

진동량 추정을 통한 강인 트래킹 제어기의 설계

Design of a Robust Tracking Controller by the Estimation of Vibration Quantity

이 문 노*, 진 경 복, 윤 기 봉
(Moon-Noh Lee, Kyoung Bog Jin, and Ki Bong Yun)

Abstract : This paper presents a robust tracking controller design method for the track-following system of an optical recording device. A tracking loop gain adjustment algorithm is introduced to accurately estimate the tracking vibration quantity in spite of the uncertainties of the tracking actuator. A minimum tracking open-loop gain is calculated by the estimated tracking vibration quantity and a tolerable limit of tracking error. A robust tracking controller is designed by considering a robust H_∞ control problem with the weighting function of a slightly larger gain than the minimum tracking open-loop gain. The proposed controller design method is applied to the track-following system of an optical recording device and is evaluated through the experimental result.

Keywords : tracking vibration quantity, tracking loop gain adjustment, minimum tracking open-loop gain, weighting function, robust H_∞ control problem

I. 서론

광 기록기기의 전송 속도를 높이기 위해 디스크 회전 배속을 증가시키면 디스크 편심에 의해 발생하는 트래킹 진동량이 증가하게 되어 트랙 추종 시스템의 성능을 유지하기가 어려워진다. 고배속에서도 광 픽업이 트랙을 정확하게 추종하기 위해서는 트랙 추종 시스템이 트래킹 진동량을 효율적으로 제어할 수 있도록 트래킹 제어기가 설계되어야 한다.

현재 광 기록기기에 구현되는 대부분의 트래킹 제어기는 실제 발생하는 트래킹 진동량을 직접 고려하지 않고 디스크 규격에 정해져 있는 최대 트래킹 진동량과 최대 트래킹 진동 가속도를 고려하여 설계된다[1]. 그러나 실제 발생하는 트래킹 진동량은 규격으로부터 계산된 진동량보다 훨씬 작기 때문에 설계된 트래킹 개루프 게인과 트래킹 대역폭은 필요 이상으로 커지게 되고 이로 인해 트래킹 루프는 불안정하게 된다. 그리고 디스크 회전 배속이 증가함에 따라 트래킹 진동량이 얼마나 변화하는지를 알 수 없기 때문에 고배속에서 트래킹 성능을 만족하는 트래킹 제어기를 설계하기가 더욱 어렵게 된다.

광 기록기기에 발생하는 트래킹 진동량에 대해 트랙 추종 시스템을 최적으로 설계하기 위해서는 트래킹 진동량을 최대한 정확하게 추정할 수 있어야 하고 추정된 트래킹 진동량과 최대 허용 에러로부터 최소 트래킹 개루프 게인을 계산하여야 한다[1,2]. 모든 회전 배속에서 실제 발생하는 트래킹 진동량을 최대한 정확하게 추정할 수 있다면 배속 변화에도 트래킹 루프의 대역폭을 정확하게 결정할 수 있고 트랙 추종 시스템을 최적으로 설계할 수 있다.

본 논문에서는 광 기록기기에서 발생하는 트래킹 진동량

을 최대한 정확하게 추정하고 이를 토대로 강인 트래킹 제어기를 설계하는 방법을 제안한다. 트래킹 액츄에이터의 불확실성에 대해 트래킹 진동량을 최대한 정확하게 추정하기 위해 트래킹 루프 게인 조정 알고리즘을 적용하고 추정된 트래킹 진동량과 최대 허용 에러로부터 최소 트래킹 개루프 게인을 계산한다. 액츄에이터 불확실성과 트래킹 진동에 대해 강인 성능을 보장하는 강인 트래킹 제어기를 설계하기 위해 최소 트래킹 개루프 게인보다 진폭이 큰 가중 함수를 선택하고 가중 함수를 적용한 강인 H_∞ 제어 문제를 고려한다. 본 논문에서는 LMI 접근 방법을 이용하여 강인 H_∞ 제어 문제를 만족하는 강인 트래킹 제어기를 설계한다. 제안된 강인 트래킹 제어기 설계 방법은 광 기록기기의 트랙 추종 시스템에 적용되고 실험을 통해 타당성이 검증된다.

