

광디스크 드라이브의 디스크 표면 결함에 대한 트래킹 제어 Track-following Control under Disk Surface Defect of Optical Disk Drive Systems

정동슬[†], 이준성^{*}, 정정주^{**}

Dong-Seul Jeong[†], Joon-Seong Lee^{*} and Chung-Choo Chung^{**}

ABSTRACT

This paper proposes a new and simple input prediction method for robust servo system. A robust tracking control system for optical disk drives to reject disk runout was recently proposed based on both Coprime Factorization (CF) and Zero Phase Error Tracking (ZPET) control. The CF control system can be designed simply and systematically. Moreover, this system has not only stability but also robustness to parameter uncertainties and disturbance rejection capability. Since optical disk tracking servo systems can detect only tracking error, it was proposed that the reference input signal for ZPET could be estimated from tracking errors. In this paper, we propose a new control structure for the ZPET controller. It requires less memory than the previously proposed method for the reference signal generation. Therefore, it is very effective in runout control. Furthermore, this method can be applied to defective optical disk like surface defects on disk. Numerical simulation and experimental result show the proposed method effective.

Key Words : Optical Disk Drive, Disk surface defect, Zero phase error tracking

1. 서 론

광디스크 시스템의 트래킹 제어 성능을 저하시키는 요소로는 외란 (disturbance)과 결함 (fault)이 있다. 외란에는 디스크의 트랙 중심과 디스크 회전축의 불일치로 생기는 편심의 영향에 의한 주기적인 것과 외부로부터 충격에 의한 비주기적인 것이 있다. 디스크 표면을 손상시킨 스크래치(Scratch), 디스크 표면에 묻은 지문 또는 잉크 등이 디스크 표면의 결함으로 분류된다[1][2]. 디스크 표면에 존재하는 결함은 트래킹 에러 신호 (Tracking Error Signal: TES)를 왜곡시켜 정밀한 위치 제어를 방해한다. 디스크 결함은 광학빔의 디스크 반사율을 떨어뜨려 RF 신호와 트래킹 에러 신호를 왜곡시켜 트래킹 서보의 성능을

저하시키는 원인이 된다[2]. 이런 문제점을 해결하기 위하여 결함구간에서 제어기 대역폭을 줄여 픽업이 왜곡된 에러를 추종하지 않도록 하는 방법이 제안 되었다[4]. 하지만 제어기의 대역폭을 낮추게 되면 고주파 성분인 외부 충격이 발생할 경우 외란에 대한 대응력이 떨어져서 픽업이 추종하던 트랙을 벗어날 수 있다[3][4]. 또 다른 방법으로 결함 구간에서 제어기의 이전 출력 값을 유지하는 방식이 제안 되었다[5]. 그러나 제어출력 값이 일정하게 유지되면 편심의 영향으로 트랙중심과 광학 스팟(Spot)간의 위치오차가 발생하여 결함구간이 끝나는 지점에서 트래킹 에러 신호가 안정화되는데 많은 시간이 소요된다[6]. 뿐만 아니라 이 방식을 사용하면 결함 구간이 길어질 경우 편심의 영향으로 픽업이 추종하던 트랙을 이탈하는 현상이 발생할 수도 있다. 따라서 디스크의 표면에 결함이 발생시 결함이 있는 일정 구간에서는 이전 트랙 궤적을 따라가도록 하면서 외란에 강인한 제어 방식이 요구된다.

광디스크 시스템에서 외란에 강인한 트래킹 서보 방법으로 Coprime factorization(CF)와 Zero

[†] 한양대학교 전자통신전파공학과
E-mail : dsjeong@ihanyang.ac.kr
TEL : (02)2298-5307 FAX : (02)2281-9912

^{*} 한양대학교 전자통신전파공학과

^{**} 한양대학교 전기제어생체공학과
논문접수일 (2005년 10월 8일)

Phase Error Tracking(ZPET)기법으로 구성된 2 자유도 제어방식이 제안 되었다[11][12]. CF 이론으로 설계된 피드백 제어기는 외란 루프가 외란 관측기 형태를 가지고 있어서 ZPET 제어기와 함께 강인한 2 자유도 제어기 구현에 유용하다. 이 논문에서 제안된 방식은 주기적으로 발생하는 편심의 정보를 갱신하여 저장한 후 픽업이 결함구간에 진입하면 저장된 정보를 이용하여 트래킹 제어에서 피드포워드 보상한다. 그러나 이 방식은 런아웃값을 계산할 때 시스템의 모델을 이용하기 때문에 모델에 불확실성이 있을 경우 오차가 커지며 시스템의 기준 전달함수를 통하여 오차를 필터링하기 때문에 연산량이 증가한다. 또한 필터링 된 오차신호를 이용하기 때문에 결함구간의 과도응답 외란추종에 한계가 있다.

본 논문에서는 [11][12]에서 제안된 방식을 결함 구간에 적용한 제어방식을 제안한다. 제안된 제어기는 [11][12]에서 제안된 ZPET 제어기 설계방식을 수정하여 구성하였다. 제안된 ZPET 제어기 설계 방식에서는 기준 전달함수를 사용하지 않아서 모델의 불확실성에 대한 에러가 없고 피드 포워드 제어를 위한 연산량이 감소되었다. 2mm 가량의 결함 구간이 존재하는 디스크를 결함 디스크로 이용하여 제안된 제어기와 기존 제어기와의 성능을 비교하였다. 제안된 제어기 성능이 기존의 제어기와 비교하여 결함구간에서 개선된 과도응답 특성을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장은 표면 결함의 특성을 살펴본다. 3 장에서는 제어기의 설계 과정을 소개하며 4 장에서는 실험을 통해 제안한 ZPET 방식의 향상된 결함 대응 성능을 검증한다. 마지막으로 5 장에서는 결론을 맺는다.

