

광 디스크 기기의 편심 보상을 위한 적응 반복 제어

김정훈*, 심일주, 박귀태, 노형래*
 고려대학교 전기공학과, *삼성전자 SOC연구소

Adaptive Repetitive Control for an Eccentricity Compensation of Optical Disk Driver

*Jeonghun Kim, Iju Sim, Gwitae Park, *Hyunglae Roh
 ISR Lab. Korea University, *SOC Division. Samsung Electronics Co., Ltd.

Abstract - This paper present a modified repetitive control scheme for an optical storage system to track a periodic reference signal with dynamic change in period. Periodic disturbances can be adequately attenuated using the concept of repetitive control, provided the period is know. An optical storage system supports various speeds. To deal with time varying periodic disturbances, an proposed repetitive controller is turned based on repetitive control to change sampling frequency to follow the change of reference period. A modified repetitive control scheme is proposed and implement on experimental set up of a optical disk driver.

1. 서 론

광학 디스크 기기의 트랙(Track) 추종 시스템에 있어 디스크(Disk)제조상 혹은 기구상의 제한(편심:Eccentricity)에 의한 주기적인 외란이 존재한다. 이러한 외란은 반복 제어를 통하여 효과적으로 제거 될 수 있다[1][2]. 그러나 광학 디스크 기기에서는 이러한 외란이 일정한 주기만을 가지는 것이 아니라 등선속도(CLV)에서는 외주와 내주에서의 그 주기가 변화하는 특성을 가지고 등각속도(CAV)에서 배속 변경의 경우에는 그 주기가 변화하는 외란이 발생하게 된다. 이러한 주기가 변화하는 외란에 대해서는 효과적 인 제어방법[7][9]이 소개된 적이 있으나 그 구현방법과 구현이 어려운 것으로 알려져 있다. 또한 현재 광학기기에서 배속 경쟁은 한계에 부딪히며 고 배속에서 보다 안정적으로 데이터를 읽기 위해서는 이러한 편심에 의한 외란에 대한 적절한 제어가 필요하다. 본 연구에서는 주기가 변화하는 외란을 효과적으로 제어하기 위한 적응 반복 제어를 제안한다. 또한 광학 디스크 기기에 제한한 적응 반복 제어를 실제 구현하였고 실험을 통하여 그 우수성을 입증하였다.

다음 본문에서는 광학 디스크 기기에 대한 전반적인 이해를 위한 간략한 해석과 기존의 제어기가 가지는 한계를 살펴봄으로써 본 논문에서 제안한 적응 반복 제어기의 필요성에 대하여 살펴 볼 것이다. 또한 제안된 반복 제어기에 사용된 가변 샘플링 주파수 발생기와 광학 디스크에 적용된 적응 반복제어기에 대하여 살펴보도록 하자. 마지막으로 제안된 적응 반복제어기를 실제 시스템에 구현하여 실제 실험치와 결과치를 보이도록 하겠다.

2. 본 론

2.1 개요

2.1.1 광학 디스크 기기

다음 그림1은 광학 디스크 기기의 일반적인 등가 모델[7][8]을 나타내고 있다. 여기서 $r(t)$ 는 외란, $e(t)$ 는 트랙 추종 에러, C는 일반적인 폐환 제어기, P는 광학 기구계를 말하고 있다.

일반적으로 광학 기구계는 프리 앰프 부분과 픽업계, 드라이브 세가지로 구성된다. 프리 앰프는 픽업으로부터 에러를 추출해내는 곳으로 드라이브는 픽업을 구동하기 위한 기능을 수행한다. 이 두 블록의 대역은 넓은 주파수대역을 가지는 저역 필터 특성을 가지고 있어 광학기구계의 특성에 커다란 영향을 주지 못하고 픽업계의 특성이 광학기구계의 전체적인 특성을 가지게 된다.

