

QFT 를 이용한 광디스크 드라이브의 강건 트랙킹 제어

전홍길* · 최진영* · 김대현** · 양현석*** · 박영필***

Robust Tracking Control of Optical Disk Drive Using QFT

Hong-Gul Jun, Jin-Young Choi, Dae-Hyun Kim, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

Key Words : Optical Disk Drive, Robust Stability, Robust Performance, QFT(Quantitative Feedback Theory), Tracking Servo

Abstract

Robust tracking controller of optical disk drive(ODD) is designed using quantitative feedback theory(QFT). Nominal plant model is identified from real system through modal test. Uncertainties and control performance of tracking servo are specified, and robust controller satisfying these specifications is designed in the QFT framework. To verify the performances of designed controller, experiment are performed in a digital signal processor(DSP) environment, and experimental results are compared with simulations.

1. 서 론

광디스크 드라이브는 현재 가장 많이 사용되고 있는 정보저장기기의 하나로, 반사면 상의 나선형 트랙에 디지털화된 신호로서 정보를 저장하게 된다^[1]. 광디스크의 표시인 CD 플레이어의 경우, 현재 매우 보편적인 전자제품이 되었고, 최근에는, 기록용 미디어, 짧은 파장의 레이저 다이오드, 그리고 데이터 압축 기술 등의 급속한 발전에 의해 2시간 이상의 고화질 동영상을 120mm 직경의 디스크에 저장할 수 있는 DVD의 시장이 급속도로 확대되고 있다.

광디스크의 성능을 개선하는 연구 중 가장 활발하게 진행되고 있는 분야로는 기록-재생 및 데이터 액세스 속도를 개선을 위한 연구를 들 수 있는데, 이를 위해 디스크의 회전 속도의 증가가 요구되고, 이는 서보 대역의 증가를 필연적으로 수반하게 된다. 이에 따라 광픽업의 진동 모드를 가진시켜, 제어기가 불안정해질 가능성이 증가하게 되었다. 또한, 휴대용 광디스크의 급속한 보급과 더불어 전력 소비 및 외부 충격에 대한 민감도에

대한 제한이 광디스크를 설계하는데 있어 매우 중요한 고려사항으로 부각되고 있다^[2].

본 연구에서는, 광디스크의 불확실성과 외부 외란에 대한 사양에 대해 강건 안정성 및 성능의 확보를 위해 Quantitative Feedback Theory를 활용하여 제어 시스템을 설계하였다. Horowitz에 의해 현재의 형태로 발전된 QFT 기법에서는, 제어 시스템이 만족하여야 하는 성능 사양 및 강건성 조건을 주파수역에서의 공칭 개루프 전달함수가 가질 수 있는 영역으로 변환되고, 공칭 모델과 제어기로 표현되는 개루프 전달함수가 그 영역내에 있도록 제어기를 설계하게 된다. 제어기 설계를 위한 플랜트의 공칭 모델을 얻기 위해서는, 실험에서 얻어진 광픽업의 주파수 응답 함수를 곡선 적합하는 모달 시험 기법이 활용되었다. 측정 오차, 정의된 플랜트 불확실성 및 강건 성능의 확보를 위한 제어 시스템 사양 등을 산정하였고, 이를 공칭 개루프 전달함수의 경계로 Nichol 선도 상에 표현하였다. QFT의 장점으로는 제어 시스템의 구조를 미리 지정할 수 있다는 것을 들 수 있는데, 이를 이용하여 미리 정의된 구조의 제어기를 주파수 영역에서 불확실성 및 강건 성능을 만족하도록 제어 시스템을 성형하게 된다^[3]. 본 연구에서는 설계된 제어시스템의 성능 및 효용성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

* 연세대학교 대학원 기계공학과, CISD

** 유니슨 기술연구소

*** 연세대학교 기계전자공학부, CISD

2. 모델링

광디스크 드라이브 시스템의 고속 역세스나 초정밀 위치 결정 등의 연구를 하는데 있어 시스템의 구조를 단순화하여 모델링하기 위해서는 일반적으로 피기백(piggyback) 시스템의 형태가 활용되고 있다^[4]. Fig.1에 광픽업의 트래킹 및 고속 역세스 운동을 단순화한 모델을 나타내었다.

