

광디스크 드라이브에서의 트랙 점프 안정도 향상

Enhanced Track Jump Stability in Optical Disc Drives

유정래*, 도태용
(Jung Rae Ryoo and Tae-Yong Doh)

Abstract: Track jump control is a random access strategy for short distance movement. The most common track jump scheme is a bang-bang control of a kick and brake manner. In a conventional track jump scheme, a track-following compensator is turned off during kick and brake periods, and restarted at a target track for track pull-in. The inevitable controller switching with non-zero initial condition results in undesirable transient response, and excessive overshoot in the transient response causes track pull-in failure. In this paper, a new track jump scheme is proposed for enhancing track jump stability. Instead of control switching, internal states of a track-following controller are artificially manipulated for kick and brake actions in a digital control environment. Experimental results are provided in comparison with conventional track jumps.

Keywords: track jump control, radial servo system, initial value compensation, IIR filter, optical disc drive

I. 서론

광디스크 드라이브에서의 데이터 기록 및 재생을 위해서는 랜덤 액세스(random access) 제어를 통하여 광픽업에서 생성된 레이저 빔 스팟(laser beam spot)을 목표 트랙으로 이동시키고, 트랙 추종 보상기(track-following compensator)를 이용하여 목표 트랙의 중앙을 추종하는 서보 제어가 선행되어야 한다. 그림 1에는 광디스크 드라이브의 트랙 추종 제어를 위한 기구부를 도시하였다. 광디스크 드라이브에서 레이저 빔 스팟의 위치는 트래킹 액츄에이터(tracking actuator)와 슬레드 모터(sled motor)에 의하여 결정된다. 랜덤 액세스 제어는 두 액츄에이터를 구동하는 제어 방식에 따라 트랙 점프(track jump), 미세 검색(fine seek), 그리고 거친 검색(coarse seek)으로 구분되며, 목표 트랙까지 이동할 거리에 따라 적합한 제어 알고리즘을 적용한다[1-3]. 거리에 따라 각기 다른 제어 방식을 적용하지만, 전술한 3가지 제어 알고리즘의 공통된 제어 목표는 목표 트랙으로의 빠른 이동과 목표 트랙에서의 트랙 풀인(track pull-in) 안정성 확보이다. 본 논문에서는 트랙 점프 제어에서의 트랙 풀인 안정성 확보 방안에 대하여 다룬다.

트랙 점프 제어는 통상적으로 10 트랙 미만의 짧은 거리를 이동할 때 활용되며, 킥-브레이크(kick and brake) 방식의 뱅뱅 제어(band-bang control)가 가장 널리 활용된다[4,5]. 기존의 트랙 점프 제어에서는 킥-브레이크 방식의 점프 동작 중에 트랙 추종 보상은 일시 정지하였다가 레이저 빔 스팟이 목표 데이터 트랙에 도착하면 트랙 추종 보상이 다시 구동된다. 트랙 추종 제어가 다시 시작되는 트랙 풀인 시점에서 목표 트랙에 대한 레이저 빔 스팟의 상대 위치 및 속도는 0이 아니며, 트랙 추종 제어의 초기 조건(initial condition)으로 작용한다. 트랙 추종 제어는 모든 상태 변수를 0이 되도록 제어하는 일종의 레귤레이션(zero-point regulation) 문제로서 [6-8] 목표 트랙으로의 풀인 과정에서 0이 아닌 초기 조건은 피할

수 없는 과도 응답 구간으로 나타난다. 디스크 데이터 트랙의 구조 및 트랙에 대한 레이저 빔 스팟의 상대위치 검출 방식의 한계로 인하여 과도한 오버슈트는 목표 트랙으로의 트랙 풀인을 실패하게 하며, 더 나아가 전체 시스템의 불안정 요소로 작용한다. 이러한 이유로 트랙 점프를 포함한 검색 제어에서는 목표 트랙에서의 트랙 풀인 안정성을 보장하기 위하여 목표 트랙에서의 최종 상태를 최소화하는 방법 [2,3]과 트랙 풀인 시점을 결정하는 방법 [8,9], 그리고 트랙 풀인용 추가 제어기 [10]에 대한 연구가 진행되었다.