II. 트래킹 진동량 추정 알고리즘

그림 1은 광 기록기기의 트랙 추종 시스템의 블록도를 나타낸 것으로 트랙 추종 시스템은 증폭 게인 K_p , 트래킹 액츄에이터 $P(s)$, 트래킹 제어기 $C(s)$ 로 구성된다. 트래킹 에러 $e(t)$ 는 트랙 중심과 빔 스팟 사이의 차이를 나타내며 광 소자에 의해 검출된 후 게인 K_p 에 의해 증폭된다. 대부분의 트래킹 액츄에이터는 voice 코일 모터를 사용하며 모터 파라미터는 공칭값에서 10% 범위내에서 변한다. 그래서 트래킹 액츄에이터는 불확실성을 갖는 2차 선형 시스템으로 모델링 될 수 있고 모델링 불확실성은 계수 파라미터로 나타낼 수 있다.

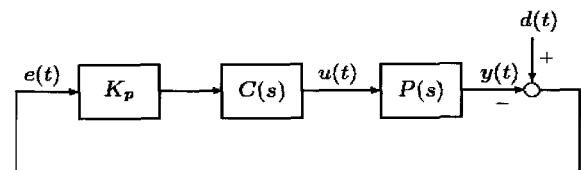


그림 1. 트랙 추종 시스템의 블록도.
Fig. 1. Block diagram of the track-following system.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 25., 채택확정 : 2007. 5. 9.

이문노 : 동의대학교 컴퓨터공학과(mnlee@deu.ac.kr)

진경복 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(kbjin@kut.ac.kr)

윤기봉 : ㈜ASEN 대표이사(kbyun@asenkorea.com)

※ 본 논문은 2005년도 동의대학교 교내연구비(과제번호 2005AA169)에 의해 연구되었음.

$$P(s) = \frac{[b_2^-, b_2^+]}{s^2 + [a_1^-, a_1^+]s + [a_2^-, a_2^+]}, \quad (1)$$

$$[b_2^-, b_2^+] = b_{2n} + \delta b_2, |\delta b_2| \leq m_{b2}$$

$$[a_1^-, a_1^+] = a_{1n} + \delta a_1, |\delta a_1| \leq m_{a1}$$

$$[a_2^-, a_2^+] = a_{2n} + \delta a_2, |\delta a_2| \leq m_{a2}$$

여기서 b_{2n} , a_{1n} , a_{2n} 는 액추에이터 파라미터의 공칭값이고 m_{b2} , m_{a1} , m_{a2} 는 모델링 불확실성 δb_2 , δa_1 , δa_2 의 최대값이다.

광 디스크가 회전하면 트랙 편심으로 인해 트래킹 진동 $d(t)$ 이 트랙 추종 시스템에 발생하며 트랙 추종 제어를 실행하지 않는 경우 발생하는 트래킹 진동량의 크기에 비례하여 광 픽업이 목표 트랙에서 주기적으로 벗어나게 된다. 광 기록기가 데이터를 정확하게 기록하거나 재생하기 위해서는 트래킹 진동이 존재하더라도 광 픽업이 트랙을 정확하게 추종하도록 트래킹 제어를 설계하여야 한다. 그림 1에서 트래킹 진동 $d(t)$ 는 트래킹 에러와 트래킹 액추에이터 출력의 합에 의해 표현되므로 주파수 ω 에서 발생하는 트래킹 진동 성분 $D(j\omega)$ 는 트래킹 에러, 트래킹 제어기 출력, 트래킹 액추에이터에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(j\omega) = E(j\omega) + Y(j\omega) = E(j\omega) + P(j\omega)U(j\omega) \quad (2)$$

