

속도 성분의 진동 외란이 있는 미동 탐색 제어 시스템의 강인 제어기 설계 방법

A Robust Controller Design Method of the Fine Seek Control System with Velocity Disturbance

이 문 노† · 신 진 호* · 김 성 우**

Moon-Noh Lee, Jin-Ho Shin and Seong-Woo Kim

(2007년 5월 3일 접수 ; 2007년 7월 18일 심사완료)

Key Words : Velocity Disturbance(속도 외란), Loop Gain Adjustment(루프 게인 조정), Minimum Open-loop Gain(최소 개루프 게인), Weighting Function(가중 함수), Robust H_∞ Control(강인 H_∞ 제어)

ABSTRACT

This paper presents a robust controller design method based on the estimation of velocity disturbance to construct a robust fine seek control system. A loop gain adjustment algorithm is introduced to accurately estimate the velocity disturbance in spite of the uncertainties of fine actuator. A weighting function is optimally selected from a minimum fine seek open-loop gain, calculated by estimating the velocity disturbance. A robust fine seek controller is designed by considering a robust H_∞ control problem using the weighting function. The proposed controller design method is applied to the fine seek control system of a DVD rewritable drive and is evaluated through the experimental results.

1. 서 론

광 기록기에서 데이터 탐색 시간을 최대한 줄이기 위해서는 광 픽업의 속도를 안정적으로 제어하는 미동 탐색 제어 시스템이 최적으로 구현되어야 한다. 광 디스크에는 구조적으로 트랙 편심이 존재하기 때문에 디스크가 회전하면 광 기록기에는 진동이 발생한다. 이러한 진동은 미동 탐색 제어 시스템에 속도 외란의 형태로 영향을 주기 때문에 안정적인 탐색 동작을 위해 속도 외란을 효율적으로 제어하여야 한다⁽¹⁻³⁾.

데이터 전송 속도를 높이기 위해 디스크의 회전

속도를 증가시키면 발생하는 진동의 크기와 가속도가 더 증가하게 되어 속도 외란의 크기와 주파수가 증가하게 된다. 만약, 속도 외란의 영향이 증가하여 속도 제어가 정밀하게 실행되지 못하게 되면 광 픽업의 잔존 속도가 크게 되어 탐색 동작 후 안정적인 트랙 추종 제어를 연속적으로 실행할 수 없게 된다. 따라서 속도 외란의 영향이 큰 고배속에서는 속도 외란을 효율적으로 제어할 수 있는 알고리즘이 적용되어야 한다. 지금까지 여러 제어 방법들이 미동 탐색 제어 시스템에 적용되었으나 속도 외란을 직접적으로 고려하는 방법들이 아니어서 최적인 루프 게인을 가진 미동 탐색 제어기를 설계하기가 어려웠다⁽⁴⁻⁷⁾. 그래서 설계와 실험을 반복하여 미동 탐색 제어기를 설계하는 경우가 많았고 설계자의 경험이 많이 필요하였다. 미동 탐색 동작 후 안정적인 트랙 추종 제어를 위해서는 속도 외란에 대한 정밀한 속도 제어가 필요하며 이를 위해 속도 외란의 추정을 통한 제어기 설계

† 교신저자 : 정회원, 동의대학교 컴퓨터공학과
E-mail : mnlee@deu.ac.kr

Tel : (051) 890-1713, Fax : (051) 890-2629

* 동의대학교 메카트로닉스공학과

** 동의대학교 컴퓨터소프트웨어공학과

방법을 고려하여야 한다.

이 논문에서는 속도 성분의 진동 외란이 발생하는 미동 탐색 제어 시스템에 대해 속도 외란의 추정을 통한 강인 미동 탐색 제어기 설계 방법을 제안한다. 작동기(actuator) 불확실성에 대해서도 속도 외란을 최대한 정확하게 추정하기 위해 루프 게인 조정 알고리즘을 도입한다. 추정된 속도 외란과 최대 허용 오차로부터 최소 개루프 게인을 구하고 최소 개루프 게인보다 게인이 조금 더 큰 가중 함수를 강인 제어 알고리즘 적용을 위해 선택한다. 이 논문에서는 가중 함수를 적용한 강인 H_∞ 제어 문제를 고려하여 강인 미동 탐색 제어기를 설계하고 DVD 기록기기의 미동 탐색 제어 시스템에 적용하여 실험을 통해 제어기 설계 방법의 타당성을 검증한다.