짧은 거리의 이동을 위한 킥-브레이크 방식의 트랙 점프 제어에서는 목표 트랙에서의 레이저 빔 스팟의 트랙에 대한 상대속도를 최소화하도록 킥-브레이크 입력을 조정하여야 한다. 하지만, 디스크 편심(disc eccentricity)에 의한 외란 및 트래킹 액츄에이터의 편차로인하여 미리 결정된 킥-브레이크 펄스로는 목표 트랙에서 레이저 빔 스팟의 최종 속도를 트랙 풀인 안정성을 보장하는 범위로 제어하는 것이 불가능하다. 또한, 목표 트랙에서의 트랙 풀인은 킥-브레이크 방식의 뱅뱅제어기에서 트랙 추종 보상기로의 제어 모드 전환(control mode switching)을 수반하며, 트랙 추종 보상기의 구동에 있어

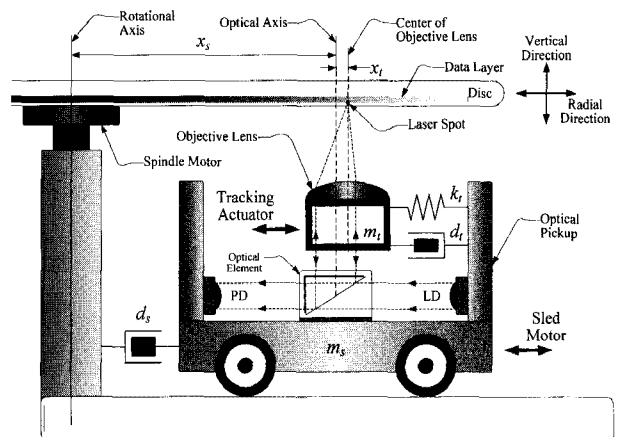


그림 1. 광디스크 드라이브 트랙 추종 기구부.
Fig. 1. Schematic view of a track-following mechanism in an optical disc drive.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 3. 9., 채택확정: 2009. 5. 13.

유정래: 서울산업대학교 제어계측공학과(jryoo@snut.ac.kr)

도태용: 한밭대학교 제어계측공학과(dolerite@hnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00182).

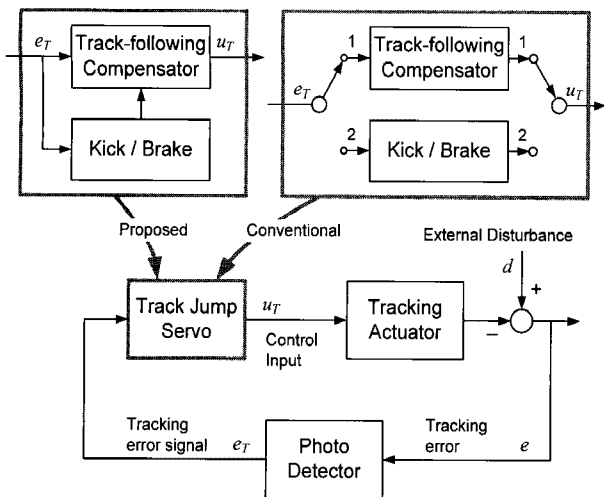


그림 2. 트랙 점프 제어 블록선도.
Fig. 2. Schematic diagrams of track jump scheme.

서 초기 조건을 고려하지 않은 제어기의 구동으로 과도 응답 특성이 트랙 폴인 안정성에 문제를 발생시킨다.

본 논문에서는 기존의 킥-브레이크 방식에 기반하여 목표 트랙에서의 트랙 폴인 안정성을 향상하기 위한 새로운 트랙 점프 방식을 제안한다. 그림 2에는 기존의 트랙 점프와 본 논문에서 제안하는 트랙 점프 방식을 비교하여 도시하였다. 기존의 트랙 점프에서는 목표 트랙으로의 이동을 위한 뱅뱅 제어기와 목표 트랙으로의 폴인 및 추종을 위한 트랙 추종 보상기가 순차적으로 수행되는 반면, 제안하는 트랙 점프에서는 트랙 추종 보상기의 제어기 내부 상태 변수를 인위적으로 조작하여 킥-브레이크 효과를 발생시킨다. 트랙 추종 보상기는 목표 트랙으로의 이동 중에도 정지되지 않으며, 따라서 목표 트랙에서의 제어기 스위칭이 발생하지 않는다. 또한, 목표 트랙에서의 액추에이터 최종 상태를 고려한 브레이크 성분의 적용은 트랙 추종 제어의 초기 상태 보상과 동일한 효과를 거두어 트랙 폴인 안정성을 향상시킬 수 있다[11-13]. 실험을 통하여 제안된 트랙 점프 제어 알고리즘의 성능을 기존 방식과 비교한다.

