

# 홀로그래픽 정보저장 장치의 트래킹 서보 제어를 위한 LQG 제어기 설계

## LQG controller design for tracking servo control of holographic data storage system

이용희† 김상훈\* 김장현\*\* 양현석\*\*\*박영필\*\*\*

**Key Words :** Holographic data storage, tracking servo control, servo beam

### ABSTRACT

본 연구는 홀로그래픽 정보저장기에서 트래킹 서보 제어를 통해 원하는 데이터를 정확하게 기록 및 재생하기 위한 LQG 제어기를 제안하고 검증하는 것을 목적으로 한다. 서보광이라는 추가적인 광을 사용할 것을 제안하여, 서보광과 참조광 간의 간섭에 의해 기록매체에 서보 신호를 얻을 수 있게 하는 홀로그래프를 형성한다. 기록 및 재생과정에서 신호광이 기록, 재생됨과 동시에 서보광에 의한 서보 신호가 재생되고, 그 신호의 경로에 설치된 포토 다이오드로부터 디스크 형태에서 발생 할 수 있는 외란을 감지하게 된다. 감지된 외란 신호인 트래킹 에러 신호를 통해 참조광이 디스크의 정확한 위치에 조사되게 하기 위해 평판유리 액츄에이터를 사용한다. 이와 같은 서보 제어를 수행했을 경우 데이터 페이지가 정확하게 재생되며 SNR 과 BER 이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

방식 등이 있고, 사용하는 저장매체의 종류에는 체적을 갖는 cubic 타입을 사용하는 방식과 디스크 형태의 저장매체를 사용하는 방법이 있다(1).

디스크형태의 저장매체를 사용할 경우 ODD 의 경우와 마찬가지로, 외란으로 작용하는 진동, 충격, 편심 등으로 인해 데이터의 기록과 재생이 불안정하게 된다(3)(4). 그러므로 정확한 데이터 기록, 재생을 위하여 정확한 트랙 추종을 할 수 있도록 서보제어를 하는 것이 필요하다. 본 논문은 디스크형의 저장매체를 사용하는 홀로그래픽 정보저장 장치에서, 서보 트랙을 생성하고 서보트랙으로부터 재생되는 신호를 4 분할 포토 다이오드로 감지, 이를 바탕으로 평판유리와 서보모터를 이용해 트래킹 서보제어 하는 것을 제안한다. 이때 사용되는 제어 방식은 LQG 제어기이며, 제어 수행 결과, BER 와 SNR 이 개선되는 것을 확인하였다.

### 기호설명

- $n_1$  = 공기의 굴절률
- $n_2$  = 평판유리의 굴절률
- $\theta_1$  = 입사각
- $\theta_2$  = 굴절각
- L = 외란 입력 행렬
- $\zeta(t)$  = 외란
- $\Theta(t)$  = 센서잡음

## 1. 서론

최근 급속도로 성장하고 있는 정보 통신 산업과 멀티미디어 산업에서 기존의 텍스트 데이터 뿐만 아니라, 고용량의 이미지 및 동영상 등의 콘텐츠를 위하여 대용량의 정보 저장장치가 필요하게 되었다. 이로 인해 고용량의 저장 용량을 가지면서 고속으로 정보에 접근할 수 있는 새로운 방식의 저장 장치에 대한 요구가 발생되었고, 대응방안으로 등장한 것이 홀로그래픽 데이터 저장장치이다. 홀로그래피 기술은 100Gb/cm<sup>3</sup>이상의 저장용량과 1Gb/s 이상의 데이터 접근이 가능한 정보저장 기술로써 고용량의 이미지 및 동영상 등의 정보를 저장하기 위한 요구를 만족시킨다(1)(2).

