

각 다중화 방식의 홀로그래픽 정보저장기기의 양방향틸트 보상시스템 설계

Design of 2-axis compensation servo system for angle multiplexing Holographic Data Storage

임성용*, 김낙영**, 한초록*, 박경수*, 박노철*, 양현석[†], 박영필*,

Sung-Yong Lim, Nakyeong Kim, Cho-Lok Han, Kyoung-su Park, No-Cheol Park
Hyunseok Yang and Young-Pil Park

(2011년 3월 14일 접수; 2011년 3월 23일 심사완료; 2011년 3월 24일 게재확정)

Abstract

Holographic Data Storage System, one of the next generation data storage devices, is a 2-dimensional page oriented memory system using volume holograms in writing and retrieving process. Recently photopolymer with disc type substrate was selected as a media for the Holographic Data Storage System. The disc tilt occurs when the media rotates and the external disturbance applies. The disc tilt causes the change of the angle between the reference beam and the media, the data cannot be retrieved with the right angle or other data page is retrieved. The tilt is generated in a 2-axis direction (tangential, radial). The tangential tilt direction is the same with the multiplexing plane, while the radial tilt direction is a perpendicular to the multiplexing plane. In this research we propose 2-axis tilt angle servo system. The tilt errors are measured by using external photo detector and the additional red laser. Then the tangential direction tilt is compensated by using the galvano mirror. Also the radial direction tilt is compensated by the rotating prism between the relay lens in the reference field. Finally we confirm the compensation results through the Signal to Noise Ratio(SNR) and Bit Error Rate(BER).

Key Words : Angle multiplexing Holographic Data Storage, 2-axis tilt servo compensation system

1. 서론

홀로그래픽 정보저장기기는 차세대 정보저장기 기 중의 하나이다. 2 차원 데이터페이지(홀로그 램)를 한 지점에 중첩 기록함으로써 이론적으로 1Gb/s 의 데이터 전송률을 구현 할 수 있고 1Tbit/cm³ 의 고밀도 기록이 가능한 장점을 가지 고 있다[1]. 한 지점에 홀로그래픽을 중첩 기록하 는 기법을 다중화 기법이라 하는데 홀로그래픽의 다중화 기록/재생 방법으로는 각도 다중화, 파장 다중화, 위상코드 다중화 등 여러 가지 기법이

제안되어 있다. 이러한 여러 가지 기법 중 각 다 중화 (angle multiplexing) 방식은 그 구성이 간단 하고, 상용화 가능성이 크므로 현재 홀로그래픽의 다중화 기록/재생에 가장 널리 사용되는 방식이 다. 최근에 홀로그래픽 저장매체는 기능성 유기 광 저장 물질인 포토폴리머(photopolymer)를 기반 으로 하는 디스크 형태로 개발되고 있다. 이는 기존의 광 정보저장기기와 같이 상용화와 소형화 에 유리하기 때문이다[2-3]. 그러나 디스크의 회 전, 외란, 스피들 모터의 기구적인 공차, 저장/재 생을 반복하기 위한 디스크 탈 착시 틸트오차가 양방향(2-axis)으로 발생하게 된다. 각 다중화 방 식의 홀로그래픽 정보저장기기는 특히 틸트오차 에 민감하기 때문에 양방향으로 발생하는 틸트오 차에 대한 보상이 반드시 필요하다[4].

본 논문에서는 각도 다중화 방식의 홀로그래픽 정보저장기기에 적합한 양방향 틸트오차를 보상

[†] 연세대학교 기계공학과
E-mail : hsyang@yonsei.ac.kr
TEL : (02) 2123-2824

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 정보저장공학 협동과정

하는 시스템을 제안하고 재생이미지의 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio)와 비트오차율(Bit Error Rate)를 통해 제안된 보상시스템의 타당성을 모의실험과 실험을 통해서 성능을 평가 하였다.