II. 트랙 추종 보상기 내부 구조

광디스크 드라이브의 트랙 추종 보상기는 통상적으로 주파수 영역에서 지연상 보상기(lead-lag compensator) 형태로 설계된다. 편심에 의한 외란 성분을 제거하면서 충분한 안정도 여유를 확보하기 위한 다양한 제어 구조와 설계 방법이 연구되었다[6-8]. 또한, 대부분의 트랙 추종 보상기는 DSP를 포함한 디지털 프로세서 기술의 발전에 힘입어 이산시간 IIR 필터(discrete-time infinite impulse response filter)로 구현된다. 그림 3에는 트랙 추종 보상기로 활용되는 3차 IIR 필터를 예시하였으며, 예시된 트랙 추종 보상기의 전달함수 $C_D(z^{-1})$ 는 (1)에 나타내었다.

$$C_D(z^{-1}) = K_T \frac{(1 - Z_{D1}z^{-1})(1 - Z_{D2}z^{-1})(1 - Z_{D3}z^{-1})}{(1 - P_{D1}z^{-1})(1 - P_{D2}z^{-1})(1 - P_{D3}z^{-1})} \quad (1)$$

e_T 는 데이터 트랙 중심에 대한 레이저 빔 스팟의 상대 위치를 나타내는 트래킹 오차 신호(tracking error signal)이며, u_T

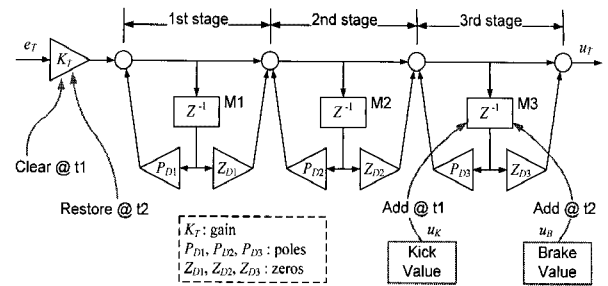


그림 3. 트랙 추종 보상기의 내부 구조.
Fig. 3. Internal structure of track-following compensator.

표 1. 트랙 추종 보상기의 일반적인 주파수 응답 특성.
Table 1. General frequency response characteristics of a track-following compensator.

Stage	Design Objectives	Usual Freq.		Estimated Settling time
		Pole	Zero	
1st	Disturbance attenuation	5 ~ 50 Hz	100 ~ 500Hz	12 ~ 120 ms
2nd	Phase margin	2 ~ 5 kHz	0.5 ~ 1 kHz	0.12 ~ 0.32 ms
3rd	Noise rejection	10 kHz ~	N. A.	~ 0.064 ms

는 트랙 추종 제어 입력을 의미한다. M1 ~ M3은 각각 IIR 필터 내부의 지연 소자(delay memory)로서 과거의 입력과 출력의 상태를 반영하므로 트랙 추종 보상기의 내부 상태 변수(internal state variables)로 간주할 수 있으며, 컴퓨터 프로그램에 의하여 임의의 값으로 손쉽게 변경할 수 있다.

본 논문에서는 IIR 필터 내부의 지연 소자에 미리 정의된 킥-브레이크 대응값(kick/brake value)을 인위적으로 더하여 트랙 점프의 킥-브레이크 효과를 생성한다. IIR 필터의 출력은 입력뿐만 아니라 지연 소자의 값에도 의존적이므로 변경된 지연 소자의 값은 IIR 필터의 출력인 제어 입력에 즉시 반영된다. 이러한 동작은 디지털 제어 시스템에서 프로그램으로 쉽게 구현할 수 있으며, 기존의 트랙 점프 알고리즘과 달린 트랙 추종 보상기를 킥-브레이크 구간 동안 정지하지 않으므로 제어기 스위칭이 존재하지 않는다.

