

트래킹 액추에이터의 진동 억제를 위한 트래킹 Gain-up 제어기 설계

Design of a Tracking Gain-up Controller for the Vibration Suppression of Tracking Actuator

이 문 노* · 진 경 복*

Moonnoh Lee and Kyoung Bog Jin

(Received January 23, 2013 ; Revised March 20, 2013 ; Accepted March 20, 2013)

Key Words : Tracking Gain-up Control(트래킹 게인-업 제어), Vibration of Tracking Actuator(트래킹 액추에이터 진동), Pole Placement Constraint(극점 위치 제한), Loop Gain-up Constraint(루프 게인-업 제한), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), LMI Design Approach(LMI 설계 기법)

ABSTRACT

This paper presents a tracking gain-up controller design method to control effectively the vibration of tracking actuator caused by external shocks and remaining velocity after seek control. A pole placement constraint is considered to assure a desired transient response against the vibration of tracking actuator. A loop gain-up constraint is introduced to hold the tracking gain-up loop gain and control bandwidth within allowable bounds. The pole placement constraint is expressed by a matrix inequality and the loop gain-up constraint is considered as an objective function so that genetic algorithm can be applied. Finally, a tracking gain-up controller is obtained by integrating a genetic algorithm with LMI design approach. The proposed tracking gain-up controller design method is applied to the track-following system of a DVD recording device and its effectiveness is evaluated through the experimental results.

1. 서 론

광 디스크에는 트랙 편심이 존재하기 때문에 디스크가 회전하면 광 픽업이 목표 트랙에서 수백 트랙 이상을 벗어나게 하는 트래킹 외란이 발생하게 된다. 광 기록기기는 이러한 트래킹 외란에 대해 트랙을 정밀하게 추종하는 트랙 추종 제어와 특정 트랙으로 빠르게 이동하는 검색 제어를 반복하여 실행해야 한다. 만약 광 픽업이 트랙을 정밀하게 추종하지 못하면 안정적으로 검색 제어를 시작할 수 없고

검색 제어 동안 속도를 정밀하게 제어하지 못하면 검색 제어 후 잔존 속도에 의한 액추에이터 진동이 크게 발생하여 트랙 추종 제어를 안정적으로 시작할 수 없게 된다⁽¹⁾.

디스크 회전 배속이 증가함에 따라 검색 시간이 더 작아져야 하기 때문에 검색 제어 동안 더 정밀한 속도 제어가 필요하다. 특히 수십 트랙 이하의 검색 제어의 경우 속도 제어 루프가 안정화되기 전에 목표 트랙에 도달하기 때문에 잔존 속도에 의한 액추에이터 진동의 영향은 상대적으로 더 크게 된다. 액추에이터 진동이 크게 발생하면 목표 트랙에서 많이

* 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
* School of Mechatronics Engineering, KUT

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

벗어나게 되고 액추에이터가 안정화될 때까지 기다렸다가 트랙 추종 제어를 시작해야 하기 때문에 접근 시간이 더 증가하게 된다.

광 기록기기는 외부 충격에 의해서도 액추에이터 진동이 발생하게 된다. 보통 액추에이터 진동은 상대적으로 고주파 성분을 많이 포함하고 있기 때문에 액추에이터 진동을 최대한 빨리 안정화시키기 위해 트랙킹 gain-up 제어가 필요하다. 대부분의 광 기록기기 제조회사에서는 트랙킹 루프의 게인과 대역폭을 조금씩 증가시키는 반복 실험을 통해 트랙킹 gain-up 제어기를 설계한다. 최근에 진동량 추정을 통한 강인 H_∞ 제한 조건과 극점 위치 제한 조건을 고려한 트랙킹 gain-up 제어기 설계방법이 제안되었다⁽²⁾. 그러나 트랙킹 gain-up DC 게인과 제어 대역폭이 필요 이상으로 커질 수 있기 때문에 gain-up 제어기 설계에서 트랙킹 gain-up 루프 특성을 고려하는 것이 필요하다.

이 논문에서는 검색 제어 후 트랙킹 액추에이터 진동의 영향을 최소화하는 트랙킹 gain-up 제어기를 설계하는 문제를 다룬다. 트랙킹 액추에이터를 최대한 빨리 안정화시키기 위해 극점 위치 제한 조건을 통해 과도 응답 특성을 설계에서 고려한다. 그리고 액추에이터 진동 추정을 통해 적절한 트랙킹 gain-up DC 게인, gain-up 제어 대역폭을 설정하고 액추에이터 불확실성에 대해서도 설정한 목표 지수가 최대한 유지되도록 하기 위해 loop gain-up 제한 조건을 고려한다. 극점 위치 제한 조건은 선형 부등식에 의해 표현될 수 있고 loop gain-up 제한 조건은 유전자 알고리즘의 목표 함수를 통해 다루어지게 된다. 결론적으로 트랙킹 gain-up 제어기는 유전자 알고리즘과 LMI 설계 기법을 통합한 설계 방법에 의해 설계될 수 있다. 제안된 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법은 DVD 기록기기의 gain-up 트랙 추종 시스템에 적용하였고 실험을 통해 타당함을 나타내었다.