홀로그래픽 데이터 저장장치가 차세대 정보 저장 장치임에도 불구하고, 아직까지 국제 표준이 정해지지 않은 상태이기 때문에 데이터의 저장방식에 대한 연구와 새로운 저장매체에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있는 상황이다. 데이터의 저장방식의 종류에는 비트 단위의 저장방식과 페이지 단위의 저장

## 2. HDSS 의 트래킹 서보제어 시스템

### 2.1 HDSS 시스템 구조

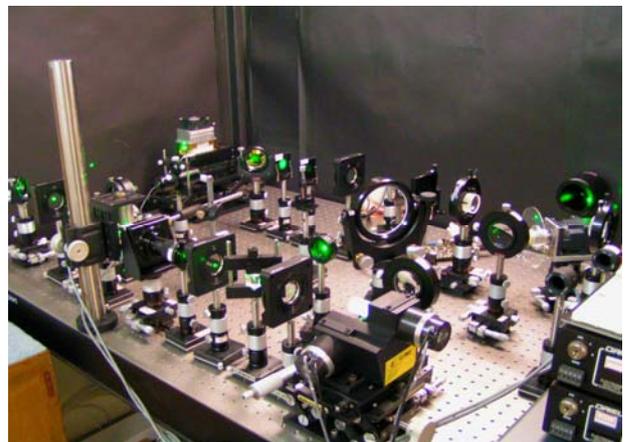


그림 1 Holographic Data Storage System

† 이용희; 연세대학교 기계공학과

E-mail : cion4242@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677,2824, Fax : (02) 365-8640

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 전기전자공학부

\*\*\* 연세대학교 기계공학과

을 수행하고 있는 시스템 구조가 그림 1 에 나타나 있다. 광원인 레이저 다이오드로부터 나온 광이 첫 번째 PBS 에서 참조광과 신호광으로 나뉘게 된다. 신호광은 SLM 을 거치면서 저장하고자 하는 데이터로 변조되고 참조광은 중첩기록을 위한 갈바노 미러를 거쳐 저장매체로 향하게 된다. 저장매체에서 만난 두 광은 간섭무늬를 형성하게 되고, 신호광을 제외한 참조광을 저장매체에 조사했을 경우 SLM 에 의해 변조된 데이터가 회절되어 CCD 에 나타난다.

### 2.2 서보트랙의 생성

본 논문에서는 정확한 트래킹 서보를 위해 데이터 저장 영역과 별개로 저장매체의 원주 방향으로 서보트랙을 생성한다. 참조광의 광로로부터 PBS 를 통해 서보광을 분리하게 되고, 서보트랙 홀로그램의 기록은 서보광과 참조광간의 간섭에 의해 수행된다.

데이터 기록 및 재생과정에서 지속적으로 서보신호가 재생이 되기 때문에 실시간으로 서보신호를 포토다이오드를 통해 감지할 수 있어 서보제어가 가능해진다.

### 2.3 시스템 모델링

액추에이터는 서보모터와 평판유리로 이루어져 있다. 포토다이오드로부터 받은 서보 신호가 서보모터의 입력이 되어 서보모터에 설치된 평판유리가 회전하게 된다. 평판유리의 회전을 통해 참조광이 정확하게 트래킹을 조사하게 된다.

#### (1) 서보모터

서보모터의 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$G_{motor}(s) = \frac{3501.6}{s^2 + 52.49s} \quad (1)$$

입력은 4 분할 포토다이오드로부터 푸쉬-풀 방법에 의해 나오는 전압이며, 출력은 서보모터의 각도이다.

#### (2) 평판유리

서보모터에 설치된 평판유리는 외란에 의해 데이터가 왜곡되어 기록, 재생되는 문제를 보상하는데 사용된다. 평판유리에 입사되는 광이 굴절해 투과되는 스넬의 법칙을 이용해 평판유리를 투과하면서 생기는 변위  $z$  를 식(2)와 그림 2 를 통해 확인 할 수가 있다.(5)

$$z = d \cdot y \cos \theta_1 = d (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \cos \theta_1$$

$$= d \left[ \tan \theta_1 - \tan \left[ \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \right] \right] \cos \theta_1 \quad (2)$$

