

# 데드비트 관측기를 이용한 망막의 3차원 실시간 영상화를 위한 고속 동기제어 시스템 개발

고종선, 김영일, 이태훈  
원광대학교 전기전자정보공학부

## Development of high speed synchronous control system for real time 3D eye imaging equipment using deadbeat observer

Jong-Sun Ko, Young-Il Kim and Tae-hoon Lee  
Dept. of Electric-Electronic & Information Engineering

### ABSTRACT

To show a retina shape and thickness on the computer monitor, a laser has been used in Scanning Laser Ophthalmoscope (SLO) equipment using the travelling difference. This method requires exact synchronous control of laser travelling in optic system to show a clear 3-dimensional image of retina. To obtain this image, this exact synchronism is very important for making the perfect plane scanning. In this study, a synchronous control of the galvanometer using deadbeat torque observer to make 3-dimensional retina image is presented. For the more, a very simple mathematical model of the galvanometer is approved by experimental result.

### 1. 서 론

안구의 질환에 대처하는 방법으로 망막의 조사가 필수적이다. 이 망막을 3차원 영상으로 데이터 처리하여 보여주는 장치에 있어서 그 화상의 정밀성을 확보하는데 본 동기제어 장치는 매우 중요하다. 특히 망막의 상태, 형상, 두께 등을 있는 그대로 영상화하기 위하여 레이저 신호를 완전히 동기화 하는 것이 필요하다. 망막의 두께나 형상을 컴퓨터에 표시하고자 레이저의 입사광선과 반사광의 차이를 이용하여 두께를 영상화하는 장비가 사용되고 있다. 현재 여러 안과 병원에서 사용하고 있는 안구 영상화 장비로는 Scanning Laser Ophthalmoscope (SLO)라는 장비가 주로 사용되고 있으나 망막의 영상을 2차원으로밖에 볼 수 없는 단점이 있다.<sup>[1]</sup> 그 외에 현재까지 나와 있는 장비들은 모두 2차원이거나 3차원이라도 등고선 방식의 3차원 추측방식을 사용하고 있고 아직까지는 실시간으로 망막의 영상을 3차원으로 보여주는 장비는 개발되어 있지 않다. 본 논문에서는 안구 망막의 영상을 실시간으로 볼 수 있도록 하는데 필요한 이 레이저 경로를 정밀 동기제어 함으로써 안과 실명 질환의 가장 많은 부분을 차지하는 안구 망막을 실시간 3차원 영상으로 관찰할 수 있도록 하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 SLO의 기본구조 및 동작원리<sup>[1]</sup>

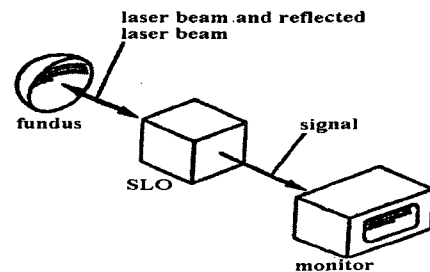


그림 1 SLO의 기본 개념도  
Fig. 1 Basic configuration of the SLO

현재 안구를 영상화하기 위해서 사용되고 있는 장비의 동작원리는 레이저 광선을 다면경 모터(polygonmotor)와 진동 평면거울을 제어하는 모터인 갈바노미터(galvanometer)를 이용하여 연속되는 시간에 따른 2차원의 면으로 만들고, 안구의 동공을 통하여 거의 투명한 망막에 조사시킨다. 이때, 망막을 중심으로 각 순간에 레이저 발생기로부터 망막에 조사되는 레이저빔의 입사각과, 망막으로부터 반사되는 레이저 반사 가상선의 출사각을 일정하게 유지하게 하고 망막에서 레이저빔의 입사와 반사 가상선의 출사가 수직 및 수평 방향으로 일치되도록 광학계를 배열한다. 또한, 한 순간에 망막에 비추어진 레이저 전후단선을 센서 어레이에 일치시키고, 센서 어레이의 수와 동 수의 2차원의 망막면을 실시간 3차원으로 영상화하는 기술이다. 현재 사용되고 있는 SLO장비는 레이저빔을 텔레비전의 주사선처럼 수평방향과 수직방향으로 망막에 주사한다. 그 반사광을 검출하여 비디오 신호와 합성한 후 모니터에 표현하여 2차원적 영상을 얻는다. 이러한 구조는 그림 2와 같다. 이에 착안하여 레이저 주사를 위해 수평 및 수직 주사에는 각각 다면경모터와 갈바노미터를 사용하며, 주사연결 거울로는 오목거울을 사용한다. 이때 수평 주사선과 수직 주사선과의 정확한 동기를 맞추는 것이 매우 중요하며 필요하다.