트랙 추종 제어는 일종의 레귤레이션 제어로서 IIR 필터의 지연 소자를 포함한 시스템의 모든 상태 변수를 0으로 제어한다. 킥-브레이크 효과를 위하여 M1 ~ M3에 더해지는 값은 트랙 추종 보상기에서는 알려지지 않은 외란으로 간주된다. 변경된 지연 소자의 값은 출력에 즉시 반영되지만, 시간이 흐름에 따라 원래 상태인 0 근처로 수렴하게 된다. 다만, 변경된 지연 소자와 관련된 극점(pole)의 특성에 따라 수렴 시간이 결정된다. 따라서, 트랙 점프에 소요되는 시간 및 IIR 필터 내부의 극점 배치 특성을 고려하여 킥-브레이크에 사용될 지연 소자를 선정하여야 한다.

III. 트랙 점프 알고리즘

1. 지연 소자의 선정

트랙 점프는 통상적으로 10트랙 미만의 짧은 거리를 이동할 때 활용되는 랜덤 액세스 방식으로 통상적으로 1개 트랙을 이동하는 시간은 0.5 msec 미만으로 적용된다. 따라서, 킥-

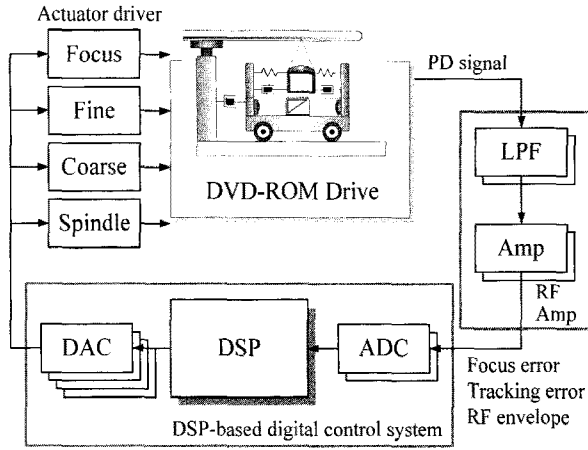


그림 4. DSP를 이용한 디지털 서보 시스템의 구성도.
Fig. 4. Schematic view of the DSP-based digital servo system.

브레이크 값 적용 후 내부 지연 소자의 값이 원상태로 복귀하는 수렴 시간(settling time)은 0.1 msec 보다 작아야 한다. 표 1에는 3차 트랙 추종 보상기의 통상적인 주파수 응답 특성을 요약하였다. 각 단계에 설정된 극점의 위치에 따라 추정된 수렴 시간을 보면 3단의 극점에 해당하는 수렴 시간이 0.1 msec 보다 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 3단에 해당하는 M3를 활용하여 킥-브레이크 효과를 생성한다.

2. 트랙 점프 알고리즘

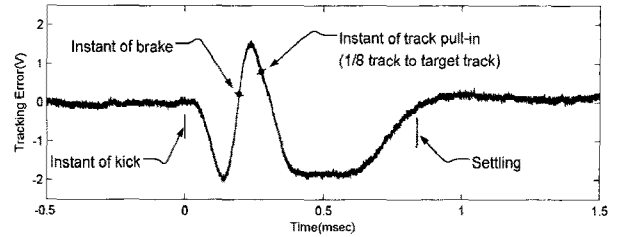
본 논문에서 제안하는 트랙 점프 알고리즘은 그림 3에 요약하였다. t_1 과 t_2 는 각각 킥-브레이크가 발생하는 시점을 나타낸다.

- t_1 에서 킥 동작을 위한 u_k 를 M3에 더한다.
- 이와 동시에 트랙 추종 보상기의 입력 이득을 결정하는 K_T 를 0으로 설정한다.