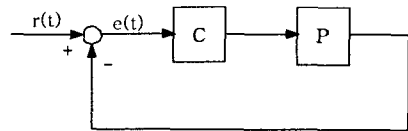


Figure 1. Equivalent circuit of Optical Disk Driver

픽업의 특성을 살펴보면 식 (1)과 같이 나타 낼 수 있다. 본 논문에서는 k_n (DC감도)=1mm/V, f_0 (공진 주파수)=57Hz, Q_0 (공진 피크)=15dB인 픽업을 사용하였다. 이것에서 ζ 과 공진 각주파수 ω_n 를 구하여 보면 0.033과 358.1이 됨을 알 수 있다.

$$P(s) = \frac{k_n \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{128 \times 10^5}{s^2 + 5371s + 128 \times 10^5} \quad \text{--- (1)}$$

이 픽업의 특성을 보면 그림2와 같이 나타난다. 그림에서와 같이 80Hz정도까지 충분한 DC 이득을 가지고 6kHz의 대역폭을 가지는 것을 알 수 있다.

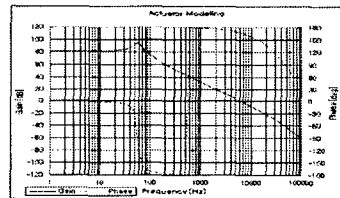


Figure 2. Frequency characteristic of Actuator

광학 디스크 기기가 디스크회전에 의한 편심과 에러에 최적의 조건을 유지하며 트랙을 추종하기 위한 제어기를 설계하기 위해서는 최소 이득과 동작 주파수 대역에 대한 위상여유와 게인 여유를 가지도록 설계하여야 한다. 최소 이득은 외란의 크기에 대한 최대 허용 오차의 비로 표시 될 수 있다. 일반적으로 디스크 편심량 240um과 기구 편차 10 0um으로 하여 최소 72dB의 최소 이득을 가지도록 설계되어야 한다. 또한 주파수 대역은 1배속 기준으로 318Hz의 주파수 대역폭을 가지므로 이것을 기준으로 배속별로 적절한 필요한 컷오프 주파수를 만족하도록 설계하여야 한다.

이득여유는 15dB이상 위상여유는 30°이상 가지도록 설계하기 위하여 병렬형의 디지털 필터를 사용하였다. 그리하여, 고주파 대역 필터는 Lead 보상기 2개를 사용하여 위상여유와 컷오프 주파수를 만족하도록 설계하였고 저주파 대역은 저역 통과 필터를 사용하여 저역 측의 최소 이득을 만족하도록 설계 하였다. 다음 식(2)은 본 연구에서 사용된 디지털 필터의 특성 방정식이다.

$$H(z) = \left[\frac{K_{10} + K_{11}z^{-1}}{1 - k_1z^{-1}} \times \frac{1 + K_{13}z^{-1}}{1 - k_1z^{-1}} \times \frac{1 + K_{15}z^{-1}}{1 - K_{12}z^{-1}} \times (K_{17} + K_{18}z^{-1}) \right] \times kg \times 2^5 \quad \text{--- (2)}$$

$$+ \frac{K_{20}}{1 - K_2z^{-1}} \times \frac{K_{22}(K_{24} + K_{25}z^{-1})}{1 - K_3}$$

다음<그림3>은 이렇게 설계된 제어기의 특성(a)와 전체 개루프 특성(b)을 나타내고 있다. 전체 개 루프 특성에서 최소 이득은 82dB, 위상여유는 40°, 게인 여유는 16dB를 가지는 것을 알 수 있다.

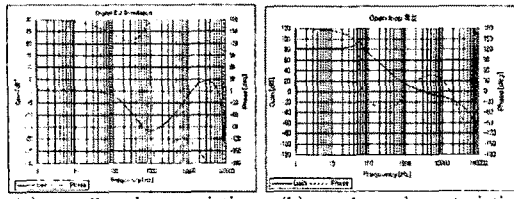


Figure 3. Frequency characteristic

2.1.2 편심

편심이란 디스크상의 트레이 정확한 동심원을 그려야 하나 제조상의 제한과 회전기 기구계의 흔들림에 의해 수평에러가 발생하는 것을 말한다. 다음 그림4는 이러한 디스크사의 편심과 그것을 추종하는 픽업의 추종상태를 나타내는 것이다.

