

광 디스크 드라이브의 편심 보상을 위한 적응 반복 제어

Adaptive Repetitive Control for an Eccentricity Compensation of Optical Disk Drive

서삼준, 김동원*, 박귀태*

Sam-Jun Seo, Dongwon Kim*, and Gwi-Tae Park*

안양대학교 전기전자공학과

*고려대학교 전기공학과

요약

본 논문에서는 변하는 주기 기준 신호를 추종하기 위한 광학 디스크 드라이브의 적응 반복 제어 기법을 제시한다. 주기가 알려진 주기적인 외란은 반복 제어 개념을 이용하면 충분히 제거할 수 있다. 광학 디스크 드라이브는 다양한 속도를 지원하기 때문에 변하는 주기의 외란을 가진다. 기준 주기 변화를 추종하기 위해 샘플링 주파수를 변화시키는 반복 제어를 기초로 하여 주기가 변하는 외란을 다루기 위한 적응 반복 제어를 제안한다. 제안한 제어 기법은 반복 제어기와 주파수 발생기로 구성된다. 전자는 외란 주파수의 고정 배수에서 동작하는 가변 샘플러를 사용하고 후자는 외란 주파수에 따라 변하는 샘플링 주파수를 발생한다. 광학 디스크 드라이브 제어 대한 실험 결과에서 제안한 기법의 우수성과 랜덤 탐색 시간의 개선을 보인다

Abstract

This paper presents an adaptive repetitive control scheme for optical disk drives to track a variable periodic reference signal. Periodic disturbances can be adequately attenuated using the concept of repetitive control, provided the period is known. Because optical disk drives support various speeds, they have the varying periodic disturbances. Based on repetitive control to change sampling frequency to follow the change of reference period, an adaptive repetitive control is proposed in order to deal with such disturbances. The proposed control consists of the repetitive controller and the frequency generator. The former uses a varying sampler operating at fixed multiple times of the disturbance frequency and the latter generates the changeable sampling frequency based on the disturbance frequency. The experimental results on the control of an optical disk drive demonstrate the effectiveness of the proposed schemes and the improvement of random access time as well

Key Words : Optical disk drives, eccentricity compensation, adaptive repetitive control

1. 서론

반복 제어는 1981년 Inoue, Nakano 외 다수가 IFAC Congress에 그 주요 아이디어를 소개함으로써 시작되었고 1988년에 Hara Yamamoto가 그 제어방식의 안정도 분석과 설계 방법을 소개 하였다[1]. 초기에는 연속 시간 영역에서의 반복 제어 시스템이 제안 되었고 안정성과 강인성 확보를 위한 수정 반복 제어기가 제안되었다[2][3][4]. 이 후 이산 시간 영역에서 반복 제어 시스템이 제안되었다[5][6]. 이러한 이산 시간 영역에서의 반복 제어기도 모델링 불확실성에 대한 시스템의 강인성과 안정성의 확보를 위해 수정 반복 제어기가 제안되었다[7][8][9]. 이러한 반복 제어 기법은 반복 작업을 수행하는 시스템인 로봇 제어[5][9], 디스크 드라이브의 헤드 위치 제어 시스템[8], 광학 디스크 드라이브의 트랙 추종 시

스템[4][10]등에 적용되어 반복적인 주기를 가지고 그 주기가 알려진 경우에 그 오차를 효과적으로 감소시키기 위하여 사용되었다.

광학 디스크 기기에서 디스크의 제조상의 제한과 디스크가 회전 시에 중심의 흔들림에 의한 수평 에러가 발생하게 된다. 이러한 수평 에러를 편심이라고 하는데 디스크의 회전 주기와 비례하며 고배속 시 기존의 선형 제어기로는 적절한 제어가 불가능한 경우가 많다.

기존의 편심 제어 방법은 일정시간 동안 편심 성분을 메모리에 저장하여 그 값을 반복적으로 출력하는 방법이나 기존의 반복 제어를 사용하였다. 그러나, 전자의 방법은 일정시간 동안 디스크의 상태에 따라 잡음이나 흠집 등의 영향으로 원하는 편심 에러가 추출되지 않는 경우가 빈번히 발생하였고 배속 변경이나 등선 속도(Constant Linear Velocity)인 경우에는 기존의 반복 제어로도 편심 보상이 사실상 불가능하였다. 이러한 제한, 즉 변화하는 주기에 대한 외란을 극복하고자 개선된 반복 제어를 제안하였다[11][12][13]. 그러나 이러한 적응 반복 제어기는 실제 구현이 복잡하여 광학 디스크에 적용하는 데는 무리가 있었다.

접수일자 : 2004년 12월 15일

완료일자 : 2005년 2월 15일

이러한 단점을 보완하기 위하여 변화하는 외란에 대한 적절한 제어를 위해 샘플링 주파수 발생기를 포함하는 적응 반복 제어 기법을 제안하였다. 제안한 적응 반복 제어를 통하여 편심 보상 제어 기능을 추가함으로써 보다 높은 배속에서도 편심 디스크를 동작시킬 수 있었을 뿐 아니라 점프 시 평균 탐색 시간의 편차도 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한 배속 변경시 뿐만 아니라 등선 속도에서 편심 성분의 주파수가 가변 하는 경우에도 안정적인 편심 보상을 수행하도록 하였다. 이러한 기능을 마이크로프로세서 및 디지털 필터를 사용하여 하드웨어 및 소프트웨어로 서버 시스템을 구현하고 실험 세트에 적용하여 제안한 서버 시스템의 우수성을 입증하였다.