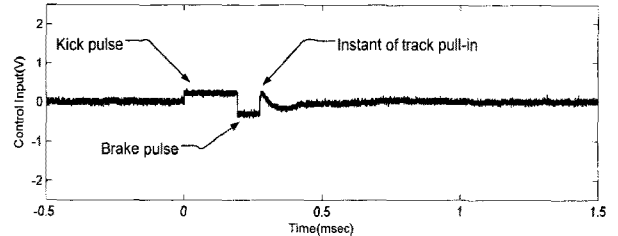
M3에 더해진 u_k 는 출력 u_T 에 즉각 반영되어 가속 구간을 시작한다. 여기서 K_T 를 0으로 설정하는 것은 트랙 점프가 이루어지는 동안 0이 아닌 트랙 오차 값이 트랙 추종 보상기에 입력되어 가속 구간을 방해하는 현상을 방지하기 위함이다. M3의 값이 수정되었으므로 M1과 M2의 값은 변경되지 않고 트랙 추종 상태인 0의 값을 유지한다. M3와 u_T 의 값은 표 1에 요약한 대로 0.1 msec보다 짧은 시간 내에 0으로 수렴하게 되어 t_1 시점 이전의 값으로 복귀한다. 결과적으로 u_T 의 출력 파형은 고역 통과 필터를 통과한 계단 입력의 형태로 나타난다. 수렴시간 후 트랙 추종 보상기의 상태는 원래 상태로 복귀하지만, u_T 의 값으로 인한 트래킹 액츄에이터는 목표 트랙 방향으로 가속되어 이동하는 상태가 된다.

- t_2 에서 브레이크 동작을 위한 u_b 를 M3에 더한다.
- 이와 동시에 트랙 추종 보상기의 입력 이득을 결정하는 K_T 를 원상태로 복귀한다.

t_2 는 실질적으로 트랙 폴인 제어가 시작되는 시점으로 트래킹 오차 신호 e_T 를 관찰하여 목표 트랙의 1/8 트랙 피치에 도달하는 시점으로 설정한다[9]. 결과적으로 t_2 이후의 제어 입력 u_T 는 트랙 추종 제어 입력에 지속적으로 감소하는 브레이크 펄스의 합으로 구성된다. u_b 는 트랙 폴인 제어의 초기



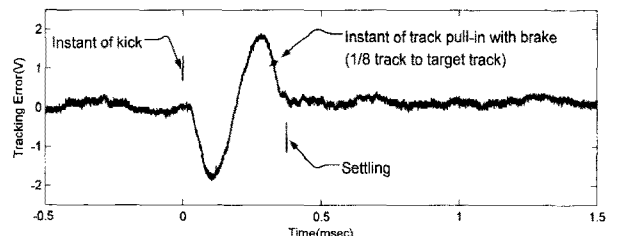
(a) 트랙 오차 신호(e_T)



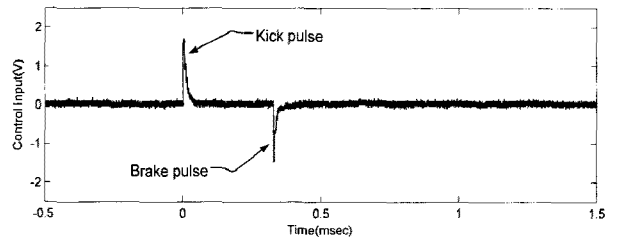
(b) 트랙 제어 입력(u_T)

그림 5. 기존 트랙 점프 알고리즘.

Fig. 5. Conventional track jump scheme.



(a) 트랙 오차 신호(e_T)



(b) 트랙 제어 입력(u_T)

그림 6. 제안된 트랙 점프 알고리즘.

Fig. 6. Proposed track jump scheme.

조건으로 동작하는 잔존 속도와 위치 오차에 대한 초기 상태 보상의 역할을 수행하고, u_k 와 마찬가지로 0.1 msec 이내에 사라진다. 2개 이상의 여러 트랙을 이동하는 경우에는 트래킹 오차 신호를 활용하여 이동한 트랙의 수를 카운트하고, 이 값이 이동할 트랙의 수와 같은 경우에 t_2 가 결정되어 트랙 인입을 시도한다[4,5].

IV. 실험 및 결과

1. 실험 환경

트랙 추종 서보 시스템과 제안된 트랙 점프 알고리즘은 DSP (Digital Signal Processor) 기반 디지털 제어 시스템을 이용하여 구현하였으며, 전체 시스템은 그림 4와 같다. DSP의 연산능력을 바탕으로 트랙 추종 서보 시스템의 샘플링 주파수는 200kHz를 적용하였다. 트랙 오차 신호 생성 방식으로 DPP (Differential Push-Pull) 방식을 사용하는 DVD-R 디스크를

