

단일 빔을 이용한 고밀도 광 디스크 드라이브의 Radial Tilt 검출 및 보상

도태용, 마병인, 최병호
삼성전자 디지털 미디어 연구소

Raidal Tilt Detection using One Beam and Its Compensation in a High Density Optical Disk Drive

Tae-Yong Doh, Byung In Ma, Byoung Ho Choi
Digital Media R & D Corporate Center, Samsung Electronics Co., Ltd

Abstract - 광 디스크의 용량을 증가시키기 위해선, 레이저 다이오드의 단파장화와 렌즈의 개구수 증가가 수년 동안 시도되어왔다. 불행히도 이러한 노력들은 디스크 틸트(tilt)로 인해 야기되는 코마(coma) 수차로 인한 부작용을 유발하였다. 이런 문제를 해결하기 위해, 램(random access memory, RAM) 디스크의 경우 몇 가지 검출과 보상 방법이 제안되었다. 그러나, 롬(read only memory, ROM) 디스크의 경우 아직까지 뚜렷한 해결책이 제시되지 않고 있다. 본 논문에서는 8분할 광 검출기에 의해 생성되는 차동 위상 검출(differential phase detection, DPD) 신호를 이용한 고밀도 롬 디스크에서 래디얼(radial) 틸트를 검출하는 방법을 제안한다. 3축 렌즈 구동형 액츄에이터(actuator)를 이용하여 개발한 래디얼 틸트 서보로 검출된 래디얼 틸트를 보상한다. 액츄에이터의 회전이 트래킹(tracking) 서보(servo)에 미치는 영향을 소개한다. 끝으로 제안된 방법의 유용성을 고밀도 롬 드라이브에 대한 실험을 통해 검증한다.

1. 서론

대용량의 광 디스크 장치를 개발하기 위해, 높은 개구수(numerical aperture, N.A.)를 가지는 대물 렌즈와 청색 레이저를 사용하게 될 예정이다. 그러나, 이런 광 디스크 시스템은 디스크 틸트(tilt)에 의한 코마(coma) 수차에 취약하다. 램(random access memory, RAM) 디스크의 경우 이런 문제를 해결하기 위해 다양한 디스크 틸트 검출 및 보상 방법이 개발되었다. Ishibashi는 광 디스크에서 반사되는 회절 빔의 간섭을 이용하여 래디얼(radial) 틸트를 검출하였다 [1]. Gerber와 Gage는 틸트 오차 신호를 생성하기 위해, 다수의 트래킹(tracking) 신호를 사용하였다 [2]. Yamada 등은 DVD-RAM [3]을 위한 DC 래디얼 틸트 서보를 개발하였다 [4]. 그러나, 롬(read only memory, ROM) 디스크의 경우 확실한 방법이 아직까지 제시되지 않고 있다. 본 논문에서는 8분할 광 검출기에서 생성되는 차동 위상 검출(differential phase detection) 신호를 이용한 고밀도 롬 디스크의 래디얼 틸트 검출 방법을 제안한다. 검출된 래디얼 틸트는 3축 렌즈 구동형 액츄에이터(actuator)로 이루어진 래디얼 틸트 서보(servo)에 의해 보상된다. 액츄에이터의 회전은 트래킹 서보 루프에 부가적인 외란으로 작용한다. 여기서는 이를 제거하기 위한 두 가지 방법에 대해서 소개한다. 최종적으로 고밀도 롬 드라이브에 대한 실험을 통해 제안된 방법의 유용성을 검증한다.

2. 차동 위상 검출 신호를 이용한 래디얼 틸트 검출

고밀도 롬 디스크에서의 래디얼 틸트 량을 검출하는 원리를 그림 1과 그림 2를 참조하여 설명한다. 포커스(focus)와 트래킹 서보가 작동한다고 가정할 때, 레이저

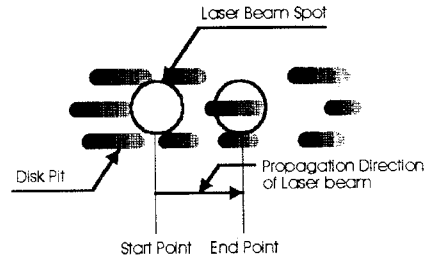


그림 1. 롬 디스크의 구조.