2. 트래킹 에러와 디스크 표면 결함

광디스크 시스템에서 디스크의 중심과 픽업의 회전축이 불일치하여 발생하는 편심에 의해 주기적인 트래킹 에러가 발생한다[15]. 일반적으로 CD-ROM 에서는 3 빔법(3 beam method)을 사용하여 트래킹 에러를 검출한다. 레이저 다이오드에서 출사된 빔은 회절 격자를 통해 하나의 Main 빔과 두 개의 sub 빔으로 분리되어 디스크에 조사되며, Main 빔은 트랙의 데이터와 포커스 에러를 검출한다. 그리고 두 개의 Sub 빔은 Main 빔의 트래킹

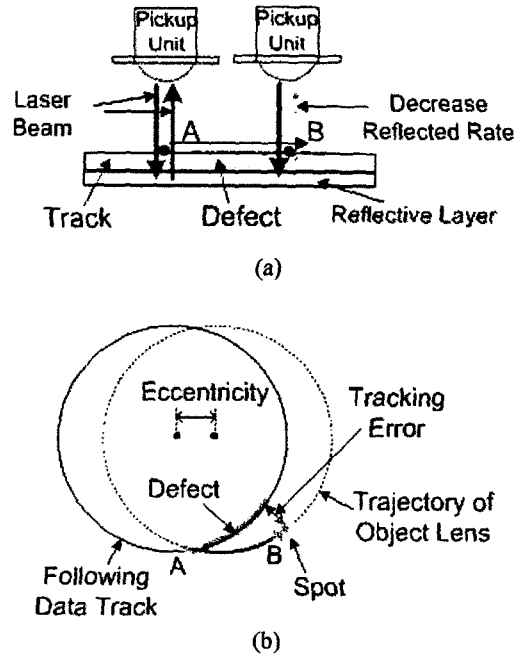


Fig. 1 Effect of defective surface on disk (a) Decreased reflection of laser beam due to surface defect on disk (b) Tracking error caused by disk eccentricity

에러를 허용범위 이내로 유지시키는데도 사용된다 [4]. 하지만 디스크 표면 결함은 Fig. 1 (a)처럼 광학빔의 디스크 반사율을 떨어뜨려서 정밀한 제어를 방해한다.

기존의 결함 대응 방식인 제어신호 유지 방법은 Fig. 1 (b)처럼 편심의 영향으로 픽업과 트랙간의 에러를 발생시키며 결함구간이 끝나는 지점에서 트래킹 에러의 큰 오버슈트가 발생할 수 있다. 이와 같이 큰 오버슈트는 때로는 대물렌즈를 추종하던 트랙에서 이탈시키기도 한다. 3 장에서는 이 문제를 해결하기 위한 새로운 방법으로 CF 제어기와 ZPET 제어기로 구성된 제어기 설계 방법을 소개한다.

3. 서보 시스템 구조와 제어기 설계

2 자유도 제어 방식을 사용하여 제어기를 설계하였다. 피드백 제어기를 통해 기본적인 안정도와 강인성 및 외란 제거 성능을 보장하였고 피드포워드 제어기를 통해 결함 구간내에서 외란에 대한 대응 성능을 향상 시켰다.

3.1 강인한 피드백 제어기

본 논문은 [11][12]에서 제안된 제어기 설계 방식을 따랐다. CF 이론을 이용하여 안정된 제어기

를 설계하되 외란 관측기 기능을 보유하도록 제어기를 설계하였다. 기존에 연구되었던 CF 제어기의 설계 과정을 요약하면 다음과 같다[11][12].

플랜트 $P(s)$ 가 $(N(s), D(s))$ 로 Coprime Factorization 될 수 있으면, 제어기 $C(s)$ 가 식(1)을 만족하는 $(X(s), Y(s))$ 로 Coprime Factorization 될 때 제어기 $C(s)$ 는 플랜트 $P(s)$ 를 안정화 시킨다 [7]-[9].

$$X(s)N(s) + Y(s)D(s) = 1 \quad (1)$$

기본적인 CF 제어기에 Youla Parameter $Q(s)$ 를 추가하여 강인성과 외란 제거 성능을 갖도록 하는 제어기 설계 기법에 대한 연구가 진행 되었다[10]-[12]. 식(2)와 같은 형태로 Youla Parameter $Q(s)$ 가 주어진다

$$Q(s) = \frac{Y(s)}{N(s)}g(s) \quad (2)$$

여기서 $g(s)$ 의 저주파 이득은 1 이 (즉 $g(0)=1$) 되도록 설계한다. 식(2)를 만족하는 $Q(s)$ 를 추가한 제어기는 식(3)과 같이 되며 이때 제어시스템의 전체 구성도는 Fig. 2와 같다.

