

망막의 3차원 영상화를 위한 데드비트 외란 관측기를 가진 고속, 고강성 제어 시스템

高宗宣^{*}, 李泰勳^{**}, 金榮一^{***}

High Speed and Robust Control System with Deadbeat Disturbance Observer for 3D Eye Imaging Equipment

J.S. Ko, T.H. Lee, and Y.I. Kim

요 약

컴퓨터 모니터를 통해 안구망막의 형태와 두께를 보기 위해서 레이저의 경로차를 이용하는 SLO 장비가 사용되고 있다. 이러한 방법으로 망막의 선명한 3차원 영상을 보기 위해서는 레이저 광경로 시스템의 정확한 동기제어가 필요하다. 이 영상을 얻기 위해서는 평면주사를 하는데 있어서 정밀동기제어가 매우 중요하다. 본 논문에서는 안구의 3차원 영상을 만들기 위해 고속 동기제어를 구현한다. 또한 고속 제어시 부하 관성에 의해 발생하는 위치 응답의 오차를 보상하기 위해서 기존 PI(Proportional-Integral) 제어기에 데드비트 외란 관측기를 추가한다. 제안된 제어시스템은 고속 제어시 발생하는 토크 변화에 강인하고 정밀한 시스템이 된다. 이상의 제안된 시스템의 안정성과 유용함이 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인되었다.

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 traveling difference. This method requires exact synchronous control of laser traveling 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 high speed and synchronous control of the galvanometer to make 3-dimensional retina image is presented. For the more, deadbeat load torque observer is added to the PI controller for compensation of the position error arisen in the high speed control. As a result, the proposed control system has a robust and precise response against the load torque variation appeared in high speed control. A stability and usefulness are verified by the computer simulation and the experiment.

Key Words : galvanometer, polygonmotor, retina, synchronous control

1. 서 론

안구의 질환에 대처하는 한가지 방법으로 망막의 조사가 매우 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

*정회원, 단국대 전기공학과 교수

E-mail : jsko@dku.edu

**정회원, 원광대 전자공학과 석사과정

***정회원, 광전자(주) 생산기술부 연구원

접수일자 : 2003. 8. 4

1차심사 : 2003. 8.29

심사완료일 : 2003. 9. 8

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 라는 장비가 주로 사용되고 있으나 망막의 영상을 2차원으로밖에 볼 수 없는 단점이 있다¹¹⁾. 그 외에 현재까지 나와 있는 장비들은 RTA (retina thickness analyzer), OCT (optical coherence tomography), HRT (heidelberg retinal tomography) 등이 있다. 그러나 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 동작원리¹¹⁾

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. 이러한 구조는 그림 2와 같다. 이에 착안하여 레이저 주사를 위해 수평 및 수직 주사에는 각각 다면경 모터와 갈바노미터를 사용하며, 주사연결 거울로는 옴복거울을 사용한다. 이때 수평 주사선과 수직 주사선과의 정확한 동기를 맞추는 것이 매우 중요하며 필요하다.

