Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 25(5) : 361~368, 2015
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2015.25.5.361

한국소음진동공학회논문집 제 25 권 제 5 호, pp. 361~368, 2015
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

유전자 알고리듬을 이용한 강인 미동 탐색 제어기의 설계

Design of a Robust Fine Seek Controller Using a Genetic Algorithm

이 문 노†·진 경 복*

Moonnoh Lee and Kyoung Bog Jin

(Received March 26, 2015 ; Revised April 28, 2015 ; Accepted April 28, 2015)

Key Words : Fine Seek Control System(미동 탐색 제어 시스템), Velocity Disturbance(속도 외란), Disturbance Estimation(외란 추정), Robust H_∞ Constraint(강인 H_∞ 제한), Robust Velocity Loop Constraint(강인 속도 루프 제한), Genetic Algorithm(유전자 알고리듬)

ABSTRACT

This paper deals with a robust fine seek controller design problem with multiple constraints using a genetic algorithm. A robust H_∞ constraint is introduced to attenuate effectively velocity disturbance caused by the eccentric rotation of the disk. A weighting function is optimally selected based on the estimation of velocity disturbance and the estimated minimum velocity loop gain. A robust velocity loop constraint is considered to minimize the variances of the velocity loop gain and bandwidth against the uncertainties of fine actuator. Finally, a robust fine seek controller is obtained by solving a genetic algorithm with an LMI condition and an appropriate objective function. The proposed controller design method is applied to the fine seek control system of a DVD recording device and is evaluated through the experimental results.

1. 서 론

광 기록기기는 트랙 추종 제어와 트랙 탐색 제어가 반복되면서 디스크상의 데이터를 재생하거나 데이터를 기록하게 된다. 트랙 추종 제어는 디스크상의 트랙을 추종하기 위해 사용되고 트랙 탐색 제어는 광 픽업을 목표 트랙으로 빠르게 이동하기 위해 사용된다. 광 디스크에 존재하는 구조적인 편심 때문에 디스크가 회전하면 진동 외란이 발생한다. 이러한 진동 외란은 미동 탐색 제어 동안 속도 외란의 형태로 영향을 주기 때문에 미동 탐색 제어 시스템의 설계에서는 정밀한 속도 제어뿐만 아니라 효율적인 속도 외란 감쇠도 고려되어야 한다[1~3].

디스크 회전 배속이 증가하면 미동 탐색 시간이 감소되고 속도 외란의 주파수도 증가하게 된다. 미동 탐색 시간은 상대적으로 짧기 때문에 속도 외란을 효율적으로 제어하지 못하면 미동 탐색 제어가 종료된 후에 안정적으로 트랙 추종을 시작할 수 없게 된다. 그래서 속도 외란을 효율적으로 감쇠하여야 하고 이를 위해 속도 외란을 적절히 추정하여 미동 탐색 제어기 설계에 고려하여야 한다[4].

일반적으로 고배속에서는 미동 탐색 제어 루프의 제어 대역폭이 증가하게 되고 안정도 마진을 확보하기가 상대적으로 어렵게 된다. 고배속에서 안정적인 미동 탐색 제어 성능을 유지하기 위해서는 액추에이

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Computer Engineering, Dong-Eui University
E-mail : mnlee@deu.ac.kr
Tel : +82-51-890-1713, Fax : +82-51-890-2629
* Member, School of Mechatronics Engineering, KOREATECH

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

터 불확실성에 따른 미동 탐색 제어 시스템의 루프 게인이나 제어 대역폭 등의 성능 변화를 최소화하여야 한다. 유전자 알고리듬은 수학적으로 표현하기 어려운 성능 조건들을 다루기 위해 사용될 수 있고 여러 목표 성능에 최적인 제어기를 찾는데 효율적으로 적용될 수 있다[5~7]. 그래서 미동 탐색 루프 게인과 제어 대역폭의 변화를 최소화하기 위한 적절한 목표 함수를 설정할 수 있고 유전자 알고리듬을 통해 목표 함수를 최소화하는 미동 탐색 제어기를 탐색할 수 있다.

이 논문에서는 강인 안정한 미동 탐색 제어 시스템을 설계하기 위해 속도 외란을 효율적으로 감쇠하고 액추에이터 불확실성에 따른 속도 제어 성능 변화를 최소화하는 강인 미동 탐색 제어기 설계 문제를 다룬다. 이를 위해 강인 H_∞ 제한 조건과 강인 속도 루프 제한 조건을 고려한다. 추정된 속도 외란과 최대 허용 속도 에러로부터 속도 외란 감쇠를 위한 가중 함수를 구하고 강인 H_∞ 제한 조건에 적용한다. 그리고 액추에이터 불확실성에 대해 미동 탐색 루프 게인과 제어 대역폭의 변화를 최소화하기 위해 적절한 목표 함수를 설정한다. 결론적으로 강인 미동 탐색 제어기는 LMI 조건을 가진 유전자 알고리듬에 의해 설계될 수 있다. 제안된 제어기 설계 방법은 DVD 기록기기의 미동 탐색 제어 시스템에 적용하였고 실험을 통해 제어기 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 강인 미동 탐색 제어

