

광디스크 드라이브의 디스크 표면 결함에 대한 트래킹 제어

이준성[†], 정동술*, 정정주**

Track-following Control for Disk Surface Defect of Optical Disk Drive Systems.

Joon Seong Lee, Dong Seul Jeong, and Chung Choo Chung

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

ABSTRACT

In optical disk drives, surface defects on a disk distort tracking error signal and disturb a precision tracking control. A conventional method against disk defect is held the tracking control signal when a defective portion is detected. However, if the defective portion is getting longer, objective lens will get away from following track. In order to keep the position of spot from following track, the servo system must predict tracking error and control the object lens in the defective portion.

A tracking control system for optical disk drives was proposed recently based on both Coprime Factorization(CF) and Zero Phase Error Tracking(ZPET) control. The system was proposed for overcome the limit of previously tracking error. But there were no research about the method against the defective portion. This paper proposes a new and simple ZPET construct. as a new method against the defective portion. From experimental results, we have proved that proposed method improves the performance against the defective portion, decreases the uncertainty of a model, and requires less memory than the previously proposed method.

1. 서론

광디스크 시스템에서 제어를 방해하는 요소는 크게 주기적인 외란과 비주기적인 외란으로 나눌 수 있다. 주기적인 외란은 디스크의 트랙 중심과 디스크 회전축의 불일치로 생기는 편심에 의해 발생하며 비주기적인 외란은 외부 충격(External Shock), 디스크 표면 결함(Surface defect), 진동(Vibration)등의 영향에 의해 발생한다. 이 중 디

스크 표면에 존재하는 결함(Surface defects)은 트래킹 에러 신호를 왜곡시켜 정밀한 제어를 방해하는 외란으로써 그 종류는 Scratch, 지문, 잉크 등이 있다[1][2].

광학빔(Optical beam)은 광디스크 시스템에서 트래킹, 포커싱 에러를 측정하고 트랙의 데이터를 읽기 위해 사용하는 신호이다. 디스크 결함은 광학빔의 디스크 반사율을 떨어뜨려 RF 신호와 트래킹 에러 신호를 왜곡시키는 원인이 된다[2]. 이런 문제점의 대응 방식으로 결함구간에서 제어기 대역폭을 줄여 픽업이 왜곡된 에러를 추종하지 않도록 하는 방법이 제안 되었다[3]. 하지만 제어기의 대역폭을 낮추면 고주파 성분인 외부 충격이 발생할 경우 대응력이 떨어져서 픽업이 추종하던 트랙을 벗어날 수 있다[4]. 또

[†] 한양대학교 전자통신전파공학과
E-mail : joon43@ihanyang.ac.kr
TEL : (02)2298-5307 FAX : (02)123-1234

* 한양대학교 전자통신전파공학과

** 한양대학교 전기제어생체공학부

다른 방법으로 결함 구간에서 제어기의 이전 출력값을 유지하는 방식이 제안 되었다[5]. 그러나 제어신호가 유지되면 편심의 영향으로 트랙중심과 스팟(Spot)의 에러가 발생하여 결함구간이 끝나는 지점에서 서보 시스템이 안정화하는데 많은 시간이 소요된다[6]. 또한 결함 구간이 길어질 경우 편심의 영향으로 트래킹 에러도 같이 증가하여 픽업이 추종하던 트랙을 이탈하는 현상이 발생할 수도 있다. 따라서 디스크의 표면에 결함이 발생시 결함이 있는 일정 구간에서는 이전 트랙 레적을 따라가도록 하면서 외란에 강인한 제어 방식이 요구된다.