2. Gain-up 트랙 추종 제어

Fig. 1은 정상적인 트랙 추종 제어와 트랙킹 gain-up 제어를 포함한 광 기록기기의 트랙 추종 시스템의 블록도를 나타낸다. 정상적인 트랙 추종 시스템은 트랙을 정밀하게 추종하기 위해 증폭 게인

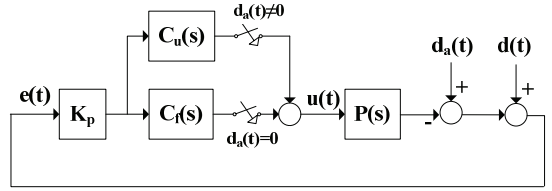


Fig. 1 Block diagram of a track-following system

K_p , 트랙킹 제어기 $C_f(s)$, 트랙킹 액추에이터 $P(s)$ 로 구성된다. 트랙킹 에러 $e(t)$ 는 트랙 중심과 빔 스팟 사이의 차이를 나타내고 광 소자에 의해 검출된 후에 게인 K_p 에 의해 증폭된다. 디스크의 트랙에는 편심이 존재하기 때문에 디스크가 회전하면 트랙 추종 시스템에 트랙킹 외란 $d(t)$ 이 발생한다. 그리고 외부 충격이나 검색 제어 후 잔존 속도에 의해 액추에이터 진동 $d_a(t)$ 이 발생한다. 외부 충격에 의한 액추에이터 진동은 외부 검출 회로에 의해 검출될 수 있다. 정상적인 트랙 추종 모드에서는 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 가 트랙 추종 시스템에 연결되지만 액추에이터 진동이 발생하는 경우 트랙킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 가 트랙 추종 시스템에 연결된다.

대부분의 트랙킹 액추에이터는 voice 코일 모터를 사용하며 액추에이터 동작 특성은 2차 선형 시스템으로 근사화될 수 있다. 액추에이터 불확실성은 공칭값에서 일정한 범위내에서 변하기 때문에 트랙킹 액추에이터는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

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

정상적인 트랙 추종 제어에서는 트랙킹 외란에 대해 광 픽업이 트랙을 정밀하게 추종하도록 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 를 설계하여야 한다. 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 는 강인 제어 알고리즘이나 반복 제어 알고리즘 등의 제어 알고리즘에 의해 효율적으로 설계될 수 있다⁽³⁻⁷⁾. 그리고 발생하는 트랙킹 외란을 측정하거나 최대한 정확하게 추정하여 트랙킹 제어기를 설계하기 위해 사용될 수 있다^(8,9).

정상적인 트랙 추종 제어를 실행하는 동안 외부 충격에 의해 액추에이터가 흔들리게 되면 정상적인 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 만으로는 트랙 추종 제어를 안정적으로 수행할 수 없게 된다. 액추에이터 진동은 검색 제어 동안 속도 제어가 정밀하게 실행되지 못

한 경우에도 발생하게 된다. 액추에이터 진동은 수 kHz의 고주파 성분을 많이 포함하고 있기 때문에 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 만으로는 안정적으로 트랙 추종 제어를 시작할 수 없다. 그래서 트래킹 gain-up 제어기는 트래킹 액추에이터의 고주파 진동을 효율적으로 제어하기 위해 트래킹 루프의 게인과 제어 대역폭이 적절히 증가되도록 설계되어야 한다. 검색 제어가 종료된 후에 트래킹 gain-up 제어가 시작되고 트래킹 gain-up 제어에 의해 트래킹 에러가 정상 제어 범위내로 안정화되면 정상적인 트랙 추종 제어로 변환된다.

액추에이터 진동에 대해 트랙 추종 시스템을 최대한 빨리 안정화시키기 위해서는 상승 시간과 안정화 시간 등의 과도 응답 특성을 고려하여야 하고 정상적인 트래킹 루프 보다 큰 루프 게인과 제어 대역폭을 가지도록 트래킹 루프를 gain-up시켜 주어야 한다. 그래서 이 논문에서는 목표로 하는 과도 응답 특성을 위해 극점 위치 제한 조건을 고려하고 액추에이터 진동에 대해 트래킹 루프의 게인과 제어 대역폭을 적절히 높여주기 위해 loop gain-up 제한 조건을 고려한다. Loop gain-up 제한 조건을 위해 액추에이터 진동을 추정하고 이를 토대로 목표로 하는 트래킹 gain-up DC 게인과 gain-up 제어 대역폭을 적절히 설정한다. 그리고 유전자 알고리즘을 이용하여 액추에이터 불확실성에 대해 트래킹 gain-up DC 게인, gain-up 제어 대역폭이 최대한 일정한 범위내에 유지되도록 한다. 이 논문에서는 극점 위치 제한 조건과 loop gain-up 제한 조건을 만족하는 트래킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 를 LMI 설계 기법과 유전자 알고리즘을 적용하여 설계한다.

