
All DSP 기반의 비편광 FOG 설계 및 제작

윤영규** · 김재형* · 이상혁**

Design and Implementation of Depolarized FOG based on Digital Signal Processing

Yeong-gyoo Yoon** · Jae-hyung Kim* · Sang-hyuk Lee**

이 논문은 2008~2009년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었으며,
이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음

요 약

간접형 Fiber optic gyroscope(FOG)는 Sagnac 효과를 이용한 회전센서로 알려져 있으며, 성능 개선을 위한 연구가 수행되어 왔다. 본 논문은 개루프 방식의 FOG 개발과 FPGA를 이용한 디지털 신호처리 기술을 다루고 있다. 첫 번째 목표는 양호한 bias stability(0.22deg/h), Scale factor stability, 단일모드 광섬유를 이용한 낮은 Angle random walk($0.07\text{deg}/\sqrt{h}$)와 저가의 증급 자이로(Pointing grade)의 설계를 목표로 하고 있다. 두 번째 목표는 광검출기의 출력신호를 고속 ADC로 직접 변환 후 디지털 신호처리를 하는 FOG용 FPGA 개발이다. 본 연구에서 사용한 Cascaded integrator-comb(CIC)타입의 데시메이션 필터는 Adder와 Shift register만으로 구성되어 적은 계산량을 요구하므로 모든 디지털 FOG 프로세서를 저가의 프로세서로도 사용이 가능하다.

ABSTRACT

The interferometric fiber optic gyroscopes (FOGs) are well known as sensors of rotation, which are based on Sagnac effect, and have been under development for a number of years to meet a wide range of performance requirements. This paper describes the development of open-loop FOG and digital signal processing techniques implemented on FPGA. Our primary goal was to obtain intermediate accuracy (pointing grade) with a good bias stability (0.22deg) and scale factor stability, extremely low angle random walk (0.07deg) and significant cost savings by using a single mode fiber. A secondary goal is to design all digital FOG signal processing algorithms with which the SNR at the digital demodulator output is enhanced substantially due to processing gain. The Cascaded integrator comb(CIC) type of decimation filter only requires adders and shift registers, low cost processors which has low computing power still can be used in this all digital FOG processor.

키워드

광자이로스코프, 비편광, FOG 프로세서

Key word

FOG, Depolarizer, FOG processor

* 창원대학교 (교신저자, hyung@changwon.ac.kr)

** 창원대학교

접수일자 : 2010. 03. 09

심사완료일자 : 2010. 03. 30

I. 서 론

FOG는 Sagnac 효과를 사용한 회전센서로서, 30여 년 전에 처음 제안된[1] 이후 미사일, 인공위성, 비행기, 선박, 잠수함 등의 자세제어와 항법장치 등에 적용되고 있으며, 고가의 편광유지 광섬유를 사용하는 것이 여러 기술적 문제를 해결할 수 있는 방법으로 알려져 왔다.[2] 그러나 최근 저가의 광통신용 광섬유를 이용한 비편광 FOG의 설계와[3][4] 디지털 신호처리 방식이 제안되고 있다. 본 논문에서는 DSP 기반 FOG 신호처리 알고리즘 개발 및 저가형 중급 성능의 FOG 개발에 대하여 기술하고 있다. 첫째 Single Mode Fiber(SMF)와 Depolarizer를 이용한 비편광 open loop FOG를 제작하였다. 둘째 고속 ADC를 이용한 over sampling 된 광섬유 출력 출력을 Decimation, 디지털 필터 및 디지털 Lock-in amplifier(LIA)[5][6]등의 DSP 기술에 적용하여 고감도, 고안정 특성을 가지는 신호처리부를 설계 하였다.

기존 연구의 결과를 살펴보면, 주로 항법용으로 개발되며 Polarization Maintaining Fiber (PMF)를 사용한 FOG의 성능은 0.116deg/h 정도의 bias stability를 보이고 있으며[7], SMF를 사용한 FOG의 성능은 3deg/h 정도의 bias stability[8] 를 보이고 있다. 본 논문의 목적은 SMF로 제작한 FOG를 PMF로 제작한 FOG의 성능에 근접한 성능을 얻고자 한다.