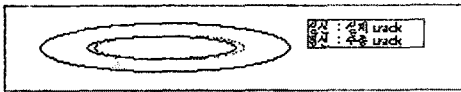


Figure 4. Eccentricity of Disk

이러한 편심을 앞에서 설명한 제어기 설계에서와 같이 최소이득을 보장함으로써 편심에 대한 적절한 대응과 추종이 가능하게 한다. 그러나 픽업의 제조상 공진 주파수 이후로 40dB/dec의 기울기로 감소하게 되어 80Hz(24배속) 이후에서는 편심에 대한 적절한 보상과 추종이 불가능하게 된다.

2.1.3 기존 제어기의 문제점

이러한 기존제어기와 픽업이 가지는 특성상의 문제로 24배속이상에서의 편심 제어는 광학 디스크의 안정적 역세스에 커다란 악 영향을 주고 있다. 다음 그림5는 140um의 편심 디스크를 48배속에서 동작 시켰을 경우 트랙에러의 실측 파형이다.

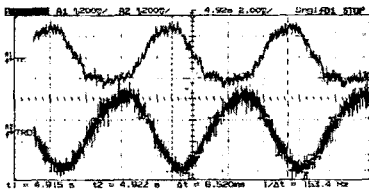


Figure 5. Eccentricity 140um, track error signal in 48x

위 파형에서와 같이 고 배속에서 트랙에서의 편차가 800mV정도 발생하게 되어 트랙 추종이 불안정하며 특히 데이터 액세스를 위한 탐색 시에 트랙을 벗어났다가 재인입을 하는 경우에는 재인입이 거의 불가능하게 된다. 트랙을 재인입하기 위해서는 트랙에러의 대역폭이 제어기의 대역폭이 내에 있어야 하나 편심이 있고 배속이 높은 경우에는 그 에러의 주파수가 매우 빨라지게 된다. 최대 편심속도는 최대 편심량과 회전전주파수의 곱을 트랙간격으로 나눈 값이 된다. 여기서 140um, 48배속에서 편심 최대 주파수는 $140 \times 160/1.6 = 14\text{kHz}$ 가 되어 제어기의 대역폭보다 높은 값을 가지게 되어 트랙 인입이 불가능하게 된다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 본 논문에서 적용 반복 제어기를 제한함으로써 이러한 한계를 극복하고 보다 안정된 고배속에서의 데이터 액세스와 탐색 성능의 향상을 도모하고자 한다.

2.2 제안된 적용 반복 제어

본 논문에서 제안한 반복제어기에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 제안된 제어기는 기존의 반복 제어기[2][5]를 광학 디스크 기기에 적절하게 수정 적용하였다[4]. 특히 주파수 발생기를 두어 배속이나 동전속도에 의한 편심 에러의 주기를 검출하여 이주기나 제배함으로써 반복제어기의 가변하는 주기적인 외란을 검출하기 위한 대역 통과 필터의 샘플링 주파수로 사용하고 있다.

2.2.1 제안한 적용 반복 제어

다음 그림6은 본 논문에서 제안하고 있는 반복 제어기의 블록도이다. 기존의 제어기에 적용 반복제어기를 추가하는 형태[3]로 설계되어 졌다. 그림에서 ①번 안의 블록이 기

존의 반복제어기를 나타내고 있다. 기존의 반복제어기는 외란의 주기를 샘플링 주파수로 나눈 N개의 지연소자를 이용하여 이전의 외란을 현재의 외란에 보상하여 주기적인 외란을 효과적으로 제어하고 있다.

