

광디스크 드라이브를 위한 강인 제어기 설계

Robust Servo System for Optical Disk Drive Systems

박 범 호*, 정 정 주**, 표 현 봉***, 박 용 우****

(Bum Ho Park, Chung Choo Chung, Hyeon-Bong Pyo and Yong Woo Park)

* 한양대학교 전자통신전과공학과(전화:(02)2298-5307, 팩스:(02)2281-9912, E-mail : laus-deo@scl.hanyang.ac.kr)

** 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(전화:(02)2290-1724, 팩스:(02)2281-9912, E-mail : chung@hanyang.ac.kr)

*** 한국전자통신연구원 정보저장소자팀(전화:(042)860-6274, 팩스:(042)860-5202, E-mail : pyo@etri.re.kr)

**** 한국전자통신연구원 정보저장소자팀(전화:(042)860-6274, 팩스:(042)860-5202, E-mail : ywpark@etri.re.kr)

Abstract : This paper proposes a new and simple input prediction method for robust servo system. This servo system uses robust tracking control system based on both Coprime Factorization(CF) and Zero Phase Error Tracking control system. The CF control system can be designed simply and systematically. Moreover, this system has not only stability but also robustness and disturbance rejection ability. The optical disk tracking servo system can detect only the tracking error. So the new and simple input prediction system proposed in this paper estimates the reference input signal from the tracking error. Numerical simulation results show that the proposed method is effective.

Keywords : Optical disk drive, coprime factorization, zero phase error tracking, track-following control, input prediction system

I. 서론

대용량 정보 저장 매체는 미래 정보화 사회의 기본이다. 차세대 정보매체의 요건으로서 저장 용량과 함께 요구되는 것은 데이터 전송률의 향상이다. 저장 용량을 증가시키기 위해서는 디스크의 저장 밀도를 향상시켜야 하고, 데이터 전송률을 향상시키기 위해서는 디스크의 회전 속도를 높여야 한다. 그러나 저장 밀도가 향상됨에 따라 서보는 더욱 정밀해져야 한다. 또한 디스크 회전 속도가 빨라짐에 따라 Radial Run-out은 증가하고 그로 인해 강인성 또한 향상되어야 한다. 광디스크 드라이브의 특성상 외란의 영향이 크므로 그에 따른 강인성 및 외란 제거 성능은 광디스크 드라이브 서보에 있어 주요 관심사가 되고 있다.

이를 위해 최근에 다양한 강인 제어 시스템이 제안되고 있다. H_∞ 제어 이론을 적용한 제어기는 시스템 계수의 변화에도 강인하고 안정한 시스템을 설계할 수 있게 해준다. 또한 원하는 주파수 특성을 가질 수 있게 설계가 가능하다[1]. 외란 관측기의 경우에는 구조가 간단하면서도 기계적 섭동을 억제할 수 있고 외란을 제거할 수 있는 특성이 있다[2][3]. 하지만 고밀도 정보저장 매체의 서보에 있어서는 되먹임 강인 제어기 만으로는 원하는 트래킹 서보 응답을 구할 수 없고, 허용오차 내로 제어도 어렵다[4][5][6].

강인 제어를 위해 본 논문에서는 "Coprime Factorization"(CF) 이론을 이용하여 되먹임 제어기를 설계할 것이다[4][5][6]. CF 제어기는 극점 배치 기법을 이용해 설계한 간단한 제어기를 이용하여 강인하고 외란 제거 성능을 가지는 제어기를 설계할 수 있게 해준다. 본

논문에서는 더욱 정밀한 제어를 위해 "Zero Phase Error Tracking"(ZPET) 이론을 이용한 앞먹임 제어기를 추가한다[7][8].

광디스크 드라이브에 ZPET 앞먹임 제어기를 적용하기 위해서는 제어기 입력을 예측하는 부분이 필요하다. 이를 위해 우선 기존의 논문에서 제시된 기법에 대해서 설명한다[4][5][6]. 하지만 기존의 구조는 상당히 방대한 구조를 가진다. 이는 실제 시스템 구현에 있어 비용의 증가를 의미한다. 본 논문에서 구조는 간략하면서 기존의 구조와 동일한 성능을 가지는 변형된 기법을 제안할 것이고 이를 모의실험을 통해 검증한다.