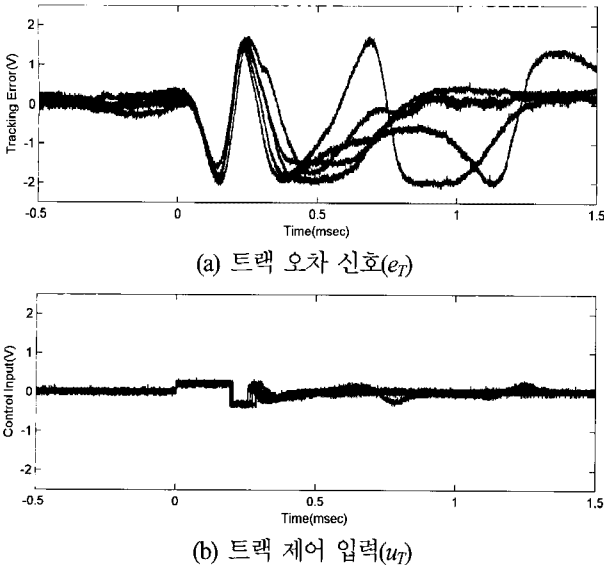


그림 7. 기존 트랙 점프의 5회 중첩 파형.
Fig. 7. Overlapped waveform of 5 conventional track jumps.

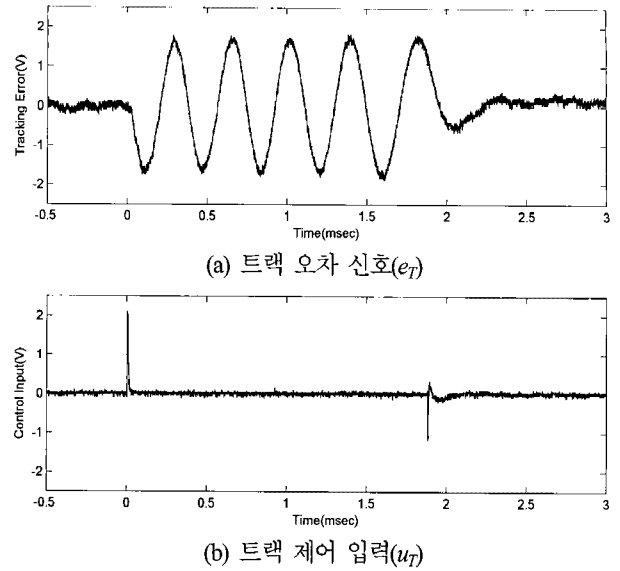


그림 9. 5트랙 점프 파형.
Fig. 9. Waveform of a 5 track jump.

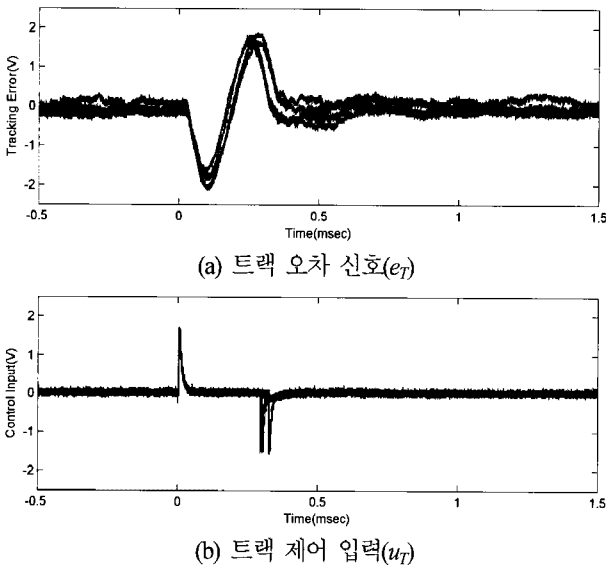


그림 8. 제안된 트랙 점프의 5회 중첩 파형.
Fig. 8. Overlapped waveform of 5 proposed track jumps.