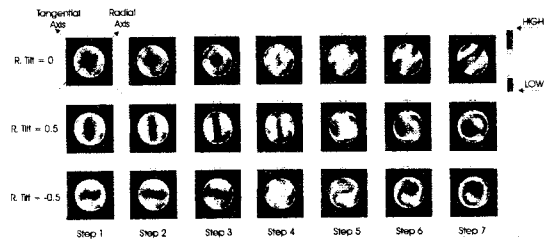


그림 2. 반사 빔의 광도 분포에 대한 모의 실험 결과. (모의 실험 조건 : $\lambda = 405\text{nm}$, 개구수 = 0.6, 트랙 피치 = $0.37\mu\text{m}$, 피트 폭 = $0.16\mu\text{m}$, 최소 피트 길이 = $0.25\mu\text{m}$, 디스크 두께 = 0.6mm)

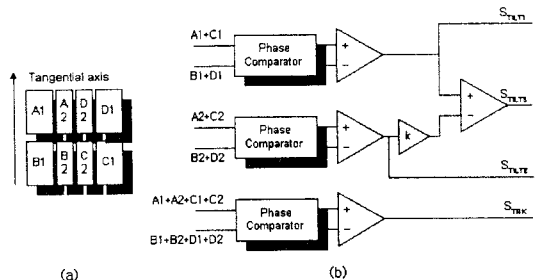


그림 3. 래디얼 틸트 검출: (a) 8분할 광 검출기 (b) 검출 방법에 대한 개략도.

빔 스팟(spot)은 그림 1에서처럼, 트랙을 따라 이동한다. 래디얼 틸트가 없을 경우, 반사 빔의 광도는 롬 디스크의 피트(pit)와 미러(mirror) 영역에 관계없이 균일하게 분포된다. 그러나, 래디얼 디스크 틸트에 의한

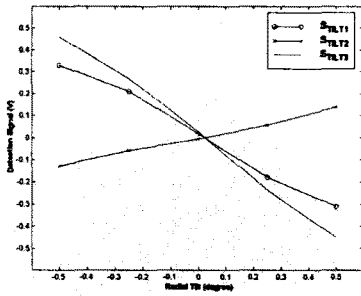


그림 4. 검출 신호의 모의 실험 결과. ($k = 1$ 일 때, S_{TILT1} 와 S_{TILT2} , S_{TILT3} 신호들)

코마 수차가 발생할 경우, 그림 2에서 알 수 있는 것처럼, 빔 광도는 막대 모양으로 한 쪽으로 밀집된다. 광 밀도가 높은 부분에서 발생하는 신호의 위상과 그렇지 않은 곳의 위상은 확연한 차이를 가진다. 그리고, 0.5° 의 래디얼 틸트를 가진 디스크에서 발생하는 막대 모양은 -0.5° 의 그것과 수직이다. 따라서, 그림 3과 같이 8 분할 광 검출기 [5]의 외부 영역이나 내부 영역, 이것들의 조합으로부터 얻어지는 차동 위상 검출 (differential phase detection, DPD) 신호를 이용하면 래디얼 틸트의 크기와 위상을 측정할 수 있다. 그림 2에서 제시한 조건으로 모의 실험을 수행하였을 경우, 래디얼 틸트 검출 성능은 그림 4와 같이 요약할 수 있다.

2. 래디얼 틸트 서보 시스템

그림 5는 래디얼 틸트 서보와 트래킹 서보 시스템을 설명하기 위한 것이다. 그림 3의 S_{TILT1} 와 S_{TRK} 가 래디얼 틸트 오차와 트래킹 오차로 사용되었다. 래디얼 틸트 서보를 위한 그림 6과 같이 포커스, 트래킹 축뿐만 아니라, 트래킹 방향으로 대물 렌즈가 회전 가능한 3축 렌즈 구동형 액추에이터가 개발되었다. 래디얼 틸트 서보에 의한 액추에이터 회전은 레이저 빔 스팟의 위치를 변화시킨다. 즉, 래디얼 틸트 서보는 그림 5의 오른쪽에 표현된 것과 같은 부가적인 외란을 발생시킨다. 이 외란을 보상하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 트래킹 서보 루프 이득을 증가시키는 것이다. 트래킹 서보 루프를 재설계하기 위해서는 트래킹 서보와 래디얼 틸트 서보와의 관계를 먼저 살펴보자. 먼저 외란 d 와 오차 e , 플랜트 P , 보상기 C 를 다음과 같이 정의하자.