3. 트래킹 Gain-up 제어기 설계

3.1 극점 위치 제한 조건

액추에이터 진동이 존재하는 트래킹 gain-up 제어 모드에서 트래킹 gain-up 제어를 제외한 gain-up 트랙 추종 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + H_1 p(t) + B_2 u(t) \\ e(t) &= C_2 x(t) + H_2 p(t) + d(t) + d_a(t) \\ q(t) &= E_1 x(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $x(t)$, $p(t)$, $d(t)$, $d_a(t)$ 는 상태 변수, 액추에이터 불확실성 입력, 트래킹 외란, 액추에이터 진동 외란을 각각 나타내고 액추에이터 불확실성은 H_1 , H_2 , E_1 행렬에 의해 표현된다. 실험 환경에서는 증폭된 트래킹 에러 $K_p e(t)$ 만 측정 가능하고 트래킹 gain-up 제어기 $C_u(s) = (A_u, B_u, C_u, 0)$ 를 식 (2)에 적용하면 gain-up 트랙 추종 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{H}_1 p(t) + \bar{B}_1(d(t) + d_a(t)) \\ e(t) &= \bar{C}_2 \bar{x}(t) + H_2 p(t) + d(t) + d_a(t) \\ q(t) &= \bar{E}_1 \bar{x}(t), p(t) = \Delta q(t), \|\Delta\| \leq 1 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A & B_2 C_u \\ K_p B_u C_2 & A_u \end{bmatrix}, \bar{H}_1 = \begin{bmatrix} H_1 \\ K_p B_u H_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ K_p B_u \end{bmatrix}, \bar{C}_2 = [C_2 \ 0], \bar{E}_1 = [E_1 \ 0] \end{aligned}$$

액추에이터 진동을 빨리 안정시키기 위해 이 논문에서는 상승 시간과 안정화 시간 등의 과도 응답 특성을 고려한다. Gain-up 트랙 추종 시스템 식 (3)은 2차 선형시스템이고 액추에이터 진동 등의 일시적인 외부 입력은 스텝 입력으로 간주될 수 있다. 스텝 입력에 대한 상승 시간 t_r 과 안정화 시간 t_s 로부터 감쇠 상수 ζ 와 고유주파수 ω_n 에 의해 표현되는 영역을 구할 수 있다⁽⁸⁾.

$$\omega_n \geq \frac{1.8}{t_r}, \quad \zeta \omega_n \geq \frac{3}{t_s} \tag{4}$$

그리고 gain-up 트랙 추종 시스템이 너무 높은 주파수 게인과 빠른 동역학을 가지지 않도록 하기 위해 극점이 너무 크지 않도록 제한하여야 한다. 상승 시간, 안정화 시간, 고주파 극점 제한을 토대로 gain-up 트랙 추종 시스템의 모든 극점이 존재해야 하는 특성 영역으로 다음의 LMI 영역을 고려한다^(10,11).

$$D = \{z \in C : f_D(z) = \alpha + z\beta + \bar{z}\beta^T < 0\} \tag{5}$$

LMI 영역은 타원, 포물선, 섹터, 다각형 영역 등의 여러 영역을 포함한다. 액추에이터 불확실성과 LMI 영역 식 (5)에 대해 다음을 만족하는 대칭 행렬 $X > 0$ 이 존재하면 gain-up 트랙 추종 시스템의 모

든 극점은 설정된 LMI 영역에 포함되게 된다⁽¹⁰⁾.

$$M(\bar{A} + \bar{H}_1 \Delta \bar{E}_1, X) = \alpha \otimes X + \beta \otimes (\bar{A} + \bar{H}_1 \Delta \bar{E}_1) X + \beta^T \otimes ((\bar{A} + \bar{H}_1 \Delta \bar{E}_1) X)^T < 0 \tag{6}$$

식 (6)을 만족하는 하나의 충분 조건은 Lyapunov 이론과 S-절차를 이용하여 다음의 행렬 부등식으로 표현될 수 있다⁽⁸⁾.

$$\begin{bmatrix} Y & \beta \otimes \bar{H}_1 & I \otimes \lambda X \bar{E}_1^T \\ \beta^T \otimes \bar{H}_1^T & -\lambda I & 0 \\ I \otimes \lambda \bar{E}_1 X & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \tag{7}$$

결과적으로 식 (7)을 만족하는 행렬 $X > 0$ 와 상수 $\lambda > 0$ 이 존재하면 gain-up 트랙 추종 시스템의 모든 극점은 목표 과도 응답 특성에 의해 설정된 LMI 영역에 포함되게 되고 극점 위치 제한 조건은 만족하게 된다.