트래킹 액추에이터 $P(j\omega)$ 는 모델링 불확실성을 포함하고 있기 때문에 각 주파수에서 발생하는 트래킹 진동량을 직접 계산할 수 없다. 그래서 본 논문에서는 공칭 액추에이터 모델 $P_n(j\omega)$ 을 진동량 추정용에 사용한다. 그러면 추정되는 트래킹 진동량은 액추에이터 불확실성 때문에 무시할 수 없는 정도의 추정 에러가 발생하게 된다. 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 트래킹 진동량을 좀 더 정확하게 추정하기 위해서는 액추에이터 불확실성이 트래킹 진동량에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 그래서 액추에이터 불확실성의 영향을 추정하고 이를 보상 계인 K_c 를 통해 반영한다. 진동량 추정에서 보상 계인을 적용하면 각 주파수에서 추정되는 트래킹 진동 성분은 (3)과 같이 수정될 수 있고 트래킹 진동량을 추정하기 위한 블록도는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{D}(j\omega) = E(j\omega) + K_c P_n(j\omega)U(j\omega) \quad (3)$$

진동량 추정에서 액추에이터 불확실성의 영향을 고려하기 위해 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 트래킹 개루프 계인을 일정한 범위내에서 유지하기 위해 적용하는 트래킹 루프 계인 조정 알고리즘을 사용한다. 그림 3은 액추에이터 불확실성의 영향을 추정하기 위한 블록도를 나타낸다. 진동량 추정에서 사용하는 트래킹 제어기는 트래킹 진동에 대해 트래킹 루프를 안정화시키는 간단한 제어기를 사용한다. 일반적으로 저배속에서 구현한 트래킹 제어기를 고배속에서 사용하면 고배속에서 발생한 높은 주파수의 트래킹 진동 때문에 트래킹 에러는 매우 증가하지만 트래킹 루프의 안정성은 유지되므로 저배속 제어기를 고배속의 트래킹 진동량 추정에 사용할 수 있다.

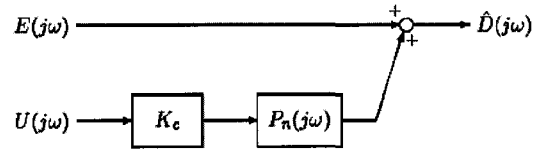


그림 2. 트래킹 진동량을 추정하기 위한 블록도.
Fig. 2. Block diagram for estimating the tracking vibration.

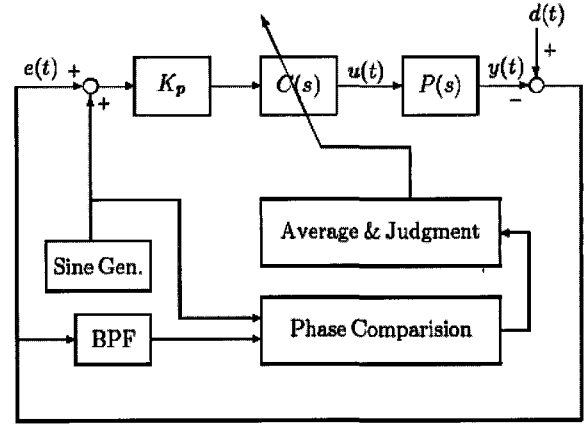


그림 3. 액추에이터 불확실성의 영향을 추정하기 위한 블록도.
Fig. 3. Block diagram for estimating the effect of the actuator uncertainties.

액추에이터 불확실성의 영향을 추정하기 위해 특정 주파수의 정현파 입력을 트래킹 에러에 더하고 더한 출력을 트래킹 제어기에 인가한다. 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 트래킹 루프의 위상 여유를 일정한 범위내에서 유지하기 위해 위상 여유를 측정하는 트래킹 대역폭 부근의 주파수를 정현파 입력의 주파수로 선택한다. 트래킹 에러에서 정현파 입력의 주파수 성분만 고려하기 위해 band pass 필터를 트래킹 에러에 연결한다. 정현파 입력 주파수 ω_0 에서 정현파 입력 $I(j\omega_0)$ 와 band pass 필터 출력 $x(j\omega_0)$ 사이의 관계는 $K_p C(j\omega_0) P(j\omega_0)$ 에 의해 표현되는 트래킹 개루프 전달 계인 $L(j\omega_0)$ 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{x(j\omega_0)}{I(j\omega_0)} = \frac{L(j\omega_0)}{1 + L(j\omega_0)} = \left| \frac{L(j\omega_0)}{1 + L(j\omega_0)} \right| \angle \phi \quad (4)$$