2. 양방향 틸트오차

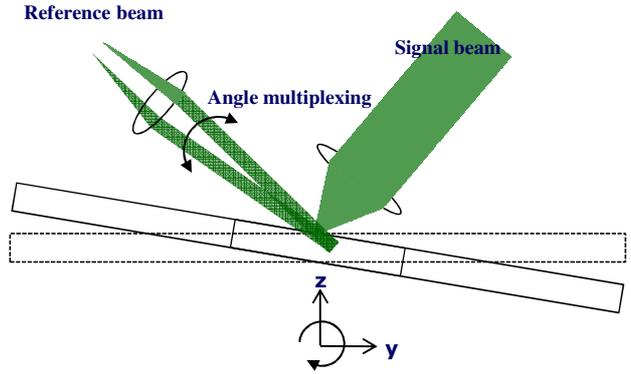
Fig.1(a) 같이 각 다중화 평면과 동일한 평면상에서 발생하는 틸트오차를 접선방향 틸트오차(tangential tilt error) 라고 한다. Fig.2(b)는 각 다중화 평면과 수직한 방향으로 발생하는 틸트오차를 원주방향 틸트오차(radial tilt error) 라고 한다.

접선방향 틸트오차 방향은 각다중화 방향과 같기 때문에 갈바노미러(Galvano mirror)의 각도 변화로 틸트오차 보상이 가능하다(Fig.2). 하지만 원주방향 틸트오차는 각도다중화 방향과 수직이기 때문에 같은 방법으로는 보상 할 수 없다. 따라서 x-z 평면을 기준으로 미디어로 입사되는 기준 빔의 각도를 변화시킬 수 있는 추가적인 광학계가 필요하다(Fig.3). 따라서 우리는 원주방향 틸트오차를 보상하기 위해 각 다중화 기법을 위해 쓰이는 참조빔(reference beam) 영역의 두 렌즈 사이에 사각 프리즘을 삽입하여 원주방향각도를 변화시킬 수 있는 광학계를 선정하였다[5].

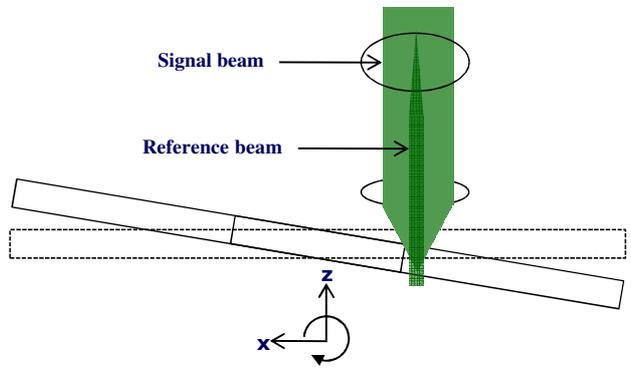
이 방법을 이외에 디스크의 회전을 통한 원주방향 틸트오차 보상방법[6]과 Inphase社에서 개발한 pitch corrector 를 이용한 보상 방법이 있다[7]. 하지만 디스크의 회전을 통한 보상 방법은, 보상을 위한 디스크의 회전에 의해 빔의 사이즈를 줄이기 위한 aperture 에 재생빔이 잘려나갈 수 있다. 또한 pitch corrector 는 시스템의 구성이 복잡한 단점이 있다. 반면에 참조빔 영역의 두 렌즈 사이에 사각 프리즘을 넣는 방법은 재생빔의 잘림 없이 간단하게 원주방향 틸트오차를 보상할 수 있다는 장점이 있다.

프리즘의 회전에 의한 원주방향 각 변화는 식 (1)과 같이 표현된다. 프리즘의 회전에 의한 빔의 굴절로 빔이 $\Delta\theta$ 만큼 꺾이게 된다. n_1 은 공기의 굴절률, n_2 은 프리즘의 굴절률, d 는 프리즘의 두께, f 는 렌즈의 초점거리다.

$$\begin{cases} n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \\ \theta_3 = \theta_1 - \theta_2 \\ d' = d / \cos(\theta_2) \\ x = d' \sin(\theta_3) \\ \therefore \Delta\theta = \tan^{-1}(x/f) \end{cases} \quad (1)$$



