

망막의 3차원 실시간 영상화를 위한 고속 동기제어 시스템 개발

高宗宣*, 金榮一, 李勇宰, 李泰勳

Development of High Speed Synchronous Control System for Real Time 3D Eye Imaging Equipment

Jong-Sun Ko, Young-Il Kim, Yong-Jae Lee, and Tae-Hoon Lee

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 갈바노미터의 동기제어를 구현한다. 또한 갈바노미터의 간략한 수학적 모델의 타당성을 보인다.

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 to make 3-dimensional retina image is presented. For the more, a very simple mathematical model of the galvanometer is approved by experimental result.

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

다. 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 있다¹⁾. 그 외에 현재까지 나와 있는 장비들은 RTA (retina thickness analyzer), OCT (optical coherence tomography), HRT(heidelberg retinal tomography) 등이 있다. 그러나 모두 2차원이

*원광대학교 전기전자 및 정보공학부 조교수
E-mail : jsko@wonkwang.ac.kr

접수일자 : 2002. 7.25

1차심사요청일 : 2002. 7.30

심사완료일 : 2002.10. 4

거나 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^[1]

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 여러 안과 병원에서 사용하고 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 다면경 모터와 갈바노미터를 사용하며, 주사연결 거울로는 오목거울을 사용한다. 이때 수평 주사선과 수직 주사선과의 정확한 동기를 맞추는 것이 매우 중요하며 필요하다.

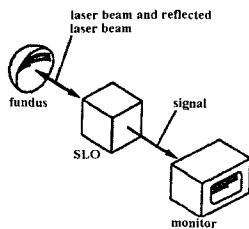


그림 1 SLO의 기본 개념도
Fig. 1 Basic configuration of the SLO

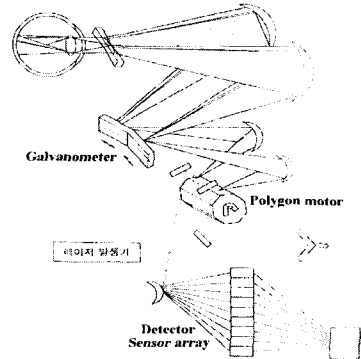


그림 2 SLO의 구조
Fig. 2 Structure of SLO

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. 이는 일정 각을 반복해서 움직이는 액추에이터로 회전자의 관성이 크면 빠른 속도의 움직임이 어려움으로 소형 평면 거울을 이용한다.

화상의 일그러짐이 없도록 하기 위해서는 다면경 모터의 수평 주사각과 3:2의 양상비(aspect rate)를 유지할 수 있도록 각도 제어를 해야 하며, 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 위치제어기를 필요로 하며 빠른 복귀 시간이 필요하다. 그림 4의 (a)와 같은 위치 명령으로 갈바노미터는 (b)와 같은 속도응답 특성을 갖고 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.

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

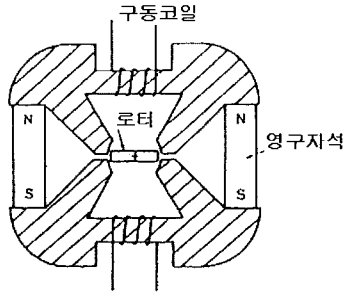


그림 3 갈바노미터의 구조
Fig. 3 Structure of galvanometer

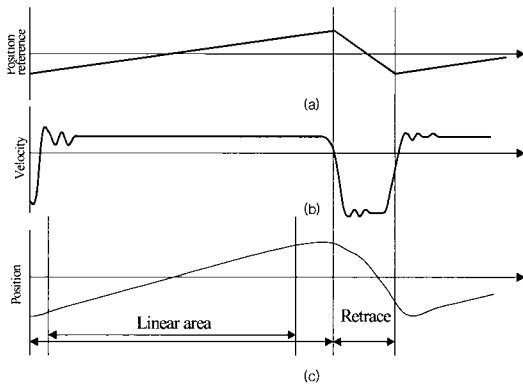


그림 4 갈바노미터의 응답 특성
Fig. 4 Response characteristics of the galvanometer

표 1 갈바노미터 '6800HP' 사양
Table 1 Characteristics of Galvanometer '6800HP'

Rated angular excursion	40 degree	Back EMF	0.04 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	2.5x10 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 % , Min 30.	Output signal, Common mode	50 uA
Repeatability	20 μradians	Output signal, Differential mode	3.2 μA/degree

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^{[5][17]}.