Band pass 필터 출력은 $|L(j\omega_0)/(1 + L(j\omega_0))|$ 에 의해 증폭되고 정현파 입력에 비해 위상이 ϕ 만큼 지연된다. 위상차 ϕ 는 $L(j\omega_0)$ 과 $(1 + L(j\omega_0))$ 의 위상 차이를 계산하여 구할 수 있으며 그림 3의 위상 비교 블록에서 계산된다. 액추에이터 불확실성이 없다면 $L(j\omega_0)$ 과 $(1 + L(j\omega_0))$ 의 위상들은 쉽게 계산될 수 있고 위상차 ϕ 는 공칭 위상차 ϕ_n 이 된다. 그러나 액추에이터 불확실성이 존재하면 $L(j\omega_0)$ 과 $(1 + L(j\omega_0))$ 의 위상들은 쉽게 계산될 수 없고 위상차 ϕ 는 공칭 위상차 ϕ_n 와 다르게 된다. 위상차 ϕ 와 공칭 위상차 ϕ_n 의 차이가 매우 작다면 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 트랙 추종 시스템의 위상 여유는 일정한 범위내에서 유지될 수 있다. Average & Judgment 블록에서는 위상차 ϕ 를 여러 번 계산하고 평균한 후에 위상차의 평균값에 따라 트래킹 제어기의 DC 계인을 얼마로 조정할 것인가

를 결정한다. 액츄에이터 불확실성이 트랙킹 루프에 미치는 영향만큼 트랙킹 제어기의 DC 게인을 역으로 조정한다. 이러한 트랙킹 루프 게인 조정 과정은 측정 오차와 조정 시간을 고려하여 $(\phi - \phi_n)$ 의 차이가 허용 범위 내에 도달할 때까지 반복된다.

트랙킹 루프 게인 조정 후 트랙킹 제어기의 DC 게인이 공칭 DC 게인에 비해 K_3 배 증가하였다면 실제 액츄에이터의 DC 게인은 공칭 액츄에이터 DC 게인보다 $1/K_3$ 배 작다는 것을 의미한다. 이러한 액츄에이터 불확실성의 영향은 트랙킹 진동량 추정에 반영되어야 하므로 본 논문에서는 보상 게인 $K_c=1/K_3$ 에 의해 트랙킹 진동량 추정 블록에 반영한다. 결론적으로 트랙킹 진동량 추정 방법은 액츄에이터 불확실성의 영향을 포함하게 되고 트랙킹 진동량은 좀 더 정확하게 추정될 수 있다. 디스크의 회전 배속이 증가하면 발생하는 트랙킹 진동량이 증가하게 되어 최소 트랙킹 루프 게인과 트랙킹 대역폭도 증가하게 된다. 고배속에서도 트랙 추종 성능을 유지하기 위해서는 배속에 따라 발생하는 트랙킹 진동량을 최대한 정확하게 추정하여 트랙킹 제어기를 설계하여야 한다.

III. 진동량 추정을 통한 강인 트랙킹 제어기의 설계

일반적으로 트랙킹 제어기는 발생하는 트랙킹 진동량에 대해 트랙킹 에러가 최대 허용 에러보다 작도록 설계되어야 한다. 그림 1에서 트랙킹 에러는 다음과 같이 표현된다.

$$E(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \tag{5}$$

최대 허용 에러가 e_{max} 이고 추정된 트랙킹 진동량을 적용하면 각 주파수에서 트랙킹 에러가 e_{max} 보다 작게 되는 최소 트랙킹 루프 게인은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{min}(j\omega) = \frac{|\hat{D}(j\omega)|}{e_{max}} \tag{6}$$