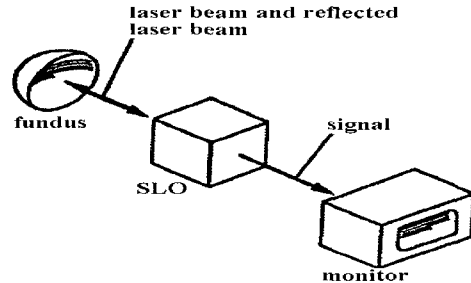


그림 1 SLO의 기본 개념도
Fig. 1 Basic configuration of the SLO

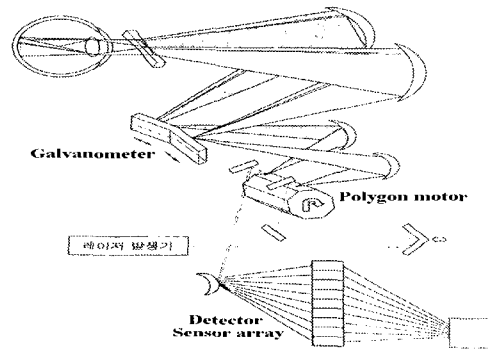


그림 2 SLO의 구조
Fig. 2 Structure of SLO

2.2 갈바노미터의 구조 및 동작원리

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. 하나의 화면을 형성하기 위해서 상하로 움직이며 화면을 만들고, 다시 처음 위치로 빠른 속도로 복귀해야 한다. 이러한 움직임을 반복함으로써 화면을 형성할 수 있다. 따라서 고정밀 위치제어기를 필요로 하며 빠른 복귀 시간이 필요하다. 그림 4의 (a)와 같은 위치 명령으로 갈바노미터는 (b)와 같은 속도응답 특성을 갖으며 움직이게 된다. 이러한 속도 응답의 특성에 의해 실제 위치 응답은 (c)와 같이 나타난다. 이때 (b)의 정정 시간(settling time)은 매우 짧아야 (c)의 위치 응답에서 선형 증가 영역이 증가한다.

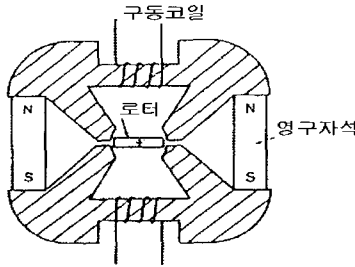


그림 3 갈바노미터의 구조
Fig. 3 Structure of galvanometer

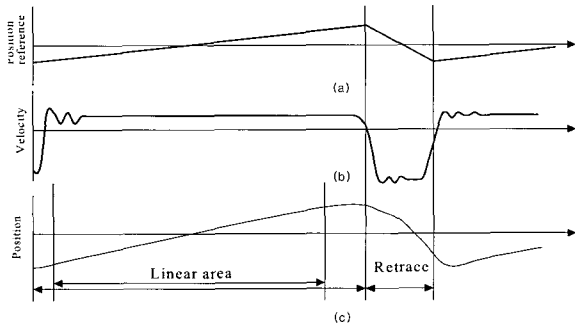


그림 4 갈바노미터의 응답 특성
Fig. 4 Response characteristics of the galvanometer

이렇게 정정 시간 이후부터 초기 위치로의 복귀 시간 사이의 선형 영역의 데이터가 유효함으로 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 위치제어기의 연구가 필요하다.

갈바노미터의 선형 위치 응답 영역에서 표준 모니터의 수평 주사선의 개수인 525개의 수평주사를 하여야 하며, 그 외 비선형 영역과 복귀 영역을 지나 다시 선형 영역으로 각의 변화 시 수평 주사선의 시작위치여야 함으로 수평 주사선의 주사 속도의 정수 배에 해당하는 복귀 시간이 필요하다^{15) 7)}.

그림 5의 (a)는 정확한 동기를 맞춰 형성한 평면의 스캔 방법을 도시하였으며 그림 5의 (b), (c)는 정확한 다면경 모터의 속도제어 및 갈바노미터의 선형 위치제어가 되지 않았을 경우의 주사선의 움직임을 나타낸다. 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 없

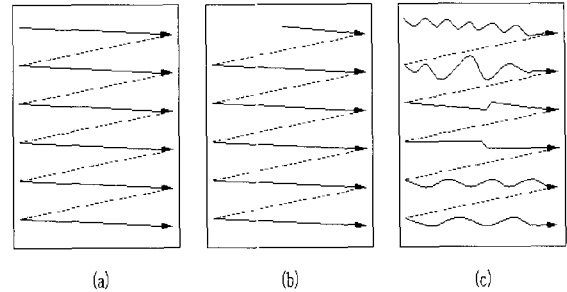


그림 5 수평주사의 예
Fig. 5 Examples of the horizontal scanning

게 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 갈바노미터와 같으므로 360°회전하는 부분만 제외하면 ±20°이내에서는 DC 서보모터와 동일하다, 따라서, 그림 6과 같이 등가회로를 구할 수 있다^{13) 4)}.

이때, 입출력간의 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{di_{qs}(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_{qs}(t) - \frac{1}{L_a} e_b(t) \quad (1)$$

$$T_m(t) = k_t i_{qs}(t) \quad (2)$$

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

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

단, $-20^\circ < \theta < 20^\circ$.