2. 미동 탐색 제어 시스템

광 기록기기는 광 픽업을 트랙 방향으로 이동하기 위해 미동 작동기와 조동 작동기로 구성된 2단 구조의 트래킹 작동기(actuator)를 사용한다. 미동 작동기는 트랙을 정밀하게 추종하기 위해 이동 범위는 작지만 대역폭이 크게 설계되고 조동 작동기는 대역폭은 작지만 먼 거리를 이동할 수 있도록 설계된다. 트랙 추종 시스템은 두 작동기의 위치 제어를 통해 광 픽업이 트랙을 정밀하게 추종하도록 제어하는 반면에 탐색 제어 시스템은 두 작동기의 속도 제어를 통해 광 픽업을 목표 트랙으로 빠르고 안정적으로 이동시킨다. 대부분의 광 기록기기에서는 미동 작동기로 보이이스 코일(voice coil) 모터를 사용하고 조동

작동기로 스텝핑 모터를 사용한다. Fig. 1은 2단 구조의 트래킹 작동기를 포함한 광 기록기기의 시스템 구성도를 나타낸다.

광 기록기기의 탐색 제어 시스템은 이동하는 거리에 따라 짧은 거리를 이동하는 미동 탐색 제어 시스템과 먼 거리를 이동하는 조동 탐색 제어 시스템으로 구분된다. 짧은 거리를 안정적으로 이동하기 위해 미동 탐색 제어 시스템은 미동 작동기를 속도 제어하는 제어 구조를 가지고 먼 거리를 안정적으로 이동하기 위해 조동 탐색 제어 시스템은 조동 작동기를 속도 제어하는 구조를 가진다. 대부분의 탐색 제어 동작은 이동하는 트랙 수에 따라 한두 번의 조동 탐색 제어와 여러 번의 미동 탐색 제어로 구성된다. 탐색 시간을 최대한 줄이기 위해서는 조동 탐색 시간을 줄이거나 미동 탐색 제어 시스템의 성능을 개선하여 미동 탐색 회수를 최대한 작게 하여야 한다^(2,7).

조동 탐색 제어 시스템은 속도 프로파일에 따라 스텝핑 모터를 속도 제어하고 미동 작동기는 스텝핑 모터의 이동으로 인한 광축 벗어남을 보정하는 제어 구조를 가진다. 반면에 미동 탐색 제어 시스템은 미동 작동기를 속도 제어하고 미동 작동기의 움직임으로 인한 광축 벗어남을 스텝핑 모터가 보정하는 제어 구조를 가진다. 조동 탐색 제어 시스템은 스텝핑 모터를 개루프 속도 제어하기 때문에 속도 외란의 영향을 직접적으로 고려할 수 없지만 미동 탐색 제어 시스템은 미동 작동기를 폐루프 속도 제어하기 때문에 안정적인 속도 제어를 통해 속도 외란을 효율적으로 제어할 수 있다.

Fig. 2는 미동 탐색 제어 시스템의 구성도를 나타낸다. 여기서 $P_f(s)$ 는 미동 작동기, $P_c(s)$ 는 조동 작동기, $C_f(s)$ 는 미동 탐색 제어기, $V_f(s)$ 와 $V_c(s)$ 는 각 작동기의 드라이버를 나타낸다. 그리고 v_r , v_f , v_c , v_m , v_d 는 지령 속도, 미동 작동기의 속도, 조동 작동기의 속도, 실제 속도, 속도 외란을 나타낸다. 미동 탐색 제어 시스템에서 속도 외란과 각 작동기의