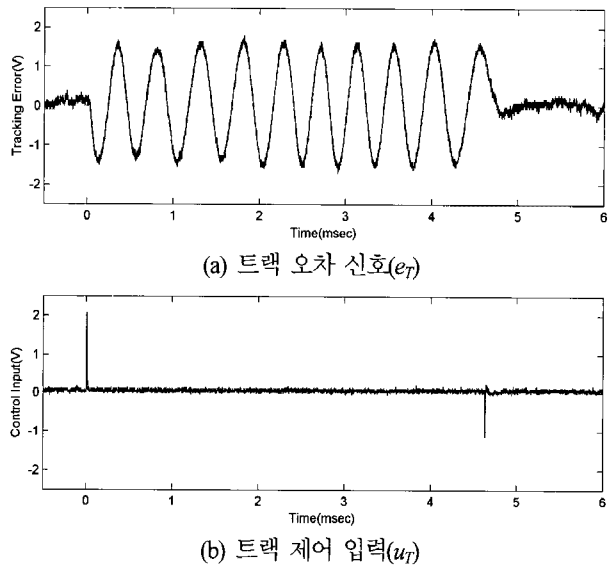


그림 10. 10트랙 점프 파형.
Fig. 10. Waveform of a 10 track jump.

활용하였으며, 디스크 회전 속도는 3000 RPM을 적용하였다. 아날로그 주파수 영역에서 설계된 트랙 추종 보상기 $C(s)$ 는 (2)에 나타내었으며, 디지털 제어 시스템에 적용하기 위하여 쌍선형 변환(bilinear transformation) 으로 이산화한 디지털 보상기 $C_D(z^{-1})$ 의 전달함수는 (3)에 정리하였다[14].

$$C(s) = 83798.0 \frac{(s+251.3)(s+3141.6)}{(s+6.3)(s+87964.6)(s+119380.5)} \quad (2)$$

$$C_D(z^{-1}) = \frac{0.13301(1-0.99874z^{-1})(1-0.98441z^{-1})(1+z^{-1})}{(1-0.99997z^{-1})(1-0.63946z^{-1})(1-0.54030z^{-1})} \quad (3)$$

2. 실험 결과

그림 5와 6에는 기존의 트랙 점프[4,5]와 제안된 트랙 점프의 실험 파형을 제시하였다. 두 경우 모두 1개 트랙을 이동하는 경우이고, 트랙 풀인 시점은 동일하게 목표 트랙의 1/8

트랙 피치 이전이며, 동일한 트랙 추종 보상기를 활용하였다. 기존 트랙 점프의 경우 킥-브레이크 제어 구간에서 트랙 추종 제어기는 일시 정지되고, 목표 트랙에서의 트랙 풀인 시점에 다시 가동되었다. 트랙 풀인 시점에서 레이저 빔 스폿은 목표 트랙에 도달하지 못한 상태이지만 목표 트랙으로 이동하는 속도 성분을 가지고 있다. 하지만, 기존의 제어 방식에서는 위치 성분 이외의 속도 성분은 고려하지 않으므로 레이저 빔 스폿의 속도를 가속하는 방향으로 제어 입력을 출력하며, 결과적으로 목표 트랙에서 큰 오버슈트가 발생한다.

반면, 제안된 트랙 점프 알고리즘에서는 동작 중인 트랙 추종 보상기의 내부 상태 변수를 조작하여 킥-브레이크 효과를 발생시킨다. 트랙 추종 보상기가 정지되는 스위칭 현상이 없으며, 트랙 풀인 시점에서 레이저 빔 스폿은 목표 트랙에 도달하지 않았으나 잔존 속도를 감안하여 브레이크 효과가 나타나도록 제어 입력이 생성되므로 목표 트랙에서의 오버

숫이 거의 발생하지 않으며 트랙 폴인 안정도는 크게 향상되었다.

광디스크 드라이브에서의 데이터 재생 과정에서 10 트랙 미만의 트랙 점프 동작은 매우 빈번하게 발생하므로 반복성이 보장되어야 한다. 그림 7과 8에는 동일한 트랙 점프를 기존의 방식과 제안된 방식에서 각각 5회씩 반복하고, 그 결과를 중첩한 파형을 도시하였다. 제안된 트랙 점프 알고리즘에서 반복성이 크게 향상된 것을 확인할 수 있다.

그림 9와 10에는 제안된 방식을 적용한 5트랙과 10트랙 점프 결과를 각각 도시하였다. 이동한 트랙 수를 반영하여 트랙 인입 시점인 t_2 를 결정하는 것 이외에는 1트랙 점프와 차이가 없으며, 그럼에도 목표 트랙에서의 트랙 인입이 안정적으로 이루어진다.