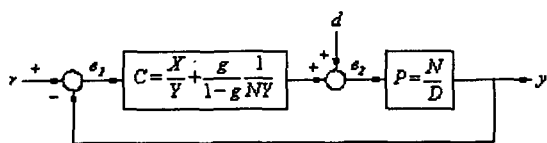


Fig. 2 Coprime Factorization controller

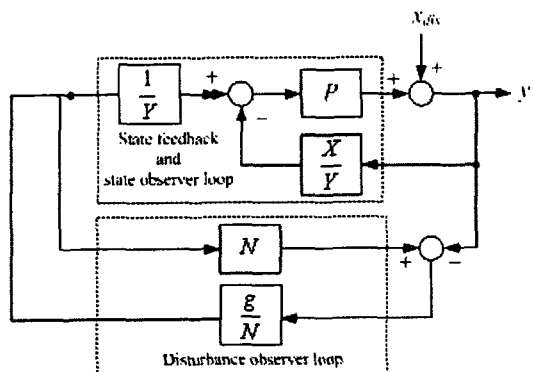


Fig. 3 Block diagram for verify external disturbance rejection

$$C = \frac{X+QD}{Y-QN} = \frac{X}{Y} + \frac{g}{1-gNY} \quad (3)$$

Fig. 2는 등가적으로 Fig. 3과 같이 표현될 수 있으며 우리는 Fig. 3에서 설계된 제어기가 외란 관측기의 구조 (Structure of Disturbance Observer (DOB))를 갖고 있음을 알 수 있다[10]-[12]. Fig. 2에서 외란 제거 성능을 확인하기 위해 외란으로부터 출력까지 전달 함수를 구하면 식(4)와 같다.

$$\frac{y}{d} = \frac{P}{1+CP} = (1-g)NY \quad (4)$$

식(4)에서 $g(s)$ 가 $g(0)=1$ 의 조건을 만족하도록 설계되면 저주파 외란이 효과적으로 제거될 수 있음을 알 수 있다. 이 구조에서 실제 플랜트가 곱셈 섭동 $E(s)$ 를 가질 경우 Fig. 3을 간략화시키면 Fig. 4와 같고 이를 수식적으로 정리하면 식(5)와 같이 된다. Fig. 4를 통해 $g(s)$ 가 식(6)을 만족하도록 설계되면 스톨 계인 이론에 의해 CF 제어기는 곱셈 섭동 $E(s)$ 에 대한 강인성을 갖는다[10]-[12].

$$G_m(s) = \frac{N+NE}{1+NXE} = \hat{G}_m(s) \left(1 + \frac{E(1-NX)}{1+NXE} \right) = \hat{G}_m(s)(1+E_m(s)) \quad (5)$$

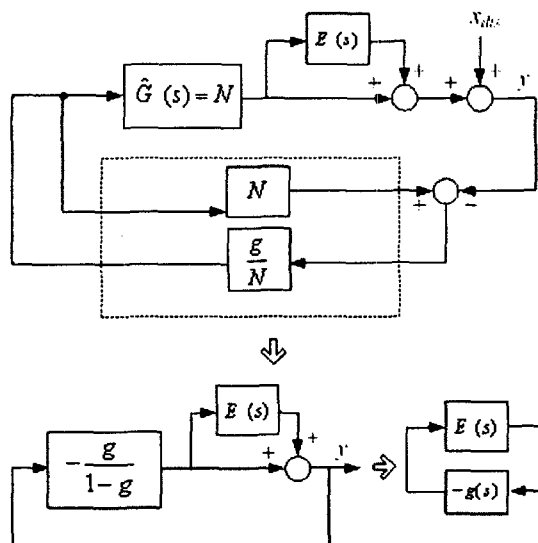


Fig. 4 Robust stability condition

$$\|E_m(s)g(s)\|_\infty < 1$$

$$\text{or } |E_m(j\omega)|^{-1} \geq |g(j\omega)| \quad \forall \omega \quad (6)$$

Fig. 5 에 보인 것과 같이 플랜트 불확실성이 존재할 경우 $g(s)$ 는 식(6)을 만족하도록 식(7)과 같이 간단한 2차 저대역 필터로 설계될 수 있다. 제어기의 강인성은 Fig. 5 를 통해서 쉽게 확인될 수 있다.

$$g(s) = \frac{g_p^2}{s^2 + 2g_p s + g_p^2} \quad (7)$$

명목 플랜트의 트래킹 제어 성능을 위해서 필요한 DC 게인, Crossover 주파수, Phase Margin 등을 만족하도록 극점을 선정하여 CF 제어기를 구하면 식(8)과 같다. 식(8)의 주파수 응답인 Fig. 6 을 통해서 $C(s)$ 는 위상지연 앞섬 보상기 형태를 갖고 있으면서 저주파 영역의 외란을 제거하는 동시에 섭동에 대한 강인성도 보장을 받는 구조임을 알 수 있다.

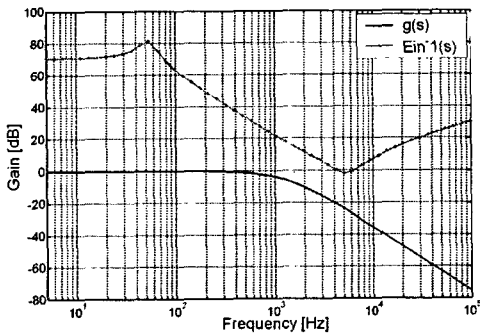


Fig. 5 Frequency Response of $g(s)$

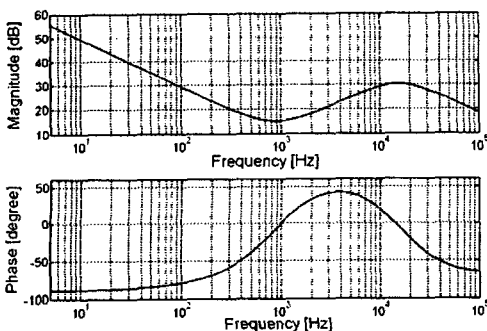


Fig. 6 Bode diagram of CF Controller

$$C(s) = \frac{n_{c,4}s^4 + n_{c,3}s^3 + n_{c,2}s^2 + n_{c,1}s + n_{c,0}}{s^4 + d_{c,3}s^3 + d_{c,2}s^2 + d_{c,1}s + d_{c,0}} \quad (8)$$