2. 편심 보상

편심이란 디스크상의 트랙이 정확한 동심원을 그리고 있어야 하나 제조상의 제한과 디스크 회전 시 중심의 흔들림으로 수평 에러가 발생하는 것을 말한다. 회전시 발생하는 흔들림은 기구계에서 어느 정도의 사양 안에서 만족시킬 수 있으나 제조상에 나오는 편심 성분은 상당히 크게 되어 있다. 그리하여 최초의 오디오용 CDP 1배속 기준으로 하여 편심량을 제한하는데 최대 편심량은 280 μm로 정하고 있다.

그림 1은 편심과 제어기의 편심 에러를 나타내고 있다. 최대 편심 허용량은 CD 1배속을 기준으로 정하여졌지만 오디오용 디스크가 데이터용 디스크로 사용됨에 따라 그 탐색 속도는 계속 증가하여 현재는 52X 배속까지 증가하여 왔다. 이에 따라 기존의 제어기만을 가지고 280 μm의 편심을 추종하는 것은 불가능하게 되었는데 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 시도들이 이루어 졌다[2][3][4].

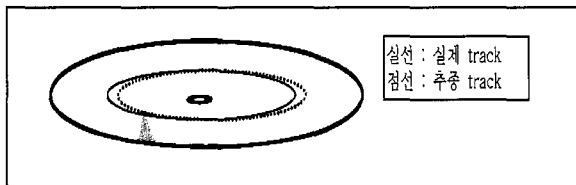


그림 1. 편심과 편심 에러
Fig. 1. Eccentricity and eccentric error

디스크 드라이브 시스템에 존재하는 편심은 서버 시스템에 있어서 주요한 외란 성분으로 시스템의 성능을 크게 제한한다. 광디스크 기기의 고배속화에 따라서 디스크 드라이브 시스템에 미치는 편심의 영향은 더욱 크게 나타나므로 이를 효과적으로 제거하지 않는 한, 편심 디스크에 대한 드라이브 시스템의 구동 배속은 증가시킬 수 없게 된다. 기존의 제어기를 가지고는 140 μm이상의 편심 디스크를 20배속 이상에서 안정되게 제어하는 것이 불가능하였다.

3. 반복 제어

반복 제어의 개념은 외란이 가지는 반복적인 주기의 성질을 이용하여 이 신호에 대한 중첩을 가함으로써 외란을 제거하는 방식에 기초하고 있다[1]. 디지털 반복 제어기는 이산 시간에서 메모리 루프를 이용하여 해당 외란의 주기를 N샘플링 하여 구성하고 있다.

그림 2에 반복 제어기의 블록선도를 나타내었다. 여기서 C는 제어기이고 P는 액츄에이터를 포함한 기구계이다. 초기에 제안되었던 반복 제어기의 구조는 C와 P로 이루어지는 기존의 폐루프 안에 반복 제어기를 삽입하여 구현한다[5][6].

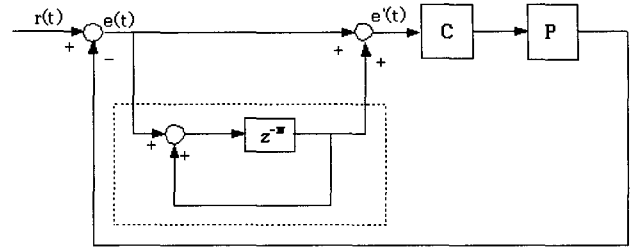


그림 2. 반복 제어의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of repetitive control

여기서 r(t)는 기준입력, e(t)는 입력에 대한 오차, C는 일반 제어기, P는 제어 대상, 점선인 사각형안이 반복 제어를 말한다. 또한, z^{-N}e(t) = e(t - N)이다. N은 주기적 외란의 한 주기 동안에 샘플링 개수를 의미한다. 샘플링 주기가 T라고 하였을 때 외란의 주기는 NT로 표현되고 외란의 주기에 적절한 샘플링 주기를 선택하여 외란을 N개 만큼 저장한 후 외란의 한 주기 NT가 지난 후에 이전의 외란을 상쇄함으로써 외란을 제거하고 있다.

e(t)에서 e'(t)까지의 전달 함수를 구하여 보면 다음과 같다.

$$\frac{e'}{e} = 1 + \frac{z^{-N}}{1 - z^{-N}} = \frac{1}{1 - z^{-N}} \quad (1)$$

폐루프 안에 반복 제어기를 더하는 것은 $\omega = \frac{2\pi k}{NT}, k=1, 2, \dots, N$ 의 주파수에서 무한 이득을 가지게 한다. 이러한 무한 이득은 폐루프 시스템의 안정성을 떨어뜨리게 된다. 이러한 반복 제어기의 강인성과 안정성을 보장하는 방법은 Tomizuka 등에 의해서 제안 되었다[6]. 이러한 안정성을 보장하기 위하여 그림 3과 같이 두개의 필터를 반복 제어기 내에 추가하였다.