본 논문에서는 강인 트랙킹 제어기를 설계하기 위해 가중 함수를 적용한 강인 H_∞ 제어 문제를 고려한다. 추정된 트랙킹 진동량에 의해 최소 트랙킹 루프 게인 (6)이 계산되고 이를 토대로 가중 함수는 선택될 수 있다. 트랙킹 제어기를 포함하지 않은 트랙 추종 시스템은 다음의 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + H_1p(t) + B_2u(t) \\ e(t) &= C_2x(t) + H_2p(t) + d(t) \\ q(t) &= E_1x(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $x(t)$, $p(t)$, $d(t)$ 는 상태 변수, 액츄에이터 불확실성 입력, 트랙킹 진동 외란을 각각 나타내고 액츄에이터 불확실성은 H_1 , H_2 , E_1 행렬에 포함된다. 트랙킹 제어기 $C(s)$ 는 증폭 게인 K_p 를 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c x_c(t) + B_c(K_p e(t)) \\ u(t) &= C_c x_c(t) \end{aligned} \tag{8}$$

본 논문에서는 트랙 추종 시스템의 강인 성능을 고려하기

위해 $Z(s)=W(s)E(s)$ 의 관계를 만족하는 가중 함수 $W(s)$ 를 도입한다. 추정된 트랙킹 진동량에 대해 트랙킹 에러가 최대 허용 에러보다 작도록 하기 위해서 가중 함수는 최소 트랙킹 루프 게인 (6)보다 게인이 조금 더 크도록 선택되어야 한다. 가중 함수와 가중 함수의 출력인 제어 신호 $z(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_w(t) &= A_w x_w(t) + B_w e(t) \\ z(t) &= C_w x_w(t) \end{aligned} \tag{9}$$

트랙킹 제어기 (8)과 가중 함수 (9)를 (7)에 적용하면 트랙 추종 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{cl}(t) &= \bar{A}x_{cl}(t) + \bar{H}_1p(t) + \bar{B}_1d(t) \\ z(t) &= \bar{C}_w x_{cl}(t) \\ q(t) &= \bar{E}_1 x_{cl}(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 $x_{cl}(t)=[x^T(t) x_c^T(t) x_w^T(t)]^T$ 는 트랙 추종 시스템의 상태 변수이고 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A & B_2C_c & 0 \\ K_p B_c C_2 & A_c & 0 \\ B_w C_2 & 0 & A_w \end{bmatrix}, \bar{H}_1 = \begin{bmatrix} H_1 \\ K_p B_c H_2 \\ B_w H_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ K_p B_c \\ B_w \end{bmatrix}, \bar{C}_w = [0 \ 0 \ C_w], \bar{E}_1 = [E_1 \ 0 \ 0] \end{aligned} \tag{11}$$

본 논문에서는 액츄에이터 불확실성과 진동 외란에 대해 트랙 추종 시스템 (10)이 강인 안정하고 $\|T_{d\Delta}(j\omega)\|_\infty < 1$ 를 만족하는 트랙킹 제어기를 설계하는 강인 H_∞ 제어 문제를 고려한다. $\|T_{d\Delta}(j\omega)\|_\infty < 1$ 을 만족하는 트랙킹 제어기를 설계하면 $W(j\omega) > L_{min}(j\omega)$ 과 (6)으로부터 각 주파수에서 트랙킹 에러는 최대 허용 에러 e_{max} 보다 작다는 것을 쉽게 증명할 수 있다. 강인 H_∞ 제어 문제는 [4]의 Lemma 4로부터 다음의 LMI를 만족하는 행렬 $A_c, B_c, C_c, X > 0$ 와 상수 $\lambda > 0$ 를 구하는 문제로 변환될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{A}X + X\bar{A}^T & \bar{B}_1 & \bar{H}_1 & X\bar{C}_w^T & \lambda X\bar{E}_1^T \\ \bar{B}_1^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ \bar{H}_1^T & 0 & -\lambda I & 0 & 0 \\ \bar{C}_w X & 0 & 0 & -I & 0 \\ \lambda \bar{E}_1 X & 0 & 0 & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \tag{12}$$