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 제어가 되지 않았을 경우의 주사선의 움직임을 나타낸다.

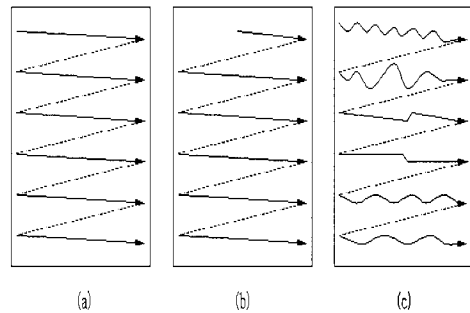


그림 5 수평주사의 예
Fig. 5 Examples of the horizontal scanning

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 PM 형식으로 360°회전하는 DC 서보 모터와는 다르게 보인다. 그러나 실제 구동은 갈바노미터와 같으므로 360°회전하는 부분만 제외하면 ±20°이내에서는 DC 서보 모터와 동일하다, 따라서, 그림 6과 같이 등가회로를 구할 수 있다^{[3][4]}.

이때, 입출력간의 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

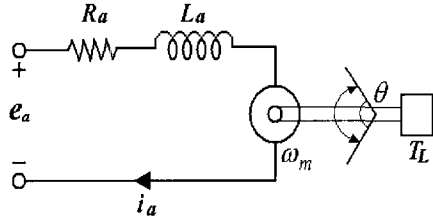


그림 6 갈바노미터 등가 회로
Fig. 6 Equivalent circuit of the galvanometer

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

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

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

단, $-20^\circ < \theta < 20^\circ$.

- 여기서, $i_a(t)$: 전기자 전류,
 $\omega_m(t)$: 회전자 각속도, $\theta(t)$: 회전자 위치,
 $e_a(t)$: 인가전압, $e_b(t)$: 역기전력,
 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 상수.

3. 제어구조 및 시뮬레이션 결과

실제 실험을 위한 동기제어시스템은 그림 7과 같이 다면경 모터, 레이저발생기, 갈바노미터와 이를 제어하는 DSP 제어기로 구성된다.

그림 중 갈바노미터 제어시스템의 시뮬레이션을 위해 Matlab의 Simulink를 사용했다. 전체 제어시스템의 블록도는 그림 8의 (a)와 같고 Simulink를 이용한 갈바노미터의 세부 블록도는 그림 8의 (b)와 같다. 다면경 모터의 저속 및 고속 구동에 따른 갈바노미터의 응답 파형은 그림 9와 같다.

그림 9에서 알 수 있듯이 다면경 모터가 고속으로 회전해도 갈바노미터가 주어진 명령을 비교적 잘 따르고 있다. 그러나, 다면경 모터가 30,000rpm 이상의 매우 고속으로 회전하면 벗어나는 부분이 발생한다.

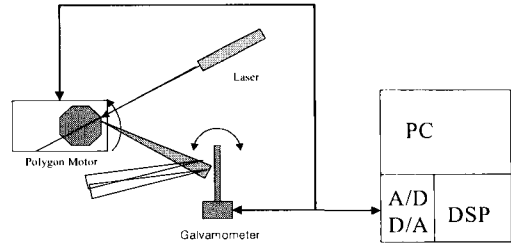
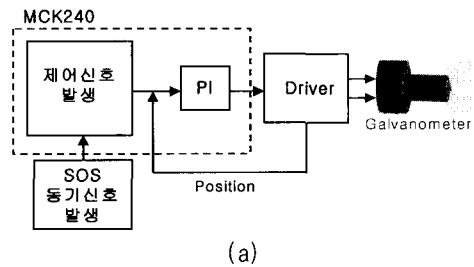
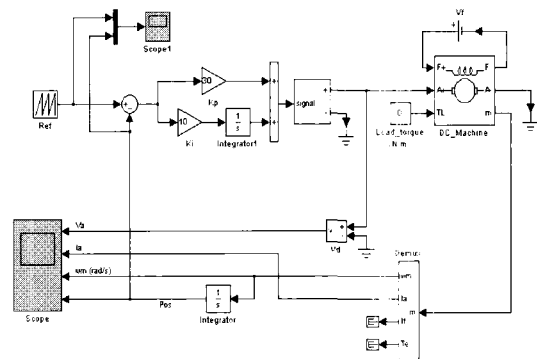