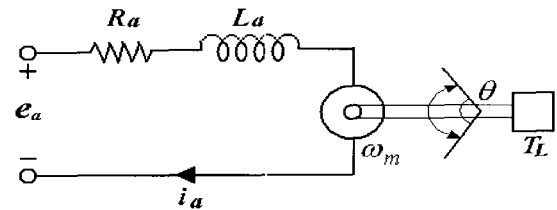


그림 6 갈바노미터 등가 회로
Fig. 6 Equivalent circuit of the galvanometer

여기서,

- $i_{qs}(t)$: 전기자 전류 $\omega_m(t)$: 회전자 각속도
- $\theta(t)$: 회전자 위치 $e_a(t)$: 인가전압
- $e_b(t)$: 역기전력 R_a : 전기자 저항
- K_b : 역기전력 상수 $T_m(t)$: 전동기 토크
- $T_L(t)$: 부하 토크 J : 회전자 관성
- B : 마찰계수 k_t : 토크 상수
- L_a : 전기자 인덕턴스

3. 제어 알고리즘

3.1 기존 위치 제어기

갈바노미터의 위치 제어를 위해 가장 많이 사용되고 있는 제어기는 PI 제어기이고, PI 제어기의 제어 명령은 식 (5)와 같다.

$$u = P_p(\theta_r - \theta) + I_p \int (\theta_r - \theta) dt \quad (5)$$

여기서, P_p : 비례이득(proportional gain)

I_p : 적분 이득(integral gain)

일반적으로 PI 제어기는 가격이 저렴하고 구현이 간단하지만 외란에 의한 오차에 대해 시스템이 불안정해지기 쉽기 때문에 추적 제어에서 고성능을 얻기가 어렵다는 단점이 있다.

3.2 데드비트 외란 관측기

일반적으로 시스템의 모든 입력을 알면 상태 추정(estimation)을 할 수 있다. 하지만 실제 시스템에서 많은 경우에 몇몇 입력은 정확한 값을 알수 없거나 찾아내기 힘든 경우가 있다. 이러한 입력의 경우 관측기에 의해 추정할 수 있음이 알려져 있으며, 빠른 샘플링에 의해 외란은 구간 상수로 가정할 수 있으므로 다음과 같은 0차 관측기에 의해 추정 가능하다.

$$\dot{T}_L = 0 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\hat{T}_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{1}{J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} k_t \frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} + L \left(\theta - [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

이때 L 은 3×1 의 피드백 행렬이다. 전체 시스템 응답 시간보다 빠르게 부하 토크를 계산하고 과도 응답에서 부하토크 보상을 위해 데드비트 관측기를 사용한다. 데드비트의 극점 정의에 의해 극점을 z 도메인의 0점에 정의하여 궤환 이득은 $L = P(\Phi)W_0^{-1}[0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$ 의 Ackermann공식에 의해 얻을 수 있으며 Cayley-Hamilton 정리에 의해서 페루프 시스템 행렬 Φ_c^n 는 다음 방정식을 만족한다.

$$\Phi_c^n = 0 \quad (8)$$

여기서 $\Phi_c^n = \Phi - LC$ 이며 L 은 궤환 이득 행렬이다. 이는 최대 n 번의 제어 주기내에 각 상태를 추적함을 의미한다. 따라서 관측기의 정정 시간(settling time)은 $n \cdot h$ 가 된다.

4. 전체 시스템 구성

제안된 시스템의 구성은 그림 7과 같다. 주 제어기인 위치 제어기는 기존에 사용되고있는 PI 제어기를 사용하였고 빠른 위치오차 보상을 위하여 점선 부분과 같이 데드비트 외란 관측기를 추가하여 보상된 전류 명령으로 갈바노미터를 구동하게 된다.