대부분의 광 기록기기 제조 회사에서는 스펙에서 주어지는 트랙킹 최대 진동량과 트랙킹 최대 진동 가속도를 토대로 최소 트랙킹 루프 게인을 구한 후에 트랙킹 루프 게인이 최소 루프 게인보다 크고 위상 마진과 게인 마진을 만족하도록 트랙킹 제어기를 설계한다. 스펙에서 주어지는 진동량 데이터는 실제 기록기기에서 발생하는 진동량에 비해 매우 크기 때문에 트랙킹 제어기를 최적으로 설계할 수 없고 이로 인해 설계와 실험을 여러 번 반복하여 트랙킹 제어기를 설계하게 된다. 더구나 회전 배속이 증가하면 진동량이 어떻게 증가하는지를 알 수 없고 트랙킹 루프 마진의 감소로 인해 트랙킹

제어기를 설계하기가 더 어려워진다. 본 논문에서 제시하는 진동량 추정을 통한 강인 트래킹 제어기 설계 방법은 여러 배속의 트래킹 제어기를 설계하는데 효율적으로 적용될 수 있기 때문에 성능을 만족하는 트래킹 제어기를 설계하는 시간을 최대한 줄일 수 있다.

IV. 실험 결과

진동량 추정을 통한 강인 트래킹 제어기 설계 방법의 타당성을 검증하기 위해 본 논문에서는 광 기록기기의 트랙 추종 시스템에 적용하였다. 트래킹 진동량 추정을 위한 트래킹 루프 게인 조정 알고리즘은 디지털 실험 보드에 의해 구현하였고 트래킹 진동량 추정을 위한 실험 데이터들은 100KHz의 샘플링 주파수로 측정하였다. 실험에서 사용한 광 기록기기의 트래킹 액츄에이터는 공진 주파수 65Hz, 감쇠 상수 0.158, DC 감도 0.95mm/V이고 전압-전류 드라이버 게인이 2.7이므로 액츄에이터 공칭 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n(s) = \frac{158.5}{s^2 + 129.1s + 166800} \left[\frac{M}{V} \right] \quad (13)$$

액츄에이터 파라미터들은 공칭값에서 10% 범위에서 변하기 때문에 불확실성의 최대값을 $m_{b2}=7.93$, $m_{a1}=6.45$, $m_{b2}=8340$ 로 설정하였다. 디지털 실험 보드에서 DVD 디스크의 0.37 μm 의 트래킹 에러는 1.2V로 변환되므로 증폭 계인 K_p 는 3.24×10^6 [V/M]이다.

트래킹 루프 게인 조정 알고리즘을 적용한 결과 트래킹 제어기의 DC 게인은 초기 게인의 1/1.3배로 감소하였다. 이것은 트래킹 액츄에이터의 실제 게인이 (13)의 공칭 게인보다 1.3배 더 크기 때문에 위상 여유를 최대한 일정하게 유지하기 위해 트래킹 제어기의 DC 게인을 1/1.3배로 감소시켰다는 것을 의미한다. 트래킹 진동량 추정에서 액츄에이터 불확실성의 영향을 고려하기 위해 (3)의 보상 게인 K_c 를 1.3로 설정하였다. 그림 4는 DVD 12 배속에서 추정한 트래킹 진동량을 나타낸다.

추정된 트래킹 진동량에는 디스크 회전에 의해 발생하는 트래킹 진동 성분과 트랙 추종 시스템에서 발생하는 모든 트래킹 진동 성분을 포함하고 있으며 저주파에서 상대적으로 큰 진동 성분이 발생한다는 것을 알 수 있다.

트래킹 제어기 설계를 위한 최소 트래킹 개루프 게인은 추정된 트래킹 진동량을 최대 허용 에러로 나누어 구할 수 있다. 광 기록기기에서 트래킹 에러는 광학 시스템, 기계 시스템, 디지털 서보 보드에서 발생하는 에러의 합으로 나타나기 때문에 트래킹 루프 설계시의 트래킹 허용 에러는 실험에서 나타나는 최대 허용 에러의 1/3이어야 한다. 그림 5는 트래킹 루프 설계시의 최대 허용 에러가 0.025 μm 인 DVD 12 배속의 최소 트래킹 개루프 게인을 나타낸다. 저주파 대역의 최소 개루프 게인이 70dB 이하인 것을 알 수 있다.