II. 강인한 되먹임 제어기

1. Coprime Factorization(CF) 제어기 설계

플랜트 P 가 안정하고 검출가능한 상태 방정식 (A, B, C, E) 로 주어지면 극점 배치 기법을 이용하여 되먹임 게인 K 와 관측기 게인 F 를 설계할 수 있다. 이렇게 설계된 제어기는 Coprime Factorization 이론에 의해 정형적으로 CF 제어기 형태로 표현할 수 있다[9][10]. 그리고 여기에 Youla Parameter를 추가함으로써 다양한 특성을 가지는 제어기를 설계할 수 있다. 본 논문에서 제시하는 Youla Parameter는 기본적인 CF 제어기에 강인성과 외란 제거 성능을 추가해준다.

플랜트의 모델이 식(1)과 같이 주어질 때

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1)$$

식(2)와 같이 주어지는 Bezout Identity를 만족하는

(X, Y)로 구성되는 제어기 $C = X/Y$ 는 플랜트 P 를 안정하게 한다.

$$X(s)N(s) + Y(s)D(s) = 1 \quad (2)$$

여기에 Youla Parameter $Q(s)$ 를 추가하여도 Bezout Identity를 만족하므로 제어기 C 의 안정도는 변하지 않는다.

$$C(s) = \frac{X(s) + Q(s)D(s)}{Y(s) - Q(s)N(s)} \quad (3)$$

외란 d 에서 출력 y 까지 전달함수와 민감도 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$G_{dy} = \frac{P}{1 + CP} = N(Y - QN) \quad (4)$$

$$S_{rei} = \frac{1}{1 + CP} = (Y - QN)D \quad (5)$$

설계하는 제어기의 목표는

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G_{dy} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} S_{rei} = 0 \quad (6)$$

이므로 이 논문에서는 식(5)와 같은 형태의 Youla Parameter $Q(s)$ 를 사용한다[4][5][6].

$$Q(s) = \frac{Y(s)}{N(s)}g(s), \quad g(0) = 1 \quad (7)$$

여기서 $g(s)$ 는 자유 파라미터이다. 이렇게 설계된 $Q(s)$ 를 추가한 제어기는 식(8)과 같고 전체 구성도는 그림 1과 같다. 제안된 $Q(s)$ 는 제어기에 강인성과 외란 제거 성능을 갖도록 해준다.

$$C = \frac{X + QD}{Y - QN} = \frac{X}{Y} + \frac{g}{1-g} \frac{1}{NY} \quad (8)$$

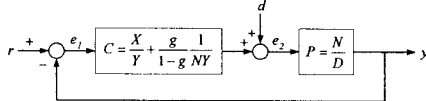


그림 1. Coprime Factorization 제어기
Fig. 1. CoprimeFactorization controller

2. 제어기 성능 검증

외란 제거 성능을 검증하기 위해서 외란 d 에서 출력 y 까지 전달함수를 구해보면 식(9)와 같다.

$$\frac{y}{d} = \frac{P}{1 + CP} = (1 - g)NY \quad (9)$$

여기서 $g(s)$ 는 $g(0) = 1$ 이므로 저주파 외란이 제거됨을 알 수 있다. 구조적으로 분석해보면 그림 1은 그림 2와 같이 변형되고 외부루프는 외란 관측기의 형태를 취하게 된다. 그러므로 외란 제거 성능을 가짐을 알 수 있다. 강인성을 검증하기 위해 그림 2의 내부 루프

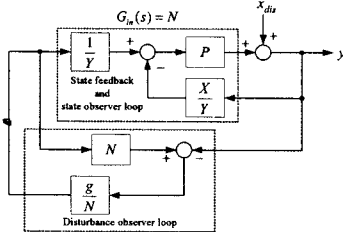


그림 2. 외란 제거 성능 검증

Fig. 2. Confirmation of disturbance rejection ability

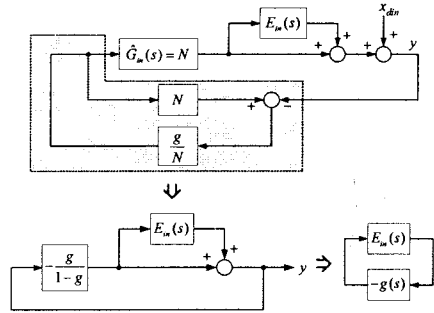


그림 3. 강인성 조건

Fig. 3. Robust stability condition

에 곱셈 섭동 $E(s)$ 를 추가해서 구조를 변형해보면 그림 3과 같다. 이를 통해 강인성을 보장하는 $g(s)$ 의 설계 조건을 알 수 있다.

$$\|E_m(s)g(s)\|_{\infty} < 1, \quad |E_m(jw)|^{-1} \geq |g(jw)| \quad \forall w \quad (10)$$

$$E_m(s) = \frac{EDY}{1 + NXE} \quad (11)$$

$g(s)$ 를 식(10)의 조건에 충족하도록 설계해주면 스물 개인 정리에 의해 강인성 또한 보장됨을 알 수 있다[4][5][6].