갈바노미터 동기 제어 장치의 전체 구성은 그림 8과 같다. 다면경모터의 모서리를 감지하여 생성된 SOS (Start of Signal) 신호로부터 위치 기준신호로 톱니파

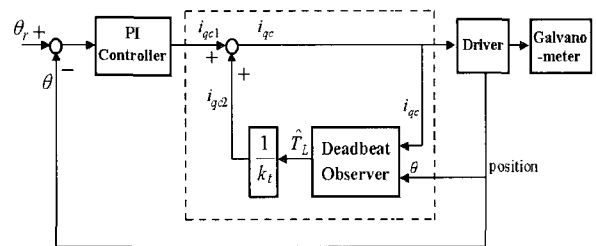


그림 7 제안된 제어시스템 블록도
Fig. 7 Block diagram of the proposed control system

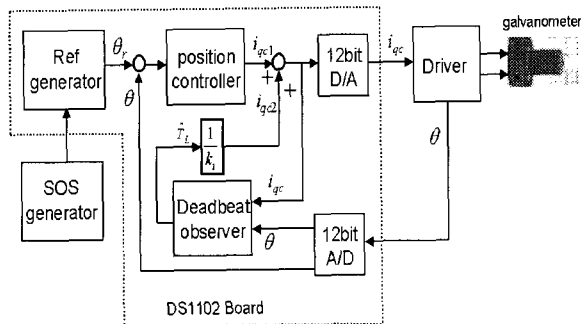


그림 8 전체 시스템의 구성
Fig. 8 Configuration of the total system.

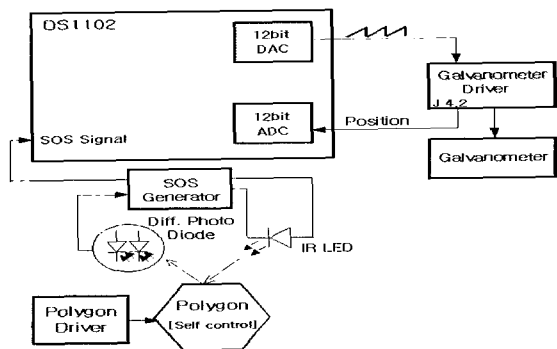


그림 9 SOS 신호 발생기의 구성
Fig. 9 Configuration of the SOS generator

형태의 명령인 θ_r 을 내보내는 목표값 발생기와 PI 제어기로 구성된 기본 위치제어기와 위치 오차 보상을 위한 데드비트 외란 관측기로 구성되어있다. 최종 전류 명령인 i_{qc} 가 12bit D/A 변환기를 통해 갈바노미터로 나가게 되고 12bit A/D 변환기를 통해 위치 응답인 θ 를 입력받아 제어하게 된다.

갈바노미터의 정밀한 제어를 위한 기준이 되는 신호의 생성을 위해 위치센서가 필요한데, 그림 9에서와 같이 광신호가 다면경 모터의 모서리 부분에서 산란하는 특성을 이용하여 다면경 모터의 모서리 부분을 감지하는 방법을 사용한다. 그리고 이 신호를 기준을 신호의 시작점인 SOS 신호를 만들어 낸다.

5. 모의실험 및 실험 결과

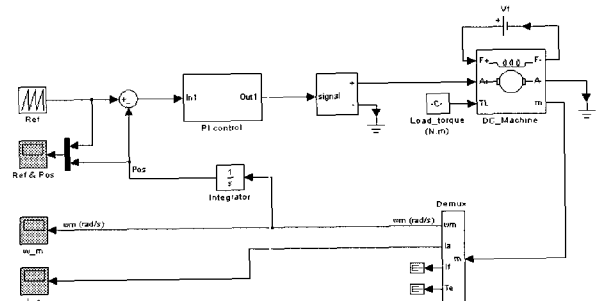
모의 실험 및 실험에 사용된 캠브리지사의 갈바노미터 6800HP의 사양은 표 1과 같다.

