이브 시스템보다 훨씬 외란이 큰 경우가 많다. 이러한 외란에 대해 트랙킹 제어기는 기록 혹은 재생 중인 트랙을 벗어나지 않도록 제어하는 것은 물론이고 최적의 기록 및 재생상태를 유지하기 위해서는 허용에러 이내로 제어하는 것이 필요하다. 따라서, 일반 선형제어기만으로 이러한 외란을 억압하는 데는 한계가 있으므로 기존에 제안된[5],[6] 알고리즘과 같이 선형 제어기와 비선형 제어기를 병렬로 구성하여 정상적인 제어에서는 선형 제어기만 동작이 되도록 하고 충격이 검출되면 선형제어기와 비선형 제어기가 동시에 구동될 수 있도록 한다. 본 논문에서는 기존논문[6]에서의 충격보다 큰 3ms 동안 최대 20G까지의 사인파를 충격으로 정의하고 광스폿이 트랙을 벗어나는 방향으로 충격을 가해주는데 이를 간략화한 것을 그림1에 보인다. 즉, 외란 $d(t)$ 로 20G에 해당되는 신호를 입력한다

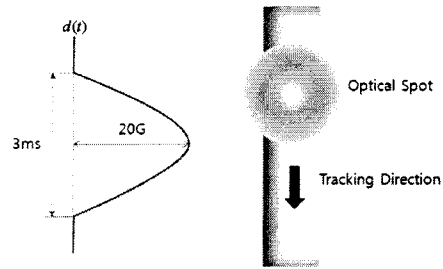


그림 1. 충격의 표현
 Fig. 1. Image of shock

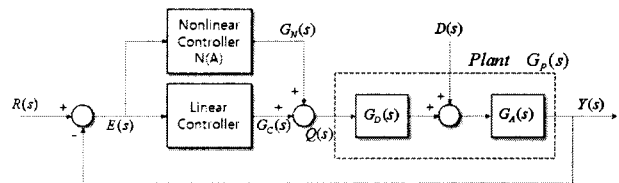


그림 2. 비선형제어기를 갖는 트래킹 블록도
 Fig. 2. Block diagram of tracking with Nonlinear controller

그림2는 dead zone을 갖는 relay 비선형 제어기를 나타내는 트래킹 블록도로 기존의 [5],[6]에서 이러한 형태의 비선형 제어기를 사용한 연구내용이 있었다. 플랜트 $G_p(s)$ 는 액츄에이터 구동부와 액츄에이터 및 광학계의 신호중복부를 포함하는 전체를 나타내고, 이를 제어하기 위해 선형 제어기와 비선형 제어기를 설계 하였고, 제어기의 동작을 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$g(t) = \begin{cases} g_c(t), & \text{for } |e(t)| \leq \delta \\ g_c(t) + g_N(t), & \text{for } e(t) > \delta \\ g_c(t) - g_N(t), & \text{for } e(t) < -\delta \end{cases} \quad (1)$$

제어기의 동작은 트래킹 에러 입력값 $e(t)$ 가 δ 보다 작거나 같으면 선형 제어기만 동작을 하고, δ 보다 큰 외란이 입력되는 경우는 선형 제어기와 더불어 비선형 제어기가 같이 동작을 하도록 하였다. 단, $e(t)$ 의 신호극성에 따른 비선형 제어기의 동작은 선형 제어기의 동작에 가감할 수 있도록 하였다. 여기서, $g_N(t) = B$ 로 두었다. 비선형 제어기의 특징은 그림3과 같다.

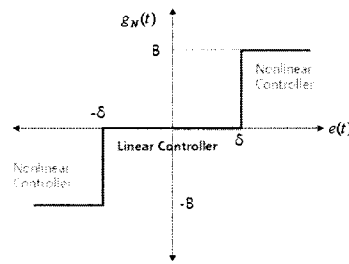


그림 3. Dead zone을 갖는 relay 비선형 특성
 Fig. 3. Characteristics of relay nonlinear with dead zone

2.2 비선형 제어기의 안정도 분석

이런 절에서는 relay 비선형 제어기의 안정도 분석을 통하여 기존의 논문

[6]에 비해 안정도 측면에서 여유가 있음을 보이기로 한다. Relay형태의 비선형 제어기는 [3]에서 Describing function analysis를 통해 유도되었는데 이는 dead zone이 없는 형태로 표현되었고 [4]에서 아래 식(2)와 같이 dead zone이 있는 경우를 식으로 표현하였다.

$$N(A) = \begin{cases} 0, & \text{for } A \leq \delta \\ \frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{A}\right)^2}, & \text{for } A > \delta \end{cases} \quad (2)$$

$$G_p(s) = \frac{2.532 \times 10^9}{s^2 + 214.6s + 1.151 \times 10^5} \quad (3)$$

$$G_C(s) = \frac{0.6(s + 628.32)(s + 5654.87)(s + 18849.56)}{(s + 402.12)(s + 37699.11)(s + 62831.85)} \quad (4)$$