3. 모의실험 결과

모의실험에 쓰인 플랜트는 아래와 같다.

$$P_n(s) = \frac{K_d w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (12)$$

여기서 w_n 는 공진 주파수이고, ζ 는 감쇠비, K_d 는 Driver 이득이다. w_n 는 326.73rad/sec, ζ 는 0.149, K_d 는 1.48×10^{-4} 이다. CF 제어기를 설계하기 위한 상태 되먹임 극점과 상태 관측기 극점 및 식(10)의 조건을 만족하도록 설계한 $g(s)$ 의 극점은 표 1과 같이 정하였다. $g(s)$ 는 식(13)과 같은 LPF 형태이다.

표 1. Coprime Factorization 제어기 설계를 위한 극점

Table 1. Poles of Coprime Factorization controller	
상태 되먹임 극점	-7700, -7700 red/sec
상태 관측기 극점	-8800, -8800 red/sec
$g(s)$ 의 극점	-6900, -6900 red/sec

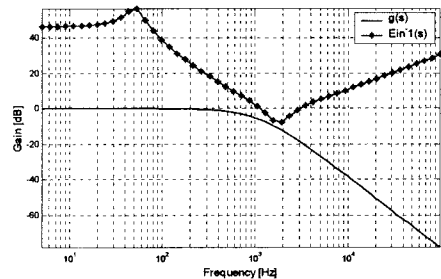


그림 4. $g(s)$ 의 주파수 응답

Fig. 4. Frequency response of $g(s)$

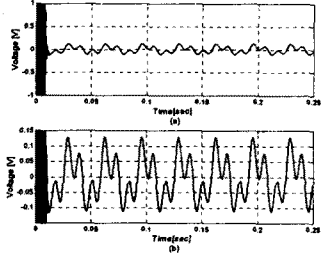


그림 5. (a)Coprime Factorization 제어기의 모의 실험 결과
(b)트랙킹 에러를 확대한 그림
Fig. 5. (a)Simulation Results of CF controller
(b)Tracking error with expanded y-axis

$$g(s) = \frac{g_p^2}{s^2 + 2g_p s + g_p^2} \quad (13)$$

설계된 $g(s)$ 의 보드 선도는 그림 4와 같다. 이들 통해 식(10)의 조건에 만족함을 알 수 있다.

모의실험에는 $76\mu\text{m}$, 30Hz 의 Radial Run-out을 적용하였다. 트랙킹 에러는 광 초점이 트랙을 중심으로 트랙 폭의 1/4인 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 를 움직일 때 $\pm 1\text{V}$ 가 발생하게 되어 있다. CD 규격에 따르면 트랙킹 서보의 허용 오차는 $\pm 70\mu\text{m}$ 의 Run-out에 대해 최대 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 로 주어진다. 그림 5는 모의실험의 결과이다. 결과를 분석해보면 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 의 오차가 생김을 알 수 있다. 이 결과는 CF 제어기가 충분히 유용함을 보여준다. 하지만 DVD나 이후에 개발될 고용량의 광디스크를 고려한다면 트랙킹 서보의 정밀도는 더욱 향상 되어야 한다.

III. ZPET 제어기

1. ZPET 제어기 설계

본 장에서는 더욱 정밀한 트랙킹 서보를 위해 ZPET 이론을 적용한 앞먹임 제어기를 설계한다. ZPET 이론의 앞먹임 제어기는 식(14)와 같은 형태를 가진다 [7][8].

$$G_H(z^{-1}) = \frac{z^A A(z^{-1}) B^-(z)}{B^+(z^{-1}) [B^-(1)]^2} \quad (14)$$

이를 광디스크 드라이브에 적용하여 설계하면 식(15)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} u_f &= \frac{zA(z^{-1})B^-(z)}{B^+(z^{-1})[B^-(1)]^2} e_f^i(k) \\ &= \left(A'_H s + \frac{A_H(z^{-1})}{B_H(z^{-1})} \right) z e_f^i(k) \\ &= A'_H e_f^i(k+2) + \frac{A_H(z^{-1})}{B_H(z^{-1})} e_f^i(k+1) \end{aligned} \quad (15)$$

이러한 ZPET 앞먹임 제어기가 포함된 시스템의 구성도는 그림 6과 같다.