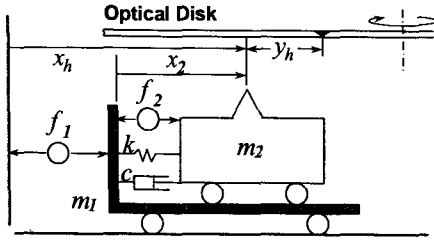


Fig. 1 Optical Pickup Model in Tracking Motion

이 시스템은 정밀 위치 결정 시스템과 조동 시스템으로 구성되어있다. 광픽업의 대물렌즈는 서스펜션 스프링에 의해 지지되는데, 이를 미동 작동기에 의해 트래킹 방향으로 구동하게 된다. 여기에서, m_2 는 대물렌즈를 이동시키는 미동 작동기의 질량, k 는 서스펜션 스프링의 강성, c 는 서스펜션 스프링의 감쇠 계수, 그리고 f_2 는 미동 작동기의 구동력을 나타낸다. 조동 시스템은 조동 작동기에 의해 미동 작동기 시스템인 광픽업을 구동하게 되는데, 여기에서 m_1 은 조동 시스템의 질량, f_1 은 조동 작동기의 구동력을 나타낸다. 이러한 시스템의 운동 방정식은 (1), (2)와 같다.

$$m_1(\ddot{x}_h - \ddot{x}_2) = kx_2 + c\dot{x}_2 + f_1 - f_2 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_h = -kx_2 - c\dot{x}_2 + f_2 \quad (2)$$

여기에서 두개의 질량이 서스펜션 스프링에 의해 연결되어 있으므로, 2-강체 진동 모드가 발생하게 되는데, 이때의 고유진동수는 (3)과 같다. 이러한 진동 모드를 주공진이라 부른다.

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)k}{m_1 \cdot m_2}} \quad (3)$$

일반적인 광픽업의 경우에는, m_1 이 m_2 에 비해 매우 크다. 따라서 주공진 주파수는 미동 구동기의 고유진동수와 거의 같다. 또한, 트래킹 운동시의 조동 작동기에 의한 구동력 f_1 은 미동 작동

기의 구동력 f_2 에 비해 매우 작는데, 이에 따라 트래킹 운동시에는 조동 작동기의 영향을 무시할 수 있게된다. 따라서, 트래킹 운동은 미동 작동기의 1자유도 진동 시스템으로 모델링이 가능하다.

그러나, 미동 구동기 시스템에는 고주파수의 부공진점이 존재한다. 이는 대물렌즈가 고정된 렌즈홀더의 구조진동에 기인하는데, 이를 2차 시스템으로 모델에 반영할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서 트래킹 운동시의 광픽업의 모델로는 주공진과 부공진이 포함된 4차 단일 입출력 시스템이 사용되었는데, 이를 (4)에 나타내었다.

$$G(j\omega) = G_{trk}(j\omega) + G_{sub}(j\omega) \quad [V/V] \quad (4)$$

여기에서,

$$G_i(j\omega) = \frac{r_i}{j\omega - p_i} + \frac{\bar{r}_i}{j\omega - \bar{p}_i}$$

$$p_i = \omega_{n,i}(\zeta_i + j\sqrt{1 - \zeta_i^2})$$

모델의 각종 계수를 얻기 위해서 모달 해석을 수행하였다. Fig.2에 모델 및 실제 시스템의 주파수 응답 함수를 나타내었고, 얻어진 공칭 모델의 모달 파라미터들은 Table 1과 같다.

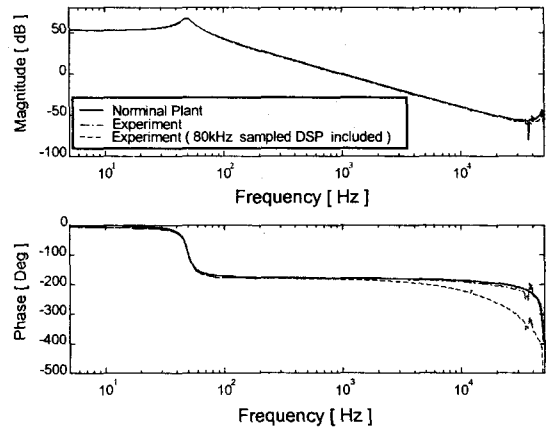


Fig. 2 Frequency Response Function of Optical Pickup

Table 1 Modal Parameters of Model

i	trk	sub
r_i	-0.03612-j51.124	0.03612-j0.02096
p_i	-28.482-j311.03	-11436-j3.004e+5
$\omega_{n,i}$	$2\pi \times 49.709$	$2\pi \times 47.847e+3$
ζ_i	0.0919	0.03804

3. 제어 시스템 사양

제어 시스템의 강건 안정성을 확보하기 위해서는, 불확실성의 영역 및 상대 안정도에 대한 사양이 정의되어야 한다. 본 연구에서 고려된 공칭 플랜트 모델의 시스템 변동 중 중요한 것들은 다음과 같다.