광디스크 시스템에서 외란에 강인한 트래킹 서보 방법으로 Coprime factorization(CF)와 Zero phase error tracking(ZPET)기법으로 구성된 2 자유도 제어방식이 제안 되었다[11][12]. 이 논문에서 제안된 방식은 주기적으로 발생하는 편심의 정보를 갱신하여 저장한 후 픽업이 결함구간에 진입하면 저장된 정보를 이용하여 트래킹 제어에서 피드포워드로 보상한다. 그러나 이 방식은 런아웃값을 계산할 때 시스템의 모델을 이용하기 때문에 모델에 불확실성이 있을 경우 오차가 커지며 시스템의 기준 다이내믹스를 통하여 오차를 필터링하기 때문에 연산량이 증가한다. 본 논문에서는 결함 구간에 대한 새로운 대응 방법으로 ZPET 제어기를 이용한 방법을 제안한다. 제안된 제어기는 기존 ZPET 방식과 비교하여 모델의 불확실성에 대한 에러가 적으며 연산량이 감소되었다. 또한 2mm의 결함 구간이 존재하는 디스크의 트래킹 서보 실험을 통하여 제안된 제어기가 결함 구간의 대응 성능이 향상되었음을 보인다.

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 시스템은 디스크의 중심과 픽업의 회전축이 불일치하여 발생하는 편심에 의해 주기적인 트래킹 에러가 발생한다[15]. 일반적으로 CD-

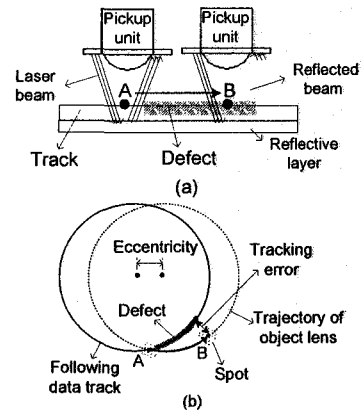


Fig. 1 Effect of the defective portion (a) Decrease reflection rate of laser beam (b) Tracking error by defect and eccentricity

ROM에서는 3 빔법을 이용하여 이 트래킹 에러를 검출한다. 레이저 다이오드에서 출사된 빔은 회절 격자를 통해 하나의 Main 빔과 두 개의 sub 빔으로 분리되어 디스크에 조사되며, Main 빔은 트랙의 자료와 포커스 에러를 검출하고 두 개의 Sub 빔은 Main 빔의 트래킹 에러를 허용범위 이내로 유지시키는데 사용된다[3]. 하지만 디스크 표면 결함은 Fig.1 (a)처럼 광학빔의 디스크 반사율을 떨어뜨려 정밀한 제어를 방해한다.

기존의 결함 대응 방식인 제어신호 유지는 Fig. 1 (b)처럼 편심의 영향으로 픽업과 트랙간의 에러가 발생하고, 결함구간이 끝나는 지점에서 트래킹 에러의 오버슈트를 야기시키며 심지어는 대물렌즈를 추종하던 트랙에서 이탈시키기도 한다. 3 장에서는 이 문제를 보완하기 위한 새로운 대응 방식으로 CF 제어기와 ZPET 제어기로 구성된 서보시스템을 소개한다.

3. 서보 시스템

본 논문은 2 자유도 제어 방식을 사용하여 서보 시스템을 구성하였으며, 피드백 제어기를 통해 기본적인 안정도와 강인성 및 외란 제거 성능을 보장하였고 피드포워드 제어기를 통해 결함 구간의 대응 성능을 향상 시켰다.

3.1 피드백 제어기

본 논문은 CF 이론을 이용하여 안정된 제어기를 설계하면서 외란 관측기 기능을 구현하도록 피드백 제어기를 설계하였다. 플랜트 $P(s)$ 가 $(N(s), D(s))$ 로 Coprime Factorization 되고, 제어기

$C(s)$ 가 식(1)를 만족하는 $(X(s), Y(s))$ 로 Coprime Factorization 될 때 제어기 $C(s)$ 는 플랜트 $P(s)$ 를 안정화 시킨다[7][8][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[6]-[8]. 식(2)과 같은 형태로 Youla Parameter $Q(s)$ 가 주어진다면 $g(s)$ 의 저주파 이득이 1이 된다.

$$Q(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} g(s), \quad g(0) = 1 \quad (2)$$

$Q(s)$ 를 추가한 제어기는 식(3)와 같으며 이때 제어시스템의 전체 구성도는 Fig. 2와 같다.

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

Fig. 2와 등가적인 구조로 표현한 Fig. 3은 설계된 제어기의 외부 루프가 외란 관측기의 형태를 취하게 됨을 나타낸다[10]-[12].