광 기록기기는 트랙을 정밀하게 추종하기 위한 트랙 추종 제어와 광 픽업을 목표 트랙으로 빠르게 이동시키기 위한 트랙 탐색 제어가 반복하여 수행된다. 트랙 추종 제어와 트랙 탐색 제어를 위해 광 기록기기는 미동 액추에이터와 조동 액추에이터로 구성된 2단 구조의 액추에이터를 사용한다. 미동 액추에이터는 이동 범위는 작지만 대역폭이 크도록 설계되고 조동 액추에이터는 대역폭은 작지만 먼 거리를 이동할 수 있도록 설계된다. 대부분의 광 기록기기에서는 voice coil 모터를 미동 액추에이터로 사용하고 스텝핑 모터를 조동 액추에이터로 사용한다[1].

광 기록기기의 트랙 탐색 제어는 이동하는 거리에 따라 짧은 거리를 이동하는 미동 탐색 제어와 먼 거리를 이동하는 조동 탐색 제어로 구분된다. 미동 탐색 제어는 미동 액추에이터를 속도 제어하고 미동 액추에이터의 움직임으로 인한 광축 벗어남을 스텝핑 모터가 보정하는 제어 구조를 가진다. 반면에 조동 탐색 제어는 속도 프로파일에 따라 스텝핑 모터를 속도 제어하고 미동 액추에이터는 스텝핑 모터의 이동으로 인한 광축 벗어남을 보정하는 제어 구조를 가진다. 조동 탐색 제어는 스텝핑 모터를 개루프 속도 제어하기 때문에 속도 외란을 직접적으로 제어할 수 없지만 미동 탐색 제어는 미동 액추에이터를 폐루프 속도 제어하기 때문에 안정적인 속도 제어를 통해 속도 외란을 효율적으로 제어할 수 있다. 그래서 조동 탐색 제어의 경우 속도 외란의 영향으로 탐색 제어가 종료된 후 목표 트랙을 벗어나게 되고 목표 트랙에 도달하기 위해 미동 탐색 제어를 다시 수행하여야 한다.

미동 탐색 제어 시스템에서 미동 액추에이터는 속도 제어를 통해 목표 트랙으로 이동하게 되고 이로 인해 광축이 벗어나게 된다. 광축 벗어남이 크게 되면 탐색 제어를 위한 센서 신호들의 크기가 작아지기 때문에 광축 벗어남을 보정해주어야 한다. 그래서 미동 액추에이터가 광축을 1 마이크로 스텝 벗어나게 되면 스텝핑 모터를 1 마이크로 스텝 이동시켜 광축 벗어남을 보정한다. 스텝핑 모터는 광축 벗어남만을 보정하기 때문에 미동 탐색 제어 시스템은 Fig. 1과 같이 미동 액추에이터에 의한 속도 제어 루프만으로 단순화하여 나타낼 수 있다. 여기서 $P_f(s)$는 미동 액추에이터, $C_f(s)$는 미동 탐색 제어기, K_v는 증폭 게인을 나타낸다. 그리고 v_r, v_f, v_m, v_d은 목표 속도, 미동 액추에이터의 속도, 실제 속도, 속도 외란을 나타낸다. 미동 탐색 제어 시스템에서 속도 외란과 액추에이터의 속도는 직접적으로 측정할 수 없고 실제 속도 v_m만 측정 가능하다. 속도 에러는 목표 속도와 실제 속도의 차인 (v_r-v_m)에 의해 정의되고 측정된 속도 에러는 제어 범위를

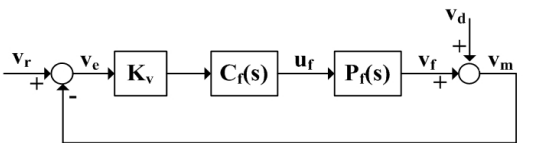

Fig. 1 Block diagram of the simplified fine seek control system

고려한 증폭 게인에 의해 증폭된 후에 미동 탐색 제어기 $C_f(s) \cong (A_c, B_c, C_c, 0)$에 입력된다.