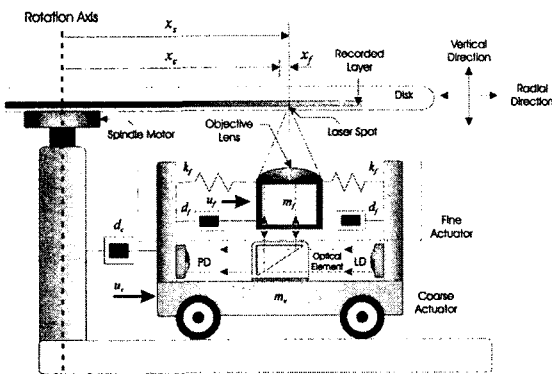


Fig. 1 Schematic view of an optical disk drive mechanism

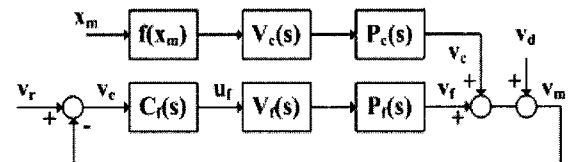


Fig. 2 Block diagram of a fine seek control system

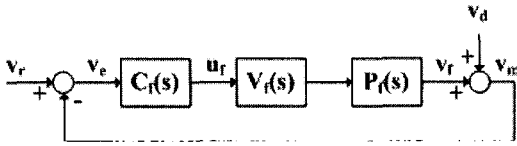


Fig. 3 Block diagram of the simplified fine seek control system

속도는 직접적으로 측정할 수 없고 실제 속도 v_m 만 측정 가능하다. 속도 오차는 지령 속도와 실제 속도의 차이 ($v_r - v_m$)에 의해 정의된다. 비선형 함수 $f(x_m)$ 은 미동 작동기에 의한 광축 벗어남을 보정하기 위한 조동 작동기의 구동 알고리즘을 나타낸 것으로 광축 벗어남이 1 마이크로 스텝 이상이 되었을 때 스텝핑 모터를 1 마이크로 스텝 이동시키게 된다. 이와 같이 미동 탐색 제어 시스템에서 스텝핑 모터는 단순히 광축 벗어남만을 보정하고 속도 외란에 대한 정밀한 속도 제어는 미동 작동기를 통해 이루어지므로 미동 탐색 제어 시스템은 Fig. 3과 같이 단순히 속도 제어 루프만으로 나타낼 수 있다⁽¹⁾.

디스크의 회전 속도가 증가함에 따라 미동 탐색 제어 시스템에서 속도 외란의 영향은 증가하게 된다. 보통, 목표 트랙에서 광 픽업의 잔존 속도가 10 mm/s 이상이면 안정적으로 트랙 추종 제어를 시작할 수 없는데 CD 디스크의 경우 디스크 회전 속도가 2000 rpm만 되어도 속도 외란이 10 mm/s 이상이 된다. 그래서 디스크 회전 배속이 2000 rpm 보다 큰 배속에서는 속도 외란을 효율적으로 제어하여 목표 트랙에서 광 픽업의 잔존 속도가 10 mm/s 이하가 되도록 하여야 한다^(1,9).

DVD 디스크의 경우 CD 디스크에 비해 트랙 피치가 2배 이상 더 작기 때문에 탐색 제어 후 안정적인 트랙 추종 제어를 위한 광 픽업의 잔존 속도는 CD 디스크의 잔존 속도보다 더 작아야 한다.

3. 속도 외란의 추정을 통한 강인 미동 탐색 제어기의 설계

이 절에서는 속도 외란을 추정하는 방법과 추정된 속도 외란을 토대로 강인 미동 탐색 제어기를 설계하는 방법에 대해 설명한다.

3.1 속도 외란 추정 방법

보이스 코일 모터를 사용하는 미동 작동기의 특성

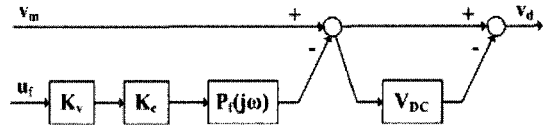


Fig. 4 Block diagram for the velocity disturbance estimation

은 2차의 선형 시스템으로 모델링될 수 있고 작동기의 불확실성은 다음과 같이 계수 파라미터에 포함될 수 있다.

$$P_f(s) = \frac{k_f s}{s^2 + \alpha_f s + \beta_f} \quad [(m/s)/A] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} k_f &= k_{f_n} + \delta k_f, \quad |\delta k_f| \leq m_k \\ \alpha_f &= \alpha_{f_n} + \delta \alpha_f, \quad |\delta \alpha_f| \leq m_\alpha \\ \beta_f &= \beta_{f_n} + \delta \beta_f, \quad |\delta \beta_f| \leq m_\beta \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 k_{f_n} , α_{f_n} , β_{f_n} 는 파라미터 공칭값, δk_f , $\delta \alpha_f$, $\delta \beta_f$ 는 파라미터 불확실성, m_k , m_α , m_β 는 불확실성의 최대값을 나타낸다. 미동 작동기 모델의 각 파라미터들은 보통 공칭값에서 10% 범위에서 변하기 때문에 이 논문에서는 불확실성의 크기가 공칭값의 10% 이내라고 가정한다. Fig. 3에서 속도 외란 v_d , 미동 작동기의 속도 v_f , 실제 속도 v_m 과의 관계로부터 속도 외란은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d(j\omega) = V_m(j\omega) - V_f(j\omega)P_f(j\omega)U_f(j\omega) \quad (3)$$

드라이버 $V_f(j\omega)$ 는 저주파 필터의 특성을 가지는 전압-전류 증폭기이고 드라이버의 차단 주파수가 추정하는 속도 외란의 주파수 범위보다 크기 때문에 속도 외란 추정에서 드라이버 $V_f(j\omega)$ 를 드라이버의 DC 게인 K_v 로 근사화할 수 있다.