플랜트는 52배속 CD-ROM Drive의 픽업을 식(4)와 같이 모델링하여 사용하였다.

$$P_n(s) = \frac{K_d K_r \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

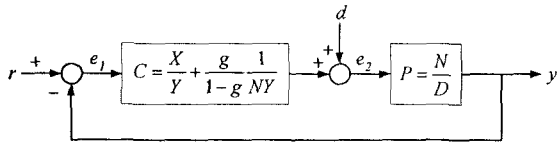


Fig. 2 Coprime Factorization controller

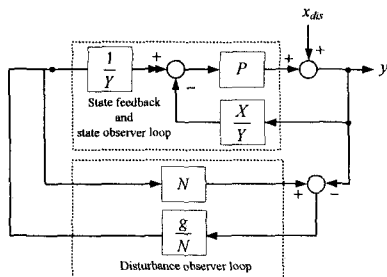


Figure. 3 Block diagram for verify external disturbance rejection

여기서 ω_n 은 공진 주파수이고, ζ 는 감쇠비, K_d 는 Driver 이득, K_r 은 광학 이득이다. ω_n 은 1884.94rad/sec, ζ 는 0.149, K_d 는 3.47×10^{-4} , K_r 은 2.5×10^6 이다.

트래킹 제어를 하기 위해 필요한 DC 게인, Crossover 주파수, Phase Margin 을 만족하도록 극점을 선정하여 CF 제어기를 설계하였다. 이렇게 설정된 피드백 게인 K 와 관측기 게인 F 를 식(1)로 주어진 명목 플랜트에 적용하여 $Q(s)$ 를 포함한 CF 제어기를 구하면 식 (5)와 같고 $g(s)$ 는 식 (6)과 같다.

$$C(s) = \frac{n_{c,4}s^4 + n_{c,3}s^3 + n_{c,2}s^2 + n_{c,1}s + n_{c,0}}{s^4 + d_{c,3}s^3 + d_{c,2}s^2 + d_{c,1}s + d_{c,0}} \quad (5)$$

$$g(s) = \frac{g_p^2}{s^2 + 2g_p s + g_p^2} \quad (6)$$

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 기존의 제안된 ZPET 방법보다 적은 연산량으로 향상된 결함 성능을 가지는 새로운 ZPET 입력 예측구조를 제안한다.

3.2.1 ZPET 기법

ZPET 기법은 페루프 전달 함수의 역수를 피드포워드 제어기로 사용하여 전체 입력에서 출력까지의 게인이 1 이 되도록 하는 것이다. 이 방법의 특징은 원하는 출력의 값을 피드포워드 제어기에 입력하면 그대로 출력되기 때문에 결함 구간에서 유용하게 사용할 수 있다. Fig. 4 는 피드포워드 제어기를 포함한 전체 시스템의 구성도이다. 우선 전체 시스템의 페루프 전달 함수를 이산화한 것이 식(7)과 같다고 가정하였다. 여기서 z^{-d} 는 일반적으로 플랜트에 존재하는 d -step delay 를 나타낸다. 원론적으로 피드포워드 제어기는 식 (8)와 같다.

$$G_{cl}(z^{-1}) = \frac{z^{-d} B_c(z^{-1})}{A_c(z^{-1})} \quad (7)$$

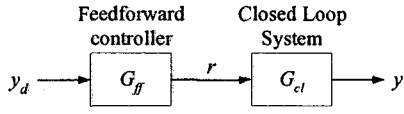


Figure. 4 General ZPET controller

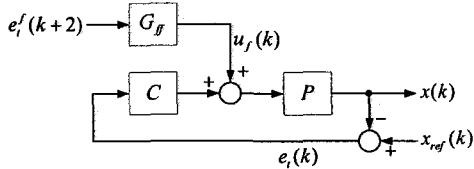


Figure. 5 ZPET feedforward controller

$$G_{ff}(z^{-1}) = \frac{1}{G_{cl}(z^{-1})} = \frac{z^d A_c(z^{-1})}{B_c(z^{-1})} \quad (8)$$

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 1 이 되도록 한다. 결과적으로 ZPET 기법에 의해 구현되는 피드포워드 제어기는 식(9)와 같은 형식을 가지게 된다.

$$G_{ff}(z^{-1}) = \frac{z A_c(z^{-1}) B_c^-(z)}{B_c^+(z^{-1}) \{B_c^-(1)\}^2} \quad (9)$$

3.2.2 입력 예측 구조

설계된 ZPET 피드포워드 제어를 입력 $e_i^f(k)$ 와 출력 $u_f(k)$ 의 관계로 정리해보면 식(10)과 같다 [6]. Fig. 5는 입력 예측 ZPET 피드포워드 제어기를 포함한 시스템의 구성도이다.