미동 액추에이터의 특성은 2차 선형 시스템으로 근사화할 수 있고 액추에이터 파라미터는 공칭값에서 약 10 % 범위내에서 변하게 된다. 이러한 파라미터 불확실성을 포함하여 미동 액추에이터는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$P_f(s) = \frac{[k_f^-, k_f^+]s}{s^2 + [\alpha_f^-, \alpha_f^+]s + [\beta_f^-, \beta_f^+]} \; [\frac{m/s}{V}] \qquad (1)$$

미동 액추에이터를 제외한 미동 탐색 제어 시스템은 다음의 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x_f}(t) &= Ax_f(t) + H_1 p(t) + B_2 u_f(t) \\ v_e(t) &= C_2 x_f(t) + H_2 p(t) + v_r(t) - v_d(t) \\ q(t) &= E_1 x_f(t),\; p(t) = \Delta q(t),\; \| \Delta \| \le 1 \end{aligned} \qquad (2)$$

여기서 $x_f(t)$와 $p(t)$는 상태 변수, 액추에이터 불확실성 입력을 나타내고 액추에이터 불확실성은 H_1, H_2, E_1 행렬에 포함된다.

디스크 회전 배속이 증가함에 따라 미동 탐색 제어 시스템에서 발생하는 속도 외란의 주파수는 증가하게 된다. 보통, 목표 트랙에서 미동 액추에이터의 잔존 속도가 5 mm/s이상이면 안정적으로 트랙 추종 제어를 시작할 수 없기 때문에 속도 외란을 효율적으로 제어하여야 한다. 그리고 미동 탐색 제어 시스템의 속도 루프 성능을 항상 일정하게 유지하기 위해서는 액추에이터 불확실성에 따른 미동 탐색 루프 게인과 제어 대역폭의 변화 등을 최소화하여야 한다. 그래서 이 논문에서는 강인 H_∞ 제한 조건과 강인 속도 루프 제한 조건을 고려하고 유전자 알고리듬을 적용하여 강인 미동 탐색 제어기를 설계한다.

2.1 강인 H_∞ 제한 조건

속도 외란을 효율적으로 제어하기 위해서는 발생하는 속도 외란의 크기와 주파수를 적절히 추정하여 미동 탐색 제어 시스템 설계에 반영하여야 한다. Fig. 1에서 속도 외란, 미동 액추에이터의 속도, 실제 속도의 관계로부터 속도 외란은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d(j\omega) = V_m(j\omega) - P_f(j\omega)\, U_f(j\omega) \qquad (3)$$

미동 액추에이터는 파라미터 불확실성을 포함하고 있으므로 속도 외란 식 (3)을 직접적으로 계산할 수 없다. 속도 외란을 최대한 정확하게 추정하기 위해 액추에이터 공칭 모델 $P_{fn}(j\omega)$와 보상 게인 K_c를 사용한다. 액추에이터 공칭 모델과 보상 게인을 식 (3)에 적용하면 속도 외란은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\widehat{V}_d(j\omega) = V_m(j\omega) - K_c P_{fn}(j\omega)\, U_f(j\omega) \qquad (4)$$

속도 외란 추정에서 미동 액추에이터 불확실성의 영향을 고려하기 위해 루프 게인 조정 알고리듬을 사용한다[4]. 속도 제어 범위에 속하는 특정 주파수의 정현파 입력을 속도 에러에 더하고 더한 출력을 미동 탐색 제어기에 입력한다. 인가된 정현파 주파수에 대한 실제 속도의 크기를 측정하여 정현파 입력에 대한 루프 게인과 위상을 구한다. 측정한 위상은 액추에이터 불확실성의 영향을 포함하고 있기 때문에 공칭 액추에이터 모델에 대한 공칭 위상과는 차이가 있게 된다. 이러한 위상차가 허용 범위내에 도달할 때까지 미동 탐색 제어기의 DC 게인을 조정한다[4]. 이러한 루프 게인 조정 알고리듬은 액추에이터 불확실성이 존재하더라도 미동 탐색 제어기의 DC 게인을 조정하여 미동 탐색 제어 루프의 특성을 일정하게 유지하게 한다. 결론적으로 루프 게인 조정 알고리듬을 적용한 후에 미동 탐색 제어기의 DC 게인의 변화 K_δ를 측정하여 조정 게인 $K_c = 1/K_\delta$에 의해 속도 외란 추정 식 (4)에 반영한다. 추정된 속도 외란과 최대 허용 속도 에러 v_{emx}를 이용하면 각 주파수에서 속도 에러가 v_{emx}보다 작게 되는 최소 속도 루프 게인 $L_{\min}(j\omega)$을 구할 수 있다.

