

고배속 광 디스크 드라이브 시스템의 트렉 추종 제어

조성일, 진주화, 정수열, 서중언, 신동호
 삼성전자 디지털미디어총괄 디지털미디어연구소 고밀도기록기팀

Track-Following Control for High-Speed Optical Disk Drives

Seong-Il Cho, JuHwa Jin, Soo-Yul Jung, Joong-Eon Seo, Dong-Ho Shin
 High Density Recording System Team, Digital Media R&D Center, Samsung Electronics Co.

Abstract - 최근에 광 디스크 기기의 고배속에 따라 디스크의 재생 속도는 점차로 증가하고 있다. 이러한 경향에 따라 트랙킹 제어 루프에서 나타나는 디스크의 편심에 의한 외란의 영향은 더욱 커지게 되므로 기존의 선형 제어기만으로는 디스크의 편심량이 큰 경우에 고배속에서 원하는 트렉 추종 성능을 얻을 수가 없다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 반복 학습 제어 알고리즘과 드라이브 시스템의 액츄에이터의 주파수 응답 특성을 이용한 새로운 트렉 추종 제어 방법을 제안한다. 또한, 제안된 트렉 추종 제어 시스템의 제어 성능을 실험을 통하여 검증하여 본다.

로 이용할 수 있도록 하였다. 즉, 본 논문에서 제안된 방법을 이용하는 경우에는 편심의 영향이 상대적으로 적게 나타나 시스템의 안정성이 보장되는 저배속에서 학습 제어 방식에 의해 편심 보상 정보를 얻고 이를 고배속에서 이득과 위상을 보상하여 사용함으로써 편심량이 큰 디스크를 항상 안정된 상태를 유지하면서 재생할 수가 있다. 또한, 속도 변화 후에는 이득과 위상 보상된 피드포워드 제어 입력을 초기값으로 새롭게 학습 제어를 진행하여 액츄에이터의 주파수 응답 특성의 편차에 대응을 하도록 하였다. 마지막으로 실제로 제안된 방법을 상용 광 디스크 드라이브 시스템에 적용하여 편심을 포함한 주기적인 외란에 대한 트렉 추종 제어 시스템의 유용성을 검증하였다.

1. 서 론

2. 본 론

광 디스크 드라이브 시스템의 편심은 디스크의 회전 축과 디스크에 기록되어 있는 트렉의 중심이 일치하지 않음으로써 나타나는 현상으로, 광 디스크 드라이브 시스템의 트렉 추종 제어 시스템의 주요한 외란 성분으로 제어 성능을 크게 제한한다. 특히, 이러한 편심의 영향은 디스크의 재생 속도가 증가함에 따라서 더욱 커지게 되므로 기존의 선형 제어기만으로 원하는 트렉 추종 제어 성능을 얻을 수가 없다. 또한, 많은 상용 광 디스크 드라이브 시스템은 이러한 이유로 인하여 편심 디스크를 재생하는 경우에는 그 편심량을 미리 측정하여 편심량에 따라 그 최대 재생 속도를 제한하여 시스템의 안정성을 확보한다.

2.1 새로운 형태의 편심 보정 방법

그림 1은 고배속 광 디스크 기기를 위해 제안된 편심 보정 방법을 이용한 트렉 추종 제어 시스템의 블록도를 나타낸다. 그림 1에서 나타나듯이 크게 두 가지 부분으로 구성되어 있음을 알 수가 있다. 반복 학습 제어 방식을 이용하여 편심을 보상하는 피드포워드 제어 입력을 계산하는 학습 제어 블록과 디스크의 재생 속도 변화에 따라서 피드포워드 제어 입력의 이득과 위상을 보상하는 이득 및 위상 보상 블록으로 나눌 수 있다.