3.2 Loop Gain-up 제한 조건

정상적인 트랙 추종 시스템은 트랙킹 외란만을 효율적으로 제어하기 때문에 액추에이터 진동이 발생하면 트랙킹 루프의 게인과 제어 대역폭을 gain-up 시켜주어야 한다. 일반적으로 산업 현장에서는 트랙킹 제어기의 DC 게인을 2배로 증가시키고 반복적인 실험을 통해 위상 여유가 최대한 확보가 되도록 트랙킹 제어기의 고주파 극점과 영점들을 조정한다. 그러나 액추에이터 진동을 좀 더 정밀하게 제어하기 위해서는 발생하는 액추에이터 진동량에 따라 트랙킹 루프를 gain-up시켜주어야 한다. 그래서 이 논문에서는 검색 제어 후 발생하는 액추에이터 진동을 추정하여 이를 토대로 트랙킹 gain-up DC 게인과 gain-up 제어 대역폭을 적절히 설정한다.

액추에이터 진동이 얼마나 발생하는지를 추정하기 위해 정상적인 트랙킹 제어기 $C_f(s)$ 를 트랙 추종 시스템에 연결한다. Fig. 1의 gain-up 트랙 추종 제어 모드에서 발생하는 트랙킹 외란 $d(t)$ 과 액추에이터 진동량 $d_a(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(D(j\omega) + D_a(j\omega)) = E(j\omega) + P(j\omega)U(j\omega) \tag{8}$$

액추에이터 모델 $P(j\omega)$ 은 불확실성이 존재하기 때문에 식 (8)을 직접 계산할 수 없다. 그래서 $P(j\omega)$ 대신 공칭 모델 $P_n(j\omega)$ 과 보상 게인 K_c 를 적용하면 트랙킹 외란과 액추에이터 진동량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\hat{D}(j\omega) + \hat{D}_a(j\omega)) = E(j\omega) + K_c P_n(j\omega)U(j\omega) \tag{9}$$

액추에이터 불확실성에 대한 영향을 최소화하기 위해 트랙킹 루프 게인 조정 알고리즘을 트랙킹 외란과 액추에이터 진동량 추정에 사용한다. 트랙킹 루프 게인 조정 알고리즘은 액추에이터 불확실성에 대해서도 트랙킹 루프의 위상을 최대한 일정하게 유지하기 위해 트랙킹 제어기의 DC 게인을 역으로 조정한다. 그래서 트랙킹 루프 게인 조정 후 트랙킹 제어기 DC 게인의 변화를 측정하고 변화된 크기의 역수를 보상 게인 K_c 로 설정함으로써 액추에이터 불확실성에 대해서 최대한 정확하게 식 (9)를 추정할 수 있다⁽⁹⁾. 액추에이터 진동은 외부 충격의 주파수나 검색 제어의 속도 제어의 영향으로 수 kHz의 고주파 성분이 상대적으로 크게 발생한다. 그래서 추정된 액추에이터 진동량을 통해 gain-up 제어 대역폭을 적절히 설정할 수 있다.

트랙킹 액추에이터 식 (1)은 계수 파라미터에 불확실성을 가지는 interval 시스템이기 때문에 트랙킹 루프의 극한 함수들(extremal systems)에 대해 트랙킹 gain-up DC 게인과 gain-up 제어 대역폭의 영향을 고려함으로써 액추에이터 불확실성에 대해서도 loop gain-up 제한 조건을 고려할 수 있다. 트랙킹 액추에이터의 분자 다항식과 분모 다항식은 다음의 vertex 다항식을 가진다.

$$\begin{aligned} \hat{N}_1(s) &= b_2^-, & \hat{N}_2(s) &= b_2^+ \\ \hat{D}_1(s) &= s^2 + a_1^- s + a_2^-, & \hat{D}_2(s) &= s^2 + a_1^+ s + a_2^- \\ \hat{D}_3(s) &= s^2 + a_1^- s + a_2^+, & \hat{D}_4(s) &= s^2 + a_1^+ s + a_2^+ \end{aligned} \tag{10}$$

액추에이터 불확실성을 고려한 트랙킹 gain-up 루프 함수 $L_u(s) = K_p C_u(s)P(s)$ 의 복소 평면의 경계는 각 vertex 다항식에 의해 정의되는 극한 함수들에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹³⁾.

$$L_{ui}(s, \delta) = K_p C_u(s) \frac{\hat{N}_l(s)}{(1-\delta)\hat{D}_j(s) + \delta\hat{D}_k(s)} \cup K_p C_u(s) \frac{(1-\delta)\hat{N}_j(s) + \delta\hat{N}_k(s)}{\hat{D}_l(s)} \quad (11)$$

여기서 $\delta \in [0, 1]$, $(j, k) \in \{(1, 2), (1, 3), (2, 3), (3, 4)\}$, $l \in \{1, 2, 3, 4\}$ 이다. 일반적으로 interval 시스템의 극한 함수는 32개이지만 트래킹 gain-up 루프 함수는 분자 다항식이 2개의 vertex 다항식만을 가지므로 12개의 트래킹 gain-up 극한 루프 함수를 가지게 된다. 이 논문에서는 액추에이터 불확실성에 대해 loop gain-up 제한 조건을 고려하기 위해 12개의 트래킹 gain-up 극한 루프 함수 각각에 대해 다음의 목표 함수 J 를 고려한다.

$$J = \max_{1 \leq i \leq 12} \max_{0 \leq \delta \leq 1} \left(\left| \frac{L_{ui}(0, \delta) - L_{ui}(0)}{2L_{ui}(0)} \right| + \left| \frac{(\omega_{ui}(\delta) - \omega_{ui})}{2\omega_{ui}} \right| \right) \quad (12)$$

여기서 $L_{ui}(0)$ 과 ω_{ui} 는 추정된 트래킹 gain-up DC 게인과 gain-up 제어 대역폭을 나타낸다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘의 검색 과정을 통해 액추에이터 불확실성에 대해 목표 함수 J 가 최소가 되는 트래킹 gain-up 제어를 구한다.