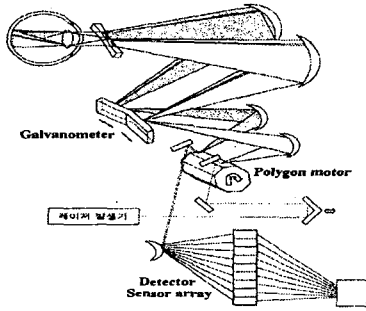


그림 2 SLO의 구조  
Fig. 2 Structure of SLO

## 2.2 갈바노미터의 구조 및 동작원리

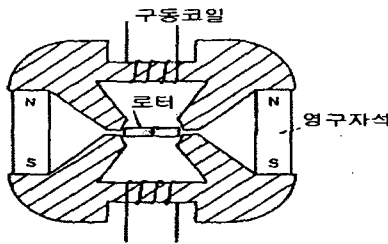


그림 3 갈바노미터의 구조  
Fig. 3 Structure of galvanometer

레이저를 반사시켜 극히 작은 scanning 창을 만드는 갈바노미터는 그림 3처럼 자장 안에 놓여 있는 코일에 전류가 흐를 때 발생하는 자력을 이용하는 원리와 같다. 따라서, 코일의 상하에 부착된 긴 스트립 선의 탄력과 코일의 회전력이 평형을 이루는 상태로 각도가 결정되는 광 편향기이다. 이는 일정 각을 반복해서 움직이는 액추에이터로 회전자의 관성이 크면 빠른 속도의 움직임이 어려움으로 소형 평면 거울을 이용한다.

화상의 일그러짐이 없도록 하기 위해서는 상하의 수직 편향 운동이 선형적이어야 한다. 하나의 화면을 형성하기 위해서 상하로 움직이며 화면을 만들고, 다시 처음 위치로 빠른 속도로 복귀해야 한다. 이러한 움직임을 반복함으로써 화면을 형성할 수 있다. 따라서 고정밀 위치 제어기를 필요로 하며 빠른 복귀 시간이 필요하다. 그림 4의 (a)와 같은 위치 명령으로 갈바노미터는 (b)와 같은 속도 응답 특성을 갖으며 움직이게 된다. 이러한 속도 응답의 특성에 의해 실제 위치 응답은 (c)와 같이 나타난다. 이때 정정 시간(settling time)은 매우 짧아야 위치 응답에서 선형영역이 증가한다.

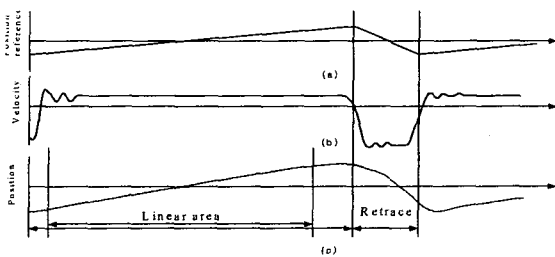


그림 4 갈바노미터의 응답 특성  
Fig. 4 Response characteristics of the galvanometer

이렇게 정정 시간 이후부터 초기 위치로의 복귀 시간 사이의 선형 영역의 데이터가 유효하므로 속도 응답의 정정 시간이 짧을수록 선형 영역이 증가하고 유효 주사 면적을 넓힐 수 있으며, 가능한 빠른 복귀시간을 가져야 한다. 따라서 고속, 고정밀 속도제어 루프를 갖는 위치제어의 연구가 필요하다.<sup>[2][3][4]</sup>