$$d = [d_T \ d_R]^T, \quad e = [e_T \ e_R]^T, \quad (1)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_T & k_c P_R \\ 0 & P_R \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_T & 0 \\ 0 & C_R \end{bmatrix}. \quad (2)$$

아래 첨자 T 와 R 은 트래킹과 래디얼 틸트를 의미하고, k_c 는 대물 렌즈와 액추에이터의 무게 중심간의 유효 거리이다. d 와 e 의 관계는

$$-e = PCe + d \quad (3)$$

이기 때문에, 래디얼 틸트 오차와 트래킹 오차는

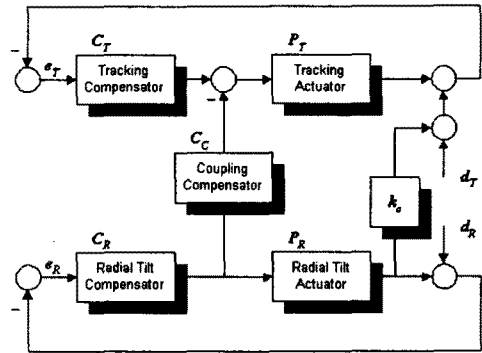


그림 5. 래디얼 틸트 서보와 트래킹 서보 시스템.

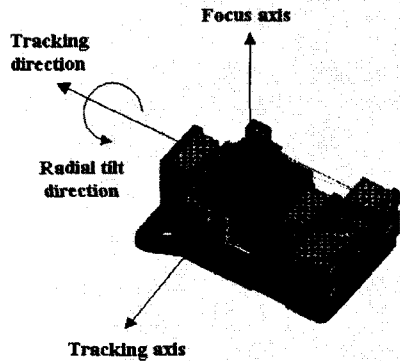


그림 6. 3축 렌즈 구동형 액추에이터.

$$e_R = \frac{1}{1 + P_R C_R} d_R \quad (4)$$

$$e_T = \frac{k_c P_R C_R}{(1 + P_R C_R)(1 + P_T C_T)} d_R - \frac{1}{1 + P_T C_T} d_T \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 만약

$$\begin{aligned} |P_R(j\omega)C_R(j\omega)| &\gg 1, \quad \omega \in [0, \omega_c) \\ |P_R(j\omega)C_R(j\omega)| &\cong 0, \quad \omega \in [\omega_c, \infty) \end{aligned}$$

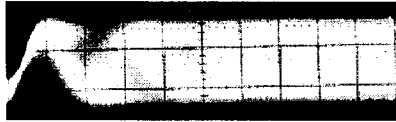
이면, 식 (5)는 다음과 같이 표현될 수 있다. 여기서, ω_c 는 래디얼 틸트 서보의 차단 주파수이다.

$$e_T \cong \frac{k_c d_R(j\omega) - d_T(j\omega)}{1 + P_T(j\omega)C_T(j\omega)}, \quad \omega \in [0, \omega_c) \quad (6)$$

따라서, 트래킹 서보 루프는 d_T 뿐만 아니라, 래디얼 틸트 서보 루프의 제어 대역 내에 $-k_c d_R$ 도 제거할 수 있도록 다시 설계되어야 한다. 이 방법은 서보 구조는 간단하지만 d_T 와 $-k_c d_R$ 의 위상 특성을 충분히 활용하지 못하기 때문에 신중하다 (conservative). 두 번째 방법은 그림 5의 중앙에 표현된 결합 (coupling) 보상기 C_c 를 더하는 것이다. 그 결과, 전체 보상기 C 는



(a)



(b)



(c)

그림 7. RF 신호들: (a) 래디얼 틸트 = 0° 일 때, RF 신호 (b) 래디얼 틸트 = 0.5° 이고, 래디얼 틸트 서보가 동작하지 않을 때의 RF 신호 (c) 래디얼 틸트 = 0.5° 이고, 래디얼 틸트 서보가 동작할 때의 RF 신호.

$$C = \begin{bmatrix} C_T & C_C \\ 0 & C_R \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 재정의된다. 래디얼 틸트 오차는 식 (4)와 동일하고 트래킹 오차는

$$e_T = \frac{P_T C_C + k_c P_R C_R}{(1 + P_R C_R)(1 + P_T C_T)} d_R - \frac{1}{1 + P_T C_T} d_T \quad (8)$$

와 같이 다르게 표현된다.

$$C_C = -k_c \frac{P_R C_R}{P_T} \quad (9)$$

그러므로, 만약 결합 보상기가 다음과 같이 선택되면, 부가적인 외란은 완벽하게 제거된다. 그러나, 이 방법은 서보 구조가 다소 복잡해지고, 플랜트에 대한 정확한 정보를 필요로 한다.