- (a) $\omega_{n, rk}$ 에서의 $\pm 6\text{dB}$ 의 변동
- (b) $\omega_{n, sub}$ 에서의 $\pm 2.5\%$ 의 변동
- (c) 주파수 응답 진폭의 $\pm 2\text{dB}(26\%)$ 의 변동

이에 따른 불확실 시스템의 주파수 응답 집합은 (5)와 같이 정의된다.

$$\{G(j\omega) = k[G_{rk}(j\omega) + G_{sub}(j\omega)]\} \quad (5)$$

여기에서,

$$\omega_{n, rk} \in 2\pi[43.709, 55.709]$$

$$\omega_{n, sub} \in 2\pi[46650.37, 49042.69]$$

$$k \in [0.794, 1.259]$$

이러한 변동들에 대해 적절한 격자를 선정하게 되면, 전체 집합에 대해 제어 시스템 설계에 적절한 근사화된 주파수 응답 집합을 얻을 수 있다. 다양한 주파수에서의 플랜트 템플릿을 Fig.3에 나타내었다. 여기에서, 플랜트 템플릿은 각각의 고정된 주파수에 대해서 5°개의 요소들로 집합이 구성된다.

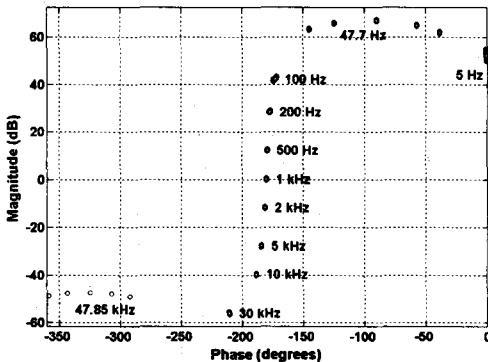


Fig. 3 Plant Templates at Several Frequencies

강건 안정도에 대한 사양으로서, 모든 불확실

플랜트 모델의 집합에 대해 제어 시스템의 위상 여유(PM)가 40° 보다 커야 한다고 규정하였다. 이에 따라 다음과 같은 강건 안정성 조건이 얻어진다.

- (d) $PM \geq 40^\circ$

앞서 서술한 강건 안정성을 위한 조건과 더불어, 제어 시스템의 사양으로 제어기의 성능이 규정되어야 하는데, 이러한 성능 사양으로는 출력 외란 제거 성능이 반영되었다. 광디스크 드라이브에서 발생하는 외란의 주요 원인으로는 트랙 위치가 일정하지 않은 것과 외부 충격을 들 수 있다. 트랙 위치의 사양의 경우에는 CD에 대한 규정에 따라 정의된다. 외부 충격에 대한 사양은 규정에 대해 특별히 정의되어 있지 않지만, 휴대용 광디스크 드라이브의 경우 5Hz에서 150Hz의 범위에서 충격 외란이 발생하는 것으로 알려져 있다^[5]. 이러한 외란들은 제어 시스템의 감도에 대한 구속 조건을 결정하는데 활용할 수 있다. 제어 시스템이 만족하여야 하는 감도 성능 사양을 Fig.4에 나타내었다.

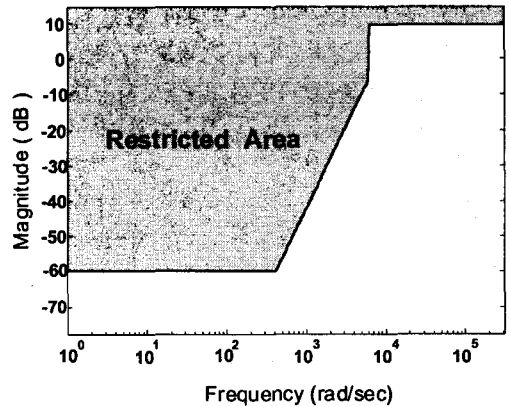


Fig. 4 Sensitivity Specification

제어 시스템에 대한 추가된 구속 조건으로는, 제어기의 차수가 가능한 저차로 설정되어야 한다는 것을 들 수 있는데, 이는 빠른 샘플링 시간의 제어 시스템 구현에 시스템의 차수가 매우 큰 영향을 미치기 때문이다.