표 1 갈바노미터 '6800HP' 사양

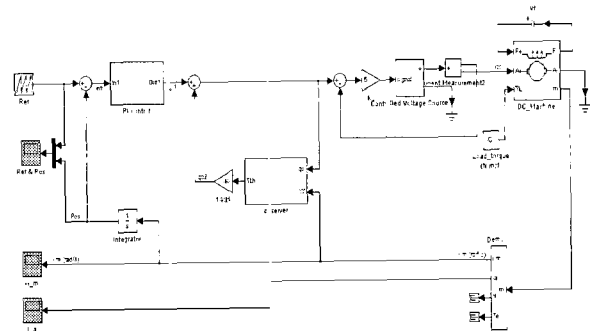
Table 1 Characteristics of Galvanometer '6800HP'

Rated angular excursion	40 degree	Back EMF	0.01 mV/deg/sec
Rotor inertia	0.018 gm*cm ²	RMS current	1.6 A
Max load recommended	0.18 gm*cm ²	Torque constant	2.5e+4 Dyne-cm/Amp
Coil inductance	96 uH	Peak current	6 A
Coil resistance	4.2 Ohms	Step response time	0.3 ms
Linearity	98 % over 30.	Output signal, Common mode	50 uA
Repeatability	20 pradians	Output signal, Differential mode	3.2 uA/degree

샘플링 주기 T_s 는 0.1[ms]이고 데드비트 관측기의 이득 $L^T = [10000 \ 2 \ -10]$ 이다. 모의 실험을 위해 Matlab의 Simulink를 이용했으며 Simulink를 이용한 기존 제어기와 제안된 제어기의 블록도는 그림 10과 같다. 이 그림은 기존 제어 방식과 달리 외란을 관측기가 추정된 외란에 비례한 전류를 보상하고 있음을 보인다.



(a) 기존 PI제어
(a) conventional PI control



(b) 데드비트 관측기가 추가된 PI제어
(b) PI control with deadbeat observer

그림 10 갈바노미터의 시뮬링크 블록도
Fig. 10 Block diagram of the galvanometer using Simulink

위치 응답 오차의 보상을 위해 그림 10의 (b)에서 사용된 제안된 데드비트 관측기의 세부 블록도는 그림 11과 같다. 피드백 되어진 속도 값을 적분하여 위치 값으로 변환한 뒤 시스템의 출력과 오차에 데드비트 관측기의 이득 L 인 $ek1$, $ek2$, $ek3$ 를 곱하여 추정값을 구한다. 이 값과 갈바노미터의 인가되는 i_{qc} 값을 이용하여 디지털화된 관측기 시스템을 통해 추정외란 T_L 을 구할 수 있다. 추정된 외란은 토크상수 $1/k_t$ 을 곱하여 위치보상용 i_{qc2} 를 만들어내고 이 신호와 PI제어기의 출력 i_{qcl} 을 합하여 제어신호 i_{qc} 를 생성하게 된다.

그림 12-15는 갈바노미터의 위치 지령을 3,000rpm으로 좌·우로 줄 때와 18,000rpm에 해당하는 위치 지령을 줄 때의 파형을 보인다. 그림 12는 PI 제어기를 사용한 경우의 갈바노미터의 모의실험 응답 파형이다. 저속 구동 시에는 부하 관성에 의한 오차가 아주 작으므로 위치 응답에 대한 오차가 아주 작게 나타나지만 고속시에는 반사경과 공기와의 마찰로 인하여 부하 토크가 커짐에 따라 응답이 늦어져 위치 응답 오차가 커짐을 알 수 있다.

그림 13은 제안된 제어기의 모의실험 응답 파형으로 관측기에 의해 보상된 전류 명령에 의해 저속 및 고속 구동시 모두 PI 제어를 사용하는 경우보다 빠르게 위치 명령을 따라가게 된다.

실험에서 사용된 갈바노미터의 제어 신호는 그림 14에서 SOS 신호 (a)에 동기된 (b)의 12bit 톱니파 형태가 된다. 이때 실제 입력 파형은 (c)의 실선부분과 같고 그때의 위치 출력은 점선 부분과 같다.

그림 15와 16은 기존 제어기와 제안된 제어기의 실험 응답 파형으로 제안된 제어기에서 저속이나 고속에서 훨씬더 선형 영역이 증가하여 성능 개선됨을 알 수 있다.