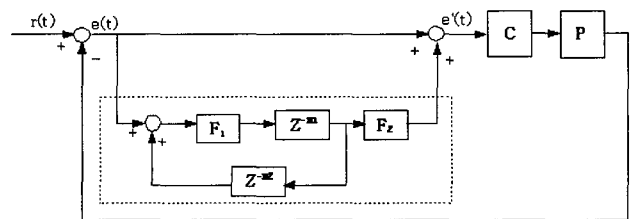


그림 3. 수정 반복 제어의 블록선도
Fig. 3. Block diagram of modified repetitive control

다음의 식이 수정 반복 제어기의 전달 함수이다.

$$\begin{aligned} \frac{e'}{e} &= 1 + F_2 \frac{F_1 z^{-M}}{1 - F_1 z^{-(M+N)}} \\ &= \frac{1 - F_1 z^{-M}(z^{-N} - F_2)}{1 - F_1 z^{-(M+N)}} \end{aligned} \quad (2)$$

다. 그림 6과 같이 두 개의 타이머를 연결하여 캡처 타이머가 FG의 펄스 폭을 세어 한 개의 FG당 원하는 샘플링의 개수(M)로 나누어 매치 타이머에 입력하면 1개의 FG에 N개의 신호가 발행하게 된다.

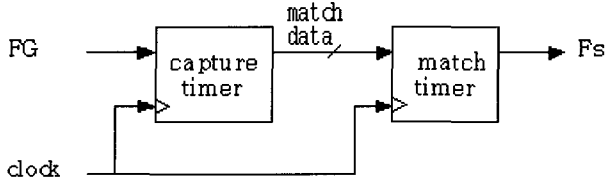


그림 6. 주파수 발생기
Fig. 6. frequency generator

그림 7은 주파수 발생기의 타이밍도이다. FG를 캡처 타이머에서 세어 그 값(M)을 원하는 FG당 샘플링 개수(M)로 나누어 매치 타이머에 입력되고 이것에 해당하는 값인 M/N이 될 때 매치 타이머는 N개의 펄스(Fs; Sampling Frequency signal)를 발생시키고 있다

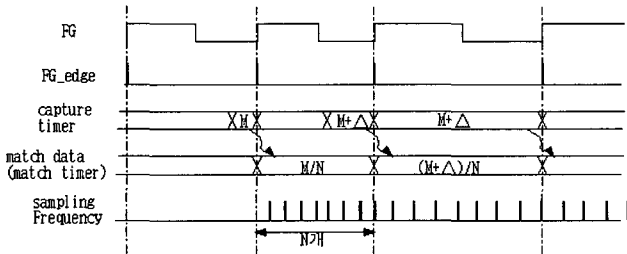


그림 7. 샘플링 주파수 발생기의 타이밍도
Fig. 7. Timing diagram of sampling frequency generator

이 펄스(Fs)를 본 논문의 제안한 적응 반복 제어기의 샘플링 주파수로 사용하고 있다. 실제 구현에 있어 FG는 1회전에 18개가 나오는 스피들 모터를 사용하였고 FG 펄스의 폭은 상승 에지(rising edge)를 기준으로 세도록 설계되었다. 위의 타이밍도는 FG내에 8개의 Fs 신호가 나오도록 설계된 주파수 발생기의 타이밍도이다. 위의 타이밍도에서 L번째의 펄스폭과 L+1번째의 펄스폭은 8개의 구간으로 나눌 때 L과 L+1번째의 신호 펄스폭의 차이가 12.5%(1/8) 이상일 경우에는 Fs의 개수가 8개 이상 혹은 이하의 개수가 나올 수 있다. 실제의 경우에는 이 이상의 변화가 생기는 것은 거의 발생하지 않으므로 무시해도 좋다. 실제의 경우 일반적으로 24배속(80Hz)에서 48배속(160Hz)으로 증가하는 데 5초 정도의 시간이 걸리는 것으로 측정되었다.

FG당 9개의 펄스가 나오므로 80Hz인 경우 개당 8개씩 샘플링 하여 80 x 9 x 8 = 5.76kHz의 샘플링 주파수를 가지게 되고 160Hz인 경우 11.52kHz의 샘플링 주파수를 가지게 된다.

4. 2 제안한 적응 반복 제어기

본 논문에서 제안한 적응 반복 제어기는 기존에 존재하였던 반복 제어기를 수정 보완하였다. 변화하는 외란에 대한 적절한 제어를 위하여 앞에서 설명한 샘플링 주파수 발생기를 사용하였다.

그림 5에서의 반복 제어기는 정상 상태가 아닌 탐색 구간

에서는 개 루프나 일반적인 폐 루프가 형성되어 그 특성은 일반 제어기로 설명될 수 있다. 편심이 있는 경우에는 반복 제어기가 동작하여 전체 루프 안에 반복 제어기가 삽입되는 구조를 가지게 된다.