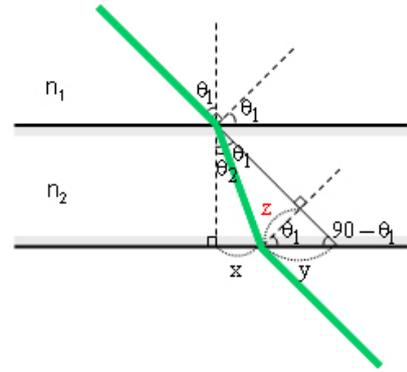


그림 2 스넬의 법칙

참조광이 평판유리에 입사하는 각도를 평판유리의 회전으로 변화시키고, 입사각의 변화에 의해 유도되는 변위  $z$  를 통해서 저장매체에 입사하는 참조광이 변화하게 된다.

#### (3) 액추에이터

본 논문에서 제안하는 제어기가 적용되는 시스템의 플랜트는 서보모터와 평판유리를 통해 얻을 수 있다. 플랜트의 상태공간 모델식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -52.49 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 20910 \end{bmatrix} u + L\zeta(t)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \Theta(t) \quad (3)$$

## 3. LQG 제어기 설계

### 3.1 제어기 설계

LQG 제어 방법은 플랜트에 대하여 최적 추정을 한 후 모델기준 보상기를 설계하여 출력 피드백 제어시스템을 구성하는 것이다. LQG 보상기에서는 설계 파라미터인 제어게인 행렬과 필터 게인행렬을 완전히 시행착오 방법에 의하여 선정하지만, 제안하는 LQG 보상기에서는 주어진 확률신호에 대하여 분산값이 최소가 되도록 kalman 필터를 설계하므로 실제 주어진 외란의 강도와 센서잡음의 강도값을 이용하여 설계 파라미터를 선정한다. (7)

#### (1) LQ 제어

식(5)의 상태 피드백 게인 행렬  $G$  를 구하기 위해 식(4)의 성능지수 함수  $J$  를 최소화 하기 위한  $Q$  와  $R$  을 시행착오 방법으로 통해 구한다.  $Q$  와  $R$  을 통해 Riccati equation 으로부터 게인 행렬  $G$  를 얻을 수 있게 된다.

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{x}^T(t)Q\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)R\mathbf{u}(t)]dt \quad (4)$$

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{G}\mathbf{x}(t) \quad (5)$$

### (2) Kalman filter

Kalman filter 동역학 식(6)의 kalman filter 게인 행렬  $\mathbf{H}$ 의 계산을 통한 상태변수 추정은 오프라인에서 룬지-쿠타 방식으로 수행된다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{H}[y(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)] \quad (6)$$

### (3) LQG 제어기

식 (6)의 상태 피드백 게인  $\mathbf{G}$ 와 식(7)의 kalman filter 게인  $\mathbf{H}$ 를 이용해 LQG 제어기의 전달함수를 도출하고, 시뮬레이션을 수행했다.

$$\mathbf{G} = [1.1180 \quad 0.0223] \quad (7)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 6.6699 \times 10^2 \\ 2.2250 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3.2 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 제어기를 그림 3에 나타난 블록선도에 적용시켜 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다.

#### (1) 결과

그림 3은 단위 계단 입력에 대한 응답이다. 제어기를 적용시키지 않았을 경우보다 오버슈트와 응답속도가 개선되어 있는 것을 확인할 수가 있다.