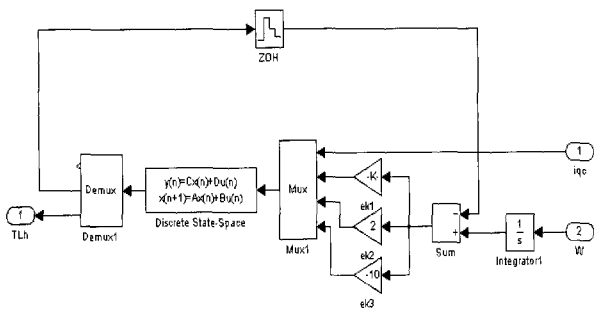
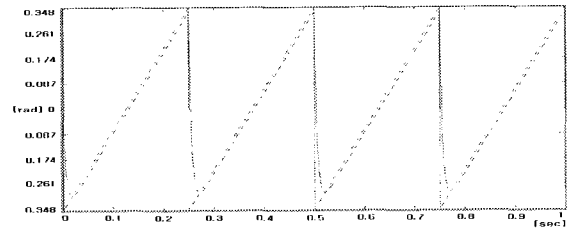
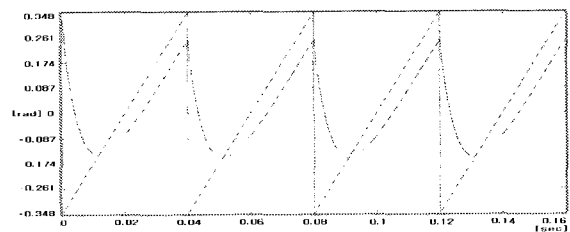


그림 11 데드비트 관측기의 블록도
Fig. 11 Block diagram of the deadbeat observer

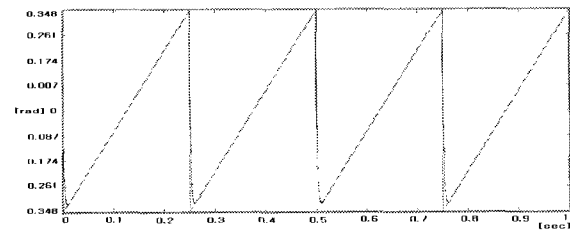


(a) PI 제어 (저속)
(a) PI control (slow)

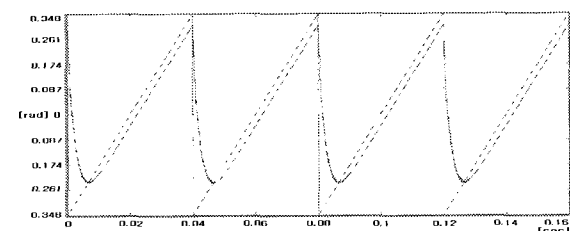


(b) PI 제어 (고속)
(b) PI control (fast)

그림 12 기존제어기의 모의실험 결과
(저속:3,000rpm, 고속:18,000rpm)
Fig. 12 Simulation result of the conventional controller (slow:3,000rpm, fast:18,000rpm)



(a) 제안된 제어기(저속)
(a) proposed algorithm(slow)



(b) 제안된 제어기(고속)
(b) proposed algorithm(fast)

그림 13 제안된 제어기의 모의실험 결과
(저속:3,000rpm, 고속:18,000rpm)
Fig. 13 Simulation result of the proposed controller (slow:3,000rpm, fast:18,000rpm)

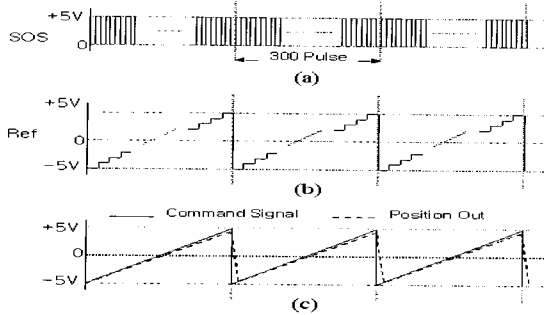
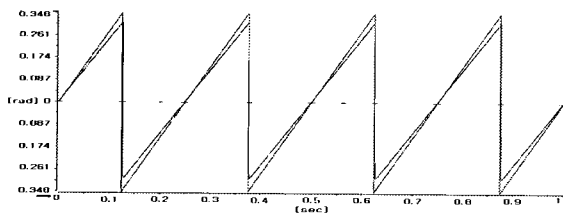
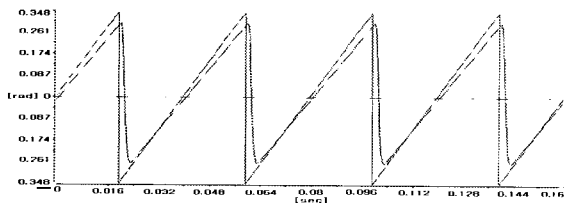