그림 5의 (a)는 정확한 동기를 맞춰 형성한 평면의 스캔 방법을 도시하였으며, 수평 주사선의 시작위치와 수직 주사선의 시작위치의 동기가 맞지 않았을 경우의 형성 평면을 나타낸다. 또한 그림 5의 (b), (c)는 정확한 다면경 모터의 속도제어 및 갈바노미터의 선형 위치 제어 가 되지 않았을 경우의 주사선의 움직임의 예를 나타낸다.

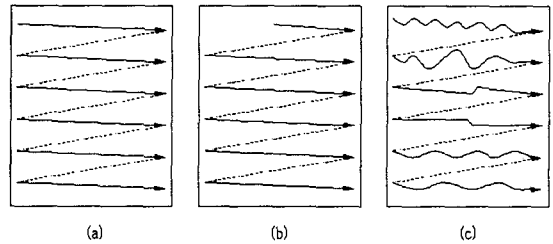


그림 5 수평주사의 예  
Fig. 5 Examples of the horizontal scanning

그림 5에서 정밀 동기제어가 될 경우에는 (a)와 같이 정확한 주사가 이루어지므로 선명한 영상을 얻을 수 있게 된다. 하지만, (b)의 경우처럼 시작점이 틀어지게 되면 영상이 일그러지거나 영상 자체를 볼 수 없게 되고 (c)처럼 시작점은 맞지만 외란에 의해 불규칙 주사를 하게 되면 영상의 해상도가 낮아지게 된다.

## 2.3 갈바노미터의 수학적 근사 모델

갈바노미터의 구조는 그림 3에서 보이는 것처럼 PM형식으로 360° 회전하는 DC 서보 모터와는 다르게 보인다. 그러나 실제 구동은 360° 회전하는 부분만 제외하면 ±20° 이내에서는 DC 서보모터와 동일하다, 따라서, 그림 6과 같이 등가회로를 구할 수 있다.<sup>[5][6]</sup>

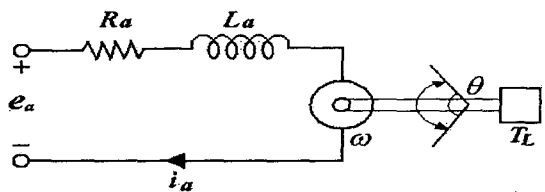


그림 6 갈바노미터 등가 회로  
Fig. 6 Equivalent circuit of the galvanometer

이때, 입출력간의 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (1)$$

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \quad (2)$$

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta(t)}{dt} = K_b \omega(t) \quad (3)$$

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

단,  $-20^\circ < \theta < 20^\circ$ .

여기서,  $i_a(t)$  : 전기자 전류,  $\omega(t)$  : 회전자 각속도,  $\theta(t)$  : 회전자 위치,  $e_a(t)$  : 인가전압,  $e_b(t)$  : 역기 전력,  $R_a$  : 전기자 저항,  $L_a$  : 전기자 인덕턴스,  $T_m(t)$  : 전동기 토크,  $T_L(t)$  : 부하 토크,  $J_m$  : 회전자 관성,  $B_m$  : 마찰계수,  $K_i$  : 토크 상수,  $K_b$  : 역기전력 상수이다.