3.3 유전자 알고리즘과 LMI 설계 기법을 이용한 트래킹 Gain-up 제어기 설계

이 논문에서 고려한 극점 위치 제한 조건과 loop gain-up 제한 조건을 만족하는 트래킹 gain-up 제어기 설계 문제는 식 (7)을 만족하는 행렬 $A_u, B_u, C_u, X > 0$ 에 대해 식 (12)의 목적 함수 J 를 최소화하는 최적화 문제로 나타낼 수 있다. 부등식 행렬 식 (7)에 존재하는 비선형 항목 때문에 식 (7)을 LMI로 변환하기 위해서는 새로운 제어 변수들을 도입하여야 한다^(10,11). 그러나 제어기 파라미터를 유전자 알고리즘의 염색체로 사용하면 식 (7)의 비선형 항목들은 선형화가 되고 제어 변수 변환은 필요가 없게 된다. 그래서 유전자 알고리즘과 LMI 설계 기법을 통합한 설계 알고리즘을 적용하면 최적화된 트래킹 gain-up 제어기를 설계할 수 있다. Fig. 2는 이 논문에서 제안하는 LMI 설계 기법이 포함된 유전자 알

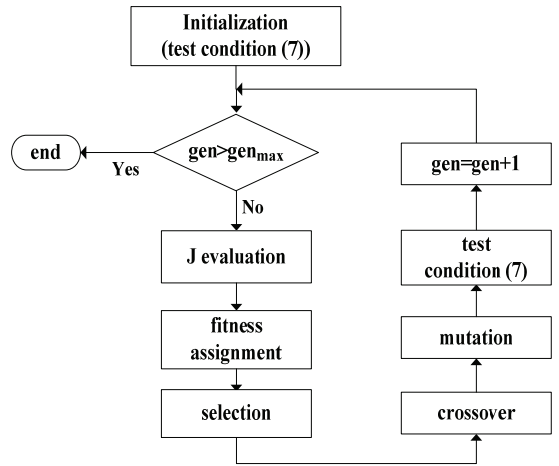


Fig. 2 A flow diagram showing a genetic algorithm with the LMI design approach

고리즘을 나타낸다.

이 논문에서는 트래킹 gain-up 제어기 $C_u(s)$ 의 제어기 파라미터들을 유전자 알고리즘의 염색체의 구성 요소로 사용한다. 각 염색체는 N_{var} 개의 제어기 파라미터를 가지게 되고 각 파라미터는 L_{var} 길이의 비트 배열로 구성된다. 염색체의 수가 N , 각 염색체 별 비트 배열 총길이가 $L_{tot} = N_{var} \cdot L_{var}$ 일 때 t 세대에서 모집단의 평균 해밍거리 $Ah(t)$ 는 다음과 같이 정의된다⁽¹²⁾.

$$Ah(t) = \sum_{i=1}^{L_{tot}} \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N (2|c_{pi}(t) - c_{qi}(t)|) / (N(N-1)) \quad (13)$$

여기서 $C_{pi}(t)$ 와 $C_{qi}(t)$ 는 모집단의 염색체 중 선택된 2개의 부모(mating pool)를 나타낸다. 일반적으로 교차 확률 P_c 과 돌연변이 확률 P_m 은 평균 해밍거리 $Ah(t)$ 의 영향을 받게 되고 유전자 알고리즘이 수렴하기 위해서는 다음의 조건을 만족하여야 한다^(12,13).

$$0 < p_c < \frac{L_{tot} - 1}{Ah(t)} \quad (14)$$

$$\frac{1}{NL_{tot}} < p_m < \frac{1}{L_{tot}}, \quad 0 < p_m < \frac{1}{L_{tot} - Ah(t)} \quad (15)$$

국부 최적해에 조기 수렴하는 것을 방지하기 위해 유전자 알고리즘의 초기 단계에는 교차 연산자가

탐색에 주로 작용을 하고 세대가 진행됨에 따라 교차 연산자보다 돌연변이 확률의 영향을 크게 하여야 한다. 그리고 전역 최적해로 수렴하도록 하기 위해 가변의 교차 확률과 돌연변이 확률을 사용한다.