기준입력 $r(t)$ 의 z변환을 $R(z)$, 오차 $e(t)$ 의 z변환을 $E(z)$, 시스템의 출력의 z변환을 $C(z)$, $G_r(z)$ 는 반복 제어기의 전달 함수, 일반 제어기의 전달 함수는 $G_o(z) = C(z)P(z)$ 이다. 그리고 z^{-N} 은 시간지연 요소, T는 샘플링 시간, NT는 반복 주기를 나타낸다. 여기서, 반복 주기는 하모닉 오차의 기본 주파수와 주기가 같다. 주기성을 갖고 그 주파수가 정수 k에 대하여 $2\pi k/NT(\text{rad/s})$ 인 신호를 하모닉 신호라 하고 그렇지 않은 다른 모든 신호를 비하모닉 신호라고 하자.

반복 제어기가 없을 경우 폐 루프 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_s(z) = \frac{G_o(z)}{1 + G_o(z)} \quad (3)$$

일반적으로 $G_s(z^{-1})$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_s(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (4)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \quad (5)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n} = B^+(z^{-1})B^-(z^{-1}) \quad (6)$$

여기서 $B^+(z^{-1})$ 는 상쇄 가능한 부분을 $B^-(z^{-1})$ 는 상쇄 가능하지 않는 부분을 나타내고 있다. 즉 $B^+(z^{-1})$ 은 복소수 평면에서 단위 원 위 혹은 안에 있는 해와 $B^-(z^{-1})$ 은 단위 원 밖에 있는 해로 구성된다[5][7].

또한, 반복 제어기의 전달함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_r(z) = \frac{z^{-NF}}{1 - z^{-NF}} \quad (7)$$

(3)으로부터 G_o 를 구하면 다음과 같다.

$$G_o(z) = \frac{G_s(z)}{1 - G_s(z)} \quad (8)$$

(7)과 (8)을 이용하여 그림 7의 전체 시스템의 폐루프 전달함수 $G_c(z)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_c(z) &= \frac{(1 + G_r)G_o}{1 + (1 + G_r)G_o} = \frac{(1 + \frac{Fz^{-N}}{1 - Fz^{-N}})G_o}{1 + (1 + \frac{Fz^{-N}}{1 - Fz^{-N}})G_o} \\ &= \frac{G_o}{1 - Fz^{-N} + G_o} \\ &= \frac{G_s}{1 - Fz^{-N} + Fz^{-N}G_s} \end{aligned} \quad (9)$$

위 식의 분모에 (4)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$A(z^{-N})(1 + Fz^{-N}(B^+(z^{-N})B^-(z^{-N}) - 1)) = 0 \quad (10)$$

여기서 $G_s(z^{-1})$ 가 점근적으로 안정하고 F가 (11)를 만족한다면 시스템은 점근적으로 안정하다.

$$|B^+(z^{-N})B^-(z^{-N})-1| < \frac{1}{|F(z)|} \quad (11)$$

오차 전달 함수를 $G_e(z)=1-G_{cl}(z)$ 로 정의하면 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_e(z) \approx G_{re}(z)G_{eo}(z) \quad (12)$$

여기서 $G_{eo}(z)$ 는 반복 제어기 $G_{re}(z)$ 가 적용되지 않는 경우이다. 또한 $G_{re}(z)$ 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$G_{re}(z) = \frac{1}{1+G_s(z)G_s(z)} = \frac{1-Fz^{-N}}{1-Fz^{-N}+Fz^{-N}G_s(z)} \quad (13)$$

여기서 $|G_s(z)|=1$ 이고 $\angle G_s(z)=0$ 이면 $G_{re}(z)$ 는 (14)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$G_{re}(z)=1-Fz^{-N} \quad (14)$$

그러면, 하모닉 오차는 정수 k 에 대하여 $2\pi k/NT$ 에서만 일어나므로 z^{-N} 는 1이어야 한다. 그러므로 $|G_{re}(z)|$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$|G_{re}(z)|=1-|F(z)|_{z=\exp(i\omega T)} \quad (15)$$

$G_s(z)$ 가 점근적으로 안정하고 $F(z)$ 가 저역 통과 필터로 주어지고 $|F(z)| \leq 1$ 이고 $\angle F(z)=0$ 이면 하모닉 오차는 점근적으로 작아진다. 그리고 저역 통과 필터 특성에 의해 $|F(z)|$ 는 주파수가 증가할수록 작아지므로 하모닉 주파수에서 반복 제어 특성을 악화시킨다. 즉 제거하려는 해당 주파수 대역에 대한 하모닉 오차만을 제거하며 비하모닉 오차에 대한 증폭을 방지할 수 있다. 본 논문에서는 DC offset 제거를 위해 다음과 같은 대역 통과 필터를 사용하였다. 그림 8에 대역 통과 필터의 블록선도를 나타내었다.

$$F(z^{-1}) = \frac{K_{bb\beta}(1+z^{-1})}{1-K_{bb\beta}z^{-1}} \times \frac{(1+K_{bb\beta}z^{-1})}{1-K_{bb\beta}z^{-1}} \quad (16)$$