II. 비편광 FOG의 설계

본 논문에서는 고가의 편광유지 광섬유 대신에 저가의 SMF를 사용하여 비편광 FOG를 제작하였다.[3][4] 그림 1은 비편광 FOG의 구성을 나타낸 것이며, 편광된 광학신호의 편광을 소멸시키기 위해 Lyot 비편광기를 사용하였다. 본 논문에서 제작한 FOG는 5mW 출력의 Superluminescent laser diode(SLD)로부터 발생된 광파를 편광기를 통해 편광 시킨다. 편광된 광파를 광섬유 커플러를 이용해 두 개의 광파로 분리시킨다. 분리된 광파는 센서 코일에 반대방향의 진행 경로로 인가되어 Sagnac 위상차를 발생시킨다. Sagnac 위상차를 검출하기 위해 광섬유를 통과한 두 광파의 간섭 현상을 Photo

detector(PD)를 통해 빛의 세기(Intensity)를 측정하여 검출하게 된다.

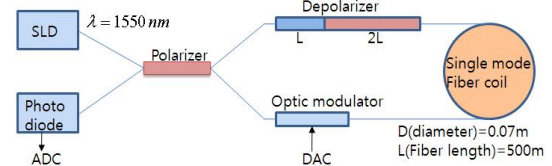


그림 1. 비편광 FOG의 구성
Fig 1. Optic structure of Depolarized FOG

FOG가 놓인 평면이 Ω 의 각속도로 회전할 때 Sagnac 효과는 다음 식 (1)와 같다.[9]

$$\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

여기서 ϕ_s 는 Sagnac효과, L 은 Fiber길이, D 는 센서코일의 직경, λ 는 광파의 파장, c 는 광속 그리고 Ω 는 입력 회전율(deg/s)을 나타낸다.

그림 1에서 볼 수 있는 Lyot 편광 소멸기는 L, 2L의 길이를 가지는 편광유지 광섬유를 45도의 각도를 가지도록 결합한 구조로 구성되어 있으며, 두 비편광기를 광축 접속하여 사용하였다. 그림 2에서 편광 측정기를 사용한 비편광기 광축 조정방법에 대해 나타내고 있으며, 그림 3은 2L 비편광기에서 측정된 편광축 측정 결과이다.

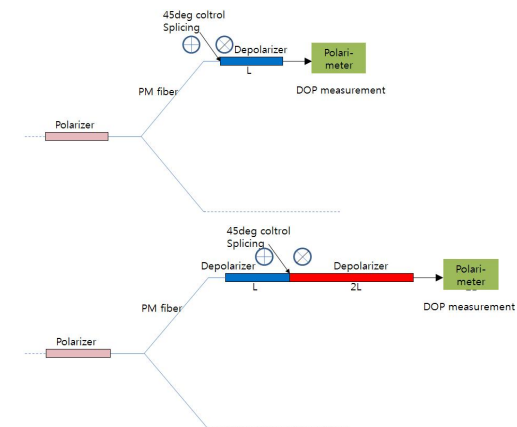


그림 2. 비편광기의 광축 조정 순서
Fig 2. Depolarizer optic axis control method

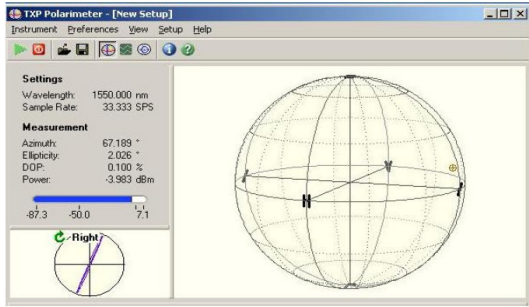


그림 3. 편광 측정기의 DOP 측정
Fig 3. Screen of measured DOP in Polarimeter

편광측정기로 편광상태를 측정하면서 비편광기의 광축을 조정할 경우 컨넥터를 이용한 연결 방식에 비해 손실을 최소화 하면서도 0.1% 이하의 DOP로 유지되는 비편광 신호를 사용할 수 있다.

III. FPGA 기반 FOG DSP 알고리즘 개발

FOG의 구조는 그림 4와 같이 구성되며, PD의 출력이 A/D 변환기로 입력되고, Numerically controlled oscillator (NCO)에서 생성된 190kHz의 변조신호($\omega_m t$)는 광학 변조기로 입력된다.