2.1.1 반복 학습 제어 방식

먼저 제안된 트렉 추종 제어 시스템에 사용된 학습 제어 방식에 대하여 설명한다. 학습 제어 방식에 의한 피드포워드 제어 입력은 다음의 식에 나타나는 것처럼 기존의 선형 제어기의 출력에 더하여 액츄에이터에 인가 된다.

$$u^k(t) = u_{fb}^k(t) + u_{ff}^k(t) \quad (1)$$

여기서, 위첨자 k 는 학습 횟수를 의미하고, $u_{fb}^k(t)$ 는 선형 제어기에 의한 피드백 제어 입력을, $u_{ff}^k(t)$ 는 학습

이러한 편심을 포함한 광 디스크 드라이브 시스템의 외란은 주기적인 특성을 지니고 있으므로 이전의 주기에서의 제어 결과를 이용하여 새롭게 제어 입력을 갱신하여 시스템에 가해줌으로써 점진적으로 제어 성능을 향상시킬 수 있는 학습 제어 방식[1-4]을 이용하여 보상이 되는 것이 효과적이라고 할 수 있다. 실제로 디스크 드라이브 시스템에 있어서도 여러 가지 학습 제어 방식이 제안되었다[5-8]. 이러한 학습 제어 방식은 디스크 드라이브 시스템의 주기가 일정한 경우와 선형 제어기의 안정성이 보장되는 경우에 있어서의 학습을 먼저 가정하고 있다. 하지만 광 디스크 드라이브 시스템에서 편심량이 큰 디스크를 재생하는 데 있어서 디스크의 재생 속도가 큰 경우에는 선형 제어기만으로는 시스템의 안정성이 보장되지 않으므로 학습 과정을 진행할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 편심의 영향이 적게 나타나는 저배속에서는 트렉 추종 성능을 개선할 수 있으나 고배속에서는 선형 제어기의 안정성이 보장되지 않으므로 학습을 진행할 수가 없는 경우가 나타나게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 광 디스크 드라이브 시스템의 액츄에이터의 주파수 응답 특성을 이용하였다. 특정한 디스크의 재생 속도에서 학습 제어 방식에 의해 얻어진 피드포워드 제어 입력을 다른 재생 속도에서 이용하는 경우에는 피드포워드 제어 입력의 이득과 위상을 액츄에이터의 주파수 응답 특성을 이용하여 보상함으로써 디스크의 재생 속도가 변하는 경우에도 피드포워드 제어 입력을 새롭게 갱신하지 않고 바

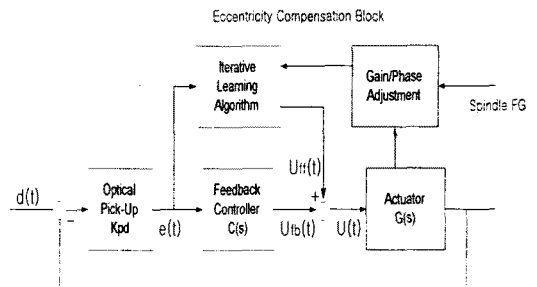


그림 1 제안된 트렉 추종 제어 시스템의 블록도

제어 알고리즘에 의해 생성되는 피드포워드 제어기의 출력을 각각 나타낸다. 이때 이용된 학습 제어 알고리즘의 갱신 법칙은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$U^{k+1}(s) = P(s)U^k(s) + Q(s)E^k(s) \quad (2)$$

여기에서, $U^k(s)$, $E^k(s)$ 는 각각 $u^k(t)$, $e^k(t)$ 의 라플라스 변환을 나타낸다. 한편, $P(s)$ 와 $Q(s)$ 는 학습 제어기의 특성을 결정하는 일종의 필터로서 다음의 수렴 조건을 만족하도록 설계를 하면 식 (2)로 나타나는 학습 제어 알고리즘의 수렴성은 보장된다 [5].

$$\|P(s) - Q(s) \frac{K_{pd}C(s)G(s)}{1 + K_{pd}C(s)G(s)}\|_{\infty} < 1 \quad (3)$$

여기에서, K_{pd} 는 트랙 추종 오차 검출을 위한 광 픽업의 이득을 나타내고 $C(s)$ 는 피드백 제어기, $G(s)$ 는 액츄에이터의 전달 함수를 각각 나타낸다.