이 논문에서는 식 (7)을 만족하면서 목적 함수 식 (12)를 최소화하는 트래킹 gain-up 제어를 설계하기 위해 식 (14)와 (15)를 만족하는 가변 교차 확률과 돌연변이 확률을 사용한다. Fig. 2의 유전자 알고리즘을 적용하기 위해 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 의 각 파라미터값에서 $\pm 50\%$ 범위내에서 변하는 제어기 파라미터값을 임의로 생성하여 유전자 알고리즘의 염색체로 사용한다. N 개의 염색체별로 제어기 파라미터 N_{var} 에 대해 L_{var} 길이의 비트 배열을 가지도록 한다. 초기에 선택된 염색체가 극점 위치 제한 조건 식 (7)을 만족하는 지를 테스트하기 위해 각 염색체들로부터 제어기 행렬을 구성하고 식 (7)에 대입한 후 LMI 설계 기법을 사용하여 식 (7)을 만족하는 행렬 $X>0$ 와 상수 $\lambda>0$ 가 존재하는 지를 확인한다. 식 (7)을 만족하지 않는 염색체들은 초기 모집단에서 제외한다. 그리고 액추에이터 진동량을 추정하여 목표 트래킹 gain-up DC 게인 $L_u(0)$ 과 gain-up 제어 대역폭 ω_h 를 설정한다. 각 염색체별 12개의 트래킹 gain-up 극한 루프 함수에 대해 목적 함수 식 (12)의 값을 구하고 목적 함수 J 로부터 적합도 함수를 정한 후 모집단의 염색체들의 적합도를 평가한다. 선택 기법을 이용하여 가용한 모집단으로부터 부모를 선정하고 선택된 부모들로부터 평균 해밍거리를 기반으로 가변의 교차와 돌연변이 연산 과정을 거친 후에 극점 위치 제한 조건 식 (7)을 만족하는 염색체만을 다음 세대를 위한 새로운 염색체로 사용한다. 현 세대들의 염색체들을 새로운 세대의 염색체들로 교체하고 세대가 설정한 최대 세대 gen_{max} 이 될 때까지 유전자 알고리즘을 반복한다.

4. 실험 결과

이 논문에서는 DVD 8 배속에서 30 트랙 검색 제어 후 발생하는 액추에이터 진동을 빠르게 제어하기 위해 제안된 트래킹 gain-up 제어기 설계 방법을 적용하였다. 실험에서 사용한 DVD 기록기기의 트래킹 액추에이터는 공진 주파수 64 Hz, 감쇠 상수 0.079, DC 감도 1 mm/V, 전압-전류 드라이버 게인

3.65이다. 액추에이터 파라미터들은 공칭값에서 10% 범위내에서 변하기 때문에 트래킹 액추에이터는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$P(s) = \frac{[562.1 \quad 621.3]}{s^2 + [60.5 \quad 66.9]s + [153615 \quad 169785]} \tag{16}$$

디지털 실험 보드에서 0.37 μm 의 1/2 DVD트랙에 대해 트래킹 에러가 1.6V로 변환되므로 증폭 게인 K_p 는 $4.32 \times 10^6 [\text{V/M}]$ 이고 최대 트래킹 허용 에러를 0.03 μm 로 설정하였다. 정상적인 트랙 추종 제어를 위해 이 논문에서는 H_∞ 제어 알고리즘을 적용하여 트래킹 제어기 $C_f(s)$ 를 설계하였다⁽²⁾.

$$\frac{1.7 \times 10^6 s^3 + 5.6 \times 10^{10} s^2 + 5.9 \times 10^{14} s + 1.8 \times 10^{18}}{s^4 + 1.8 \times 10^6 s^3 + 2.5 \times 10^{11} s^2 + 3.8 \times 10^{15} s + 1.9 \times 10^{18}} \tag{17}$$

30트랙 검색 제어 후 안정적인 트랙 추종 제어를 시작하기 위해 상승 시간을 0.5 ms, 안정화 시간 2ms 이내로 설정하였고 극점의 최대 크기를 50 kHz 이내로 제한하였다. 식 (4)를 적용하면 $\omega_h \geq 3600$, $\xi \omega_h \geq 1500$ 의 영역을 구할 수 있고 최대 극점 제한을 고려하여 다음의 LMI 영역 Ω 로 특성 영역을 근사화하였다.

$$\Omega = \{z \in C : f_D(z) := \alpha + z\beta + \bar{z}\beta^T < 0\} \tag{18}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 7200 & 0 \\ 0 & -65000 \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 \\ 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

Loop gain-up 제한 조건을 적용하기 위해 먼저 트래킹 외란과 액추에이터 진동량을 추정하였다. 트래킹 루프 게인 조정 알고리즘을 적용한 결과 트래킹 제어기의 DC 게인은 초기 게인의 1/1.1배로 감소하였다. 이것은 트래킹 액추에이터의 실제 게인이 식 (16)의 공칭 게인보다 1.1배 더 크다는 것을 의미하므로 보상 게인 K_c 를 1.1로 설정하였다. Fig. 3은 액추에이터 공칭 모델, 보상 게인 $K_c=1.1$, 측정 데이터를 식 (9)에 적용하여 추정된 트래킹 외란과 액추에이터 진동량을 나타낸다. 약 5~6.5 kHz사이에서 상대적으로 큰 액추에이터 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 토대로 목표 트래킹 gain-up DC 게인