그림2에서 플랜트 $G_p(s)$ 모델은 식(3)과 같고, 개루프(open loop) 특성이 CD 4x에 사용될 수 있도록 lead-lag제어기 $G_C(s)$ 를 식(4)와 같이 설계하였다. 페루프(closed loop)의 특성방정식으로부터 유도된 $-1/N(A)$ 의 궤적과 $H(j\omega)$ 의 궤적이 서로 만나는 경우에 limit cycle이 존재하게 되고 시스템이 불안정해지는 원인이 된다. 이것을 Nyquist diagram을 이용하여 안정도를 분석하면 그림4와 같다. $-1/N(A)$ 의 궤적은 실제 실수축상에서 동을 하나 설명의 용이함을 위해 의도적으로 표현을 달리하였다. ②번의 궤적이 본논문에 나타내는 궤적을 나타내고 [6]에서 가장 뛰어난 성능을 나타낸 궤적이 ③으로 $H(j\omega)$ 의 궤적과 만나진 않지만 마진측면에서는 ③보다 ②가 유리함을 알 수 있다.

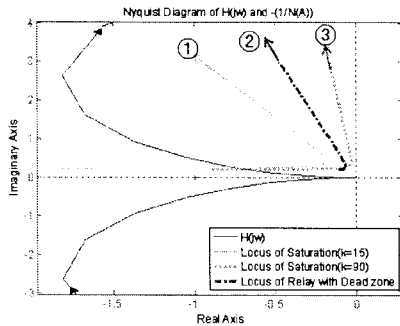


그림4. $-1/N(A)$ 의 궤적과 $H(j\omega)$ 의 궤적 비교를 통한 안정성 검증
Fig. 4. Stability test using the loci of $-1/N(A)$ and $H(j\omega)$

2.3 비선형 제어기의 모의실험 결과

지금까지 relay 비선형 제어기의 이해와 더불어 안정성 검증을 진행하였고, 이를 바탕으로 모의 실험 결과를 진행하였다. 이번 모의실험에 사용된 시스템의 개루프 특성은 저역 이득 약 60dB, 대역폭 2.4KHz가 되도록 설계하였다. 그림5는 모의실험 결과를 나타낸 그림으로 53ms에서 20G의 충격을 인가하여 (a)는 선형 제어기만으로 제어기를 구성했을 때를 나타낸 그림이고, (b)는 E(s)의 신호 입력의 절대치(δ)를 기준으로 절대치보다 큰 경우는 비선형 제어기와 선형제어기가 동시에 제어동작을 하도록 하고 δ 보다 작은 경우는 선형 제어기만을 동작하도록 설계하여 모의 실험한 결과이다. 이 결과를 보면 우선 20G가 인가 되었음에도 불구하고 CD규격인 $\pm 0.1\text{mm}$ 사양을 거의만족하나 채터링 때문에 부분적으로 사양을 초과하는 구간이 있다. 이것의 원인은 충격을 인식함에 있어 절대치 δ 에 의존하고 있기 때문에 편심에 의한 트래킹 잔류에러 신호의 크기보다 더 크게 설정을 해야 한다. 더우기 실제 적용시 δ 의 값은 더 커질 것으로 예상된다. 기존의 [5],[6]에서도 트래킹 에러 값을 사용자가 정의해 주어야 선형제어기와 비선형 제어기가 동작하는 시점을 결정할 수 있었다. 시스템이 정상상태에 있는 경우 외란에 의해 트래킹 에러 값의 통계적인 변화가 일어나더라도 값이 기 설정한 문턱값을 넘지 않게 된다면 비선형 제어기는 동작하지 않게 된다. 따라서, 외란에 더 빠른 대응을 하기 위해서는 트래킹 에러의 통계적 변화를 감지하여 자동적으로 비선형 제어기가 동작할 수 있게 하는 방법이 필요하다. [7]에서는 칼만필터를 이용하여 시스템의 상태값 및 오차의 공분산을 추정하고 추정된 값으로 chi-square test에 적용하여 외란을 감지하였다. 본논문에에서도 같은 방법을 이용하여 충격의 발생시점을 감지하고 그 시점에서 비선형 제어기가 동작하도록 설계하였다. 먼저 칼만필터를 이용한 정상 상태의 트래킹 에러의 추정값 및 추정 오차의 공분산 값은 다음과 같다.

$$\hat{x}_{k/k-1} = \hat{x}_{k-1/k-1}$$

$$P_{k/k-1} = P_{k-1/k-1}$$

$$K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k/k-1} = \hat{x}_{k-1/k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k/k-1}) \quad (5)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} H_k P_{k/k-1}$$