여기서 $n_{c,4} = 1.1029$, $n_{c,3} = 8.7219 \times 10^4$, $n_{c,2} = 1.2564 \times 10^9$, $n_{c,1} = 3.9189 \times 10^{12}$, $n_{c,0} = 5.0637 \times 10^{15}$, $d_{c,3} = 4.6706 \times 10^4$, $d_{c,2} = 8.5865 \times 10^8$, $d_{c,1} = 5.5828 \times 10^{12}$, $d_{c,0} = 0$ 이다.

본 논문에서 사용된 플랜트는 52 배속 CD-ROM 이며 광 픽업을 식(9)와 같이 모델링하여 사용하였다.

$$P_n(s) = \frac{K_d K_r \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

여기서 ω_n 은 공진 주파수이고, ζ 는 감쇠비, K_d 는 Driver 이득, K_r 은 광학 이득이다. ω_n 은 884.94rad/sec, ζ 는 0.149, K_d 는 3.47×10^{-4} , K_r 은 2.5×10^6 이다.

Fig. 6 에 있는 제어기를 사용한 경우 Open Loop Transfer Function 을 Fig. 7 에 도식하였다. Fig. 7 에서 Phase Margin 은 42.7° , Gain Margin 은 15.2dB(at 14.2KHz), Cross Over Frequency 는 3.89KHz 이다.

3.2 피드포워드 제어기

결함 대응 성능을 향상시키기 위해서는 결함구간에서 편심에 의해 발생하는 에러를 예측하여 트래킹 제어를 하는 방식이 필요하지만 피드백 제어기만으로는 그 성능에 제한이 따른다. 본 논문은 기존의 ZPET 입력 예측 구조를 이용하여 설계된 피드포워드 제어기가 결함 대응 성능의 향상에 유용함을 소개한다. 그리고 [11][12]에서 제안된 ZPET 방법보다 적은 연산량으로 향상된 결함성

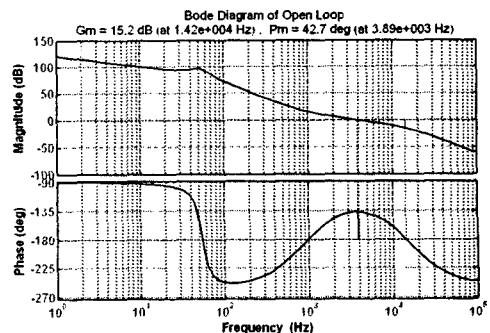


Fig. 7 Bode diagram of Open Loop

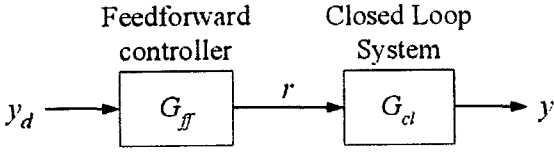


Fig. 8 General ZPET controller

능을 가지는 새로운 ZPET 입력 예측구조를 제안한다.

3.2.1 ZPET 기법

ZPET 기법은 폐루프 전달 함수의 역수를 피드포워드 제어기로 사용하여 전체 입력에서 출력까지 전달함수의 이득이 1이 되도록 하는 것이다 [13]. 이 방법의 특징은 원하는 출력의 값을 피드포워드 제어기에 입력하면 그대로 출력되기 때문에 결합 구간에서 유용하게 사용할 수 있다. Fig. 8은 피드포워드 제어를 포함한 전체 시스템의 구성도를 보여주고 있다. 우선 전체 시스템의 폐루프 전달 함수를 이산화한 것이 식(10)과 같다고 가정하였다. 여기서 z^{-d} 는 일반적으로 플랜트에 존재하는 d-step delay를 나타낸다. 원론적으로 피드포워드 제어기는 식(11)과 같다.

$$G_{cl}(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B_c(z^{-1})}{A_c(z^{-1})} \quad (10)$$

$$G_{ff}(z^{-1}) = \frac{1}{G_{cl}(z^{-1})} = \frac{z^d A_c(z^{-1})}{B_c(z^{-1})} \quad (11)$$

그러나 $B_c(z^{-1})$ 에 존재하는 불안정한 영점은 역수를 취함으로써 인해 불안정한 극점이 되고, 이는 피드포워드 제어기 $G_{ff}(z^{-1})$ 를 불안정한 시스템이 되게 하기 때문에 구현이 불가능하다. ZPET 기법은 이러한 불안정한 영점으로 인해 생기는 피드포워드 보상기의 문제를 해결한 기법이다. $B_c(z^{-1})$ 은 안정한 영점을 가진 $B_c^-(z^{-1})$ 와 불안정한 영점을 가진 $B_c^+(z^{-1})$ 로 구분할 수 있다. $G_{cl}(z^{-1})$ 의 역수를 취하고자 할 때 $B_c^-(z^{-1})$ 는 바로 역수를 취한다. $B_c^+(z^{-1})$ 는 결레 복소수를 곱함으로써 페이즈가 0°가 되도록 하고 $[B_c^+(1)]^2$ 를 분모에 곱함으로써 저주파 대역에서 게인이 1이 되도록 한다. 결과적으로 ZPET 기법에 의해 구현되는 피드포워드 제어기는