강인 트래킹 제어기 설계를 위한 가중 함수는 그림 5의 최소 트래킹 개루프 게인보다 게인이 조금 더 크도록 다음과 같이 선택하였다.

$$W(s) = \frac{7540s^2 + 5.17 \times 10^8 s + 2.38 \times 10^{12}}{s^3 + 3644s^2 + 3.16 \times 10^6 s + 7.94 \times 10^8} \quad (14)$$

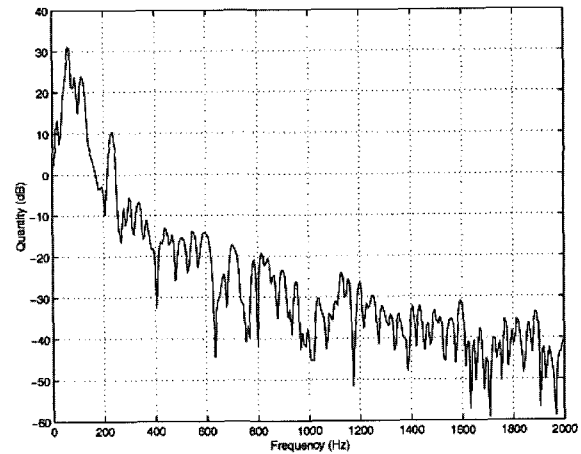


그림 4. 추정된 DVD 12X트래킹 진동량.
Fig. 4. The tracking vibration quantity estimated at DVD 12X.

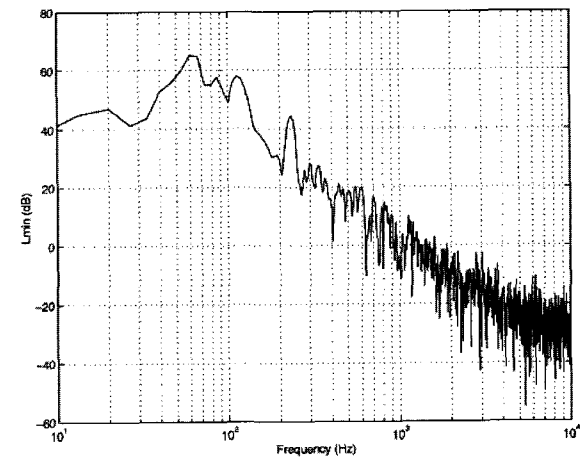


그림 5. DVD 12X 최소 트래킹 개루프 게인.
Fig. 5. A minimum tracking open-loop gain at DVD 12X.

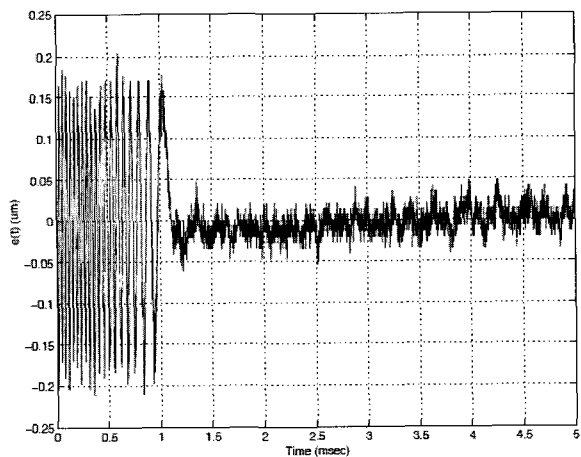


그림 6. 설계된 트래킹 제어기를 적용했을 때의 트래킹 에러.
Fig. 6. The tracking error when the designed controller is applied.