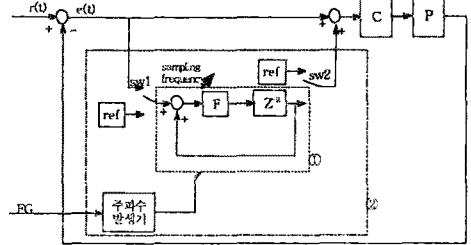


Figure 6. block of proposed adaptive repetitive control

이러한 기존의 반복 제어기의 안정도[6]는 다음과 같이 나타낼 수 있다. $G_o(Z) = C \cdot P$ 라고 하고 완벽한 피 제어 시스템의 모델링이 가능한 경우

$$G_s(Z) = \frac{G_o(Z)}{1 + G_o(Z)} \quad \text{--- (3)}$$

로 표현 될 수 있다. 그러면 전체 전달함수는

$$G_c(Z) = \frac{(1 + Gr(Z))G_o(Z)}{1 + (1 + Gr(Z))G_o(Z)} = \frac{G_o}{1 - FZ^{-N} + G_o} \\ = \frac{G_o}{1 - FZ^{-N}(1 + G_o) + FZ^{-N}G_o} \\ = \frac{G_s}{1 - FZ^{-N} + FZ^{-N}G_s} \quad \text{--- (4)}$$

라고 하고

$$G_s(Z) = \frac{B^-(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} = \frac{B^-(Z^{-1})B^-(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} \quad \text{--- (5)}$$

위 식(5)를 식(4)의 분모에 대입하여 정리하면

$$A(Z^{-1})(1 + FZ^{-N}(B^-(Z^{-1})B^-(Z^{-1}) - 1)) = 0 \quad \text{--- (6)}$$

여기서 $G_s(Z^{-1})$ 가 점근적으로 안정하고 F가 다음 식을 만족한다면 시스템은 점근적으로 안정하다.

$$\|B^-(Z^{-1})B^-(Z^{-1}) - 1\| < \frac{1}{|F|} \quad \text{--- (7)}$$

오차 전달함수를 $G_e(Z) = 1 - G_c(Z)$ 로 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_e(Z) \approx Gre(Z)Geo(Z) \quad \text{--- (8)}$$

여기서 $Geo(Z)$ 는 반복제어기 $Gr(Z)$ 가 적용되지 않는 경우이다. 또한 $Gre(Z)$ 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$Gre(Z) = \frac{1}{1 + Gr(Z)G_s(Z)} = \frac{1 - FZ^{-N}}{1 - FZ^{-N} + FZ^{-N}G_s(Z)} \quad \text{--- (9)}$$

여기서 $|G_s(Z)|=1$ 이고 $\angle G_s(Z)=0$ 이면 $Gre(Z)$ 는 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$Gre(Z) = 1 - FZ^{-N} \quad \text{--- (10)}$$

$$|Gre(Z) - 1 - F(z)|_{z=e^{j\omega T}} \quad \text{--- (11)}$$

그러면 F(Z)가 저역 통과 필터로 주어지고 $|F(Z)| \leq 1$ 이고 $\angle F(Z)=0$ 이면 하모닉 오차는 점근적으로 작아진다. 그리고 저역 통과 필터특성에 의해 $|F(Z)|$ 는 주파수가 증가할수록 작아지므로 하모닉 주파수에서 반복제어 특성을 약화시킨다. 즉 제거하려는 해당 주파수 대역에 대한 하모닉 오차만을 제거 할 수 있다. 본 논문에서는 DC offset제거를 위해 대역 통과 필터를 사용하였다.

다음 ②번 블록은 광학 디스크 기기의 정상상태와 탐색 상태일 때 안정된 동작을 보장하기 위하여 스위치를 두어 각 상태에 맞게 동작 하도록 하고 있다. 정상상태일 때는 sw1을 e(t)를 선택하고 sw2는 반복제어기를 선택하여 정상적인 반복제어를 행하고 탐색모드 일 경우에는 정밀 탐색의 경우에는 sw1을 ref를 선택하고 sw2는 반복제어기를 선택하여 메모리에 저장된 편심 에러가 그대로 출력하여 탐색 후 트랙에러의 주파수 대역을 낮춤으로써 인입이 쉬워지도록 한다. 또한 장거리 탐색의 경우에는 sw1은 ref, sw2는 ref를 선택하여 편심 에러를 그대로 보존되 제어기의 출력에는 ref를 출력하여 장거리 탐색 시에는 중점서버에 의한 제어만 이루어지도록 하고 인입시 sw1과 sw2를 정상 상태로 놓아 인입이 용이하도록 한다.