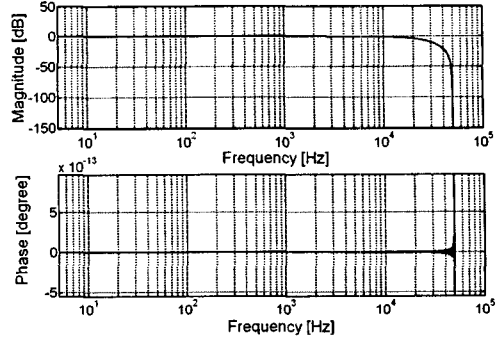


Fig. 9 Bode diagram of total system with ZPET controller

식(12)와 같은 형식을 가지게 된다.

$$G_{ff}(z^{-1}) = \frac{z^d A_c(z^{-1}) B_c^-(z)}{B_c^+(z^{-1}) \{B_c^+(1)\}^2} \quad (12)$$

식(12)를 이용하여 전체 전달함수를 구해보면 식(13)과 같고 본 논문에서 사용되는 플랜트와 제어기를 이용하여 식(13)의 보드선도를 그리면 Fig. 9와 같다.

$$G_{total}(z^{-1}) = G_{ff}(z^{-1}) \cdot G_{cl}(z^{-1}) = \frac{B_c^-(z) B_c^-(z^{-1})}{[B_c^+(1)]^2} \quad (13)$$

3.2.2 입력 예측 구조

설계된 ZPET 피드포워드 제어를 입력 $e_f^f(k)$ 와 출력 $u_f(k)$ 의 관계로 정리해보면 식(14)와 같다 [10]. Fig. 10은 입력 예측 ZPET 피드포워드 제어를 포함한 시스템의 구성도이다.

식(14)에서 알 수 있듯이 ZPET 제어기를 구현하려면 $e_f^f(k+2)$ 를 알아야 한다. 하지만 미래의 값

$$\begin{aligned} u_f(k) &= \frac{z^d A_c(z^{-1}) B_c^-(z)}{B_c^+(z^{-1}) \{B_c^+(1)\}^2} e_f^f(k) \\ &= \left(A_{ff} z + \frac{A_{ff}(z^{-1})}{B_{ff}(z^{-1})} \right) z e_f^f(k) \\ &= A_{ff}^f e_f^f(k+2) + \frac{A_{ff}(z^{-1})}{B_{ff}(z^{-1})} e_f^f(k+1) \end{aligned} \quad (14)$$

을 미리 안다는 것은 불가능하므로 $e_f^f(k+2)$ 를 예측하는 구조가 필요하게 된다. 입력 예측 구조를

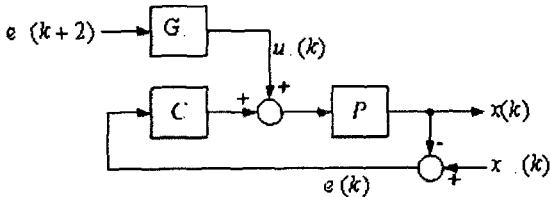


Fig. 10 ZPET feedforward controller

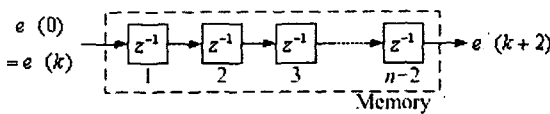


Fig. 11 Memory structure for input prediction

정의하기 전에 우선 ZPET 제어기의 입력이 어떠한 정보를 가지고 있어야 하는지를 알아 보자. ZPET 이론에 의하면 제어기의 입력은 추종해야 할 트래킹 값이 들어가야 한다[13][14]. 그러므로 ZPET 제어기 입력은 식(15)와 같이 정의할 수 있다.

$$e_i^f = x_{ref} \quad (15)$$

그런데 광디스크 드라이브에서는 식(16)과 같이 트래킹 에러만이 측정 가능하므로 트래킹 에러의 정보를 이용해서 피드포워드 제어기의 입력을 만들어 내야 한다.

$$e_i = x_{ref} - x \quad (16)$$

따라서 ZPET 제어기를 구현하려면 식(17)과 같은 정보를 가지는 2샘플 전의 e_i^f 를 제어기에 입력해야 한다.

$$e_i^f = x + e_i = \frac{P}{1+CP} u_f + e_i \quad (17)$$

광디스크 드라이브에서 트래킹 에러 e_i 는 디스크의 회전에 의해 주기적으로 발생하고, 피드포워드 제어기의 입력 e_i^f 도 주기적으로 발생한다. 따라서 매 샘플링 타임마다 e_i^f 를 메모리에 업데이트 하면, 디스크의 1회전 이후부터 메모리에 저장된 값을 이용하여 $e_i^f(k+2)$ 를 구현 할 수 있다. 이를 위한 메모리 구조는 Fig. 11과 같고 메모리 개수는 식(18)과 같이 구할 수 있다.

$$n = \frac{f_s}{f_r} \quad (18)$$

여기서 f_s 는 샘플링 주파수(Hz)이고 f_r 은 디스크의 회전 주파수(Hz)이다. 최종적으로 입력 예측 구조는 Fig. 12와 같은 형태가 된다[10]-[12].