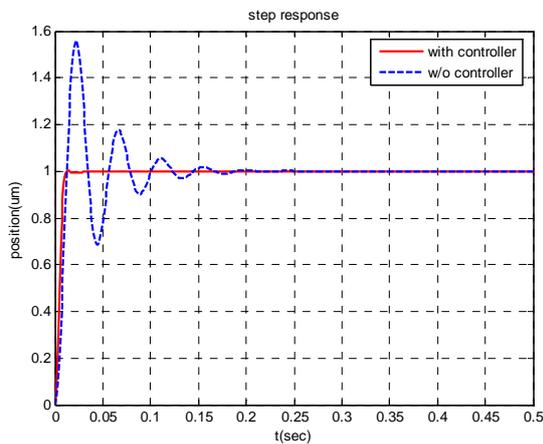


그림 3 과도 응답 결과

그림 4는 인위적으로 외란을 150um의 사인함수와 임의의 센서 잡음이 섞인 형태로 가했을 경우의 트래킹 에러 신호 (TES)와 제어기를 적용시켰을 때 역압된 트래킹 에러 신호이다.

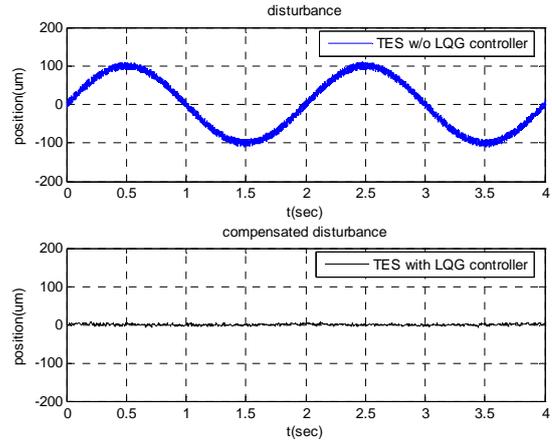


그림 4 외란에 대한 응답 결과

제어기가 적용됨으로써 150um의 트래킹 에러 신호가 0.01um 이하로 줄어든 것을 그림으로부터 확인할 수 있다. 그림 4의 결과에서 나타났듯이, 외란에 대한 트랙추종이 가능하게 되었기 때문에 데이터의 재생이 비교적 정확하게 됨을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

그림 5은 kalman filter에 의해 추정된 상태 변수들의 결과 값이다. 룬지-쿠타 방식으로 kalman filter를 적용시켜 상태 변수를 추정했으며, 실제 측정된 값과의 차이를 살펴 볼 수 있다.

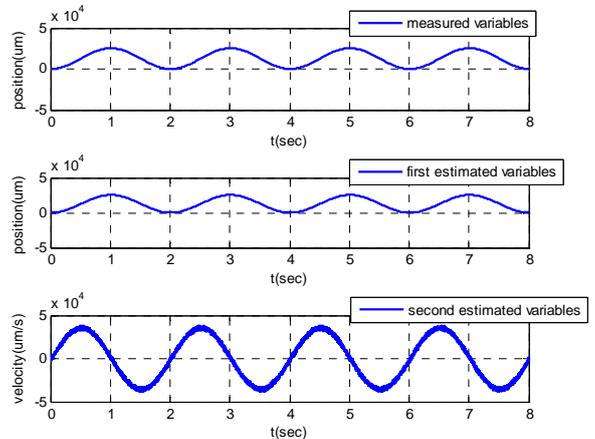


그림 5 추정된 상태 변수의 결과

본 논문에서 제시한 시스템은 첫 번째 상태 변수인 변위만이 측정이 가능하다. 그림 5의 결과, kalman filter를 통해 추정된 첫 번째 상태 변수와 측정된 값의 차이가 나타나지 않았다. 그림 5의 마지막 그래프는 추정된 두 번째 상태 변수인 속도이며, 첫 번째 상태 변수를 미분한 것으로서의 형태를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

## 4. 실험

### 4.1 실험구성

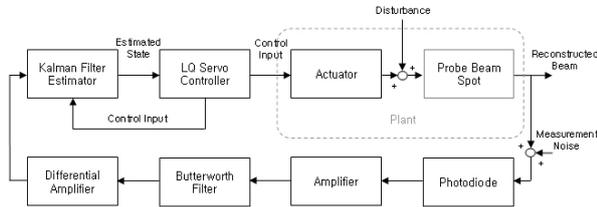


그림 6 트래킹 서보제어의 블록선도

실험을 수행하기 위한 시스템의 구성도는 그림 6의 블록선도와 같다. 실험 장치는 그림 1에 나타나 있으며, 추가적으로 증폭회로와 DSP를 이용해 실험을 수행했다.