2. 입력 예측 구조

ZPET 이론에 의하면 제어기의 입력은 추종해야 할 트랙킹 값이 들어야 한다 [7][8]. 그러므로 ZPET 제어기 입력은 식(16)과 같이 정의할 수 있다.

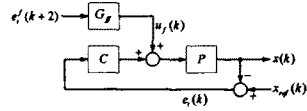


그림 6. ZPET 앞먹임 제어기
Fig. 6. ZPET feedforward controller

$$e_f^i = x_{ref} \quad (16)$$

그러나 광디스크 드라이브에서는 트랙킹 에러 e_i 만이 측정가능하다.

$$e_f^i = x_{ref} - x \quad (17)$$

$$\begin{aligned} e_f^i &= x - e_i \\ &= \frac{P}{1 + CP} u_r + e_i \end{aligned} \quad (18)$$

그러므로 결과적으로 e_f^i 는 식(18)과 같은 정보를 가지고 있어야 한다. 그런데 식(15)에서 알 수 있듯이 ZPET 제어기를 구현하려면 2샘플 전의 e_f^i 를 제어기에 입력해주어야 한다. 미래의 값을 넣는다는 것은 불가능한 일이다. 그러나 광디스크에 있어서 e_i 는 회전 주기에 따라 주기적으로 발생하므로 메모리를 이용하여 한주기의 e_i 를 저장한다면 한주기 이후에는 메모리에 저장된 값을 이용하여 $e_f^i(k+2)$ 을 예측해 낼 수 있다. 그러한 메모리 구조는 그림 7과 같고 메모리 개수는 식(19)와 같이 구할 수 있다.

$$n = f_s / f_r \quad (19)$$

여기서 f_s 는 샘플링 주파수(Hz)이고 f_r 는 디스크의 회전 주파수(Hz)이다. 최종적으로 입력 예측 구조는 그림 8과 같은 형태가 된다 [4][5][6].

그런데 이러한 앞먹임 제어기 구조는 ZPET 제어기에 전체 폐루프의 전달함수와 메모리까지 포함하는 방대한 구조이다. 본 논문에서는 크기를 상당히 줄이면서도 성능은 비슷한 새로운 입력 예측 구조를 제안하고자 한다. ZPET 이론에 의하여 식(15)는 식(20)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_f(k) &= \frac{zA(z^{-1})B^-(z)}{B^+(z^{-1})[B^-(1)]^2} e_f^i(k) \\ &\approx \frac{1 + C(z^{-1})P(z^{-1})}{P(z^{-1})} e_f^i(k) \end{aligned} \quad (20)$$

그러므로 $e_f^i(k+2)$ 는 식(21)과 같이 간략화 할 수 있다.

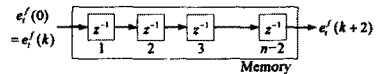


그림 7. 입력 예측을 위한 메모리 구조
Fig. 7. Memory structure for input prediction

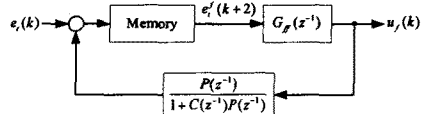


그림 8. 기존의 입력 예측 구조
Fig. 8. Previous input prediction structure

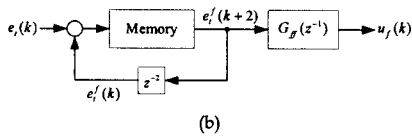


그림 9. 간략화된 입력 예측 구조
Fig. 9. New and simple input prediction structure

$$e_i'(k+2) = \frac{P}{1+CP} u_f(k) + e_i(k) \quad (21)$$

$$\approx e_i'(k) + e_i(k)$$

이로서 새롭게 제안되는 입력 예측 구조는 그림 9와 같은 형태가 된다. 이 구조는 기존 구조에서 페루프 전달함수가 빠진 것으로 훨씬 구조가 간략화 되었음을 알 수 있다.