그런데 이러한 피드포워드 제어기 구조는 ZPET 제어기에 전체 폐루프의 전달 함수와 메모리까지 포함하는 방대한 구조여서 제어기 설계가 복잡하고 연산량도 증가한다. 또한 Fig. 12에서 보이듯이 기존의 ZPET 구조는 $u_f(k)$ 를 Filter 형태로 피드백시키기 때문에 결함구간에서 발생하는 과도한 트래킹 에러를 추종하는 능력을 저하시킬 수 있다. 이 문제를 보완하기 위해 본 논문에서는 더 간단한 구조를 가지는 ZPET 제어기를 제안하였다. ZPET 이론에 의하여 식(14)는 식(19)와 같이 표현할 수 있다.

$$u_f = \frac{z^d A(z^{-1}) B^-(z^1)}{B^+(z^{-1}) [B^-(1)]^2} e_i^f(k) \approx \frac{1+C(z^{-1})P(z^{-1})}{P(z^{-1})} e_i^f(k) \quad (19)$$

이를 식(17)에 적용하여 $e_i^f(k+2)$ 를 다시 정의해 보면 식(20)과 같이 간략화 할 수 있다. Fig. 13 에서 볼 수 있듯이 제안된 입력예측구조는 기존 방식에 비해 폐루프 전달 함수가 빠짐으로써 간단한 피드백 구조를 가지며 또한 과도 응답 특성을 개선시킬 수 있도록 설계되었다.

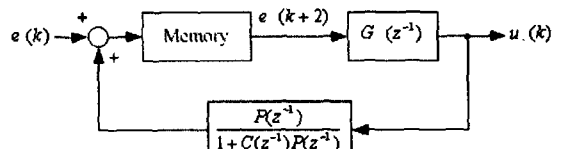


Fig. 12 Previous input prediction structure[12]

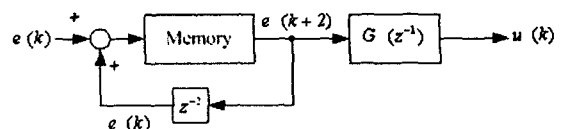


Fig. 13 Proposed input prediction structure

$$e_i^f(k+2) = \frac{P}{1+CP} u_f(k) + e_i(k) \approx e_i^f(k) + e_i(k) \quad (20)$$

4. 실험 결과

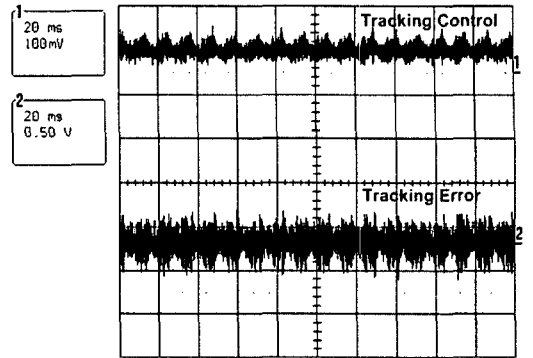
4.1 실험 환경

실험에 (주)삼성전자 시판용 52 배속 CD-ROM Drive 를 사용하였다. 디스크의 회전 주파수는 주기적으로 Fault 를 발생시키기 위해 85Hz로 설정하여 실험을 진행하였다. CD 규격에 의한 트래킹 에러 허용 수준인 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 가 $\pm 0.3V$ 수준으로 외부로 출력되도록 설정되었다. 디지털 제어를 구현하기 위해 TI 사의 TMS320VC33 DSP 를 사용하였으며, 샘플링 주파수를 100KHz 로 설정하여 실험을 수행하였다.

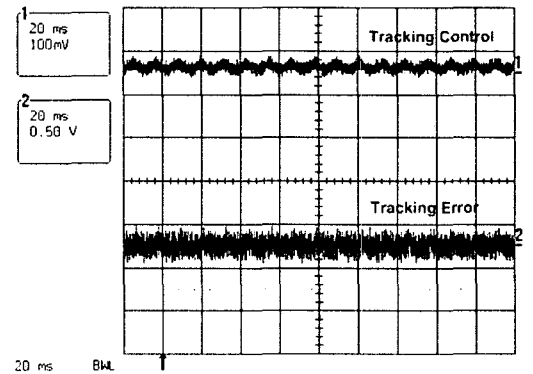
4.2 실험 결과

우선 결함이 없는 디스크에 대한 CF 제어기, 기존의 ZPET, 제안된 ZPET 제어기의 성능을 비교하기 위해 각각의 제어기를 적용한 실험결과를 Fig. 13 에 보였다. Fig. 14 (a)에서 트래킹 에러의 첨두치가 $\pm 0.3V$ 임에 비해 Fig. 14 (b), Fig. 14 (c)의 트래킹 에러 크기는 (peak-to-peak amplitude) 약 30% 감소된 $\pm 0.2V$ 임을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안된 방법을 적용한 경우 Fig. 14 (c)는 기존 ZPET 방법 Fig. 14 (b)보다 트래킹 에러신호가 부드럽지 못함을 확인할 수 있다. 그 이유는 기존 ZPET 방법은 Fig. 12 와 같이 필터링이 된 부드러운 에러신호를 피드포워드 제어기에 입력하기 때 문인 것으로 추정된다. 그러나 이 방식은 디스크 에 결함이 발생시 과도응답특성의 저하를 초래한다.