V. 결론

본 논문에서는 목표 트랙에서의 트랙 폴인 안정도 향상을 위한 새로운 트랙 점프 알고리즘을 제안하였다. 기존의 트랙 점프 알고리즘과 마찬가지로 킥-브레이크 방식을 활용하지만 레이저 빔 스팟의 이동 중에 트랙 추종 보상기 동작을 중지하는 스위칭 현상이 없도록 디지털 제어 환경에서의 제어기 내부 상태 변수를 조작하였으며, 그 결과 목표 트랙에서의 트랙 폴인 과정에서 트랙 추종 제어의 초기값 보상 효과를 거둘 수 있다. 제안된 트랙 점프 알고리즘을 활용한 실험을 수행하여 트랙 점프 후의 트랙 폴인 안정도가 기존의 방식에 비하여 향상되었음을 입증하였다. 본 논문에서는 킥-브레이크 대응값을 미리 튜닝하는 방식을 사용하였으나, 향후 측정 데이터를 기반으로 온라인에서 연산하도록 알고리즘을 보완할 필요가 있다.

참고문헌

[1] J.-M. Huang and J.-Y. Yen, "Radial fine seek control with fault protection in a digital versatile disc player," *Mechatronics*, vol. 15, no. 2, pp. 129-150, 2005.

[2] 진경복, 이문노, "고배속 광 디스크 드라이브를 위한 강인 직접 검색 제어 시스템의 구현," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제8권 제7호, pp. 539-546, 2002.

[3] J. R. Ryoo, K. B. Jin, T.-Y. Doh, and M. J. Chung, "Fine seek control of extended applicable range for optical disk drives," *Trans. on Contr., Autom. and Syst. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 146-151, 1998.

[4] 김경수, 홍성표, "광기록재생기의 서보 제어 장치 및 방법," 특허번호: 10-0396597, 한국, 2003.

[5] 하인중, 이주영, 홍동기, "광 기록매체의 트랙 점프 방법 및 장치," 특허번호: 10-0686167, 한국, 2007.

[6] M.-N. Lee, J.-H. Moon, K. B. Jin, and M. J. Chung, "Robust H_{∞} control with multiple constraints for the track-following

systems of an optical disk drive," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, vol. 45, no. 4, pp. 638-645, 1998.

[7] J.-H. Moon, M.-N. Lee, and M. J. Chung, "Repetitive control for the track-following servo system of an optical disk drive," *IEEE Trans. Contr. Syst. Techn.*, vol. 6, no. 5, pp. 663-670, 1998.

[8] K.-S. Kim, "Analysis of optical data storage systems-tracking performance with eccentricity," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 52, no. 4, pp. 1056-1062, 2005.

[9] M. Suzuki, H. Tanaka, and Y. Miura, "Pull-in condition and method of tracking servo in optical disk drive," *Jpn. J. Television*, vol. 44, no. 10, pp. 1391-1397, 1990 (in Japanese).

[10] 김은희, 오준호, "광디스크 드라이브의 폴인(pull-in) 성능 향상을 위한 이득 스케줄링 제어기의 설계," 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제14권 제5호, pp. 462-466, 2008.

[11] T. Yamaguchi, K. Shishida, S. Tohyama, and H., Hirai, "Mode switching control design with initial value compensation and its application to head positioning control on magnetic disk," *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 43, no. 1, pp. 65-73, 1996.

[12] Y. Li, C. Smith, L. Guo, and W. Guo, "Optimization of initial value compensation for settle control in hard disk drives," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, no. 2, pp. 797-801, 2005.

[13] L. Yang and M. Tomizuka, "Short seeking by multirate digital controllers for computation saving with initial value adjustment," *IEEE Trans. Mechatronics*, vol. 11, no. 1, pp. 9-16, 2006.

[14] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1995.

유 정 래



1972년 2월 6일생. 1996년 한국과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 및 2004년 박사. 2004년~2005년 9월 삼성전자 책임연구원. 2005년 10월~현재 국립서울산업대학교 제어계측공학과 조

교수. 관심분야는 강인 동작 제어, 광디스크 드라이브 서보 제어, DSP를 이용한 디지털 제어 시스템 설계.

도 태 용



1969년 3월 8일생. 1992년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 및 1999년 박사. 1997년~2001년 삼성전자 책임연구원. 2002년~현재 국립한밭대학교 제어계측공학과 부교수. 관심분야는 반복 학습 제어, 반복 제어, 강인제어, DSP 기반 디지털 제어, 지능

로봇.