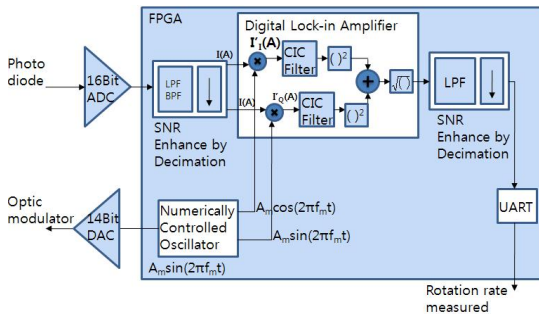


그림 4. FOG 신호처리부 블록도
Fig 4. Block diagram for signal processing part of FOG

3.1 DSP 알고리즘

A/D 변환기는 변조주파수를 검출하고 최소한의 아날로그 회로만으로 높은 신호대비 잡음비를 얻기 위해

Nyquist 주파수인 380kHz 보다 높은 19MHz으로 Over sampling 한다. 양자화된 신호는 Low-pass 필터 (LPF)를 통해 SNR을 개선한 이후 디지털 LIA[5][6]로 입력된다. NCO는 190kHz의 Sine 및 Cosine 신호를 1.9Msample/s 속도로 LIA의 기준신호로 입력한다. 이 신호는 동시에 D/A 변환기를 통하여 광학 변조기에 입력된다. 광학 변조기를 통한 FOG의 광검출기 출력은 식(2)로 주어지며,[9]

$$I = I_0 [1 + J_0(\phi_\Delta) \cos(\phi_s)] + 2J_0 J_1(\phi_\Delta) \sin(\phi_s) \sin \omega_m t + 2J_0 J_2(\phi_\Delta) \cos(\phi_s) \cos 2\omega_m t + 2J_0 J_3(\phi_\Delta) \sin(\phi_s) \sin 3\omega_m t \quad (2)$$

ϕ_s 를 검출하기 위해 변조주파수($\sin(\omega_m t)$)를 포함하는 두 번째 항만을 이용하면 되므로 식(2)는,

$$I'_I = \frac{1}{2} [2J_0 J_1(\phi_\Delta) \sin(\phi_s)] + \frac{1}{2} [2J_0 J_2(\phi_\Delta) \cos(\phi_s)] \sin(3\omega_m t) + \text{Harmonic frequency} \quad (3)$$

로 다시 쓸 수 있다. 여기서 ϕ_s , ϕ_Δ , $J_n(\cdot)$ 는 각각 Sagnac 효과, 변조지수 및 n^{th} order Bessel 함수이다. 식(3)에서 첫째 항은 검출된 회전을 나타내며, 두 번째 항은 억제시켜야 하는 성분 중 가장 큰 신호를 나타낸 것이다. CIC필터의 특성에서 볼 수 있듯이 190kHz의 정수배에서 Null 특성을 가진다. 이는 식(3)에서 ω_m 의 하모닉 성분을 제거하기에 적합한 특성을 가진다고 할 수 있다. 본 논문에서 설계한 최저 회전을 $\Omega = 0.002 \text{deg/s}$ 이며, 이때의 최대 하모닉 성분과 최저 회전의 비율은 $J_2(\phi_\Delta) \cos(\phi_s) / J_1(\phi_\Delta) \sin(\phi_s) = 32874$ 이므로 $20 \log_{10} 32874 = 90.34 \text{dB}$ 이상의 Attenuation을 가지는 필터를 설계해야 한다. (단, $J_1 = 0.58186$, $J_2 = 0.31575$) 그러나 이러한 고성능의 디지털 필터는 많은 하드웨어를 요구하므로, 적은 하드웨어로 고조파를 제거할 수 있는 CIC필터를 적용하였다. 그림 5는 CIC필터의 블록도이고, 그림 6에서는 특성을 나타내었다.