2.2.2 주파수 발생기

다음 그림7은 주파수 발생기의 파형을 나타내고 있다. 그

림에서 FG는 스피들 모터(spindle motor)에서 발생하는 주파수 발생 신호로 1회전에 18개의 펄스를 발생시켜 모터의 회전 정보를 알려 주고 있다. 이 신호를 높은 주파수의 신호로 폭을 세어 그 값을 저장한다. 그 값이 capture timer를 나타낸다. 이 값을 다시 원하는 주파수, 즉 FG 한 펄스 당 원하는 개수(N)로 나누어 match timer로 입력시켜주면 match timer는 N 값에 해당하는 펄스를 발생시키게 된다. 이렇게 하여 회전 주기가 변함에 따라 일정한 개수의 펄스가 발생되고 이 펄스를 적용 반복 제어기의 샘플링 주파수로 사용하게 된다.

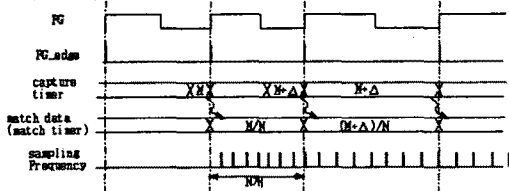


Figure 7. the time diagram of frequency generator

이 샘플링 주파수를 사용하게 됨에 따라 일정한 지연소자를 사용하여도 변화하는 주기적인 편심에 대해 샘플링 주파수가 연동하여 안정적인 편심 보상이 이루어지게 된다.

2.3 실험 결과

본 논문에서는 사용된 광학디스크 기기는 삼성의 CDRW Chip을 기반으로 제작되었으며, MCU는 ARM7TDMI를 사용하였고 JEENI 에뮬레이터를 사용하였다. 필터는 하드웨어 디지털 필터를 사용하였고 적용 반복 제어기는 C 언어를 사용하여 구현하였다.

다음 그림8은 반복 제어기를 적용하지 않는 상태에서의 24배속에서 48배속으로 변경시켰을 때의 트랙에러(TE)와 제어기 출력(TRD)를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 저배속에서는 최소 이득을 어느 정도 만족하여 트랙에러가 작은 값을 가지나 배속이 증가하여 편심 에러 주파수가 증가함에 따라 최소 이득을 만족하지 못해 트랙에러의 편심 성분은 점차 증가하여 시스템이 불안해지는 것을 볼 수 있다.

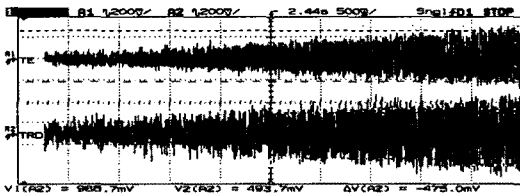


Figure 8. Signal without adaptive repetitive controller

다음 그림9의 (a)는 본 논문에서 제안한 적응 반복제어기를 구동시켰을 때의 초기 모습이다. 첫 번째 신호는 FG(회전 펄스 발생 신호)를 나타내고 두 번째와 세 번째 네 번째 신호는 주파수 발생기에서 생성된 1회전 신호와 체배 신호, 생성된 반복제어기의 샘플링 주파수이다. 그림(b)은 탐색과 정상동작이 이루어지는 파형을 나타내고 있다. 첫 번째 신호는 트랙에러, 그리고 다음 신호들은 제어기 출력과 반복제어기의 출력을 나타내고 있다.