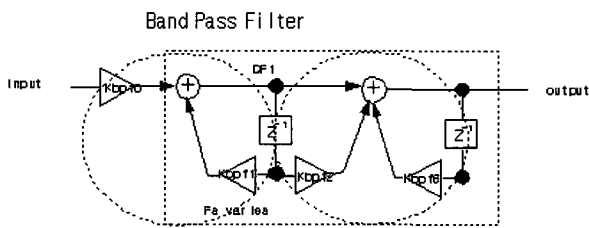
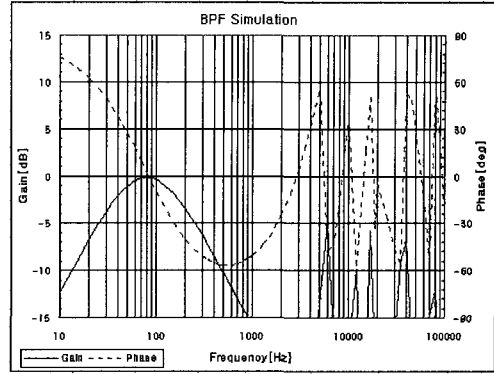


그림 8. 대역 통과 필터의 블록선도
Fig. 8. Block diagram of band pass filter

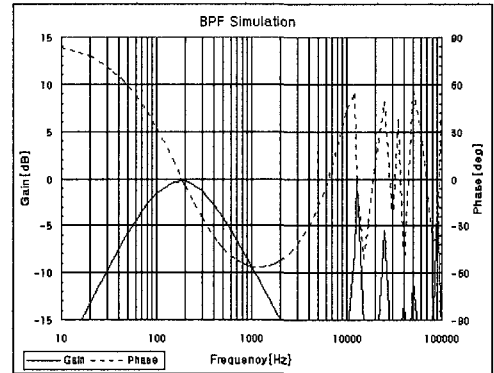
그림 9에 제안한 적응 반복 제어기의 필터에 사용된 대역 통과 필터의 주파수 특성을 나타내었다. 편심 주파수가 80Hz/160Hz (등각속도 24배속/48배속)일때 5.76kHz/12.8kHz를 사용하여 통과 대역이 80Hz/160Hz인 필터 특성이다.

대역 통과 필터의 중심 주파수는 다음과 같은 식으로 정의된다. 이때 ($K_{bb\beta} = K_{bb\beta}$)

$$F_c = -F_s \times \log(K_{bb\beta}/2\pi) \quad (17)$$



(a) 24배속(80Hz)



(b) 48배속(160Hz)

그림 9. 대역 통과 필터 주파수 특성
Fig. 9. Frequency characteristic of band pass filter

이와 같이 중심 주파수는 F_s 에 비례하므로 디스크의 1회전을 알려주는 FG 를 사용하여 만든 샘플링 주파수는 항상 1회전 주파수와 비례하여 발생된다. 여기서 발생하는 F_s 에 의해 대역 통과 필터의 주파수 특성도 편심 주파수, 즉 배속과 비례하여 변화하게 된다. 따라서 해당 배속에서 발생하는 편심 성분만이 반복 제어기의 입력으로 들어가게 되어 적절한 제어가 이루어진다. 결과적으로 외주와 내주의 회전주파수(내주 대외주 주파수 비는 2.5배)가 다른 등각 속도에서와 등속 속도에서 배속 변경시에 회전주파수에 비례하는 샘플링 주파수에 의한 대역 통과 필터가 편심 성분, 즉 해당 배속에 해당하는 주기적인 외란에 대해 반복 제어기의 입력으로 사용됨에 따라 안정된 안정적으로 동작과 배속 변경이 가능하다. 또한 이 대역 통과 필터는 반복 제어기의 안정도를 향상시켜 비하모닉 오차에 대한 증폭도 억제할 수 있다.

6. 실험 결과

6.1 실험 환경

본 논문에서 제안한 반복 제어기의 구현과 실험을 위하여 CDRW (BI9255X) 칩 셋(Chipset)을 사용하여 구현하였다. 그림 10은 실제 구현 및 실험에 사용된 세트이다.

세트는 실험을 위한 보드와 광 디스크 드라이브의 기구계를 담당하는 데크로 구성했다. MCU는 칩(BI9255X)에 내장된 16/32-bit ARM7TDMI RISC processor 를 사용하였고 MCU와 컴퓨터간의 인터페이스와 디버그를 위한 애플레이

터를 사용하였다. 그리고 각종 아날로그 신호와 디지털 신호의 측정을 위해 아날로그 오실로스코프와 혼합 신호 오실레이터를 사용하였다.

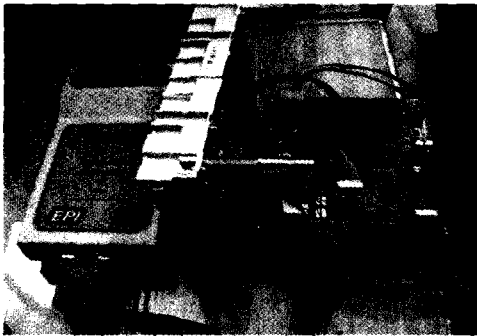


그림 10. 실험용 세트
Fig. 10. Experiment set

그림 11은 구현 및 개발 환경에 사용되었던 실험을 위한 디지털 서보 시스템의 블록선도이다.