### 2.4 데드비트 외란 관측기

저속 구동시에는 거의 나타나지 않지만 고속 구동시 부하 관성에 의한 오차가 발생하게 된다. 이 오차를 빨리 줄이기 위해서는 큰 제환 이득이 필요하게 되며, 이것은 매우 큰 전류를 만들게 된다. 만일 부하 토크  $T_L$ 을 알게 되면,  $T_L = k_t i_{qc2}$ 에 의하여 등가 전류  $i_{qc2}$ 를 구할 수 있으며 외란의 보상 입력을 생성할 수 있다. 따라서 제어 입력  $i_{qc}$ 는 위치 제어기 출력  $i_{qc1}$ 과 등가 전류  $i_{qc2}$ 로 구성된다. 일반적으로 시스템의 모든 입력을 알면 상태 추정(estimation)을 할 수 있다. 그러나, 실제 시스템에서 많은 경우에 몇몇 입력은 정확한 값을 알 수 없거나 찾아내기 힘든 경우가 있다. 빠른 샘플링에 의해 외란은 구간상수로 가정할 수 있으므로 다음과 같은 0차 관측기에 의해 추정 가능하다.<sup>[7][8]</sup>

$$\dot{T}_L = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\hat{T}_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{P}{2J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$+ \begin{bmatrix} k_t \frac{P}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} + L \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix}$$

빠른 추정을 위해 데드비트 알고리즘을 사용하면, 극점을  $s$ 도메인의 0점에 정의하여 제환 이득을 Ackermann공식에 의해 얻을 수 있다.<sup>[9]</sup>

### 3. 제어구조 및 시뮬레이션 결과

전체 제어시스템의 블록도는 그림 7과 같다.

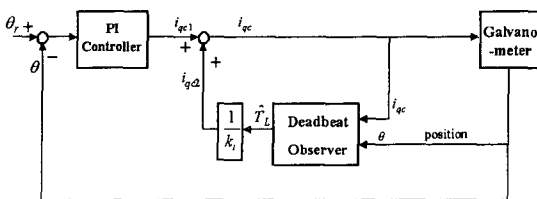
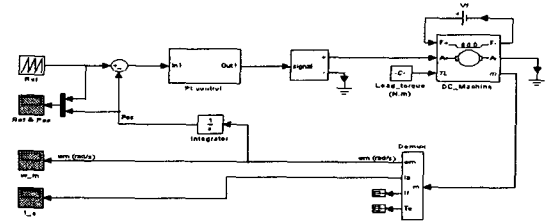
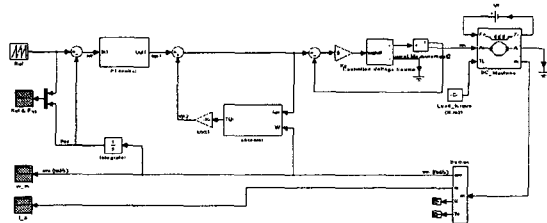


그림 7 제어시스템 블록도  
Fig. 7 Block diagram of control system

시뮬레이션은 Matlab의 Simulink를 사용하였다. PI제어기만을 사용했을 경우와 데드비트 관측기를 추가한 경우의 Simulink를 이용한 세부 블록도는 그림 8과 같다.



(a)



(b)

그림 8 갈바노미터의 시뮬링크 블록도  
(a) 기존 PI제어  
(b) 데드비트 관측기가 추가된 PI제어  
Fig. 8 Block diagram of galvanometer using Simulink  
(a) conventional PI control  
(b) PI control with deadbeat observer

다면경 모터의 저속 및 고속 구동에 따른 갈바노미터의 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다.

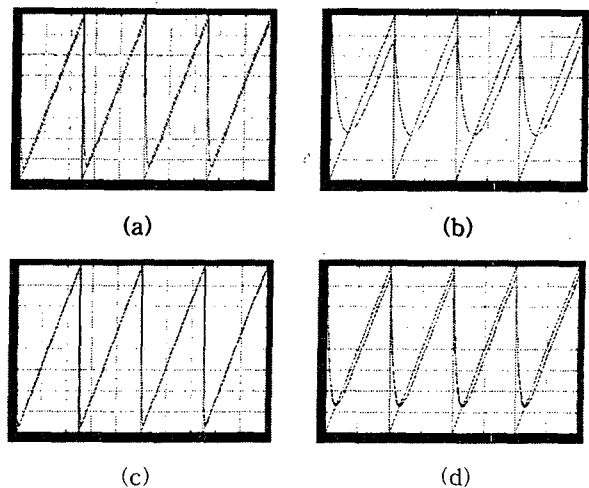


그림 9 Simulation결과  
(저속:3,000rpm, 고속:18,000rpm)  
(a) PI제어시 (저속) (b) PI제어시 (고속)  
(c) 관측기 추가시 (저속) (d) 관측기 추가시 (고속)  
Fig. 9 Simulation result  
(slow:3,000rpm, fast:18,000rpm)  
(a) PI control (slow) (b) PI control (fast)  
(c) using observer(slow) (d) using observer(fast)