$$L_{\min}(j\omega) = \frac{|\widehat{V}_d(j\omega)|}{v_{emx}} \qquad (5)$$

효율적인 속도 외란 감쇠를 위해 강인 H_∞ 제한 조건은 속도 외란의 특성을 반영한 가중 함수를 고려하여야 한다. 가중함수 $W(s)$는 $Z(s) = W(s)\, V_e(s)$로 정의되고 추정된 최소 속도 루프 게인 식 (5)보다 루프 게인이 크도록 설정된다. 미동 탐색 제어 시스템 식 (2)에 가중 함수 $W(s) \cong (A_w, B_w, C_w, 0)$을 적용하고 목표 속도를 0으로 하면 미동 탐색 제어 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\dot{\overline{x_f}}(t) = \overline{A}\overline{x_f}(t) + \overline{H_1}p(t) + \overline{B_1}(v_r(t) - v_d(t)) \\
&z(t) = \overline{C_w}\overline{x_f}(t) \\
&q(t) = \overline{E_1}\overline{x_f}(t),\ p(t) = \Delta q(t),\ \| \Delta \| \le 1
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} A & B_2C_c & 0 \\ K_vB_cC_2 & A_c & 0 \\ B_wC_2 & 0 & A_w \end{bmatrix},\ \overline{H_1} = \begin{bmatrix} H_1 \\ K_vB_cH_2 \\ B_wH_2 \end{bmatrix}$$

$$\overline{B_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_vB_c \\ B_w \end{bmatrix},\ \overline{C_w} = [0\ 0\ C_w],\ \overline{E_1} = [E_1\ 0\ 0]$$

가중 함수를 포함한 강인 H_∞ 제한 조건은 미동 탐색 제어 시스템 식(6)이 속도 외란과 액추에이터 불확실성에 대해 강인 안정하고 $\| T_{dz}(j\omega) \|_\infty < 1$이면 만족하게 된다. 그러면 $|L_{\min}(j\omega)| \lhd |W(j\omega)|$, $\| T_{dz}(j\omega) \|_\infty < 1$로부터 각 주파수에서 속도 에러는 최대 허용 속도 에러보다 항상 작게 유지된다.

$$|V_e(j\omega)| = \frac{|T_{dz}(j\omega)\|V_d(j\omega)|}{|W(j\omega)|} < \frac{|\widehat{V_d}(j\omega)|}{|L_{\min}(j\omega)|} = v_{emx} \tag{7}$$

가중 함수를 고려한 강인 H_∞ 제한 조건은 다음의 행렬 부등식을 만족하는 행렬 A_c, B_c, D_c, $X>0$와 상수 $\lambda>0$을 구하는 문제로 변환될 수 있다[8].

$$\begin{bmatrix} \overline{A}X + X\overline{A}^T & \overline{B_1} & \overline{H_1} & X\overline{C_w}^T & \lambda X\overline{E_1}^T \\ \overline{B_1}^T & -I & 0 & 0 & 0 \\ \overline{H_1}^T & 0 & -\lambda I & 0 & 0 \\ \overline{C_w}X & 0 & 0 & -I & 0 \\ \lambda\overline{E_1}X & 0 & 0 & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \tag{8}$$

2.2 강인 속도 루프 제한 조건

안정적인 미동 탐색 제어를 위해서는 속도 외란의 효율적인 감쇠뿐만 아니라 목표 속도에 대한 정밀한 속도 제어가 수행되어야 한다. 충분한 속도 성능을 확보하기 위해서는 적절한 루프 게인과 제어 대역폭을 가지도록 미동 탐색 제어기는 설계되어야 한다. 그러나 액추에이터 불확실성 때문에 속도 루프 게인과 제어 대역폭이 변화하게 되고 속도 제어 성능도 편차가 있게 된다. 특히 고배속에서는 탐색 시간 감소로 인해 목표 속도가 증가하고 진동 외란의 주파수도 증가하게 된다. 이로 인해 미동 탐색 루프 게인과 제어 대역폭이 증가하게 되어 액추에이터 불확실성에 따른 속도 루프 성능 변화가 더 커지게 된다. 안정적인 미동 탐색 제어 동작을 실행하기 위해서는 액추에이터 불확실성에 따른 속도 루프 게인과 제어 대역폭 등의 변화를 최소화하여야 한다.

미동 액추에이터 식(1)은 $P_f(s) = N_f(s)/D_f(s)$로 표현될 수 있으므로 분자 다항식 $N_f(s)$와 분모 다항식 $D_f(s)$에 대해 다음의 kharitonov 다항식을 가진다.

$$\begin{aligned}
&\widehat{N_{f1}}(s) = k_f^- s,\ \widehat{N_{f2}}(s) = k_f^+ s \\
&\widehat{D_{f1}}(s) = s^2 + \alpha_f^- s + \beta_f^-,\ \widehat{D_{f2}}(s) = s^2 + \alpha_f^+ s + \beta_f^- \\
&\widehat{D_{f3}}(s) = s^2 + \alpha_f^- s + \beta_f^+,\ \widehat{D_{f4}}(s) = s^2 + \alpha_f^+ s + \beta_f^+
\end{aligned} \tag{9}$$

미동 탐색 루프 함수 $L_f(s) = K_vC_f(s)P_f(s)$에 대한 복소 평면의 경계를 토대로 일련의 극한(extreme) 루프 함수를 구하면 다음과 같다.