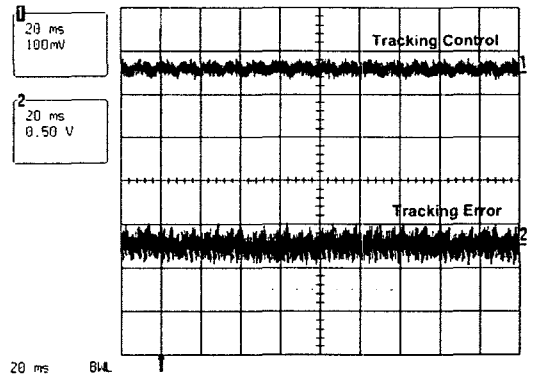
디스크 결함에 대한 제안된 제어방식의 개선효과를 검증하기 위하여 약 12ms 간격으로 Fault 가 발생되도록 디스크에 인위적으로 2mm 의 결함구간을 구현하고 실험하였다. 픽업이 결함구간을 진입할 경우 RF 신호의 값이 감소하는 특징을 이용하여 결함구간을 검출하였으며 실제 Fig. 15 에서 Fault 가 발생할 때마다 트래킹 에러의 오버슈트가 발생하는 것을 알 수 있다[6]. 결함구간에 대해서 Fig. 15 (a)는 이전에 제안된 CF 제어기와 이전 제어값 유지 방식을 적용한 결과이며, Fig. 15 (b)는 기존의 ZPET 제어기를 적용한 결과이고, Fig. 15 (c)



(a)



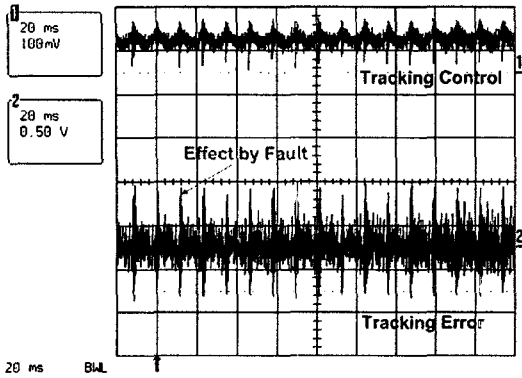
(b)



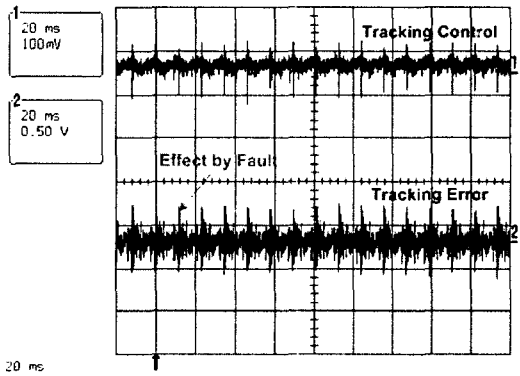
(c)

Fig. 14 Track Following Performance without surface defect (Ch1: Tracking Control Signal, Ch2: Tracking Error Signal) : Three controllers are tested. (a) Coprime controller only, (b) CF Controller with ZPET designed by the conventional input prediction method, (c) CF Controller with ZPET designed by the proposed input prediction method. All the controllers meet the specification on the track following requirement.

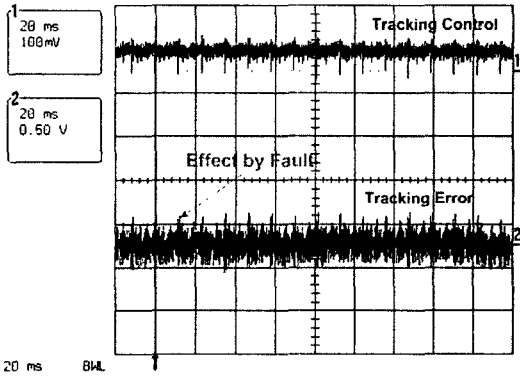
는 제안된 ZPET 를 적용한 실험 결과이다.



(a)



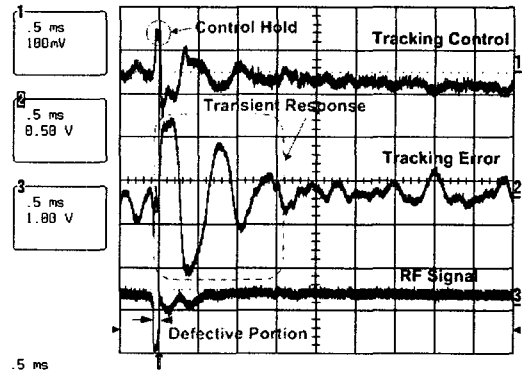
(b)



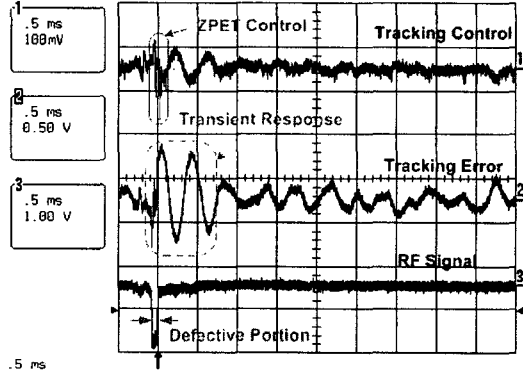
(c)

Fig. 15 Track Following Performance in the presence of surface defect (Ch1: Tracking Control Signal, Ch2: Tracking Error Signal) : (a) Coprime controller only, (b) CF Controller with ZPET designed by the conventional input prediction method, (c) CF Controller with ZPET designed by the proposed input prediction method.