작동기 불확실성이 식 (3)에 포함되어 있으므로 속도 외란을 직접적으로 계산할 수 없다. 그래서 이 논문에서는 $P_f(j\omega)$ 대신에 작동기 공칭 모델 $P_{f_n}(j\omega)$ 을 사용하여 속도 외란을 추정한다. 그러면 작동기 불확실성이 미치는 영향만큼 속도 외란을 정확하게 추정할 수 없게 되므로 이 논문에서는 작동기 불확실성이 속도 외란에 미치는 영향을 최대한 추정하고 보상 게인 K_c 를 통해 반영한다. 공칭 모델과 보상 게인을 적용하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 수정될 수

있고 속도 외란 추정 블록도는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{V}_d(j\omega) = V_m(j\omega) - K_c K_v P_{jm}(j\omega) U_f(j\omega) \quad (4)$$

실제 속도와 제어기 출력을 측정하여 속도 외란을 추정하면 회로 부품간의 바이어스 전압 차이로 인해 DC 성분이 존재한다. 그래서 Fig. 4의 블록에서와 같이 일정 시간 평균한 값을 속도 외란에서 (-)하여 속도 외란에서 DC 성분을 제거한다.

이 논문에서는 속도 외란 추정에서 미동 작동기 불확실성의 영향을 고려하기 위해 불확실성에 대해서도 위상 여유를 일정한 범위내에서 유지하기 위해 적용하는 루프 게인 조정 알고리즘을 사용한다. Fig. 5는 작동기 불확실성의 영향을 추정하기 위한 블록도를 나타낸다.

속도 외란 추정에 사용되는 미동 탐색 제어기는 속도 외란에 대해 탐색 제어 루프를 단순히 안정화시키는 간단한 제어기를 사용한다. 일반적으로 저배속에서 구현한 미동 탐색 제어기를 고배속에서 그대로 사용하면 고배속에서 발생하는 높은 주파수의 속도 외란 때문에 속도 오차는 매우 증가하지만 미동 탐색 제어 루프의 안정성은 유지되므로 저배속에서 구현한 미동 탐색 제어기를 고배속의 속도 외란 추정에 사용할 수 있다.

작동기 불확실성의 영향을 추정하기 위해 지령 속도는 0으로 한 후 특정 주파수의 정현파 입력을 속도 오차에 더하고 더한 출력을 미동 탐색 제어기에 인가한다. 미동 탐색 제어 루프의 대역폭 부근 주파수를 정현파 입력의 주파수로 선택한다. 지령 속도가 0이기 때문에 미동 작동기는 정현파 입력 주파수에 대해 속도 제어를 실행하고 작동기의 속도는

실제 속도에 의해 측정된다. 속도 오차에서 정현파 입력의 주파수 성분만 고려하기 위해 밴드 패스 필터를 속도 오차에 연결한다. 정현파 입력 주파수 ω_0 에서 정현파 입력 $I(j\omega_0)$ 와 밴드 패스 필터 출력 $x(j\omega_0)$ 사이의 관계는 다음과 같이 개루프 전달 함수 $L(s)$ 에 의해 나타낼 수 있다.

$$\frac{x(j\omega_0)}{I(j\omega_0)} = \frac{L(j\omega_0)}{1+L(j\omega_0)} \quad (5)$$

밴드 패스 필터 출력은 정현파 입력에 비해 게인은 $|L(j\omega_0)/(1+L(j\omega_0))|$ 배 증폭되고 위상은 ϕ 만큼 지연된다. 위상차 ϕ 는 $L(j\omega_0)$ 과 $(1+L(j\omega_0))$ 의 위상 차이를 계산하여 구할 수 있는데 Fig. 5의 위상 비교 블록에서 계산된다. 작동기 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 작동기 불확실성이 존재하면 $L(j\omega_0)$ 과 $(1+L(j\omega_0))$ 의 위상차 ϕ 는 공칭 위상차 ϕ_n 와 다르게 된다. 위상차 ϕ 와 공칭 위상차 ϕ_n 의 차이를 최소화할 수 있다면 작동기 불확실성이 존재하더라도 미동 탐색 제어 시스템의 위상 여유는 일정한 범위내에서 유지될 수 있다. 평균 및 판단(average & judgment) 블록에서는 위상차 ϕ 를 여러 번 계산하고 평균한 후에 위상차의 평균값에 따라 미동 탐색 제어기의 DC게인을 얼마로 조정할 것인가를 결정한다. 작동기 불확실성이 미동 탐색 제어 루프에 미치는 영향만큼 미동 탐색 제어기의 DC게인을 역으로 조정한다. 이러한 루프 게인 조정 과정은 측정 오차와 조정 시간을 고려하여 $(\phi - \phi_n)$ 의 차이가 허용 범위 내에 도달할 때까지 반복된다.

루프 게인 조정 후 미동 탐색 제어기의 DC 게인이 조정 전 DC 게인에 비해 K_δ 배 증가하였다면 실제 작동기의 DC 게인은 공칭 작동기 DC 게인보다 $1/K_\delta$ 배 작다는 것을 의미한다. 이러한 작동기 불확실성의 영향은 보상 게인 $K_c=1/K_\delta$ 에 의해 속도 외란 추정 식(4)에 반영될 수 있다. 결론적으로 속도 외란 추정 방법은 작동기 불확실성의 영향을 포함하게 되고 속도 외란은 좀 더 정확하게 추정될 수 있다. 속도 외란 추정 방법은 배속 변화에 따른 속도 외란의 변화를 추정할 수 있고 추정된 속도 외란은 강인 미동 탐색 제어기를 설계하기 위해 사용될 수 있다.