$$L_{fi}(s,\delta) = K_vC_f(s)\frac{\widehat{N_{fl}}(s)}{(1-\delta)\widehat{D_{fj}}(s) + \delta\widehat{D_{fk}}(s)} \cup$$

$$K_vC_f(s)\frac{(1-\delta)\widehat{N_{fj}}(s) + \delta\widehat{N_{fk}}(s)}{\widehat{D_{fl}}(s)} \tag{10}$$

여기서 δ=[0,1], $(j,k) \in \{(1,2),(1,3),(2,3),(3,4)\}$, $l \in \{1,2,3,4\}$이다. 분자 다항식 $N_f(s)$이 일차항만 있으므로 미동 탐색 제어 시스템은 12개의 극한 루프 함수들을 가지게 된다.

미동 탐색 제어 시스템의 속도 제어 주파수 범위는 대략 수백 Hz에서 수십 kHz이다. 미동 탐색 루프 게인과 제어 대역폭의 변화를 최소화하기 위해 속도 제어 대역의 특정 주파수 ω_o의 루프 게인과 상한 컷오프 주파수 ω_{fc}의 변화를 최소화하는 미동 탐색 제어기를 설계한다. 그래서 미동 탐색 제어 시스템의 12개의 극한 루프 함수에 대해 목표 루프 게인 $L_d(\omega_o)$과 목표 상한 컷오프 주파수 ω_{dfc}의 변화를 최소화하는 다음의 목표 함수 J를 도입한다.

$$J = \max_{1 \le i \le 12} \max_{0 \le \delta \le 1} \left| \frac{(L_{fi}(\omega_0,\delta) - L_d(\omega_0))}{L_d(\omega_0)} \times \frac{(\omega_{fci}(\delta) - \omega_{dfc})}{\omega_{dfc}} \right| \tag{11}$$

강인 속도 루프 제한 조건은 목표 함수 J에 의해 설정되고 목표 함수 J를 최소화하는 미동 탐색 제어기는 유전자 알고리듬을 통해 탐색될 수 있다.

3. 유전자 알고리듬을 이용한 강인 미동 탐색 제어기의 설계

이 논문에서 고려한 강인 H_∞ 제한 조건과 강인 속도 루프 제한 조건을 만족하는 미동 탐색 제어기 설계 문제는 다음의 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

식 (8)을 만족하는 행렬 A_c, B_c, D_c, X>0에 대해 식 (11)의 목표 함수 J를 최적화하라. (12)

행렬 부등식 (8)은 비선형 항을 가지고 있지만 유전자 알고리듬에서 제어기 파라미터를 염색체로 사용하면 모든 후보 염색체에 대해 식 (8)의 비선형 항들은 선형화되므로 행렬 부등식 (8)은 LMI 조건이 된다. 이 논문에서는 LMI 조건을 포함한 유전자 알고리듬에 의해 최적화 문제 식 (12)를 만족하는 강인 미동 탐색 제어기를 설계한다. Fig. 2는 LMI 조건이 포함된 유전자 알고리듬을 나타낸다.

유전자 알고리듬의 염색체로 미동 탐색 제어기 $C_f(s)$의 파라미터를 사용한다. 각 염색체는 N_v개의 제어기 파라미터를 가지게 되고 각 파라미터는 L_v 길이의 비트 배열로 구성된다. 염색체의 수가 N개이고 각 염색체별 비트 배열 총길이가 $L_{tot} = N_v L_v$ 일 때 t세대에서 모집단의 평균 해밍거리는 다음과 같이 정의된다[9].

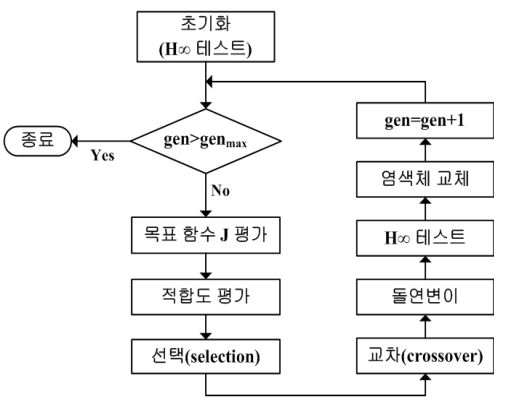

Fig. 2 A flow diagram of a genetic algorithm with an LMI condition

$$h_{av}(t) = \sum_{j=1}^{L_{tot}} \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^{N} \frac{2|C_{pj}(t) - C_{qj}(t)|}{N(N-1)} \tag{13}$$