본 논문에서는 일정한 속도에서 편심을 포함한 주기적인 외란을 효과적으로 보상을 하기 위해서 반복 학습 제어 알고리즘을 사용하여 피드포워드 제어 입력을 계산한다. 실제로 식 (2)로서 나타나는 학습 제어 알고리즘의 갱신 법칙은 디스크의 재생 속도가 변하여 다음에 설명하는 방법에 의하여 피드포워드 제어 입력의 이득과 위상을 조절한 후에도 변경된 피드포워드 제어 입력을 초기값으로 재학습이 수행되도록 한다.

2.1.2 피드포워드 제어 입력의 이득 및 위상 보상

이제 디스크의 재생 속도 변화에 따른 편심 성분의 주파수 응답 특성과 액츄에이터의 주파수 응답 특성에 따른 피드포워드 제어 입력의 영향에 대하여 간략히 살펴본다. 먼저, 편심은 디스크의 회전축과 트랙의 중심이 일치하지 않음으로써 나타나는 현상으로 디스크의 재생 속도 변화에 따른 회전 주파수를 주요한 주파수 성분으로 갖는다. 또한, 슬립 현상이 일어나지 않는다면 디스크가 한번 장착된 후에는 편심의 크기와 위상은 항상 일정하게 된다. 한편, 피드포워드 제어 입력이 액츄에이터에 인가되는 경우에는 그림 2와 같이 나타나는 액츄에이터의 주파수 응답 특성에 의하여 주파수 성분이 증가함에 따라서 이득은 감소하고 위상은 지연되는 특성이 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 특정한 회전 주파수에서 얻어진 피드포워드 제어 입력을 다른 주파수에서 주파수를 보정하여 인가하는 경우에는 디스크의 재생 속도가 증가함에 따라서 그 보상 효과는 점차로 감소하게 된다.

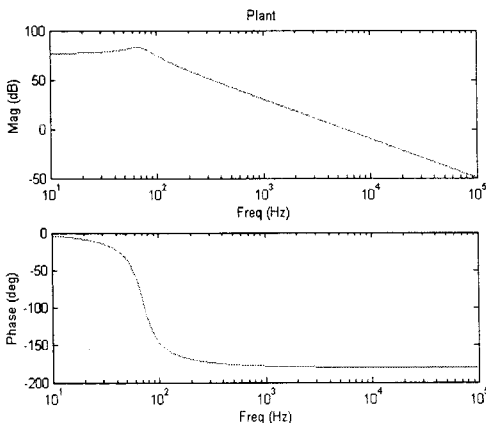


그림 2 액츄에이터의 주파수 응답 특성

만일 광 디스크 드라이브 시스템에는 회전 주파수 성분을 가지고 있는 편심 성분만이 존재하고 제한된 반복 학습 제어 알고리즘에 의하여 편심에 의한 외란이 완전히 보상된다고 가정해보자. 이 경우 최종적인 트랙 추종 오차와 피드포워드 제어 입력은 다음의 식으로 나타내어진다.

$$E^{\infty}(s) = 0, U_{ff}^{\infty}(s) = \frac{D(s)}{G(s)} \quad (4)$$

여기에서 $D(s)$ 는 편심을 나타내는 외란 $d(t)$ 의 라플라스 변환을 나타낸다. 이때 디스크의 회전 주파수가 증가하는 경우에는 $D(s)$ 는 일정한 크기와 위상을 가지면서 주파수 성분만이 변화하지만 상대적으로 $G(s)$ 는 그림 2에서 보이듯이 이득 감소와 위상 지연이 발생함을 알 수 있다. 따라서 디스크의 회전 주파수 증가에 따른 이러한 이득 감소분에 대하여 피드포워드 제어 입력의 이득을 증가시키고 위상 지연량 만큼 피드포워드 제어 입력의 위상을 빠르게 한다면 식 (4)로부터 특정한 주파수에서 얻어진 편심 보상 정보를 다른 회전 주파수에서 이용할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 이를 이용하여 먼저 편심량이 큰 디스크인 경우에도 안정한 저배속에서 식 (2)로 나타나는 학습 제어 알고리즘의 갱신 법칙을 이용하여 피드포워드 제어 입력을 구하고 고배속에서 그 크기를 증가시키고 위상을 빠르게 하여 이용함으로써 디스크의 재생 속도가 변화하는 경우에도 연속적으로 효과적인 편심 보상이 이루어지게 된다. 한편, 이러한 액츄에이터의 주파수 응답 특성은 편차가 존재할 수 있으므로 회전 주파수가 변화된 다음에 보상된 피드포워드 제어 입력 정보를 초기값으로 새롭게 학습 제어를 수행하여 최종적인 편심 보상을 수행한다.