식(10)에서 알 수 있듯이 ZPET 제어기를 구현하

$$\begin{aligned} u_f(k) &= \frac{z A_c(z^{-1}) B_c^-(z)}{B_c^+(z^{-1}) \{B_c^-(1)\}^2} e_i^f(k) \\ &= \left(A_{ff} z + \frac{A_{ff}(z^{-1})}{B_{ff}(z^{-1})} \right) z e_i^f(k) \\ &= A_{ff} e_i^f(k+2) + \frac{A_{ff}(z^{-1})}{B_{ff}(z^{-1})} e_i^f(k+1) \end{aligned} \quad (10)$$

려면 $e_i^f(k+2)$ 를 알아야 한다. 하지만 미래의 값을 미리 안다는 것은 불가능하므로 $e_i^f(k+2)$ 를 예측하는 구조가 필요하게 된다. 입력 예측 구조를 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(11)과 같이 정의할 수 있다.

$$e_i^f = x_{ref} \quad (11)$$

그런데 광디스크 드라이브에서는 트래킹 에러만이 측정 가능하므로 트래킹 에러의 정보를 이용해서 피드포워드 제어기의 입력을 만들어 내야 한다

$$e_i = x_{ref} - x \quad (12)$$

$$e_i^f = x + e_i = \frac{P}{1+CP} u_f + e_i \quad (13)$$

따라서 ZPET 제어기를 구현하려면 식(13)와 같은 정보를 가지는 2샘플 전의 e_i^f 를 제어기에 입력해야 한다. 광디스크 드라이브에서 트래킹 에러 e_i 는 디스크의 회전에 의해 주기적으로 발생하고, 피드포워드 제어기의 입력 e_i^f 도 주기적으로 발생한다. 따라서 한 주기의 e_i^f 를 메모리에 저장한다면 한 주기 이후에는 메모리 값을 이용하여 $e_i^f(k+2)$ 을 예측해낼 수 있다. 이를 위한 메모리 구조는 Fig. 6과 같고 메모리 개수는 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$$n = \frac{f_s}{f_r} \quad (14)$$

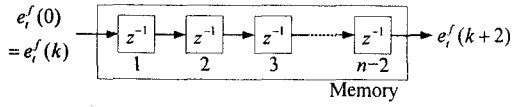


Figure. 6 Memory structure for input prediction

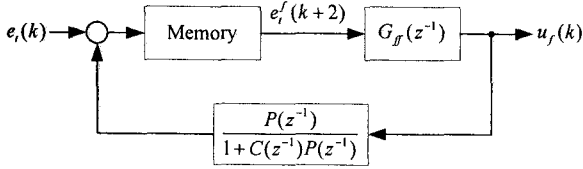


Figure. 7 Previous input prediction structure

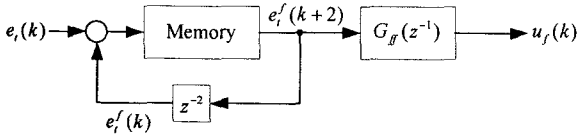


Figure. 8 New and simple input prediction structure

여기서 f_s 는 샘플링 주파수(Hz)이고 f_r 은 디스크의 회전 주파수(Hz)이다. 최종적으로 입력 예측 구조는 Fig. 7과 같은 형태가 된다[10]-[12].