(a) Direction of tangential tilt



(b) Direction of radial tilt
Fig. 1 direction of 2-axis tilt

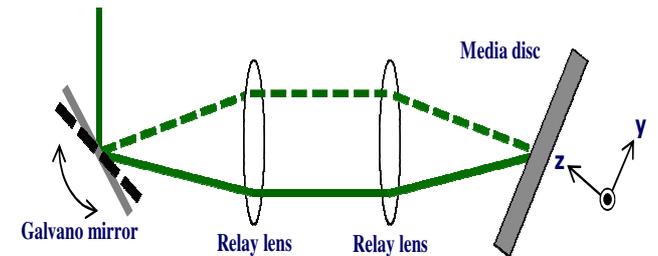


Fig. 2 Angle variation of the galvano mirror

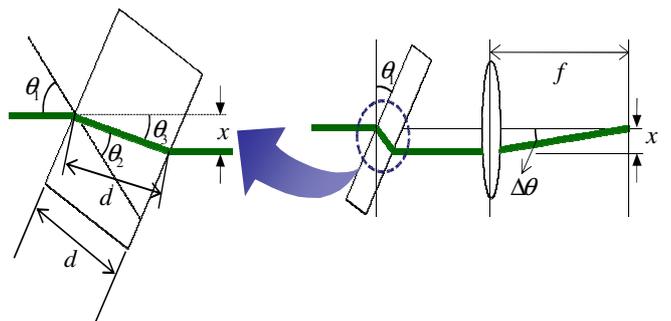


Fig. 3 Variation in angle of reference beam caused by rotating prism

3. 원주방향 틸트어러 보상

프리즘의 각도변화에 따른 원주방향의 각도 변화량을 확인하기 위해 상용 광학해석 프로그램인 CodeV 를 이용하여 모의실험을 진행하였다. 모의 실험조건은 Table 1 과 같다. Fig.4 와 같이 프리즘 각도가 80°까지 변화할 때 최대 0.95° 까지 각도 보상을 할 수 있다. 또한 실험을 통해서 변화량이 조금 감소하지만 모의실험과 같은 경향을 가지는 것을 확인하였다.

실제 보상시스템을 구성할 때 원주방향 틸트량이 측정된 후에 틸트를 보상할 수 있는 원주방향의 각도를 가질 수 있게 프리즘을 움직여 보상해주어야 한다. 따라서 원주방향각도에 대한 프리즘 각도가 계산되었다(Fig.5).

프리즘의 각도변화에 대한 원주방향의 각도 변화량이 비선형성을 갖기 때문에, 식 2 와 같이 3차 다항식으로 커브피팅을 해, 원주방향 틸트에 대응되는 프리즘의 각도를 구하였다. θ_{prm} 는 프리즘 각도, θ_{rad} 는 측정된 원주방향 틸트량이다.

$$\theta_{prm} = 74.43\theta_{rad}^3 - 167.13\theta_{rad}^2 + 179.62\theta_{rad} \quad (2)$$

Table 1 Condition of radial tilt compensation method simulation

Wavelength	532nm
Effective pupil diameter	3mm
Lens	PAC073(Newport)
Front focal	91.957mm
Back focal	99.669mm
Prism material	BK7
Prism thickness	2mm
Prism position	Center (focus)

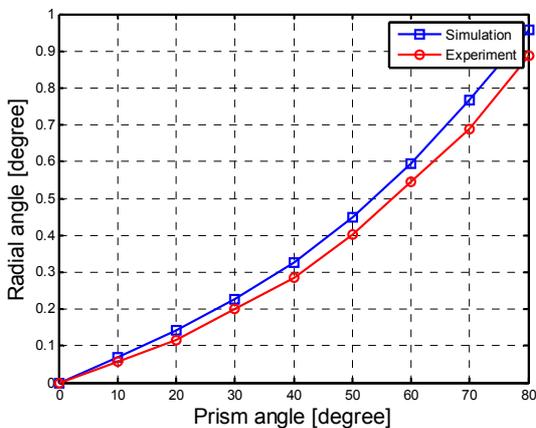


Fig. 4 Compare with simulation and experiment (variation of radial angle)