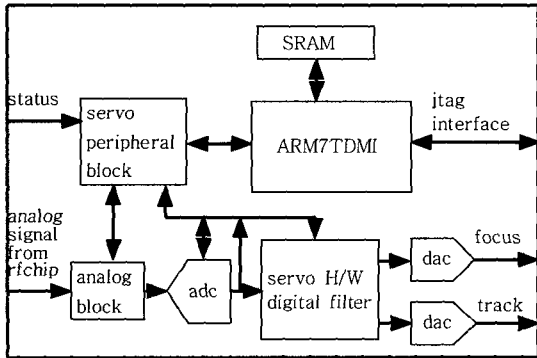


그림 11. 디지털 서보 시스템의 블록도
Fig. 11. Block diagram of digital servo system

일반적인 트랙 서보 시스템은 기존의 시스템을 그대로 사용하였고 제안된 적응 반복 제어를 설계하기 위하여 ADC 된 트랙 에러를 서보 주변 회로를 이용해 MCU (ARM7TDMI)를 통하여 읽어 MCU 내부에서 프로그램을 통하여 주파수 발생기와 대역 통과 필터 그리고 제안된 적응 반복 제어를 설계하였다.

편심 디스크는 140 μm 와 210 μm 를 사용하였으며 광학 디스크 기기의 평균 탐색 속도 측정을 위해 내장된 ATAPI interface를 통하여 PC의 IDE channel과 연결하여 테스트를 진행하였다.

6.2 측정 결과

그림 12는 적응 반복 제어를 하지 않는 경우의 24배속에서 48배속으로 배속 변경 시 210 μm 의 편심 디스크에 대한 트랙 에러(TE)와 트랙 제어기 출력(TRD)에 대한 실측 파형이다.

24배속에서는 트랙 에러에 편심 성분이 50mV 정도로 전체 루프 특성서 이득이 어느 정도 보장 되고 있으나 배속이 증가하여 편심 에러 성분의 주파수가 80Hz에서 160Hz로 증가하면 트랙에러에 편심 성분에 의한 에러 성분이 800mV 정도로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 편심 성분은 트랙 서

보의 적절한 추종과 트랙 탐색 등의 동작을 어렵게 만들고 있다.

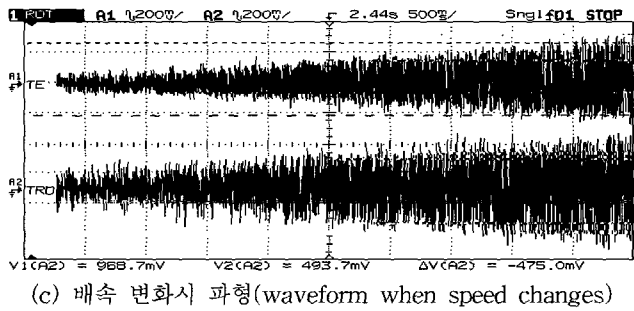
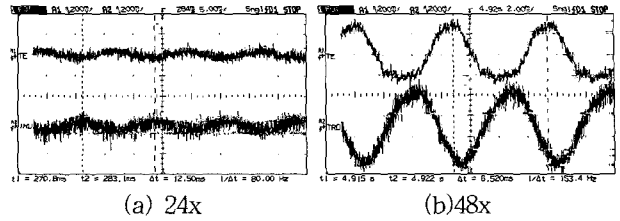


그림 12. 적응 반복 제어없는 배속 변경시 파형
Fig. 12. Waveform without adaptive repetitive controller when speed changes

그림 13은 24배속에서 적응 반복 제어를 동작시의 실측 파형을 나타낸다.

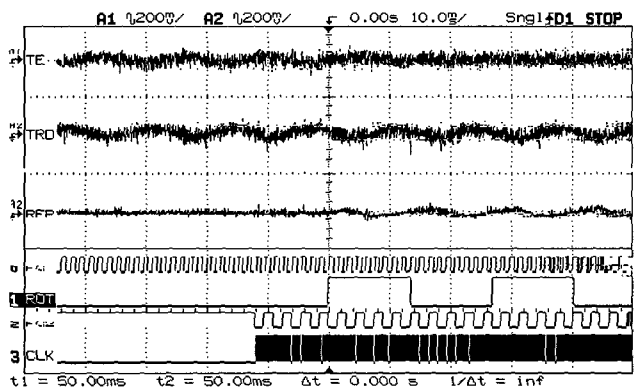
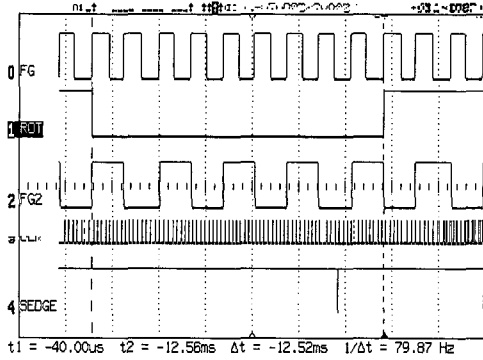