이 때, 광디스크 드라이브 시스템의 외부 충격에 의하여 식 (5)에서 추정하였던 정상상태와 충격시의 공분산 값의 차이가 발생된다. 따라서 기존 [7]과 같이 외란에 의해 통계적 성질의 변화를 감지하기 위한 chi-square test를 다음과 같이 적용하면 외부 충격 시점, 즉 비선형 제어기의 가동 시점을 얻을 수 있게 된다.

$$q_k = \sum_{i=k-n}^k \frac{H_i (\hat{x}_{i/i-1} - \hat{x}_{i-1/i-1}) (\hat{x}_{i/i-1} - \hat{x}_{i-1/i-1})^T H_i^T}{H_i K_i (H_i P_{k/k-1} H_i^T + R_k) K_i^T H_i^T} \quad (6)$$

$$= \sum_{i=k-n}^k \frac{H_i (K_i (y_i - H_i \hat{x}_{i/i-1})) (K_i (y_i - H_i \hat{x}_{i/i-1}))^T H_i^T}{H_i K_i (H_i P_{i/i-1} H_i^T + R_k) K_i^T H_i^T} \quad (6)$$

$$= \sum_{i=k-n}^k \frac{(y_i - H_i \hat{x}_{i/i-1}) (y_i - H_i \hat{x}_{i/i-1})^T}{H_i P_{i/i-1} H_i^T + R_k} \quad (7)$$

식(5)를 식(6)에 대입하여 구한 q_k 값(식(7))은 식 (5)에서 산출한 추정값의 통계적 특성이 변할 때 증가하는 형태로 나타난다. 이 값을 시스템의 특성에 맞게 자유도와 문턱값을 조절하면 비선형 제어기의 외란 대응 시점을 조절할 수 있다. 모의실험에 적용한 결과, 그림5의 (c)와 같이 채터링이 감소되고, 더 큰 외란에 대한 억압능력도 기존 [5],[6] 대비 우수한 성능을 보여주었다.

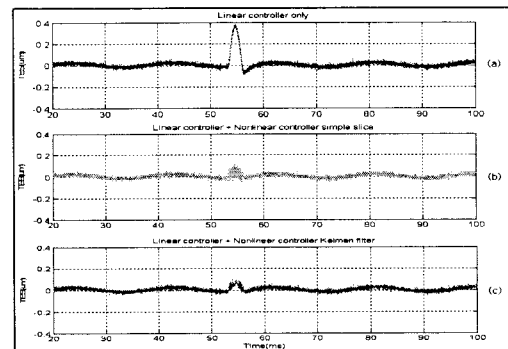


그림5. Shock인가 시, 단순 slice 비선형 제어기와 칼만필터를 이용한 비선형제어기의 모의 실험 결과 비교
Fig. 5. Comparison of simulation results between simple slice and Kalman filter nonlinear controller

3. 결 론

지금까지 광디스크 드라이브 시스템에서 외부의 큰 충격에 대응할 수 있는 dead zone을 갖는 비선형 제어기의 설계와 채터링 발생문제를 칼만필터 이론을 배경으로 개선하는 알고리즘에 대하여 안정성 검토와 이론적 분석을 바탕으로 모의실험을 수행한 결과 효과적인 제어성능을 발휘함을 확인하였다. 특히, 최대 20G의 매우 큰 외란에 대해서도 뛰어난 성능을 보임으로써 모방일용 광디스크 드라이브 장치에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 실제 적용실험을 통하여, 본 논문의 비선형제어기의 성능과 충격 검출 성능의 우수함을 검증하도록 한다.

[참고 문헌]

- [1] Y. Urakawa, T. Watanabe, "A Study of High-Gain Servo Controller with Complex Zeros for Optical Disk Drives", JJAP Vol. 44, No.5B, pp.3427-3431, 2005.
- [2] D. Koide, H. Tokumaru, K. Ohishi, T. Hayano, "High-Speed Tracking Servo Using Zero Phase Error Tracking-Feed-Forward Method for Professional-Use Optical Disks over 10000 rpm", JJAP, Vol.46, No.6B, pp. 3765-3770, 2007.
- [3] J.J.E. Slotine and W. Li, "Applied Non-linear Control", Prentice-Hall International, 1991.
- [4] H.K. Khalil, "Nonlinear Systems", Prentice-Hall, 1996.
- [5] Y. Zhou, M. Steinbuch, M. Van Der Aa, H. Ladegaard, "Anti-shock controller design for optical drives", Control Engineering Practice 12, 811-817, 2004.
- [6] J.S. Baek, C.C.Chung, M. Tomizuka, "Anti-shock Controller Design for Optical Disk Drive Systems with a Nonlinear Controller", Proceedings of the 2006 American Control Conference, pp. 1982-1989, 2006.
- [7] J.-H.Kim and J.-H. Oh, "Robust state estimator of stochastic linear systems with unknown disturbance", IEE Proceedings Control Theory & Applications, Vol.147, No.2, pp. 224-228, March, 2000.