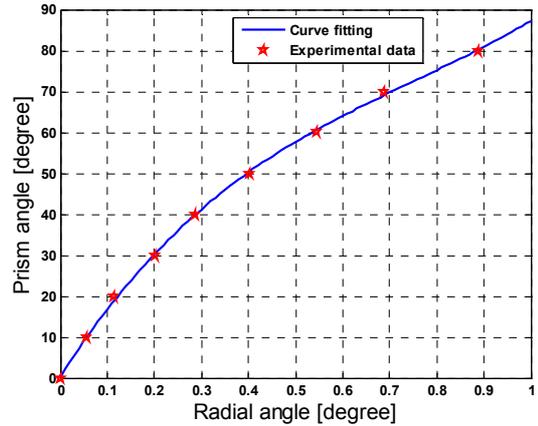


Fig. 5 Angle table (3rd order polynomial)

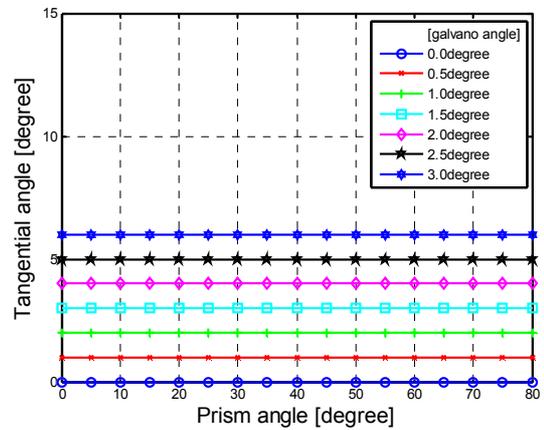


Fig. 6 Evaluation of interference effect between tangential and prism angle

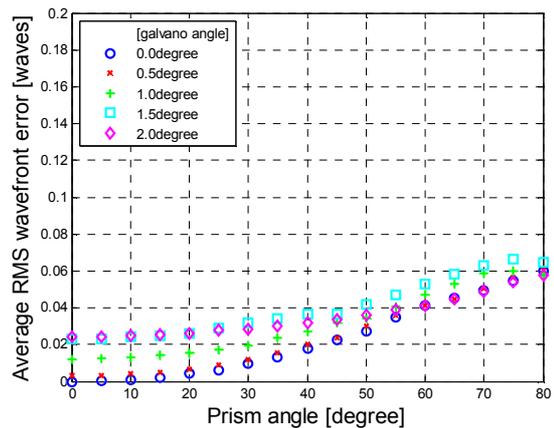


Fig. 7 Aberration of lens in angle of reference beam

또한 프리즘의 회전이 접선방향 각도변화에 미치는 간섭 영향을 확인하기 위해 모의실험을 실행하였다. Fig.6 에서 확인 할 수 있듯이 프리즘의 각도변화를 통한 원주방향 변화와 접선방향 각도간의 간섭현상이 발생하지 않는다. 또한 프리즘의 각도변화에 의해서 초점거리가 바뀌게 되

는데 이로 인한 초점거리 변화는 파면수차를 발생시켜 기록시 간섭에 의한 홀로그램 생성에 심각한 문제를 초래할 수 있다. 따라서 프리즘의 변화에 따른 파면수차를 계산하였다. 일반적으로 파면수차의 영향에 의한 광학계 왜곡은 Strehl ratio 로 평가하는데, 크기가 0.8 Strehl (0.0745 wave RMS error)까지 허용영역으로 간주된다. 모의실험결과 접선각도변화 0~2° 범위에서, 프리즘 각도변화는 80° 범위에서 평가기준을 만족하는 것을 확인하였다. 이를 통해 제안된 원주방향 틸트보상 시스템이 광학적으로 문제가 없다는 것을 확인 할 수 있다.