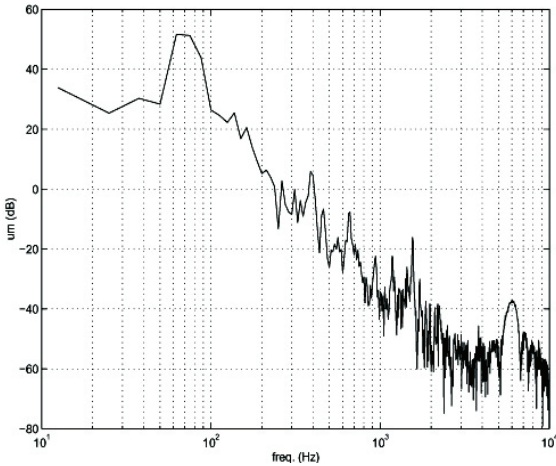


Fig. 3 The estimated tracking disturbance and vibration of tracking actuator

$L_u(0)$ 을 86 dB, gain-up 제어 대역폭 ω_l 를 6.5 kHz 로 설정하였다.

이 논문에서는 4차의 트래킹 gain-up 제어기를 사용하기 때문에 염색체별 구성 요소로 8개의 제어기 파라미터를 사용하였다. 각 제어기 파라미터는 비트 수 $L_{var}=25$, 각 염색체별 총 비트수 $L_{tot}=N_{var}L_{var}=200$ 의 비트 배열로 구성되었고 트래킹 제어기 식 (17)의 각 파라미터값에서 $\pm 50\%$ 범위내에서 변하는 제어기 파라미터값을 임의로 생성하여 초기에 사용하였다. 선택된 염색체들은 LMI 방법에 의해 식 (7)을 만족하는 지를 확인하는 테스트를 통해 $N=15$ 개의 염색체들을 최종적으로 생성하였다. 염색체들은 확률론적인 일반 샘플링(stochastic universal sampling)에 의해 선택되었고 진화 연산자로는 one point 교차 연산자와 bit inversion 형태의 돌연변이 연산자가 사용되었다. 염색체의 수 N , 염색체별 비트 배열 총길이 L_{tot} , 평균 해밍거리 $Ah(t)$ 에 따라 교차 확률과 돌연변이 확률이 식 (14)와 (15)를 만족하고 다음의 가변 교차 확률과 돌연변이 확률을 가지도록 설정하였다.

$$p_c(t+1) = 0.8 \times \left| 1 - \frac{2Ah(t)}{L_{tot}} \right| \tag{19}$$

$$p_m(t+1) = 0.001 \times \left(1 + 5 \times \left| 1 - \frac{2Ah(t)}{L_{tot}} \right| \right) \tag{20}$$

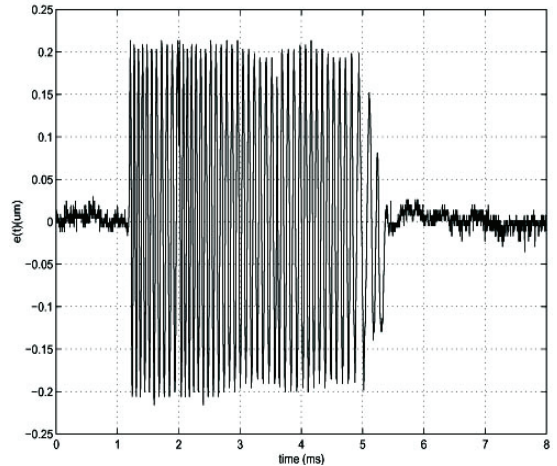


Fig. 4 The tracking error after applying the tracking controller $C_f(s)$

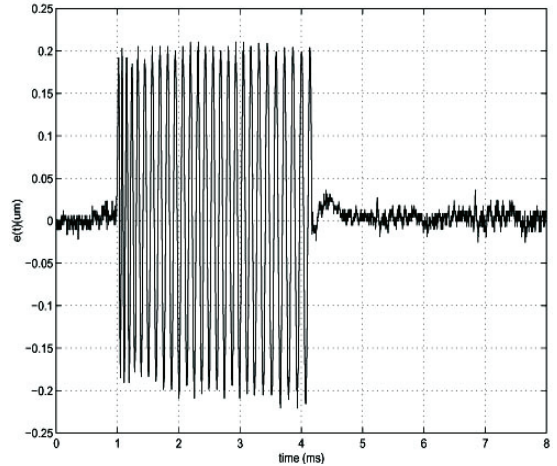


Fig. 5 The tracking error after applying the tracking gain-up controller $C_u(s)$

교차와 돌연변이를 진행한 후 생성된 염색체가 극점 위치 제한 조건 식 (7)을 만족하는지를 확인하였고 식 (7)을 만족하는 염색체들만이 다음 세대를 위해 다시 재삽입하였다. 이러한 과정은 세대가 $gen_{max}=30$ 이 될 때까지 반복되었다. 결과적으로 식 (7)을 만족하면서 목적 함수 식 (12)를 최소화하는 트래킹 gain-up 제어기는 다음과 같다.