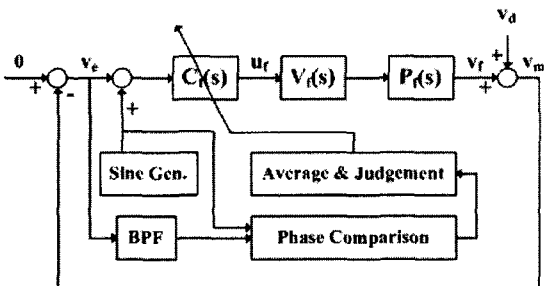


Fig. 5 Block diagram for estimating the effect of actuator uncertainties

3.2 강인 미동 탐색 제어기의 설계

제안된 속도 외란 추정 방법을 적용하면 작동기 불확실성이 존재하더라도 속도 외란은 최대한 정확하게 추정할 수 있다. 일반적으로 속도 외란은 디스크 회전 주파수와 그 정수배의 주파수에서 큰 성분을 가지기 때문에 미동 탐색 제어기는 이러한 외란 특성을 고려하여 속도 오차가 최대 허용 오차보다 작도록 설계되어야 한다. Fig. 3에서 속도 오차 $V_e(j\omega)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_e(j\omega) = \frac{1}{1+L(j\omega)}(V_r(j\omega) - V_d(j\omega)) \quad (6)$$

그리고 최대 허용 오차가 v_{emx} 이고 추정된 속도 외란을 적용하면 각 주파수에서 속도 오차가 v_{emx} 보다 작게 되는 최소 개루프 게인 $L_{min}(j\omega)$ 은 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$L_{min}(j\omega) \cong \frac{|V_r(j\omega) - \hat{V}_d(j\omega)|}{v_{emx}} \quad (7)$$

이 논문에서는 가중 함수를 적용한 강인 H_∞ 제어 문제를 고려하여 강인 미동 탐색 제어기를 설계한다. 추정된 속도 외란에 의해 최소 개루프 게인 식 (7)이 계산되고 가중 함수는 탐색 제어 주파수 범위에서 최소 개루프 게인보다 약간 더 큰 게인을 가지도록 선택된다. 대부분의 강인 제어 알고리즘에서는 설계자의 경험이나 직관에 의해 가중 함수를 선택하기 때문에 높은 루프 게인의 구현할 수 없는 강인 제어기가 설계될 수 있지만 이 논문에서 제안하는 속도 외란 추정 방법을 사용하면 가중 함수를 최적으로 선택할 수 있고 강인 미동 제어기도 최적으로 설계할 수 있다. 미동 탐색 제어기를 포함하지 않은 미동 탐색 제어 시스템은 다음의 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + H_1p(t) + B_2(K_v u_f(t)) \\ v_e(t) &= C_2x(t) + H_2p(t) + (v_d(t) - v_r(t)) \\ q(t) &= E_1x(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $x(t)$ 는 상태 변수, $p(t)$ 는 작동기 불확실성 입력을 나타내고 작동기 불확실성은 H_1, H_2, E_1 행렬에 포함된다. 그리고 미동 탐색 제어기는 다음의 상

태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c x_c(t) + B_c v_e(t) \\ u_f(t) &= C_c x_c(t) \end{aligned} \quad (9)$$

미동 탐색 제어 시스템의 강인 성능을 고려하기 위해 $Z(s) = W(s)V_e(s)$ 의 관계를 만족하는 가중 함수 $W(s)$ 를 도입한다. 추정된 속도 외란에 대해 속도 오차가 최대 허용 오차보다 작도록 하기 위해 가중 함수는 미동 탐색 제어 대역에서 최소 개루프 게인 식 (7)보다 게인이 조금 더 크도록 선택되어야 한다. 가중 함수와 가중 함수의 출력 $z(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_w(t) &= A_w x_w(t) + B_w v_e(t) \\ z(t) &= C_w x_w(t) \end{aligned} \quad (10)$$