4. 양방향 틸트오차 보상 시스템

4.1 실험 시스템 구성

실험을 위해 구성된 광학 및 구동 시스템의 구성은 Fig.8, Fig.9 와 같다. 532nm Nd-YAG 레이저가 사용되었다. 그리고 1024×768pixels, 36μm 픽셀 피치(pixel pitch)의 공간 광 변조기(Spatial Light Modulator), 1280×1024pixels, 12μm 픽셀 피치의 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)가 사용되어 1:3 의 오버샘플링(oversampling) 비를 갖는다. 또한 빔의 가우시안 분포를 평활하게 만들어서 250×250 데이터페이지의 픽셀값들의 포화를 막기 위해 신호빔 영역에 확대기(expander)를 추가하였다. Fig.8 의 빔의 형상에서 보듯이 빔 확대기를 통과한 이후 통과전의 빔보다 빔의 가우시안 분포가 평활화 된 것을 확인할 수 있다. 구성된 시스템의 광학적인 특성은 Table 2 와 같다.

4.2 틸트보상 절차

제안된 틸트보상 시스템의 성능을 평가하기 위해서 트랙 및 포커싱 오차를 최소화 하며 틸트오차를 생성하는 방법이 필요하다. 디스크 탈착을 통해서 트랙 및 포커싱 방향의 오차를 최소화 하며 틸트오차를 발생시킬 수 없기 때문에 Fig. 10 과 같이 모터스핀들과 디스크 사이에 고무를 끼워서 나사의 회전수를 조절에 의해서 임의로 틸트를 생성할 수 있게 한다. 이렇게 만들어진 틸트는 디스크의 회전을 통해 양방향틸트로 나타난다. 틸트의 측정을 위해 Fig.11 과 같이 레드레이저를 입사시키고 미디어에서 반사되어 나온 반사빔을 4 분할 포토다이오드(photo diode)를 이용해 측정한다. 틸트의 방향과 크기에 포토다이오드에 입사되는 빔의 위치가 달라지게 된다. 포토

다이오드의 각 셀의 기호가 Fig. 11 과 같다면 원주방향 틸트와 지름방향틸트는 식(3)과 같이 계산되어진다. 포토다이오드에서 측정된 오차신호가 증폭기(amplifier)를 거쳐 DSP(Digital Signal Processor)에 입력신호로 들어간다. 이 오차신호를 기반으로 DSP 에 구현되어 있는 접선방향 틸트 오차보상을 위한 갈바노미러 구동알고리즘과 원주방향 틸트보상을 위한 스테핑모터 구동알고리즘에 의한 출력신호가 드라이버를 통해 각 구동기에 전달되어 양방향의 틸트오차를 보상한다.

$$\begin{aligned} \text{Tangential tilt} &= (A + C) - (B + D) \\ \text{Radial tilt} &= (A + B) - (C + D) \end{aligned} \quad (3)$$

Table 2 experimental optical condition

Image size	250×250pixels, (9mm×9mm)
Image lens focal length	40mm
Numerical aperture	0.16