그림 14 SOS신호와 동기제어시 이상적 응답
Fig. 14 Ideal response of the synchronous control with SOS signal



(a) PI 제어 (저속)
(a) PI control (slow)

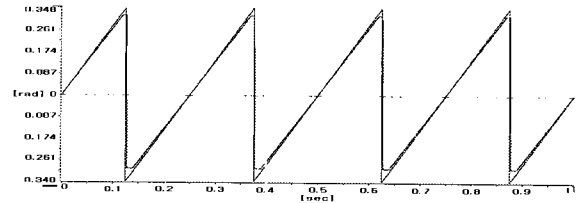


(b) PI 제어 (고속)
(b) PI control (fast)

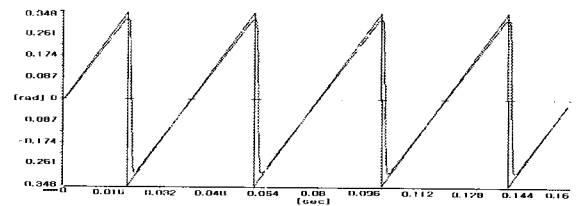
그림 15 기존제어기의 실험 결과
(저속:3,000rpm, 고속:18,000rpm)

Fig. 15 Experiment result of the conventional controller (slow:3,000rpm, fast:18,000rpm)

표 2에 모의실험 및 실제 실험에서의 위치 오차를 비교하였다. 모의 실험의 경우 저속 및 고속 모두 62% 이상의 오차 감소를 확인할 수 있었고, 실제 실험에서도 저속에서 30%, 고속에서는 64%이상의 위치 응답이 감소함을 확인할 수 있다. 결과적으로 기존 PI 제어기보다 제안된 데드비트 관측기를 추가하였을 경우 고속 제어시에 200%이상의 성능 향상을 얻을 수 있었다. 이 결과는 약 20,000 rpm 정도의 고속 제어를 감안하면 실용성이 있음을 알 수 있다.



(a) 제안된 제어기(저속)
(a) proposed algorithm(slow)



(b) 제안된 제어기(고속)
(b) proposed algorithm(fast)

그림 16 제안된 제어기의 실험 결과
(저속:3,000rpm, 고속:18,000rpm)

Fig. 16 Experiment result of the proposed controller (slow:3,000rpm, fast:18,000rpm)

표 2 모의 실험과 실험 결과의 위치 오차
Table 2 Position error of simulation and experiment result

알고리즘	조건		모의실험		실험	
	저속	고속	저속	고속	저속	고속
기존 PI 제어기	0.01454	0.09635	0.01667	0.05042		
제안된 알고리즘	0.00545	0.03636	0.01163	0.01745		
오차 감소율	62.5%	62.3%	30.2%	64.4%		

6. 결 론

본 연구에서는 실시간 3차원 영상을 얻기 위한 레이저 스캔 장치의 핵심 부분인 다면경 모터와 갈바노 미터의 동기제어 알고리즘을 제안하였다. 3차원 영상을 얻기 위해서는 다면경 모터와 갈바노미터의 고속 구동이 요구되고 영상화에 필요한 선형 영역의 데이터 확보가 필요하다. 그러나 갈바노 미터의 경우 $\pm 20^\circ$ 의 일정한 각도 이내에서 왕복 운동을 하기 때문에 고속 구동시에 부하 관성에 의한 위치 응답의 오차가 발생한다. 기존에 사용하고있는 PI제어기는 저속 제어시에는 성능에 별다른 영향을 주지 않지만 고속으로 갈수



김영일(金榮一)

1974년 8월 15일생. 1998년 원광대 전자공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 광전자(주) 생산기술부 연구원.