미동 탐색 제어기 식 (9)와 가중 함수 식 (10)을 식 (8)에 적용하면 미동 탐색 제어 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{cl}(t) &= \bar{A}x_{cl}(t) + \bar{H}_1p(t) + \bar{B}_1(v_d(t) - v_r(t)) \\ z(t) &= \bar{C}_w x_{cl}(t) \\ q(t) &= \bar{E}_1 x_{cl}(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $x_{cl}(t) = [x(t)^T \ x_c(t)^T \ x_w(t)^T]^T$ 는 미동 탐색 제어 시스템의 상태 변수이고 시스템 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A & K_v B_2 C_c & 0 \\ B_c C_2 & A_c & 0 \\ B_w C_2 & 0 & A_w \end{bmatrix}, \bar{H}_1 = \begin{bmatrix} H_1 \\ B_c H_2 \\ B_w H_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_1^T &= \begin{bmatrix} 0 & B_c^T & B_w^T \end{bmatrix}, \bar{C}_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_w \end{bmatrix}, \\ \bar{E}_1 &= \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이 논문에서는 작동기 불확실성과 속도 외란에 대해 미동 탐색 제어 시스템 식 (11)이 강인 안정하고 $\|T_{(v_d-v_r)z}(j\omega)\|_\infty < 1$ 를 만족하는 미동 탐색 제어기를 설계하는 강인 H_∞ 제어 문제를 고려한다. 만약 강인 H_∞ 제어 문제를 만족하는 미동 탐색 제어기가 설계된다면 $\|T_{(v_d-v_r)z}(j\omega)\|_\infty < 1, W(j\omega) > L_{min}(j\omega)$, 식 (7)로부터 각 주파수에서 속도 오차는 최대 허용 오차 v_{emx} 보다 작게 된다는 것을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|V_e(j\omega)| = \frac{|T_{(v_d-v_r)z}(j\omega)| |V_d(j\omega) - V_r(j\omega)|}{|W(j\omega)|}$$

$$\frac{|V_d(j\omega) - V_r(j\omega)|}{|W(j\omega)|} < \frac{|V_d(j\omega) - V_r(j\omega)|}{L_{\min}(j\omega)} = v_{emx} \quad (12)$$

강인 H_∞ 제어 문제⁽¹¹⁾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.

$$\begin{bmatrix} \bar{A}X + X\bar{A}^T & \bar{B}_1 & \bar{H}_1 & X\bar{C}_w^T & \lambda X\bar{E}_1^T \\ \bar{B}_1^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ \bar{H}_1^T & 0 & -\lambda I & 0 & 0 \\ \bar{C}_w X & 0 & 0 & -I & 0 \\ \lambda \bar{E}_1 X & 0 & 0 & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

대부분의 미동 탐색 제어기 설계에서 디스크의 회전 속도가 증가함에 따라 속도 외란이 얼마나 증가하는지를 알 수 없어 최소 개루프 계인을 계산할 수 없었다. 그래서 목표 성능을 만족하는 미동 탐색 제어기를 설계와 실험을 반복하여 설계하였다. 그러나 이 논문에서 제안한 강인 미동 탐색 제어기 설계 방법은 여러 배속의 미동 탐색 제어기 설계에 효율적으로 적용될 수 있고 성능을 만족하는 미동 탐색 제어기를 설계하는 시간을 최대한 줄일 수 있다.

4. DVD 기록기기에 대한 실험 결과

제안한 강인 제어기 설계 방법의 타당성을 검증하기 위해 이 논문에서는 DVD 기록기기의 미동 탐색 제어 시스템에 적용하였다. 속도 외란 추정을 위한 루프 게인 조정 알고리즘은 디지털 실험 보드에 의해 구현하였고 DVD 12X으로 구동하여 실험 데이터를 500 kHz로 측정하였다. 실험에서 사용한 미동 작동기의 공칭 모델은 1차 공진 주파수, 감쇠 상수, DC 감도 등을 고려하여 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$P_m(s) = \frac{574s}{s^2 + 420s + 179000} \quad [(\text{m/s}) / A] \quad (14)$$

작동기 파라미터는 공칭값에서 10%범위에서 변하기 때문에 불확실성의 최대값을 $m_k=28.5, m_\alpha=21,$

$m_\beta=8950$ 로 설정하였다. 드라이버 게인 K_v 는 2.5, 드라이버의 차단 주파수는 속도 외란의 추정 범위보다 큰 50 kHz로 구현하였다.

작동기 불확실성의 영향을 속도 외란 추정에 반영하기 위해 Fig. 5의 루프 게인 조정 알고리즘을 적용한 결과 미동 탐색 제어기의 DC 게인이 1.6배 작아졌다. 이것은 실제 미동 작동기의 게인이 공칭 모델의 게인보다 1.6배 크기 때문에 일정한 범위내에서 루프 위상을 유지하기 위해 미동 탐색 제어기의 DC 게인을 1.6배 감소시켰다는 것을 의미한다. 속도 외란을 좀 더 정확하게 추정하기 위해 조정된 결과를 식 (4)의 보상 게인 $K_c=1.6$ 에 반영하였다. 작동기의 공칭 모델 식 (14), 드라이버 DC 게인, 보상 게인을 Fig. 4의 속도 외란 측정 블록에 대입하면 속도 외란을 최대한 정확하게 추정할 수 있다. Fig. 6은 DVD 12배속에서 추정된 속도 외란을 나타낸다.