2.1.3 편심 보상 방법의 구현 순서

본 논문에서 제안되는 편심 보상 방법의 구현 순서는 다음과 같다.

- step1) 안정된 저배속에서 식 (2)로 주어지는 학습 제어 알고리즘의 갱신 법칙을 이용하여 편심 보상을 위한 피드포워드 제어 입력을 계산한다. 이때, 초기값으로 영을 사용한다.
- step2) 회전 속도를 증가시킨다. 동시에 피드포워드 제어 입력의 이득과 위상을 액츄에이터의 주파수 응답 특성을 바탕으로 보상한다.
- step3) 보상된 피드포워드 제어 입력을 초기값으로 하여 새롭게 반복 학습 제어를 수행한다

위의 방법을 사용하는 경우에 편심으로 인해 나타나는 광 디스크 드라이브 시스템의 재생 속도의 제한을 효과적으로 완화시킬 수 있으며 또한 트랙 추종 제어 시스템의 인입 성능, 추종 성능 및 고속 탐색 성능을 효과적으로 개선하게 된다.

2.2 실험 결과

실험을 통하여 제안된 편심 보상 방법을 이용한 트랙 추종 제어 시스템의 특성을 살펴보고 그 성능을 평가해 본다. 실험을 위하여 삼성 전자에서 제작된 상용 DVD-ROM 드라이브 (ref. SD-612)를 사용하였다. 제안된 편심 보상 알고리즘은 TMS320C6701 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 구현하였다. 그림 1에서 나타나는 것처럼 제안된 알고리즘을 이용하여 구현된 피드포워드 제어 입력은 기존의 선형 제어기의 출력에 추가적인 모듈로서 더해진다. 따라서 기

존 선형 제어 시스템이 동작하는 상황에서 새롭게 제안되는 피드포워드 제어 입력을 인가할 수가 있다. 실험을 위하여 편심량이 $150 \mu\text{m}$ 인 DVD-ROM 테스트(Test) 디스크를 편심 디스크로 사용하였다. 먼저 디스크의 재생 속도를 2700RPM으로 회전시키고 반복 학습 제어 알고리즘을 적용하였다. 그림 3은 반복 학습 제어 알고리즘의 성능을 나타낸다. 학습 횟수가 증가함에 따라서 편심의 영향이 효과적으로 제거되고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 피드포워드 제어 입력을 인가하지 않은 경우와 인가한 경우의 트랙 추종 오차의 파형과 피드포워드 제어 입력을 각각 나타낸다. 학습 제어 알고리즘에 의하여 편심에 의한 트랙 추종 오차는 크게 감소함을 알 수 있고 또한 최종적인 피드포워드 제어 입력은 편심을 포함한 주기적인 외란을 보상할 수 있는 형태를 가지게 된다. 이제 디스크의 재생 속도를 7200RPM으로 증가시키면서 트랙킹 제어 입력의 이득과 위상을 보상한다. 그림 4(b)와 그림 5(a)를 살펴보면 피드포워드 제어 입력의 크기가 증가되었고 한편 위상 보상이 이루어져 있음을 확인할 수가 있다. 그림 4와 그림 5에 있는 구형파는 한 주기 성분을 나타내는 파형으로서 각각의 회전 주파수에서의 위상에 대한 기준 정보를 나타내어 줄 수가 있다. 실제로 디스크의 재생 속도가 증가되었음에도 불구하고 편심에 의한 트랙 추종 오차는 효과적으로 보상되고 있음을 알 수가 있다. 마지막으로 그림 5(b)는 보상된 피드포워드 제어 입력 정보를 초기값으로 새롭게 학습 제어를 수행한 결과를 나타낸다.