여기서 $C_{pj}(t)$와 $C_{qj}(t)$는 모집단의 염색체 중 선택된 2개의 부모를 나타낸다. 일반적으로 교차 확률 P_c와 돌연변이 확률 P_m은 평균 해밍거리 $h_{av}(t)$의 영향을 받게 되고 유전자 알고리듬이 수렴하기 위해서는 다음의 조건을 만족하여야 한다[9,10].

$$0 < P_c < \frac{L_{tot}-1}{h_{av}(t)}, \quad \frac{1}{NL_{tot}} \le P_m \le \frac{1}{L_{tot}} \tag{14}$$

유전자 알고리듬의 초기 단계에는 국부 최적해에 조기 수렴하는 것을 방지하기 위해 교차 연산자가 탐색에 주로 작용을 하고 세대가 진행됨에 따라 교차 연산자보다 돌연변이 확률의 영향을 크게 하여야 한다. 그래서 식 (14)를 만족하는 가변 교차 확률과 돌연변이 확률을 사용한다.

유전자 알고리듬의 초기화 과정에서 N개의 염색체별로 제어기 파라미터 N_v에 대해 L_v길이의 비트 배열을 임의로 생성한다. 그리고 초기에 생성된 염색체에 대해 제어기 행렬을 구성하고 식 (8)을 만족하는 행렬 X>0가 존재하는 지를 확인한다. 식 (8)을 만족하지 않는 염색체들은 초기 모집단에서 제외한다. 이러한 초기화 과정은 식 (8)을 만족하는 염색체가 설정된 염색체의 개수 N과 같을 때까지 계속된다.

각 염색체별 12개의 극한 루프 함수에 대해 목표 함수 식 (11)의 값을 구하고 목표 함수 J로부터 적합도 함수를 정한 후에 모집단의 염색체들의 적합도를 평가한다. 그런 뒤에 선택 기법을 이용하여 가용된 모집단으로부터 부모를 선정하고 선택된 부모들로부터 평균 해밍거리를 기반으로 가변의 교차와 돌연변이 연산 과정을 거친 후에 식 (8)을 만족하는 염색체만을 다음 세대를 위한 새로운 염색체로 사용한다. 현 세대들의 염색체들을 새로운 세대의 염색체들로 교체하고 설정한 최대 세대 $gen_{\max}$가 될 때까지 유전자 알고리듬을 반복하여 식 (12)를 만족하는 미동 탐색 제어기를 구한다.

4. 실험 결과

제안된 제어기 설계 방법의 타당성을 검증하기

위해 DVD 기록기기의 미동 탐색 제어 시스템에 적용하였다. 실험에서 사용된 미동 액추에이터의 공칭 모델은 1차 공진 주파수, 감쇠 상수, DC 감도를 고려하여 구할 수 있고 10 % 범위내에 존재하는 파라미터 불확실성을 고려하면 미동 액추에이터 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f(s) = \frac{[1364, 1506]s}{s^2 + [399, 441]s + [170050, 187950]} \quad (15)$$

미동 탐색 제어기를 제외한 미동 탐색 제어 시스템 식 (2)의 상태 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 5000 \\ -35.8 & -420 \end{bmatrix}, H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1.79 & 21 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = [0 \ -0.287], \ H_2 = [0 \ -0.0142], E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

디지털 실험 보드에서 10 mm/s의 속도가 0.5V로 변환되기 때문에 증폭 게인 K_v=50이다. 실험을 위해 DVD 디스크를 12X로 구동하였다.

액추에이터 불확실성의 영향을 속도 외란 추정에 반영하기 위해 루프 게인 조정 알고리듬을 적용한 결과 미동 탐색 제어기의 DC 게인이 1.5배 더 작아졌다. 그래서 보상 게인 K_c=1.5로 설정하였고 식 (4)에 반영하여 속도 외란을 추정하였다. 추정된 속도 외란과 최대 허용 속도 에러 1.0mm/s로부터 최소 속도 루프 게인을 구할 수 있다.

Fig. 3은 DVD 12X의 최소 속도 루프 게인을 나타내고 이를 토대로 강인 H_∞ 제한 조건을 위한 가중 함수를 다음과 같이 설정하였다.

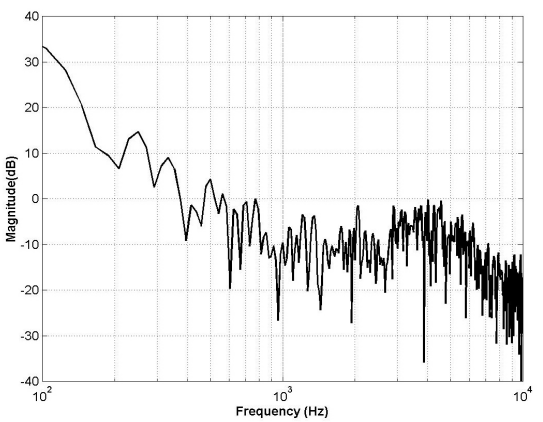

Fig. 3 A minimum velocity loop gain of DVD 12X

$$W(s) = \frac{1000s^2 + 1.9 \times 10^9 s}{s^3 + 48000s^2 + 3.7 \times 10^8 s + 9.5 \times 10^{10}} \quad (16)$$

추정된 속도 외란과 액추에이터 불확실성에 대해 강인하고 안정적인 속도 성능을 가지는 미동 탐색 제어기를 설계하기 위해 Fig. 4와 같이 200 트랙의 미동 탐색 제어 동작을 실행하기 위한 목표 속도 v_r을 고려하였다.