디스크 회전 주파수와 그 정수배의 주파수에서 속도 외란이 상대적으로 크게 발생한다는 것을 볼 수 있다. 추정된 DVD 12X 속도 외란을 토대로 강인 미동 탐색 제어기를 설계하기 위해 Fig. 7과 같은

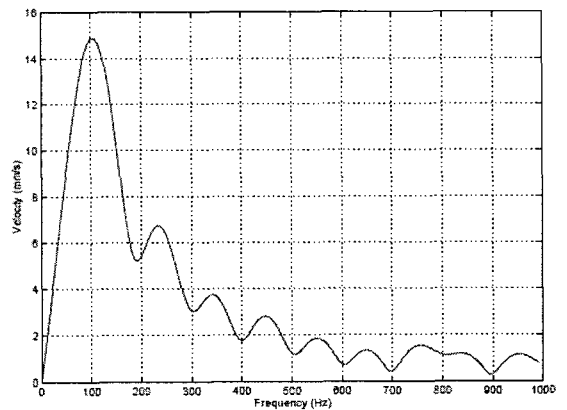


Fig. 6 The velocity disturbance estimated at DVD 12X

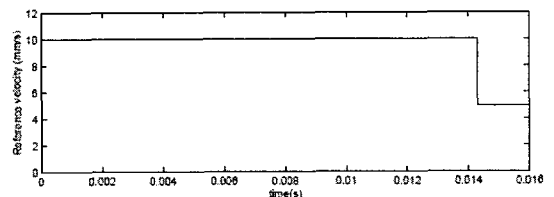


Fig. 7 The reference velocity for a fine seek action moving 200 tracks

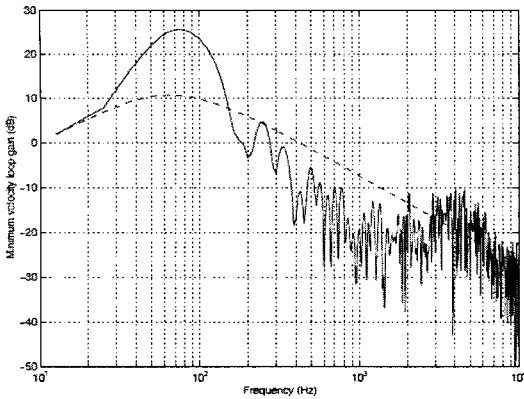


Fig. 8 A minimum fine seek open-loop gain of DVD 12X (solid) and the bode plot of the weighting function (dashed)

200 트랙의 미동 탐색 동작을 실행하기 위한 지령 속도 v_r 를 고려한다. 광 기록기기에서 속도 오차는 광학 시스템, 기계 시스템, 디지털 서보 보드에서 발생하는 오차의 합이기 때문에 미동 탐색 제어기 설계에서 사용되는 최대 허용 오차는 실험을 통해 나타나는 최대 허용 오차 1.0 mm/s의 1/3이어야 한다. Fig. 8은 추정된 DVD 12X 속도 외란, 지령 속도, 최대 허용 오차를 식 (7)에 적용하여 계산한 DVD 12X 최소 개루프 게인과 가중 함수를 나타낸다.

가중 함수 $W(s)$ 는 다음과 같이 미동 탐색 제어 대역에서 최소 개루프 게인보다 조금 더 큰 게인을 가지도록 선택하였다.

$$W(s) = \frac{2.7 \times 10^3 s^2 + 4.24 \times 10^5 s + 1.07 \times 10^7}{s^3 + 942.5 s^2 + 2.84 \times 10^5 s + 2.68 \times 10^7} \quad (15)$$

미동 탐색 시간을 최대한 줄이고 안정적인 속도 제어를 위해 수백 Hz에서 수 kHz까지의 주파수 대역을 제어 대역으로 사용하며 작동기 공진 주파수를 포함한 저주파 대역은 미동 탐색 제어 대역에 포함되지 않는다.