4. QFT에 의한 제어기의 설계

QFT는 주파수 영역에서 제어 시스템을 설계하는 기법으로, 미리 규정된 플랜트 불확실성에 대

해 원하는 강건 설계를 위해 Nichol 선도를 이용한다. QFT 기법에서는, 강건 성능 문제를 대수학 문제와 구속된 해석적 문제로 분해하여 해석하게 된다. 대수학 문제에는 페루프 주파수 응답 구속 조건의 공칭 개루프 전달 함수의 주파수 응답 고속 조건으로의 사상이 포함되어 있다. 이 때, 변환은 공칭 루프의 이득 및 위상에 대한 2차 부등식을 이용하여 수행된다. 이러한 2차 부등식은 QFT 경계를 계산하는데 활용된다^[5]. 여러 발표된 문헌에 의하면, 만약 QFT 문제가 적어도 하나의 해가 존재한다면, 무한개의 등가해가 존재한다고 알려져 있다. QFT에서는, 최적의 공칭 루프는 강건 성능을 위한 경계를 만족하고, 공칭 페루프 안정성을 만족하며, 고주파수 이득을 최소화하는 것을 말한다. Fig.5에 본 연구에서 개발된 강건 트랙킹 서보 시스템의 구조를 나타내었다.

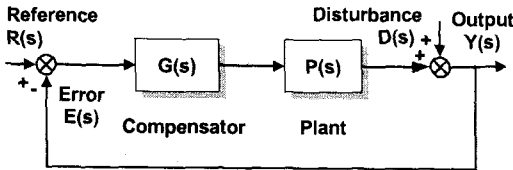


Fig. 5 Block-Diagram of Tracking Servo System

QFT 설계 과정에서는, (6)과 같은 개루프 전달 함수를 이용하여 개발된 제어기의 강건 안정성과 강건 성능을 확인하게 된다. 이 연구에서는, MATLAB을 이용하여 QFT 설계를 수행하였다^[6].

$$L(s) = G(s)P(s) \quad (6)$$

앞서 정의된 강건 성능 조건과 강건 안정성 조건에 대한 사상에 의해, QFT 설계를 위한 구속 경계를 계산할 수 있다. (7)에 의해 정의된 불확실성에 대한 영역과 위상 여유 조건이 Nichol 선도 상의 강건 여유 경계로 변환되며, 이 결과를 Fig.6에 나타내었다. 여기에서 이러한 경계들은 개루프 전달함수의 형태로부터 얻어지게 된다.

$$|s|_{\max} = \frac{1}{\alpha}, \quad |T|_{\max} = \left| \frac{L}{1+L} \right|_{\max} \leq \mu$$

$$GM \cong \frac{1}{1-\alpha}, \quad PM \cong 2 \sin^{-1} \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

$$GM \cong 1 + \frac{1}{\mu}, \quad PM \cong 180 - \theta, \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{0.5}{\mu^2} - 1 \right)$$

강건 출력 외란 제거 성능에 대하여서는, Fig.4의 민감도 사양으로부터 (8)을 이용하여 QFT 경계로 변환된다. Fig.7에 계산된 강건 출력 외란 제거 경계를 나타내었다.

$$|S| = \left| \frac{1}{1+L} \right| = \left| \frac{1}{1+l} \right| \leq |S_{upper}|, \quad L = \frac{1}{l} \quad (8)$$