그림 13. 적응 반복 제어기 동작시의 파형
Fig. 13. Waveform with adaptive repetitive controller

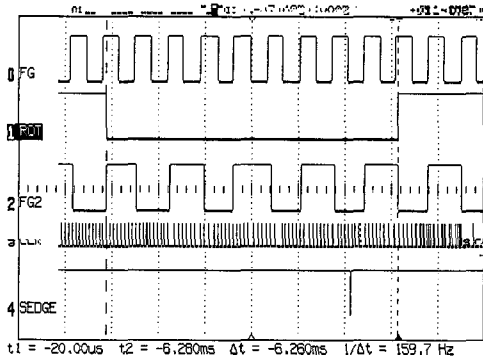
첫 번째 아날로그 신호 TE는 트랙 에러 신호, TRD는 트랙킹 제어기의 출력 신호, REP는 반복 제어기의 출력 신호를 나타낸다. 첫번째 점선 화살표는 반복 제어기의 시작 시점을 나타내고 두 번째 화살표에서는 편심의 주기 T가 지난 후 72개의 메모리에 저장된 편심 성분의 에러 신호가 주기 T를 가지고 출력 되는 것을 보여 주고 있다. 적응 반복 제어가 동작 후 1주기가 지난 후에 트랙 에러(TE) 신호에서 편심 에러 성분이 사라지는 것을 확인 할 수 있다. 디지털 신호의 0번은 FG 신호로 한 주기에 9개의 펄스(18개의 에지)가 출력 되는 것이다. 1번 ROT 신호는 FG 신호를 세어 9개 펄스(1회전)마다 위상이 반전되어 1회전을 나타내는 신호이고 2번 FG2 신호는 FG의 에지를 검출하는 신호, 3번 신호는 주파수 발생기에서 발생되는 신호로 1개의 FG 펄스에 8개의 펄스를 발생시켜 1회전에 72개의 펄스로 반복 제어기의 샘플

링 주파수로 사용되고 있다.

그림 14는 주파수 발생기의 배속에 따른 파형이다. 그림에서 1번 신호가 "L"인 상태가 1회전을 나타내고 원안에 그 1회전에 해당하는 주파수를 표시하고 있다. 두 개의 파형은 회전 주파수가 79.87Hz에서 159.7Hz로 가변 하여도 발생되는 F_s 신호의 개수는 일정함을 보여주고 있다. 이에 따라 F_s 의 주파수도 회전 주파수에 비례하여 증가, 감소하고 있다.



(a) 24x, $F_s=5.76\text{kHz}$



(b) 48x, $F_s=11.52\text{kHz}$

그림 14. 주파수 발생기의 배속별 동작

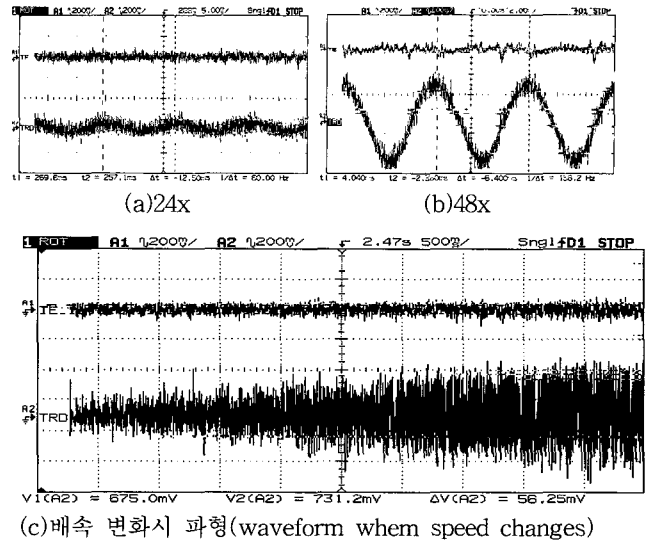
Fig. 14. Waveform of frequency generator in each speeds

그림 15는 반복 제어기를 동작시킨 상태에서 24배속에서 48배속으로 배속을 증가시킬 때의 트랙 에러(TE)와 트랙킹 제어기의 출력(TRD)를 나타내고 있는 파형이다. 24배속에서 반복제어기를 동작시키고 광 디스크 드라이브의 배속을 증가시켰다.

그림 12와 비교하여 보면 24배속과 48 배속에서 트랙 에러 성분에 존재하던 편심 성분이 사라졌음을 확인할 수 있다.

표 1은 제안된 적응 반복 제어기를 적용했을 때와 그렇지 않을 때의 탐색 평균 속도를 측정된 결과이다. 32배속에서 일반 제어기와 제안된 적응 반복 제어기가 포함된 제어기를 같은 조건에서 10000회 랜덤 탐색을 시켜 그 평균 탐색 속도를 측정하였다. 편심 디스크는 210 μm 의 디스크를 사용하였다. 또한 40배속에서도 같은 조건으로 테스트를 실시하였다. 결과적으로 32배속에서는 15%정도의 평균 탐색 속도의 향상이 있었고 40배속의 경우 탐색자체가 불가능하던 것이 기준 사양을 만족하는 결과를 나타냈다.