그림 9에서 알 수 있듯이 다면경 모터가 저속으로 회전할 때 갈바노미터가 주어진 명령을 비교적 잘 따르고 있다. 그러나, 다면경 모터가 18,000rpm 이상의 고속으로 회전하면 갈바노미터의 부하관성에 의해 위치응답의 오차가 발생하고 관측기 사용하여 이 오차가 줄어들음을 알 수 있다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

갈바노미터의 정밀한 제어를 위한 위치센서가 필요한데, 여기서는 광 신호의 모서리 부분의 특성을 이용하여 다면경 모터의 끝 모서리 부분을 감지하는 방법을 사용한다. 그리고 이 신호를 기준으로 신호의 시작점인 SOS (start of signal) 신호를 만들어 내었다. Self control되는 다면경 모터에 적외선 LED를 주사하여 수광부에서 두 개의 포토다이오드를 통해 신호의 시작점을 찾아낼 수 있다. 다면경 모터의 면에 반사되는 적외선을 감지하여 수신된 두 개의 신호는 비교기를 거쳐 high 신호를 내보낸다. 다면경 모터의 각 면의 사이에 있는 모서리 부분에서 산란이 일어난다. 이러한 산란으로 신호 크기가 작아지는 특성에 의해 출력전압이 낮아지게 된다. 이렇게 발생한 low 신호를 감지하여 동기신호로 사용한다. SOS 신호발생기의 회로는 그림 10과 같다.

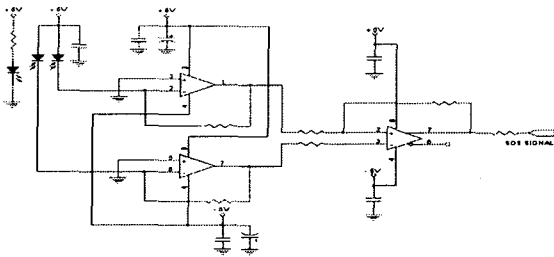


그림 10 SOS 신호발생기 회로  
Fig. 10 Circuit of the SOS signal generator

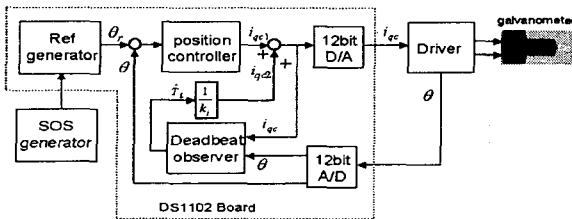


그림 11 전체 시스템의 구성  
Fig. 11 Configuration of total system

실험에서 사용된 동기 제어장치의 전체 구성은 그림 11과 같다. 실제 실험에서 18,000rpm으로 다면경 모터가 회전할 때 PI제어기 및 관측기를 사용한 갈바노미터 제어기의 응답특성은 그림 12와 같다. 가상실험인 그림 9와 매우 유사하게 동작하고 있으므로 수학적 모델이 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 관측기에 의한 오차 보상으로 고속에서도 저속에서와 같은 선형영역 확보가 가능하다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 2만 rpm의 다면경 모터와 동기 시키는 신호를 연구하고 이 신호에 맞춰 갈바노미터의 동기제어를 구현하고 DS1102 보드를 이용하여 레이저 경로 제어용 갈바노미터의 위치제어를 실현하였다. 이상의 연구로부터 PI제어기로는 저속 동기제어 시에는 제어명령을 잘 따라가지만 고속 동기제어 시에는 부하가 작더라도 부하 관성에 의해 신호의 왜곡이 일어남을 알 수 있었다. 이를 데드비트 관측기를 이용해 보상함으로써 고속에서도 정밀한 제어를 구현할 수 있었다. 따라서 앞으로 파라미터 보상기, 신경망 등의 알고리즘을 추가하여 36,000rpm

정도의 고속 제어에 적용하여 더욱 정밀한 제어를 하고자 한다.