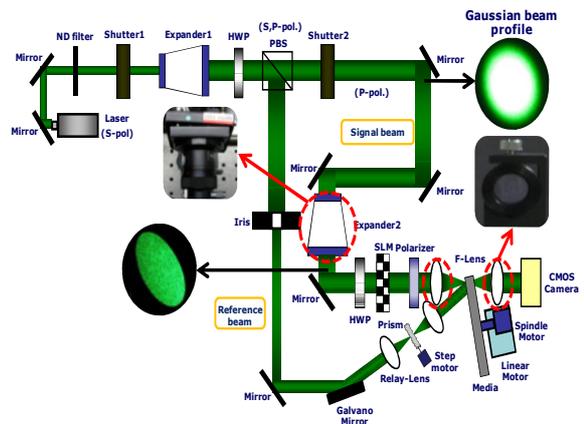


Fig. 8 Layout of Holographic Data Storage System in CISD

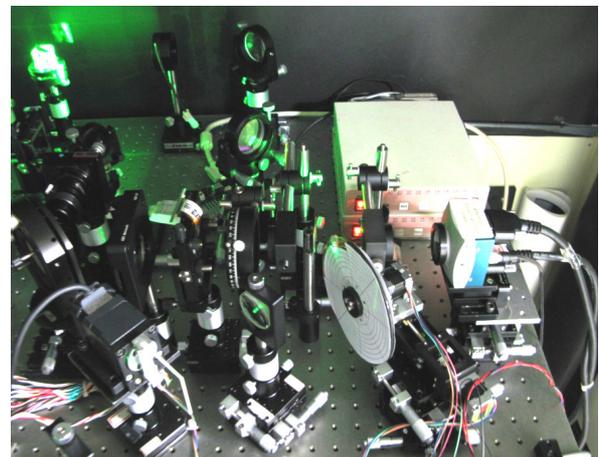


Fig. 9 experimental setup

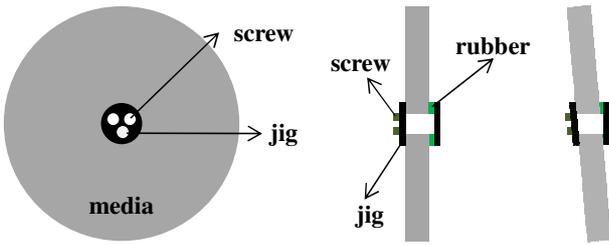


Fig. 10 Tilt generating method

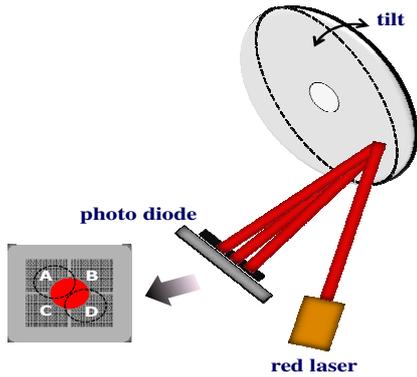


Fig. 11 Layout of tilt detection method

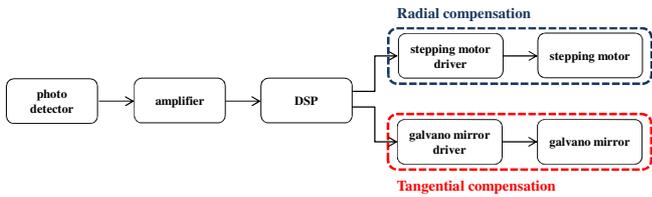


Fig. 12 Layout of 2-axis tilt servo control system

4.3 실험 결과 및 고찰

앞에서 언급된 절차에 따라 실험을 진행하였다. Fig.13 와 Fig.14 와 같이 디스크의 초기 틸트량이 약 0.07°임을 알 수 있다. 이는 스프링들에 디스크를 고정시키는 과정에서 3 개의 나사 조임량의 정도 차이와 추가적인 틸트 발생을 위해 부착된 고무의 영향일 것으로 예상된다.

0.07° 초기 틸트가 발생된 상태에서 5 개의 기록위치(spot)에 데이터페이지를 기록하고 나사 조임량의 차이를 주어 추가적으로 틸트를 가하여 0.2°의 틸트를 발생시켰다. 추가적인 틸트로 인해 재생 데이터 페이지의 성능(quality)이 저하되고, 저하된 성능은 데이터페이지의 SNR 감소와 BER의 증가로 나타난다. SNR은 식 4를 통해 구해진다. m_0, m_1 은 0과 1의 평균값이고, σ_0, σ_1 는 0과 1의 표준편차다.

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{m_1 - m_0}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}} \quad (4)$$

BER 계산에는 6:8 평형부호(balanced code)가 사용되었고 에러정정부호(Error Correction Code)는 적용되지 않았다. 틸트보상 전과 후의 SNR과 BER의 비교는 Table3에서 확인할 수 있다. 제안된 보상 시스템이 적용되었을 때 적용되기 전보다 SNR은 0.699~3.095dB 증가하였고, BER은 0.144~3.623% 감소하였다.