$$\frac{1.6 \times 10^6 s^3 + 6.2 \times 10^{10} s^2 + 6.4 \times 10^{14} s + 2.7 \times 10^{18}}{s^4 + 1.1 \times 10^6 s^3 + 1.3 \times 10^{11} s^2 + 2.9 \times 10^{15} s + 2.1 \times 10^{18}} \tag{21}$$

Fig. 4는 30 트랙 검색 제어 후 트랙킹 제어기 식 (17)을 적용하였을 때의 트랙킹 에러를 나타낸다. 검색 제어 동작은 약 3 ms 동안 실행되었고 4.2 ms에서 트랙 추종 제어가 시작되었는데 액추에이터 진동을 충분히 제어하지 못해 약 1 ms 이상 트랙킹 에러가 최대 허용 에러 0.03 μm 보다 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 설계된 트랙킹 gain-up 제어기 식 (21)을 적용하였을 때의 트랙킹 에러를 나타낸다. 검색 제어 동작은 약 3.2 ms 동안 실행되었고 4.2 ms에서 트랙킹 gain-up 제어를 시작하였는데 액추에이터 진동이 존재하더라도 트랙킹 에러가 최대 허용 에러보다 작게 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 외부 충격이나 검색 제어 후 발생 하는 트랙킹 액추에이터의 진동을 안정적으로 제어 하기 위한 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법을 제안 하였다. 안정적인 과도 응답 특성을 위해 극점 위치 제한 조건을 고려하였고 액추에이터 불확실성과 액추에이터 진동에 대해 적절한 gain-up 루프 게인과 제어 대역폭을 가지도록 하기 위해 loop gain-up 제한 조건을 고려하였다. 극점 위치 제한 조건과 loop gain-up 제한 조건을 만족하는 트랙킹 gain-up 제어기는 유전자 알고리즘과 LMI 설계 기법을 통합한 설계 방법에 의해 설계되었다. 제안된 트랙킹 gain-up 제어기 설계 방법을 DVD 기록기기의 트랙킹 gain-up 제어기 설계에 적용하였고 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2012학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2012AA179).

참 고 문 헌

(1) Jin, K. B. and Lee, M.-N., 2003, Vibration Control Technology of an Optical Disk Drive, Journal of KSNVE, Vol. 13, No. 1, pp. 48~55.

(2) Lee, M.-N. and Jin, K. B., 2009, Design of a Robust Gain-up Tracking Controller for a Stable Seek

Action of an Optical Disk Drive, IEEE Trans. Cons. Electr., Vol. 55, No. 3, pp. 1373~1379.

(3) Lee, M.-N. and Jin, K. B., 2008, A Controller Design Method for Constructing a Robust Track-following System, IEEE Trans. Cons. Electr., Vol. 54, No. 2, pp. 538~544.

(4) Moon, J.-H., Lee, M.-N. and Chung, M. J., 1998, Repetitive Control for the Track-following Servo System of an Optical Disk Drive, IEEE Trans. Contr. Syst. Tech., Vol. 6, No. 5, pp. 663~670.

(5) Lee, T. H., Low, T. S., Al-Mamum, A. and Tan, C. H., 1995, Internal Model Control Approach for Designing Disk Drive Servo-controller, IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 42, No. 3, pp. 248~256.

(6) Teo, Y. T. and Tay, T. T., 1996, 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.

(7) Yen, J. Y., Wang, F. J. and Chen, Y. Y., 1993, A Fuzzy Scheduling Controller for a Computerdisk File Track Following Servo, IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 40, No. 2, pp. 266~272.

(8) Lee, M.-N., Jin, K. B. and Lee, J. K., 2004, Design of a Robust Track-following Controller for Optical Disk Drives, IEEE Trans. Cons. Electr., Vol. 50, No. 2, pp. 723~731.

(9) Lee, M.-N. and Jin, K. B., 2005, An Optimal Tracking Controller Based on the Estimation of Tracking Vibration Quantity, IEEE Trans. Cons. Electr., Vol. 51, No. 2, pp. 478~484.

(10) Chilali, M. and Gahinet, P., 1996, H^∞ Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach, IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 41, No. 3, pp. 358~367.

(11) Scherer, C., Gahinet, P. and Chilali, M., 1997, Multiobjective Output-feedback Control via LMI Optimization, IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 42, No. 7, pp. 896~911.

(12) 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-2010, pp. 214~219.

(13) Lee, M.-N., Lee, H. K. and Jin, K. B., 2012, A Robust Track-following Control Satisfying Multiple

Constraints Using Genetic Algorithms, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 275~283.



Moonnoh Lee received the BS degree in electronic engineering from Kyungpook National University in 1991, the MS and the PhD 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 BS and MS degrees in electrical engineering from Hanyang University in 1985 and 1987, and the PhD 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 Korea University of Technology and Education, where he is currently a full professor.