강인 속도 루프 제한 조건을 고려하기 위해 식 (15)에 식 (9), 식 (10)을 적용하여 12개의 극한 루프 함수를 구하였다. 그리고 속도 외란과 목표 속도의 주파수 특성을 고려하여 특정 주파수 ω_o=2 kHz, 목표 루프 게인 $L_d(\omega_o)$=20 dB, 목표 상한 컷오프 주파수 ω_{dfc}=15 kHz를 설정하였다. 이러한 목표 파라미터값과 12개의 극한 루프 함수로부터 목표 함수 식 (11)을 다음과 같이 설정하였다.

$$J = \max_{1 \le i \le 12} \max_{0 \le \delta \le 1} \left| \frac{(L_{fi}(2 \times 10^3, \delta) - 10)}{10} \times \frac{(\omega_{f\alpha i}(\delta) - 15 \times 10^3)}{15 \times 10^3} \right| \quad (17)$$

이 논문에서는 4차의 미동 탐색 제어기를 사용하기 때문에 염색체는 8개의 제어기 파라미터를 가지게 되고 각 제어기 파라미터는 비트수 L_v=25, 각 염색체별 총 비트수 $L_{tot}=N_v L_v$=200의 비트 배열로 구성하였다. 초기화 과정에서 식 (8)을 만족하는 20개의 염색체를 생성하였다. 진화 연산자로는 one point 교차 연산자와 bit inversion 형태의 돌연변이 연산자를 사용하였고 다음의 가변의 교차 확률과 돌연변이 확률을 사용하였다.

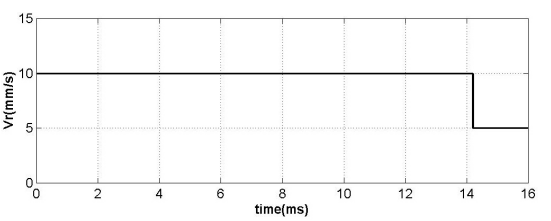

Fig. 4 The reference velocity for a fine seek action moving 200 tracks

$$p_c(t+1) = 0.8\left|1 - \frac{2h_{av}(t)}{L_{tot}}\right| \tag{18}$$

$$p_m(t+1) = 0.001 \times (1+5\left|1 - \frac{2h_{av}(t)}{L_{tot}}\right|) \tag{19}$$

돌연변이 과정 후에 식 (8)을 만족하는 염색체만이 다음 세대를 위해 현 개체군에 다시 재삽입되었다. Fig. 2의 유전자 알고리듬은 30세대($gen_{\max}$=30)가 될 때까지 반복되었다. 결과적으로 설계된 미동 탐색 제어 시스템의 특정 주파수(ω_o=2 kHz)에서의 루프 게인은 9.7 dB, 상한 컷오프 주파수는 15.4 kHz, 목표 함수 J의 최소값은 7.56×10^{-4}, 설계된 미동 탐색 제어기는 다음과 같다.

$$\frac{1.6\times10^5 s^3 + 5.5\times10^9 s^2 + 3.3\times10^{13} s + 6.9\times10^{15}}{s^4 + 1.1\times10^5 s^3 + 3.4\times10^9 s^2 + 9.9\times10^{12} s + 6.2\times10^{15}} \tag{20}$$

Fig. 5는 설계된 강인 미동 탐색 제어기를 Fig. 4의 목표 속도를 가진 200 트랙의 미동 탐색 제어 동작에 적용하였을 때의 실제 속도 v_m을 나타낸다. 속도 외란과 액추에이터 불확실성에 대해 속도 에러가 최대 허용 속도 에러 1 mm/s보다 작게 유지되는 것을 볼 수 있다.