### 4.2 실험결과

디스크를 0.5Hz로 회전시켰을 때 발생하는 외란에 대한 서보제어를 수행하였다.

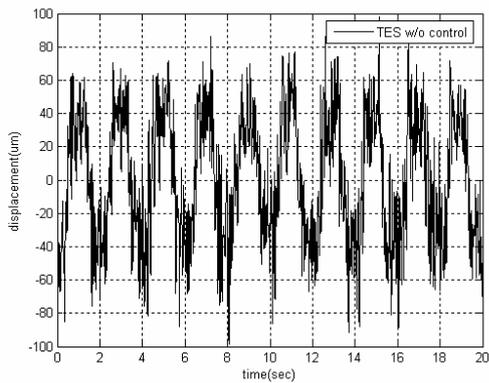


그림 7 제어 전 트래킹 에러 신호

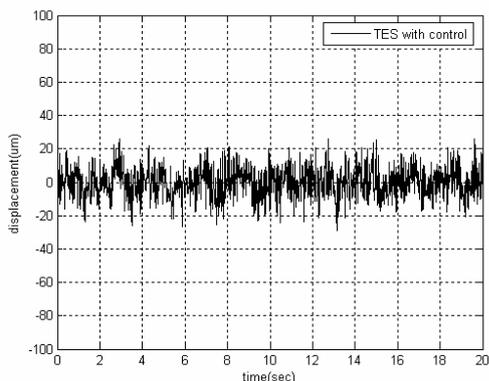


그림 8 제어 후 트래킹 에러 신호

결과는 그림 7, 그림 8과 같다. 제어기가 적용되기 전의 60um 이상의 트래킹 에러 신호가 제어기 적용 후 20um 미만으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

재생된 데이터를 평가하기 위해 SNR과 BER을 산출한 결과는 다음과 같다. 후처리를 하지 않은 데이터 이미지를 평가했음에도 불구하고, SNR은 -8.58dB에서 -1.14dB로, BER은 8.25%에서 6.02%로 개선되어 나타났기 때문에, 트래킹 서보제어가 적절하게 수행됨이 증명되었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 서보광을 이용해 서보트랙을 생성하고, 서보트랙에 의해 재생되는 서보신호, 즉, 트래킹 에러 신호를 이용해 서보제어를 수행하는 방법을 제안하였다. 트래킹 서보제어를 위한 제어기는 LQG제어기가 적용되었고, 시뮬레이션 결과, 억압된 트래킹 에러 신호를 통해서 그 방법의 타당함을 검증할 수 있었다. 실험을 통해서 역시 개선된 결과를 확인할 수 있었으며, 좀 더 나은 결과를 위해 지속적으로 실험을 수행할 계획이다.

## 후기

본 연구는 산업자원부 지정 차세대 대용량 정보저장 장치의 개발사업(00008145)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Coufal H.J., Psaltis D., Sinsarbox G.T., 2000, Holographic Data Storage, Springer, Heidelberg, Germany.
- (2) Mok F.H., Tackitt M.C., Stoll H.M., 1991, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO3 crystal." Optics Letters, 16;8.
- (3) Pu A., Psaltis D., 1996, "High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks," appl. Opt., 35(14):2389-2398
- (4) Li H.Y.S., Psaltis D., 1995, "Alignment sensitivity of holographic three-dimensional disks," J. Opt. Soc. Am. A., 12(9):1902
- (5) Hecht E., Zajac A., 1987, Optics, Addison-Wesley, Pennsylvania, USA.
- (6) Ogata K., 1970, Modern Control Engineering, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- (7) 김종식, 1988, 선형 제어시스템 공학, 청문각, 한국.