그런데 이러한 피드포워드 제어기 구조는 ZPET 제어기에 전체 페루프의 전달 함수와 메모리까지 포함하는 방대한 구조여서 제어기 설계가 복잡하고 연산량도 증가한다. 또한 Fig. 7에서 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(10)은 식 (15)와 같이 표현할 수 있다

$$u_f = \frac{zA(z^{-1})B^-(z^1)}{B^+(z^{-1})[B^-(1)]^2} e_i^f(k) \approx \frac{1+C(z^{-1})P(z^{-1})}{P(z^{-1})} e_i^f(k) \quad (15)$$

이를 식(15)에 적용하여 $e_i^f(k+2)$ 를 다시 정의해보면 식(16)과 같이 간략화할 수 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 제안된 입력 예측 구조는 기존 방식에 비해 페루프 전달 함수가 빠짐으로써 간단한 피드백 구조를 가지며 또한 과도 응답 특성을

개선시킬 수 있도록 설계되었다.

$$e_i^f(k+2) = \frac{P}{1+CP} u_f(k) + e_i(k) \approx e_i^f(k) + e_i(k) \quad (16)$$

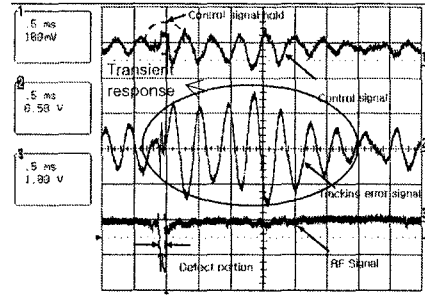


Figure. 9 Experimental results of CF controller with Disk Defect(Ch1: Tracking Control Signal, Ch2: Tracking Error Signal, Ch3: RF Signal).

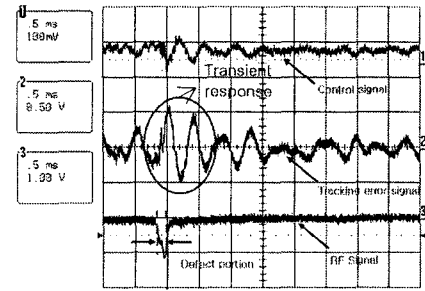


Figure. 10 Experimental results of ZPET controller used of the previous input prediction method with Disk Defect (Ch1: Tracking Control Signal, Ch2: Tracking Error Signal, Ch3: RF Signal).

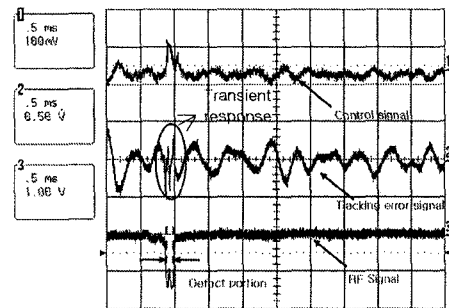


Figure. 11 Experimental results of ZPET controller used of the new and simple input prediction method with Disk Defect(Ch1: Tracking Control Signal, Ch2: Tracking Error Signal, Ch3: RF Signal)

4. 실험결과

삼성 52x CD-ROM Drive 에 2mm의 결함 구간이 있는 Disk 를 사용하여 트래킹 서보 실험을 수행하였다. 결함 구간에 대한 실험으로 첫 번째 결과인 Fig. 9 는 CF 제어기로 이전 제어값을 유지하는 방식을 사용하였고, 두 번째 결과인 Fig. 10 은 기존의 ZPET 구조를 적용하였으며, 세 번째 결과인 Fig. 11 은 제안된 ZPET 구조를 적용하였다.

결함 구간이 끝나는 지점에서 Fig. 9 는 오버슈트와 함께 트래킹 에러의 값이 안정화되는데 오랜 시간이 필요하다. Fig. 10 에서 트래킹 에러의 안정화되는 시간은 줄었지만 오버슈트는 여전히 존재함을 확인하였다. 새롭게 제안한 방식의 결과인 Fig. 11 은 앞선 두 방식보다 결함 구간의 과도 응답 특성이 향상되었음을 보였다.

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 Coprime Factorization 기법을 이용한 제어를 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, 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", Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 101-104.
- [3] 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", Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 105-110.
- [4] 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", Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 77-81.
- [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.
- [9] K. Morris, 2001, "Introduction to Feedback Control", Harcourt/Academic Press.
- [10] K. Arai, H. Okumura, H. Tokumaru, and K. Ohishi, 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", Proc. of IEEE IES AMC 2002, 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", 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", Proc. of IEEE/IES AMC'96, 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.