광 디스크 드라이브의 편심 보상을 위한 적응 반복 제어



(c) 배속 변화시 파형(waveform when speed changes)

그림 15. 적응 반복 제어 동작 배속 변경시 파형

Fig. 15. Waveform with adaptive repetitive controller when speed changes

표 1. 반복 제어기 적용 시와 비적용 시의 탐색 속도
Table 1. Search average speed of repetitive control and no controller

| 210 μm DISK | 비적용 시 | | 적용 시 | |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | (32X) | (40X) | (32X) | (40X) |
| COUNT | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 평균값 | 109.84 | X | 85.4 | 90.8 |
| 0-99ms | 5109 | | 6712 | 6015 |
| 100-199ms | 4297 | | 3259 | 3925 |
| 200-299ms | 503 | | 28 | 59 |
| 300-399ms | 78 | | 00 | |
| 400-499ms | 9 | | 00 | |
| 500-999ms | 4 | | 00 | |
| over 1 sec | 0 | | 00 | |

7. 결론

본 논문에서는 기존의 고정된 주기의 반복적인 외란에 대한 제어만 다루었던 반복 제어기를 수정하여 가변 샘플링 주파수 발생기를 추가하여 배속에 따라서, 혹은 등선 속도인 경우 내주 외주에 따라 주기가 변화하는 반복적인 외란에 대한 효과적인 적응 반복 제어기를 제안하였다. 이러한 제안된 적응 반복 제어기에 대하여 그 안정성을 살펴보고 직접 세트에 구현하고 실험을 통하여 그 우수성을 확인하였다. 실험을 통하여 고 배속에서 고 편심 디스크에 대해 안정된 동작을 확인하였다.

탐색 시에는 고 편심으로 인한 인입시점의 트랙 에러 주파수가 높아 인입조차 불가능하거나 성능 저하되는 것을 개선 향상된 탐색성능을 보여주고 있다. 210 μm 의 편심 디스크의 경우, 32배속에서는 15%정도의 평균 탐색 속도의 개선을 이루었고 40배속의 경우, 일반제어기의 경우 탐색자체가 불가능하였으나 기본 특성을 만족하는 평균 탐색 속도를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Yamamoto and S. Hara, "Relationships between internal and external stability for infinite-dimensional systems with applications to a servo problem" *IEEE Transaction on Automatic control*, Vol. 33, No. 11, pp. 1044-1052, 1988.
- [2] Y. Yamamoto and S. Hara, "Repetitive control system : a new type servo system for periodic exogenous signals," *IEEE Transaction on Automatic control*, Vol. 33, No. 7, pp. 659-668, 1989.
- [3] T. Katayama and M. Ogawa, "High-precision tracking control system for digital video disk players" *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 41, No. 2, pp. 313-321, 1995.
- [4] J. H. Moon, M. N. Lee, and M. J. Chung, "Repetitive control for the track-following servo system of an optical disk drive," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 663-670, 1998.
- [5] C. Cosner, G. Anwar, M. Tomizuka, "Discrete time repetitive control for robot manipulators" *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1341-1346, 1988.
- [6] M. Tomizuka, T. Tsao and K. K. Chew, "Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controller," *Transaction on ASME Journal of Dyn. Syst., Meas. Control*, Vol. 111, pp. 353-358, 1989.
- [7] Tadashi Inoue, "Practical repetitive control system design," *29th Conference on Decision and Control*, pp. 1673-1678, 1990.
- [8] K. K. Chew and M. Tomisuka, "Digital control of repetitive errors in disk drive systems," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 16-20, 1990
- [9] C. Cosner, G. Anwar, M. Tomizuka, "Plug in repetitive control for industrial robotic manipulators," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1970-1975, 1990.
- [10] K. Arai, H. Okumura, H. Tokumaru and K. Ohishi, "Improvement of performance of a tracking servo system for an optical disk drive," *Japan Journal of Appl. Phys.*, Vol. 39, No. 2B, pp. 855-861, 2000.
- [11] H. Dotsch and H. T. Smakman, "Adaptive repetitive control of a compact disc mechanism," *in 34th Conference on Decision and Control*, pp. 1720-1725, 1995.
- [12] T. Y. Doh, J. R. Ryoo and M.J. Chung "Repetitive controller design for track-following servo system of optical disk drive" *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 176-181, 2002.
- [13] Z. Cao and G. F. Ledwich, "Adaptive repetitive control to track variable periodic signals with fixed sampling rate," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, No.3. pp. 378-384, 2002.
- [14] Y. Onuki and H. Ishioka, "Compensation for repeatable tracking errors in hard drivers using discrete-time repetitive controllers," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6, No. 2. pp. 132-136, 2001

저 자 소 개

서삼준(Sam-Jun Seo)

제 15권 1호(2005년 2월호 참조)

김동원(Dong-Won Kim)

제 15권 1호(2005년 2월호 참조)

박귀태(Gwi-Tae Park)

제 15권 1호(2005년 2월호 참조)