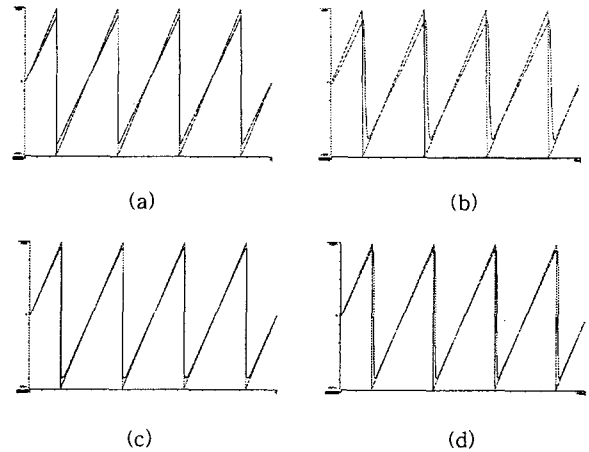


그림 12 실험 결과 (저속:3,000rpm, 고속:18,000rpm)  
(a) PI제어시 (저속) (b) PI제어시 (고속)  
(c) 관측기 추가시 (고속) (d) 관측기 추가시 (고속)  
Fig. 12 Experiment result  
(slow:3,000rpm, fast:18,000rpm)  
(a) PI control (slow) (b) PI control (fast)  
(c) using observer(slow) (d) using observer(fast)

본 연구는 한국과학재단 지역대학지원연구 (R05-2002-001184-0)의 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] G.Rodenstock Instrument GmbH, SLO 101 Service Manual 5/94
- [2] 김창우, 김현숙, 홍석민, 김재기, "열상장비용 직병렬주사광학계", 대한광학회지, Vol. 5, Num. 2, pp. 212-216, 1994
- [3] 송인섭, 유위경, 윤은숙, 이영철, 홍석민, "직병렬 주사방식 열상장비의 신호처리기 설계 연구", 전자공학회지, 제31권, B편, 제1호, pp. 49-56, 1994
- [4] 이수열, "적외선 체열 촬영시스템을 위한 고속 광주사기의 구현", 의공학회지, 제 16권, 1호, pp. 43-48, 1995
- [5] K. OHISHI, M. NAKAO, K. OHNISHI and K. MIYACHI, "Micropros- s- Controlled DC Motor for Load-Insensitive Position Servo System", IEEE Trans. IE-34, NO. 1, pp. 44-49, 1987.
- [6] Jong Sun Ko, Jung Hoon Lee, Se Kyo Chung, and Myung Joong Youn, "A Robust Position Control of Brushless DC motor with Dead Beat Load Torque Observer," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 40, no. 5, pp. 512-520, Oct.,1993.
- [7] Jong-Sun Ko, Sung-Koo Youn, "Experimental Results of Adaptive Load Torque Observer and Robust Precision Position Control of PMSM", KIEE, Vol. 49. No. 3. pp. 117-123, Mar. 2000.
- [8] Jong Sun Ko, Sung Koo Youn, and Bimal K. Bose, "A Study on Adaptive Load Torque Observer for Robust Precision Position Control of BLDC Motor" Proc. of the 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'99), pp. 1091-1096, Dec., 1999.
- [9] Jong-Sun Ko and Sung-Koo Youn, "A Study of Adaptive Load Torque Observer and Robust Precision Position Control of BLDD Motor", Transaction on KIPE, Vol. 4. No. 2, pp. 138-143, April. 1999.