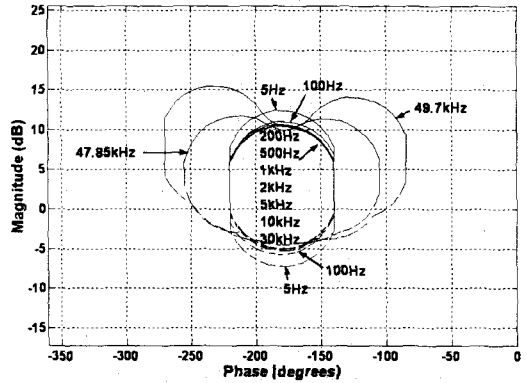


Fig. 6 Robust Margin Bounds

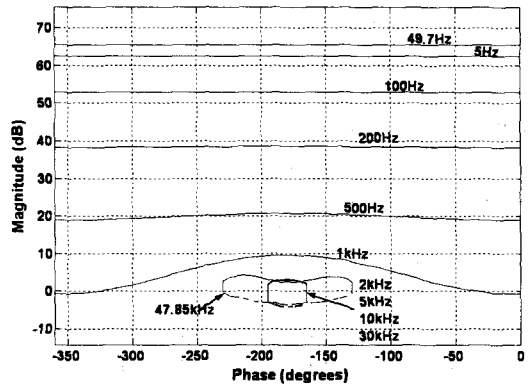


Fig. 7 Robust Output Disturbance Rejection Bounds

Fig.6과 Fig.7의 두 QFT 경계의 조합에 의해, 최악의 조건에 대한 경계인, 교차 경계(intersection of bounds)가 얻어지게 된다. 이 경계는 제어기의 설계에 사용되며, Fig.8에 계산된 결과를 나타내었다.

본 연구에서는 광디스크의 강건 트랙킹 제어를 위해 설계되는 제어기의 구조를 각 1개의 Lead 보상기, Lag 보상기 및 저주파 통과 필터로 규정하고 QFT에 의해 설계 파라미터들을 계산하였다. (9)에 설계된 제어기를 나타내었다.

$$G(s) = \frac{3.444}{s/9.585e4+1} \frac{s/7085+1}{s/9.294e4+1} \frac{s/4.742e4+1}{s/4.047e4+1} \quad (9)$$

계산된 제어기는 앞서 계산된 강건 안정성 및 강건 성능에 대한 조건을 모두 만족하게 되며, 이를 Fig.8 에 나타낸 개루프 전달함수의 루프 형성 결과로 확인할 수 있다.

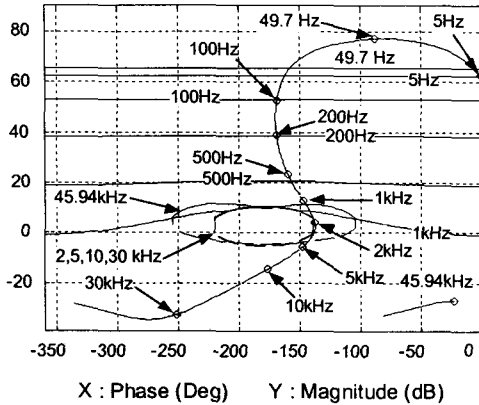


Fig. 8 Loop Shaping of Open-loop Transfer Function

5. 적용 결과

개발된 제어기의 실제 시스템에의 구현을 위해 DSP 시스템이 활용되었다^[7]. 사용된 DSP 시스템은 dSPACE 사의 DS1103 으로, 연산 장치로는 333MHz 의 Motorola PowerPC 가 사용되며, 외부에서 입력되는 아날로그 신호는 800ns 의 변환 시간을 갖는 12bit ADC 를 통해 디지털 신호로 변환되고, 제어기에 의해 계산된 디지털 제어 신호는 5 μ s 의 정착 시간을 갖는 12 bit DAC 를 통해 아날로그 신호로 변환되어, 20mA/V 의 게인을 갖는 전류 증폭기를 통해 광픽업의 VCM(voice coil motor) 에 인가되게 된다. 설계된 제어기는 Windows NT 기반에서 운용되는 MATLAB real-time workshop 과 dSPACE ControlDesk 환경에서 80kHz 샘플링 시간으로 연산 및 제어 신호 입출력이 이루어지게 하였다.

개발된 제어 시스템의 개루프 전달함수를 Fig.9 에 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이, QFT 에 의한 제어기는 외란 제거 성능 사양을 만족함을 알 수 있다. 실험 결과에서 5kHz 이상의 고주파수에서 진폭 및 위상이 시뮬레이션 결과와 일치하지 않는 것은 80kHz 샘플링에 의한 제어기의 이산화에 따른 시간지연에 의한 것으로, 이러한 시간 지

연 특성은 Fig.2 에서 DSP 시스템이 포함된 경우의 주파수 응답함수의 결과에서도 확인할 수 있다. 하지만 이러한 왜곡 현상은 제어 대역에서 충분히 떨어진 곳에서 발생하므로, 제어 시스템의 성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