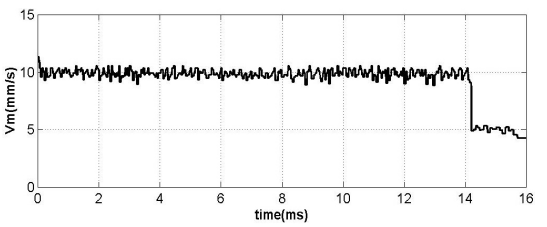

Fig. 5 The measurable velocity after applying the desired fine seek controller

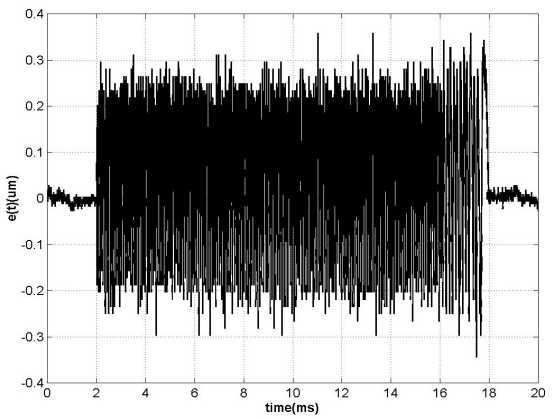

Fig. 6 The tracking error after a fine seek control of 200 tracks

Fig. 6은 200 트랙의 미동 탐색 제어 후의 트랙킹 에러를 나타낸다. 미동 탐색 제어는 2 ms에서 시작되어 18 ms에서 종료된 후에 트랙 추종 제어가 다시 시작되었다. 미동 탐색 제어 동안의 트랙킹 에러는 광 픽업이 한 트랙을 지나갈 때마다 액추에이터 이동 속도에 비례하는 주파수의 정현파가 나타난다. 미동 탐색 제어가 종료된 후에 안정적으로 트랙 추종 제어가 시작되었음을 볼 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 강인 미동 탐색 제어 시스템을 설계하기 위해 강인 H_∞ 제한 조건과 강인 속도 루프 제한 조건을 만족하는 미동 탐색 제어기 설계 방법을 제안하였다. 강인 H_∞ 제한 조건은 추정된 속도 외란을 토대로 설정된 가중 함수를 적용하여 발생하는 속도 외란을 효율적으로 감쇠한다. 강인 속도 루프 제한 조건은 액추에이터 불확실성에 대해 미동 탐색 루프 게인과 제어 대역폭의 변화를 최소화한다. 강인 미동 탐색 제어기는 LMI 조건을 포함한 유전자 알고리듬에 의해 구할 수 있고 DVD 기록기기의 미동 탐색 제어 시스템에 적용하여 타당성을 검증하였다.

References

(1) Jin, K. B., Lee, H. K. and Chung, M. J., 1998, Direct Seek Control Scheme for High-speed Rotational Optical Disk Drives, Electronics Letters, Vol. 34, No. 15, pp. 1476~1477.

(2) 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, Vol. 33, No. 5, pp. 2629~2631.

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

(4) Lee, M.-N., Shin, J.-H. and Kim, S.-W., 2007, A Robust Controller Design Method of the Fine Seek Control System with Velocity Disturbance, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 9, pp. 804~811.

(5) Hsu, C.-C., Chang, S.-C. and Yu, C.-Y., 2007, Tolerance Design of Robust Controllers for Uncertain Interval Systems based on Evolutionary Algorithms, IET Control Theory Applications, Vol. 1, No. 1, pp. 244~252.

(6) Pereira, G. and Araujo, H. X., 2004, Robust Output Feedback Controller Design via Genetic Algorithms and LMIs: The Mixed H_2/H_∞ Problem, Proceedings of the American Control Conference, pp. 3309~3314.

(7) Neumann, D. and Araujo, H. X., 2004, Mixed H_2/H_∞ Control for Uncertain Systems Under Pole Placement Constraints Using Genetic Algorithms and LMIs, Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp. 460~465.

(8) Lee, M.-N. and Jin, K. B., 2008, A Controller Design Method for Constructing a Robust Track-following System, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 54, No. 2, pp. 538~544.

(9) Lee, H. K., Lee, D. H., Ran, Z., Lee, G. K. and Lee, M.-N., 2010, On Parameter Selection for Reducing Premature Convergence of Genetic Algorithms, CAINE, pp. 214~219.

(10) Lee, H. K., 2008, Improvement of Convergence Properties for Genetic Algorithms, Journal of the Korea Navigation Institute, Vol. 12, No. 5, pp 412~419.

Moonnoh Lee received the B.S. degree in electronic engineering from Kyungpook National University in 1991, the M.S. and the Ph.D. degrees in electrical engineering from KAIST in 1993 and 1998. From 1998 to 2001, he worked for Samsung Electronics Co. as a senior research engineer. Since 2001, he has been with Department of Computer Engineering at Dong-Eui University, where he is currently a full professor.

Kyoung Bog Jin received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering from Hanyang University in 1985 and 1987, and the Ph.D. degree in automation and design engineering from KAIST in 1999. From 1987 to 2001, he worked for Samsung Electronics Co. as a principal research engineer in the field of servo technology. Since 2001, he has been with School of Mechatronics Engineering at KOREATECH, where he is currently a full professor.