Table 3 SNR and BER compare

	SNR(dB)		BER(%)	
	cmp	w/o cmp	cmp	w/o cmp
Page1	8.566	7.867	0.023	0.167
Page2	9.070	5.975	0.012	3.635
Page3	5.966	6.187	0.346	3.205
Page4	6.396	4.629	0.033	1.019
Page4	7.627	4.724	0.030	2.149

cmp : compensated page
w/o cmp: without compensation

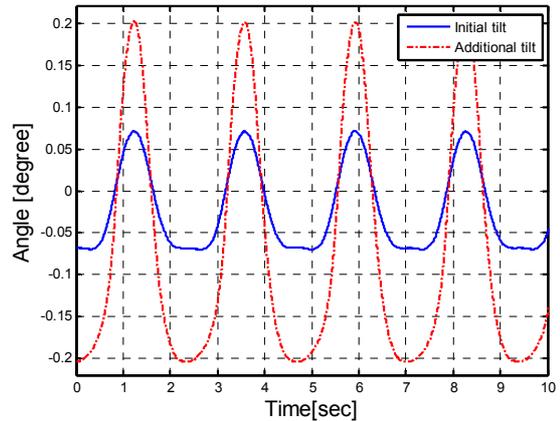


Fig. 13 Experimental measurement of tangential tilt

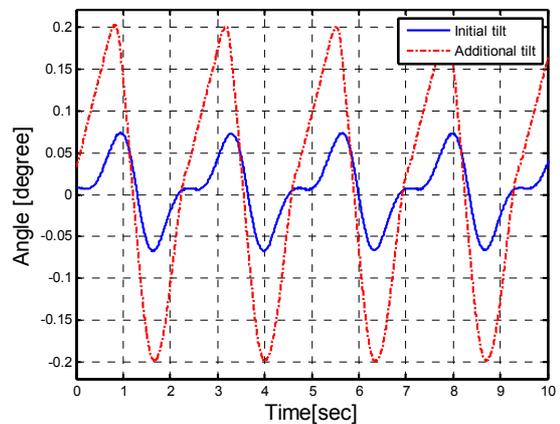


Fig. 14 Experimental measurement of radial tilt

실험결과를 통해서 기록 이후 재생을 위한 디스크 탈 착시 발생하는 틸트가 디스크 회전으로 디스크의 접선 및 원주방향으로 나타날 때, 또는 외란의 인가로 인해 발생하는 틸트를 보상할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

제안된 원주방향틸트 보상시스템을 양방향틸트 보상 시스템에 적용하였다. 트랙 및 포커싱 오차를 최소화 하며 틸트를 발생시킬 수 있는 방법으로 틸트를 발생시키고, 미디어에 반사되어 나오는 레드레이저를 포토다이오드로 측정하였다. 측정된 오차신호를 바탕으로 DSP 에 구현된 보상 알고리즘에 의해 실시간으로 발생하는 양방향틸트를 보상하였다. 보상 전과 후의 데이터 페이지의 SNR 과 BER 을 비교함으로써 보상성능을 평가함으로써 제안된 양방향틸트 보상시스템으로써 사용이 가능함을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0028140).

참고문헌

- [1] Hans J.Coufal, Demetri Psaltis and Glen T. Sincerbox, 2000 “Holographic Data Storage”, Springer
- [2] Kevin Curtis, William L. Wilson, M. Tackitt, Adrian J. Hill, and S. Campbell, 2000, High density, high performance optical data storage via volume holography: Viability at last?, Optical and Quantum Electronics 32: 393-404.
- [3] Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan, 2007, “Holographic Information Storage System: Today and Future”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 2, FEBRUARY
- [4] Alan Hoskins, Brad Sissom, Friso Schlottau, Edeline Fotheringham, Kevin Curtis, 2007, “Tolerances of a page-based holographic data storage system”, Proc. of SPIE Vol. 6620 662023-4
- [5] Nakyoung KIM, Pilsang YOON, Kunyul KIM, Gwitae PARK, Hyunseok YANG, 2010, “Radial Tilt Compensation Method of Holographic Disk Drive” Opt. Review Vol.17, No.1
- [6] Y. Matsumura, S. Hori, H. Sekine, K. Kogure, and M. Shimizu, 2007, “Radial Tilt Compensation Method of Holographic Disk Drive” Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 3837
- [7] Kevin Curtis, Tom Wilke, Invited Talk, 2007, "InPhase Professional Archive Drive Architecture" International Workshop on Holographic Memory, Penang Malaysia.