공칭 모델 (13)과 가중 함수 (14)에 대해 MATLAB의 LMI toolbox를 사용하여 (12)를 만족하는 강인 트래킹 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$\frac{1.1 \times 10^7 s^3 + 4.8 \times 10^{11} s^2 + 5.0 \times 10^{15} s + 1.4 \times 10^{19}}{s^4 + 8.2 \times 10^5 s^3 + 1.3 \times 10^{11} s^2 + 5.1 \times 10^{15} s + 3.5 \times 10^{18}} \quad (15)$$

그림 6은 DVD 12 배속에서 설계된 트래킹 제어기를 적용했을 때의 트래킹 에러를 나타낸다. 트래킹 제어를 실행하기 전에는 발생하는 트래킹 진동에 의해 광 픽업이 1트랙을 벗어남에 따라 트래킹 에러에 1개의 정현파가 나타난다. 그래서 디스크 회전 주기 동안 트래킹 에러에는 트래킹 진동량에 비례하는 수백개의 정현파가 나타나게 된다. 트래킹 제어를 시작한 1ms 이후부터 트래킹 에러가 최대 허용 에러 0.07μm 보다 작아지는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서 제안한 제어기 설계 방법은 CD, DVD 디스크의 기록 재생을 위해 여러 회전 배속에서 효율적으로 적용될 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 트랙 추종 시스템에서 발생하는 트래킹 진동량을 추정하여 강인 트래킹 제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 트래킹 진동량 추정에서 액추에이터 불확실성의 영향을 고려하기 위해 트래킹 루프 게인 조정 알고리즘을 사용하였고 추정된 트래킹 진동량에 의해 계산된 최소 트래킹 개루프 게인을 이용하여 강인 H_∞ 제어 문제에 적용하기 위한 가중 함수를 선택하였다. 진동량 추정을 통한 강인 트래킹 제어기 설계 방법의 타당성을 검증하기 위해 DVD 기록 기기의 트랙 추종 시스템에 적용하였다.

참고문헌

[1] K. B. Jin and M.-N. Lee, "Vibration control technology of an

optical disk drive," *Journal of KSNVE*, vol. 13, no. 1, pp. 48-55, 2003.

[2] J.-Y. Choi, H.-G. Jun, C.-H. Chun, M.-N. Lee, H.-S. Yang, and Y.-P. Park, "Disturbance measurement of optical disc and servo loop design related to its result," *International Conference on Motion and Vibration Control*, pp. 326-332, 2002.

[3] M. Chilali and P. Gahinet, " H_∞ design with pole placement constraints: An LMI approach," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 41, no. 3, pp. 358-367, 1996.

[4] M.-N. Lee, J.-H. Moon, K. B. Jin, and M. J. Chung, "Robust H_∞ control with multiple constraints for the track-following system of an optical disk drive," *IEEE Trans. Indus. Electr.*, vol. 45, no. 4, pp. 638-645, 1998.

[5] T. H. Lee, T. S. Low, A. Al-Mamum, and C. H. Tan, "Internal model control approach for designing disk drive servo-controller," *IEEE Trans. Indus. Electr.*, vol. 42, no. 3, pp. 248-256, 1995.

[6] Y. T. Teo and T. T. Tay, "Application of the l_1 -optimal regulation strategy to a hard disk servo system," *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, vol. 4, no. 4, pp. 467-472, 1996.

[7] J. Y. Yen, F. J. Wang, and Y. Y. Chen, "A fuzzy scheduling controller for a computerdisk file track following servo," *IEEE Trans. Indus. Electr.*, vol. 40, no. 2, pp. 266-272, 1993.

[8] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.

[9] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.

[10] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. M. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, New York: Macmillan, 1992.



이문노

1969년 3월 11일생. 1991년 경북대학교 전자공학과(공학사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 2001년 9월~현재 동의대학교 컴퓨터공학과 조교수. 관심분야

는 강인 제어, 임베디드 시스템, 지능형 시스템.



진경복

1961년 5월 19일생. 1985년 한양대학교 전기공학과(공학사). 1987년 한양대학교 전기공학과(공학석사). 1999년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(공학박사). 2001년~현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 부교수. 관심분야는

광 메카트로닉스 제어, 강인 제어, 광 신호처리, 진동 제어.



윤기봉

1967년 11월 2일생. 1990년 서강대학교 전자공학과(공학사). 1990년~2003년 삼성전자 Optical Device 책임연구원. 2003년~현재 (주) 아센 대표이사. 관심분야는 Optical Storage 제어, 광 신호처리, 고정밀 광 디스크 기록 제어.