그림 7 전체 시스템의 개략도
Fig. 7 Diagram of the overall system



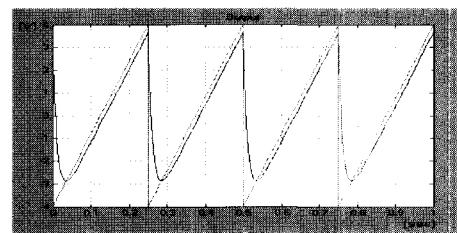
(a)



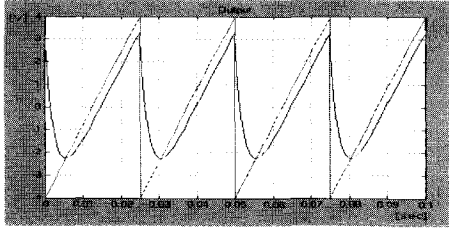
(b)

그림 8 (a) 제어시스템 블록도
(b) 갈바노미터의 시뮬링크 블록도

Fig. 8 (a) Block diagram of control system
(b) Block diagram of galvanometer using Simulink



(a)



(b)

그림 9 Simulation 결과
(a) 저속응답(3,000rpm)
(b) 고속응답(30,000rpm)

Fig. 9 Simulation result
(a) slow response(3,000rpm)
(b) fast response(30,000rpm)

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 출력 전압이 낮아지게 된다. 이렇게 박생한 low 신호를 감지하여 동기신호로 사용한다. SOS 신호발생기의 회로는 그림 10과 같다.

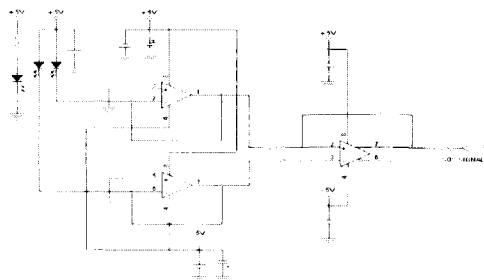


그림 10 SOS 신호발생기 회로
Fig. 10 Circuit of the SOS signal generator

실험에서 사용된 동기 제어장치의 전체 구성은 그림 11과 같다. 갈바노미터의 제어신호는 그림 12에서 SOS신호 (a)에 동기 된 (b)의 12bit 톱니파 형태가 된다. 이때 실제의 입력 파형은 (c)의 실선부분과 같고, 그때의 위치출력은 점선부분과 같다. 실제 실험에서 36,000rpm으로 다면경 모터가 회전할 때 PI제어기를 사용한 갈바노미터 제어기의 응답특성은 그림 13과 같다. 가상실험인 그림 9와 매우 유사하게 동작하고 있으므로 수학적 모델이 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과는 40,000 rpm 정도의 고속 제어를 감안하면 실용성이 있음을 알 수 있다.

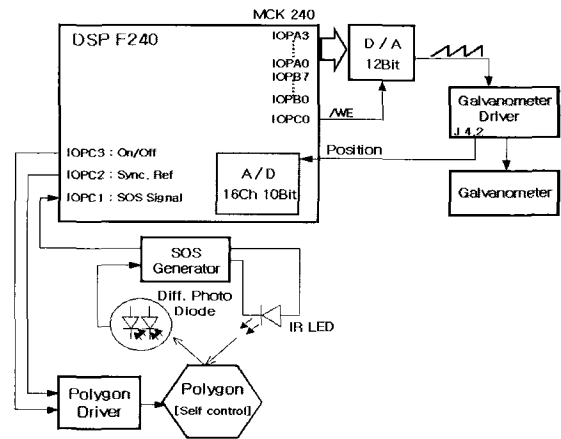


그림 11 전체 시스템의 구성
Fig. 11 Configuration of total system

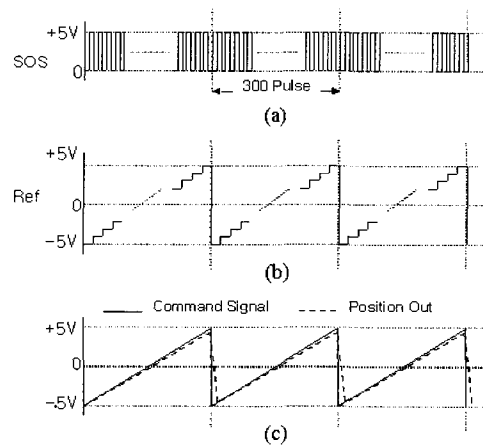


그림 12 SOS신호와 동기제어시 이상적 응답
Fig. 12 Ideal response of the synchronous control with SOS signal