공칭 모델 식 (14)와 가중 함수 식 (15)에 대해 MATLAB의 LMI toolbox를 사용하여 식 (13)를 만족하는 강인 미동 탐색 제어기 $C_f(s)$ 를 설계하면 다음과 같다.

$$\frac{1.9 \times 10^5 s^3 + 6.7 \times 10^9 s^2 + 2.3 \times 10^{13} s + 1.1 \times 10^{16}}{s^4 + 1.5 \times 10^5 s^3 + 3.3 \times 10^9 s^2 + 1.6 \times 10^{13} s + 5.6 \times 10^{15}} \quad (16)$$

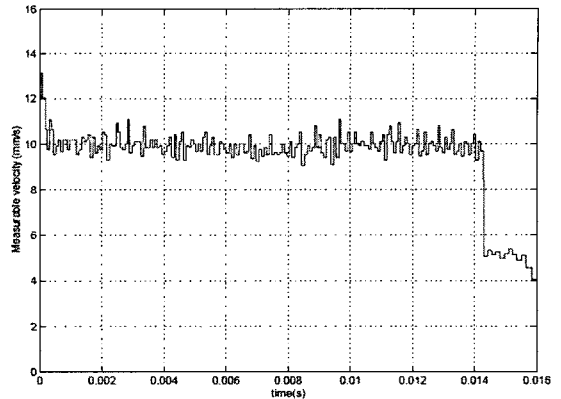


Fig. 9 The measurable velocity after applying the designed fine seek controller

Fig. 9는 설계된 강인 미동 탐색 제어기를 미동 탐색 제어 시스템에 적용한 후의 실제 속도 v_m 를 나타낸다. 속도 외란이 존재하더라도 탐색 동작 동안 속도 오차가 최대 허용 오차 1.0 mm/s보다 작게 유지되는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 추정된 속도 외란을 토대로 강인 미동 탐색 제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 속도 외란 추정에서 작동기 불확실성의 영향을 고려하기 위해 루프 게인 조정 알고리즘을 적용하였고 추정된 속도 외란과 최소 허용 오차에 의해 계산된 최소 개루프 게인을 이용하여 강인 H_∞ 제어 문제에 적용하기 위한 가중 함수를 선택하였다. 속도 외란의 추정을 통한 강인 미동 탐색 제어기 설계 방법은 DVD 기록기기의 미동 탐색 제어 시스템에 적용하여 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2006년도 동의대학교 교내연구비(과제 번호 2006AA165)에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Jin, K. B., Doh, T.-Y., Ryoo, J. R. and Chung, M. J., 1998, "Robust Direct Seek Control for High-speed Rotational Optical Disk Drives", IEEE

Transactions on Consumer Electronics, pp. 1273~1283.

(2) Jin, K. B., Lee, H. K. and Chung, M. J., 1998, "Direct Seek Control Scheme for High-speed Rotational Optical Disk Drives", Electronics Letters, pp. 1476~1477.

(3) Suzuki, M., Tanaka, H., Miura, M., Suzuki, Y. and Mori, M., 1993, "Advanced Direct Seeking System for 5.25" Magneto-optical Disk Drive", J. Appl. Phys., pp. 5371~5375.

(4) Yang, J., Pan, L., Pei, X. and D. Xu, 1998, "Two-actuator Cooperative Seek Control for Optical Disk Drives", Proceedings of the SPIE, pp. 94~98.

(5) Yang, J. D., Pan, L. F., Pei, X. D. and Xie, C. S., 1997, "Time Optimal Seek Control for a Coupled Dual Stage Disk Drive Actuator", IEEE Transactions on Magnetics, pp. 2629~2631.

(6) Akiyama, M. and Ishikawa, J., 1993, "Repetitive Track Seeking Algorithm for Optical Disk Drives", Japanese Journal of Applied Physics, pp. 5392~5396.

(7) Koumura, K., Takizawa, F., Tsujisawa, T. and Inada, H., 1989, "High Speed Accessing by Direct Accessing", Japanese Journal of Applied Physics, pp. 73~76.

(8) Choi, J.-Y., Jun, H.-G., Chun, C.-H., Lee, M.-N., Yang, H.-S. and Park, Y.-P. 2002, "Disturbance Measurement of Optical Disc and

Servo Loop Design Related to Its Result", International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 326~332.

(9) Suzuki, M., Tanaka, H. and Miura, Y., 1990, "Pull-in Condition and Method of Tracking Servo in Optical Disk Drive", J. Inst. Television Jpn, pp. 1391~1397.

(10) Jin, K. B. and Lee, M.-N., 2003, "Vibration Control Methods for Optical Disk Drives", Journal of KSNVE, Vol. 13, No. 2, pp. 48~55.

(11) Lee, M.-N., Moon, J.-H., Jin, K. B. and Chung, M. J., 1998, "Robust H_∞ Control with Multiple Constraints for the Track-following System of an Optical Disk Drive", IEEE Trans. Indus. Electr., pp. 638~645.

(12) Zhou, M., Doyle, K. C. and Glover, K. 1996, "Robust and Optimal Control", Prentice-Hall, Inc..

(13) Doyle, J. C., Francis, B. A. and Tannenbaum, A. M., 1992, "Feedback Control Theory", New York: Macmillan.

(14) Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. and Balakrishnan, V., 1994, "Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory", Philadelphia, PA: SIAM.

(15) Lim, S. C. and Jung, T. Y., 1998, "Robust Servo Control of High Speed Optical Pickups", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 533~541.