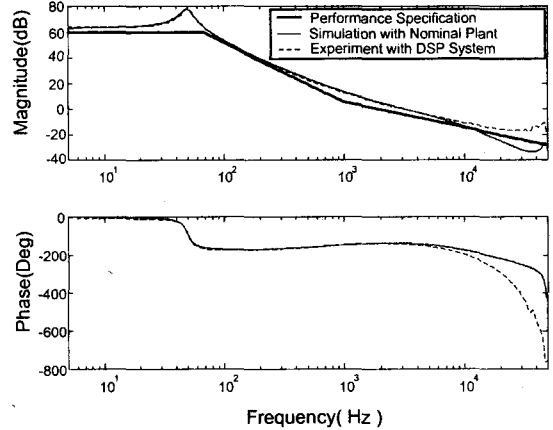


Fig. 9 Open-loop Transfer Function of Control System

출력 외란 제거 성능을 평가하기 위해 페루프 제어 시스템의 민감도 특성을 Fig.10 에 나타내었다.

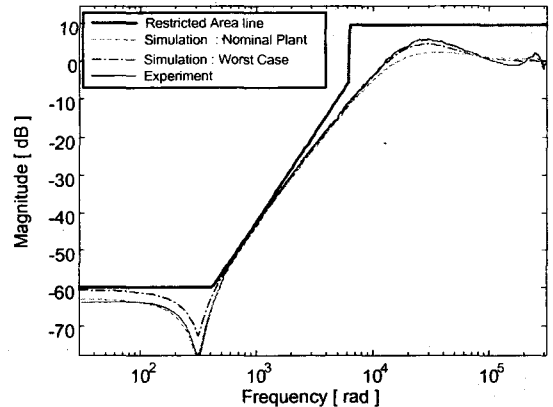


Fig. 10 Sensitivity of Closed-loop Control System

이 결과에서 알 수 있듯이, 개발된 제어기가 불확실 플랜트가 최악인 경우에 대해서도 요구되는 성능을 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는, 광디스크 드라이브의 트랙킹 서보 시스템에 대해, 강건 안정성 및 강건 성능을

만족하는 제어기의 설계를 수행하였다. 이를 위해, 먼저 광픽업 구동기 모델의 비구조적 불확실성 및 구조적 불확실성에 대해 수학적으로 그 범위를 표현하고, 외부 외란에 대한 제어 시스템의 성능에 대한 사양을 규정하였다. 정의된 불확실 시스템에 대해 40°의 충분한 위상 여유를 보장하고, 출력 외란 제거 사양을 만족하는 강건 제어 시스템의 설계를 위해 **Quantitative Feedback Theory**를 활용하였으며, 이에 따라 제어기의 구조를 지정하고, 이 제어기가 모든 사양을 만족하도록 제어기의 설계 변수들을 계산할 수 있었다. 개발된 제어 시스템의 검증을 위해서 DSP 시스템 기반으로 제어기를 구현하여 실험을 수행하였으며, 실험 및 시뮬레이션 결과 개발된 트래킹 서보 시스템이 강건 안정성 및 강건 출력 외란 제거 성능을 갖음을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과 개발된 제어 시스템은, QFT의 제어기 구조 지정 특성에 의해, 3차의 제어기로 강건 안정성 및 강건 성능 사양을 만족하게 하였으며, 이에 따라 현재 상용화되고 있는 광디스크 드라이브의 서보 시스템에 적용하는데 큰 어려움이 없을 것으로 사려된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF) 지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호:1997G0105)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bouwhuis, G. et al., Principles of optical disc systems, 1985, Adams Hilger Ltd., Bristol, UK.
- (2) Steinbuch, M. et al., "μ-Synthesis for a Compact Disc Player", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 8, pp. 169-189, 1998.
- (3) Choi, S. B., et al., "Vibration and Position Tracking Control of Piezoceramic-Based Smart Structure Via QFT", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 121, pp. 27-33, March 1999.
- (4) Toyama, S., et al., "Fast Seek Servo Method Using Two-Degree-of-Freedom Control for Magneto-Optical Disk Drives", Information Storage and Processing Systems, Vol. 3, pp. 75-82, ASME 1997.
- (5) Chait, Y., et al., "Design and Implementation of a QFT Controller for a Compact Disc Player",

- Proceedings of the American Control Conference, pp. 3204-3208, Baltimore, Maryland, June, 1994.
- (6) Borghe, C., et al., Quantitative Feedback Theory Toolbox - For Use with MATLAB, 1994, The MATH WORKS Inc.
- (7) DSPACE GmbH, Real-Time Interface - Implementation Guide, Paderborn, Germany, May 1999.