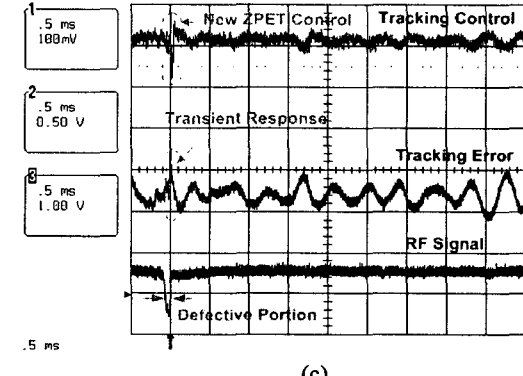
과도상태를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 15 에 있는 그림들의 시간 축을 확대한 그림을 Fig. 16 에 보였다. Fig. 16 에서 결함구간 발생시점에서 CD 규격에 의한 트래킹 에러 허용 수준($\pm 0.1\mu\text{m}(\pm 0.3V)$)



(a)



(b)



(c)

Fig. 16 Track Following Performance in the presence of surface defect (Ch1: Tracking Control Signal, Ch2: Tracking Error Signal, Ch3: RF Signal) : (a) Coprime controller only, (b) CF Controller with ZPET designed by the conventional input prediction method, (c) CF Controller with ZPET designed by the proposed input prediction method.

으로 안정화 되는 데 소요되는 시간은 각각 약 1.5ms, 0.7ms, 0.1ms 로 확인되었다. 본 논문에서 제안한 방식이 기존의 방식보다 결함 대응 성능이 우수함을 알 수 있다. 결함 대응 성능이 향상된

이유는 기존 ZPET 제어기가 Filter 형태의 피드백 구조를 포함하는 반면, 제안된 ZPET 제어기는 이 피드백 구조를 사용하지 않고 간단한 제어기 구조를 구현하여 연산량이 감소되고 과도응답특성이 개선되었기 때문이다.

5. 결론

본 논문은 디스크 표면의 결함이 서보시스템에 미치는 영향과 결함 대응 방식에 대하여 논하였다. 디스크 표면에 존재하는 결함은 RF 신호와 트래킹 에러를 왜곡시켜 트래킹 제어를 방해하는 원인이 되었으며, 결함 대응 성능의 향상을 위해 2 자유도 설계 기법을 적용하였다. 피드백 제어기는 CF 기법을 이용한 제어기를 적용하였고 피드포워드 제어기는 ZPET 기법을 적용하여 설계하였다. 그리고 기존의 ZPET 방식 보다 연산량이 감소하고 향상된 결함 대응 성능을 가진 새로운 ZPET 구조를 제안하였다. 제안된 방식이 향상된 결함 대응 성능이 있음을 실험으로 검증하였다.

참고문헌

- [1] J. van Helvoirt, G. A. L. Leenknecht, M. Steinbuch and H. J. Goossens, 2005, "Disc Defect Classification for Optical Disc Drives", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.51, No.3, pp.856-863
- [2] E. Vidal, P. Andersen, J. Stoustrup and T. Pedersen, 2001. "A study on the surface defects of a compact disk", In Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications, pp.101-104
- [3] E. Vidal, K. G. Hansen, R. S. Andersen, K. B. Poulsen, J. Stoustrup et al., 2001, "Linear Quadratic Controller with Fault Detection in Compact Disk Players", In Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications, pp.77-81
- [4] P. F. Odgaard, J. Stoustrup, M. V. Wickerhauser, and H. F. Mikkelsen, 2004, "A simulation model of focus and radial servos in Compact Disc players with Disc surface defects", In Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications, pp.105-110
- [5] R. M. Shoji, J. S. Chudy and C. J. Eberly: U. S. Patent 4406000.
- [6] Tomoaki Ryu, Eiji Yokoyama, Masaharu Ogawa and Kenjiro Kime, 2001, "Stable Servo System of Digital Versatile Disk Player against Defect", Jpn. J. Appl. Phys, Vol.40, No.9A, pp.5340-5341
- [7] J. C. Doyle, B. Francis and A. Tannenbaum, 1990, "Feedback Control Theory", Macmillan Publishing Co.
- [8] K. Zhou, and J. C. Doyle, 1998, "Essentials of Robust Control", Prentice-Hall International, Inc.
- [9] K. Morris, 2001, "Introduction to Feedback Control", Harcourt / Academic Press.
- [10] K. Arai, H. Okumura, H. Tokumaru, and K. Ohishi, Feb 2000, "Improvement of Performance of Tracking Servo System for an Optical Disk Drive", Jpn. J. Appl. Phys, Vol.39, No.2B, pp.855-861
- [11] K. Ohishi, Y. Hayakawa, H. Yanagisawa, D. Koide and H. Tokumaru, 2002, "Robust Feedforward Tracking Following Control System for an Optical Disk", In Proc. of IEEE/IES AMC, pp.57-62
- [12] K. Ohishi, Y. Hayakawa, H. Yanagisawa, D. Koide and H. Tokumaru, 2003, "Robust feedforward Tracking Following Control System for an Optical Disk Drive System", In Proc. of ACC, pp.4329-4334
- [13] M. Tomizuka, 1987, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", ASME Journal of Dynamic Systems, Meas. and Control, Vol.109, pp. 6-10
- [14] M. Tomizuka, 1996, "Model Based Prediction, Preview and Robust Controls in Motion Control Systems", In Proc. of IEEE/IES AMC, Vol.1, pp.1-6
- [15] Kyung-Soo Kim, 2005, "Analysis of Optical Data Storage Systems Tracking Performance With Eccentricity", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.52, No.4, pp.1056-1062