3. 실험 및 검토

본 논문에서는 간단한 구조 때문에 첫 번째 방법을 사용하여 실험을 수행하였다. 래디얼 틸트 서보 시스템의 성능을 검증하기 위해서, 래디얼 틸트 서보가 작동할 때와 아닐 때의 RF 신호의 아이(eye) 패턴과 래디얼 틸트 디스크에 대한 지터(jitter) 특성을 비교한다. 그림 7은 다양한 조건에서의 RF 신호들이다. 래디얼 틸트가 없을 경우, 그림 7(a)에서 볼 수 있는 것처럼 RF 신호의 아이 패턴은 아주 뚜렷하다. 그러나, 래디얼 틸트가 인가되었을 때는 아이 패턴을 관측하는 것이 거의 불가능하다는 것을 그림 7(b)에서 확인할 수 있다. 래디얼 틸트 서보가 동작하면, 그림 7(c)의 아이 패턴은 그림 7(a)의 그것만큼 선명하지는 않지만, 그림 7(b)에 비하면, 확실하게 아이 패턴을 관측할 수 있다. 그림 8은 래디얼 틸트가 증가함에 따라 지터가 어떻게 변하는지를 보여준

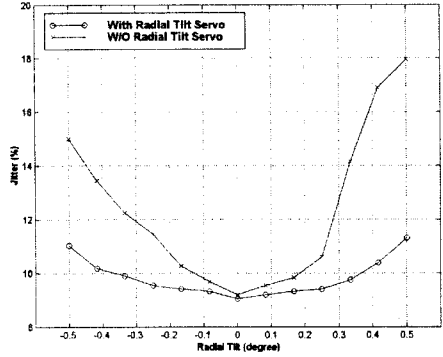


그림 8. 지터 특성 곡선: 지터 대 래디얼 디스크 틸트.

다. 래디얼 틸트 서보가 작동하지 않을 때는 래디얼 틸트가 증가함에 따라 지터 특성이 급격하게 나빠진다. 그러나, 래디얼 틸트 서보가 작동할 때는 지터 레벨의 변화가 거의 없다. ±0.5 도의 래디얼 틸트가 인가되었을 때, 래디얼 틸트가 없을 경우에 비해, 지터는 약 2% 정도 증가하는 데 그친다.

4. 결론 및 추후 과제

고밀도 롬 디스크에서 래디얼 틸트를 검출하는 방법을 제안하였다. 그리고, 제안된 검출 방법을 기본으로 3축 렌즈 구동형 액츄에이터를 이용한 래디얼 틸트 서보를 개발하였다. 본 논문에서는 액츄에이터의 회전으로 인해 발생하는 트래킹 서보 루프의 부가적인 외란을 억압할 수 있는 두 가지 해결책을 제안하였다. 실험을 통해서, 래디얼 틸트 서보가 래디얼 틸트에 의해 지터 값이 증가하는 것을 방지하는 것을 확인하였다.

그러나, 트래킹 루프를 재설계하는 방법에서는 보다 부가적인 외란만 효율적인 억압할 수 있는 새로운 루프 설계 방법이 필요하고, 결합 보상기를 이용하는 방법에서는 강인 제어나 적응 제어 방법을 이용하여 플랜트에 대한 정확한 정보가 없더라도 완벽하게 부가적인 외란을 억압할 수 있는 길을 모색하여야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Ishibashi, *U.S. Patent* 5523989, 1996.
- [2] R. E. Gerber and E. C. Gage, *U.S. Patent* 5808985, 1998.
- [3] DVD Specification for Rewritable Disc (DVD-RAM) part 1, Physical Specification, version 2.0, 2000.
- [4] S. Yamada, S. Nishwaki, A. Nakamura, T. Ishida, and H. Yamaguchi, "Track center servo and radial tilt servo system for a digital versatile rewritable disc (DVD-RAM)," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 867-870, part 1, no. 2B, 2000.
- [5] C. S. Chung, T. K. Kim, S. T. Jung, C. W. Lee, S. S. Joo, and I. S. Park, "New method of the readout signal generation to reduce the adjacent crosstalk," *Proc. ISOM & ODS*, pp. 237-239, 1999.