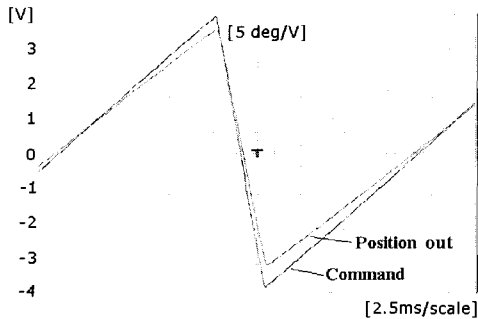


그림 13 갈바노미터 응답 파형
Fig. 13 Response waveform of the galvanometer

5. 결 론

본 연구에서는 3~4만 rpm의 다면경 모터와 동기시키는 신호를 연구하고 이 신호에 맞춰 갈바노미터의 동기제어를 구현하고 DSP F240을 이용하여 레이저 경로 제어용 갈바노미터의 위치제어를 실현하였다. 이상의 연구로부터 PI제어기로는 저속 동기제어 시에는 제어명령을 잘 따라가지만 고속 동기제어 시에는 부하가 작더라도 신호의 왜곡이 일어남을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 파라미터 보상기, deadbeat observer, 신경망 등의 알고리즘을 추가하여 고속 동기제어 시에도 저속에서와 같은 정밀한 제어를 하고자 한다.

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

참 고 문 헌

[1] G. Rodenstock Instrument GmbH, SLO 101 Service Manual 5/94.
 [2] Paul. C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill, 1984.
 [3] K. Ohisi, M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi, "Microprosner-Controlled DC Motor for Load-Insensitve Position Servo System", IEEE Trans. IE-34, No. 1, pp. 44~49, 1987.
 [4] 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 Trans. on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 5, pp. 512~520, Oct. 1993.

[5] 김창우, 김현숙, 홍석민, 김재기, "열상장비용 직병렬주사광학계", 대한광학회지, Vol. 5, No. 2, pp. 212~216, 1994.
 [6] 송인섭, 유위경, 윤은숙, 이영철, 홍석민, "직병렬 주사방식 열상장비의 신호처리기 설계 연구", 전자공학회지, 제31권, B편, 제1호, pp. 49~56, 1994.
 [7] 이수열, "적외선 체열 촬영시스템을 위한 고속 광주사기의 구현", 의공학회지, 제16권, 1호, pp. 43~48, 1995.
 [8] Jong-Sun Ko and 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.
 [9] 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.
 [10] J.W. John Cheng and Yu-Chia Hsu, "Motion Control of System With Nonlinear Transmission Couplings", Proc. of the 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON '99), pp. 985~989, Dec. 1999.
 [11] Jong-Sun Ko, Tae-Ho Lee, Chil-Hwan Cheon, and Sang-Seol Lee, "Precision Speed Control of PMSM Using Disturbance Observer and Parameter Compensator", Transaction on KIPE, Vol. 6 No. 1, pp. 98~106, Feb. 2001.
 [12] 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.

저 자 소 개



고종선(高宗宣)

1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동대학원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1983년~1995년 삼성전자 생산기술센터 선임연구원. 1995년~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내 교수(부장). 1999년 2월~2000년 1월 미국 Tennessee 주립대(UT) Post-Doc. 1996년~현재 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 조교수. 당 학회 총무이사.



김영일(金榮一)

1974년 8월 15일생. 1998년 원광대 전자공학과 졸업. 2001년~현재 동 대학원 전자공학과 컴퓨터 및 제어시스템 전공 석사과정.



이태훈(李泰勳)

1975년 5월 4일생. 2002년 원광대 전기전자공학부 졸업. 2002년 현재 동 대학원 전자공학과 컴퓨터 및 제어시스템 전공 석사과정.



이용재(李勇宰)

1975년 9월 16일생. 2001년 원광대 전기공학부 졸업. 2001년~현재 동 대학원 전자공학과 컴퓨터 및 제어시스템 전공 석사과정.