3. 모의실험 결과

기존의 입력 예측 구조를 적용한 ZPET 제어기의 모의실험 결과는 그림 10에 주어지 있다. 오차 값을 보면 트랙킹 에러가 약 $\pm 0.01\mu m$ 가 발생함을 볼 수 있

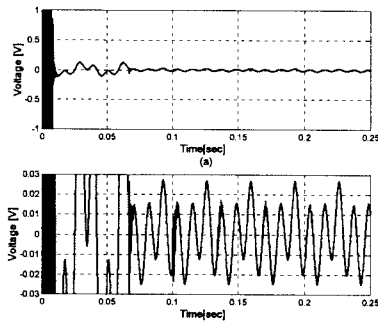


그림 10. (a)기존의 구조를 적용한 ZPET 제어기의 모의실험 결과 (b)트랙킹 에러를 확대한 그림
Fig. 10. (a)Simulation results of ZPET controller used of the previous input prediction method (b)Tracking error with expanded y-axis

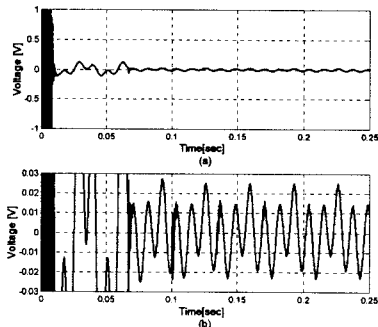


그림 11. (a)제안된 입력 예측 구조를 적용한 ZPET 제어기의 모의실험 결과 (b)트랙킹 에러를 확대한 그림
Fig. 11. (a)Simulation results of ZPET controller used of the new and simple input prediction method (b)Tracking error with expanded y-axis

다. DVD 규격에 따르면 트랙킹 서보의 허용 오차는 $\pm 70\mu m$ 의 Run-out에 대해 최대 $\pm 0.022\mu m$ 로 주어진다. 이를 기준으로 볼 때 ZPET 제어기는 충분히 정밀한 제어기임을 알 수 있다. 그리고 간략화된 입력 예측 구조를 적용한 ZPET 제어기의 모의실험 결과는 그림 11에 주어지 있다. 구조가 간략화 되었음에도 오차는 기존의 구조와 거의 동일함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 강인한 서보 제어를 위해 Coprime Factorization 되먹임 제어기를 설계했다. 이 제어기는 간단한 설계방식을 통해 안정도는 물론이고 강인성과 외란 제거 성능도 가지는 유용한 제어기이다. 또한 제어의 정밀도를 향상시키기 위해 ZPET 앞먹임 제어기를 추가하였다. ZPET 제어기를 광디스크에 적용하기 위해 필요한 입력 예측 구조를 추가하였다. 기존의 입력 예측 구조를 분석하고 이를 간략화하면서도 동일한 성능을 낼 수 있는 새로운 입력 예측 구조를 제안하였다. 이를 모의실험을 통해 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년 정보통신부 선도기술사업지원의 일환으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. C. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co., 1990.
- [2] H. T. Choi, I. H. Suh, "외란 관측기에 기초한 내부 모델 제어기 설계: 광학 디스크 드라이브의 추종 제어에의 적용", *Trans. on KIEE.*, vol. 48A, No. 2, Feb. 1999.
- [3] 김일한, 김홍록, 최영진, 서일홍, 정완균, 박명관, "고배속 광디스크 드라이브를 위한 수정된 구조를 가진 외란 관측기", *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, 2002.
- [4] K. Arai, H. Okumura, H. Tokumaru, and K. Ohishi, "Improvement of Performance of Tracking Servo System for an Optical Disk Drive", *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 39, pp. 855-861, Part 1, No. 2B, Feb. 2000.
- [5] K. Ohishi, Y. Hayakawa, H. Yanagisawa, D. Koide and H. Tokumaru, "Robust Feedforward Tracking Following Control System for an Optical Disk", *Proc. of IEEE/IES, AMC 2002*, pp. 57-62, 2002.
- [6] K. Ohishi, Y. Hayakawa, H. Yanagisawa, D. Koide and H. Tokumaru, "Robust feedforward Tracking Following Control System for an Optical Disk Drive System", *Proc. of ACC*, pp. 4329-4334, Jun. 2003.
- [7] M. Tomizuka, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", *ASME Journal of Dynamic Systems, Meas. and Control*, vol. 113, pp. 6-10, 1987.
- [8] M. Tomizuka, "Model Based Prediction, Preview and Robust Controls in Motion Control Systems", *Proc. of IEEE/IES AMC'96*, vol. 1, pp. 1-6, 1996.
- [9] K. Morris, *Introduction to Feedback Control*, Harcourt/Academic Press, 2001.
- [10] K. Zhou, J. C. Doyle, *Essentials of Robust Control*, Prentice-Hall International, Inc., 1998.