3. 결 론

본 논문에서는 반복 학습 제어 알고리즘과 액추에이터의 주파수 응답 특성을 이용한 새로운 형태의 편심 보상 방법을 이용한 트랙 추종 제어 시스템을 제안하였다. 또한 제안된 트랙 추종 제어 시스템의 유용성을 상용 DVD-ROM 드라이브에 적용하여 실험적으로 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki and S. Tamaki, "Learning control theory for dynamical systems", *Proc. IEEE 24th CDC*, vol. 3, pp 1375-1380, 1985.
- [2] P. Bondi, G. Casalino, and L. Gambardella, "On the iterative learning control theory for robot manipulators", *IEEE J. robot. automat.*, vol. 4, pp 14-22, 1988.
- [3] Young-Hoon Kim, Seok-Hee Han, Seong-Il Cho and In-Joong Ha, "Learning approach to control of servomotors under disturbance torque dependent on time and states", *IEE Proc-control theory appl.*, vol. 145, no. 3, pp 251-258, 1998.
- [4] Seong-Il Cho and In-Joong Ha, "A Learning approach to tracking in mechanical systems with friction", *IEEE transactions on automatic control*, vol 45, no 1, pp 111-116, 2000.
- [5] Jung-Ho Moon, Moon-Noh Lee and Myung Jin Chung, "Track-following control for optical disk drives using an iterative learning scheme", *IEEE transactions on consumer electronics*, vol. 42, no 2, pp 192-198, 1996.
- [6] Jung-Ho Moon, Moon-Noh Lee and Myung Jin 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 192-198, 1998.
- [7] Yosuke Hamada and Haruaki Otsuki, "Repetitive learning control system using disturbance observer

for head positioning control system of magnetic disk drives", *IEEE transactions on magnetics*, vol. 32, no. 5, pp 5019-5021, 1996.

[8] Tsuyoshi Katayama, Masaharu Ogawa and Masato Nagasawa, "High-precision tracking control system for digital video disk players", *IEEE transactions on consumer electronics*, vol. 41, no. 2, pp 313-321, 1995.

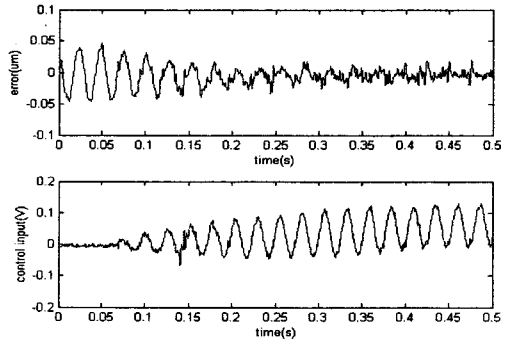
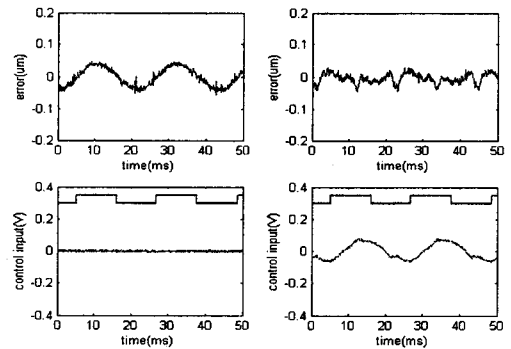
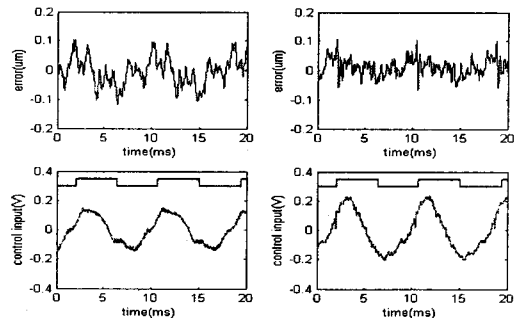


그림 3 학습 제어 효과



(a) 피드포워드 입력이 인가되지 않은 경우 (b) 피드포워드 입력을 인가한 경우

그림 4 트랙 추종 오차 및 제어 입력(2700RPM)



(a) 재생 속도 변화 후 이득 및 위상 보정 (b) 보정 후 재학습을 진행한 경우

그림 5 트랙 추종 오차 및 제어 입력(7200RPM)