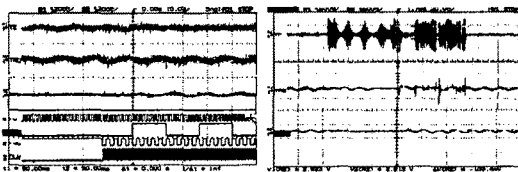


Figure 9. operation with adaptive repetitive controller

다음 그림10에서는 적응 반복 제어기를 적용시켰을 때 위와 같은 조건에서 배속을 변경시켰을 때의 파형을 나타내고 있다. 파형에서와 같이 트랙에러의 편심 성분을 적응 반복제어기가 적절히 제어하여 안정된 트랙에러를 나타내고 있다. 그림에서 (a)와 (b)는 각 배속에서의 파형을 확대하여 표시한 것이다.



Figure 10. Signal with adaptive repetitive controller

3. 결 론

본 논문에서는 고 배속 경쟁이 한계에 다다르며 대두된 보다 안정된 제어기설계에 대한 해결책을 제시하고 있다. 특히 편심으로 인한 외란이 고 배속에서의 데이터 액세스를 불가능하게 하였다. 그리고 기존에 존재했던 편심 보상 제어기들은 동작속도에 대한 제어를 다루었고 이러한 제어기 없는 시스템에서는 배속을 낮추어 데이터를 액세스함으로써 광 디스크 기기의 성능 저하를 가져 왔다. 이러한 문제점에 대한 해결책을 제시하여 광 디스크 기기의 성능 개선을 도모 하였다.

기존의 고정된 주기의 반복적인 외란에 대한 제어만 다루었던 반복 제어기를 수정하여 가변 샘플링 주파수 발생기를 추가하여 배속에 따라서, 혹은 동선속도인 경우 내주에 따라 주기가 변화하는 반복적인 외란에 대한 효과적인 반복 제어기를 제안하였다. 이러한 제안된 반복 제어기에 대하여 그 안정성을 살펴보고 직접 세트에 구현하고 실험을 통하여 그 우수성을 확인하였다. 실험을 통하여 고 배속에서 고 편심 디스크에 대해 안정된 동작을 확인하였다.

탐색 시에는 고 편심으로 인한 인입 시점의 트랙 에러 주파수가 높아 인입조차 불가능하거나 성능 저하되는 것을 개선 향상된 탐색성능을 보여 주고 있다. 210um의 편심 디스크의 경우, 32배속에서는 15%정도의 평균 탐색 속도의 개선을 이루었고 40배속의 경우, 일반제어기의 경우 탐색 자체가 불가능하였으나 기본 특성을 만족하는 평균 탐색 속도를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안된 반복 제어기는 광학 디스크 기기의 편심 보상을 위해 활용성과 성능을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.Cosner, G.Anwar, M.Tomizuka "Discrete Time Repetitive Control for Robot Manipulators" IEEE 1341-1346 1988
- [2] M.Tomizuka, T.Tsao, and K. Chew, "Discrete-Time Domain Analysis and Synthesis of Repetitive Controller". Proc America of Control Conference. 860-866, 1988
- [3] Tadashi Inoue, "Practical repetitive control system design" 29th Conference on Decision and Control, 1673-1678, 1990
- [4] K.K. Chew and M. Tomisuka, "Digital control of repetitive errors in disk drive systems" IEEE Control Systems Magazine, 16-20, 1990
- [5] C.Cosner, G.Anwar, M.Tomizuka "Plug In Repetitive Control for Industrial Robotic Manipulators" IEEE 1970-1975, 1990
- [6] Woo-Sok Chang, and G.J. Kim, J.D. Kim, "Analysis and Design of two Types of Digital Repetitive Control System". Korea Automatic Control Conference. 1051-1059, 1992
- [7] G.M Dotsch and Henk T. Smakman, "Adaptive Repetitive Control of a Compact Disc Mechanism", the 34th Conference on Decision & Control. IEEE 1720-1725, 1995
- [8] T.Y.Doh, J.R.Ryoo, M.J.Chung "Repetitive controller design for track-following servo system of Optical Disk Driver" IEEE AMC2002, 2002
- [9] Z.Cao and Gerard F. Ledwich. "Adaptive repetitive control to track variable periodic signals with fixed sampling rate" IEEE ASME Transactions on Mechatronics. Vol.7, No.3. Sep. 378-384, 2002