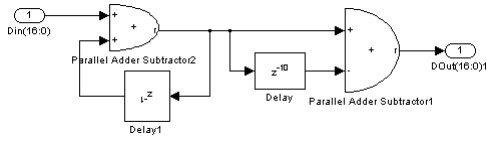


그림 5. CIC필터의 구성도
Fig 5. Block diagram for CIC filter

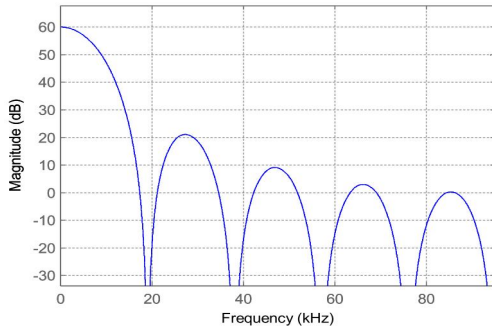


그림 6. CIC필터 특성
Fig 6. CIC filter characteristic curve

CIC필터는 173Logic만으로 구성되었으며, CIC필터의 Null 주파수는 LIA에서 생성된 고조파와 일치되어 고조파를 완전히 제거한다.

3.2 CIC필터 성능실험

그림 5와 6에서 설계된 CIC필터는 식(2)의 두 번째 항으로 나타낸 I'_I 의 최대 잡음이 $\Omega=0.002\text{deg/s}$ 일 때 발생하므로, 이때의 I'_I 의 신호를 인가하여 성능을 확인하고자 한다. 그림 7은 $\Omega=0.002\text{deg/s}$ 일 때의 I'_I 에서의 신호를 나타내며, 회전 신호는 DC 레벨에 있다.

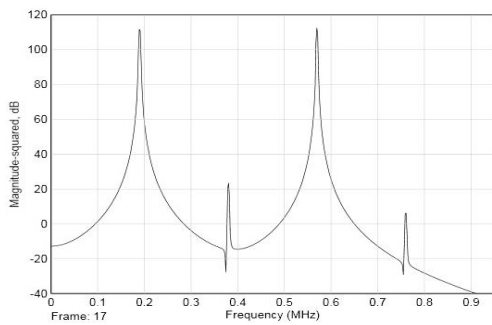


그림 7. $\phi_s = 0$ 일 때의 I'_I
Fig 7. $\phi_s = 0$ state I'_I

그림 7의 신호는 CIC필터를 통해 잡음이 제거되며 제거된 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 결과를 통해 CIC필터를 사용했을 경우 대부분의 잡음이 제거된 결과를 볼 수 있으며, 이후 여러 번의 필터링과 데시메이션 과정을 거치면서 SNR을 개선시키는데, 일반적으로 FOG의 입력신호인 회전율은 수십 Hz 이하의 동적인 특성을 가지므로, Anti-aliasing 필터(AAF)와 데시메이션에 의하여 200Hz의 대역폭을 가지는 신호로 변환된다. 이러한 신호처리를 통해 총 43dB의 SNR 개선을 가져온다. 그림 9는 제작된 FPGA 보드와 광학부가 장착된 사진이다.

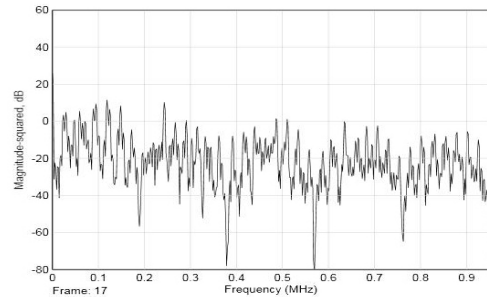


그림 8. CIC필터 출력
Fig 8. CIC filter output

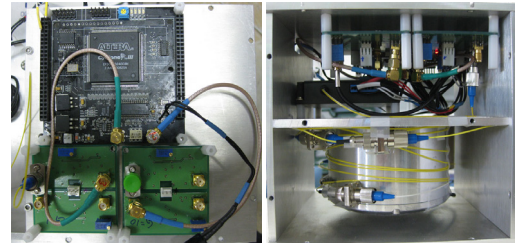


그림 9. 광학부 및 신호처리부 장착
Fig 9. Mounted optical and DSP parts

IV. 측정 및 결과

FOG의 성능을 측정하여 본 논문에서 제시한 DSP 신호처리 기술의 성능을 확인하였다. 측정된 성능은 Scale factor error, Bias instability, Angle random walk이며 측정은 IEEE Std 952-1997에 의하여 제시된 과정을 따랐다.

FOG의 출력 감도는 0.002deg/sec 부터 ±31.16deg/sec 까지 회전을 변화 시키며 측정 한 결과이다. 외란 및 Drift 오차를 제거 하고자 정지 상태 오프셋을 제거한 회전을 측정 하였으며, 최소 감도는 0.002deg/sec로 측정 되었다.

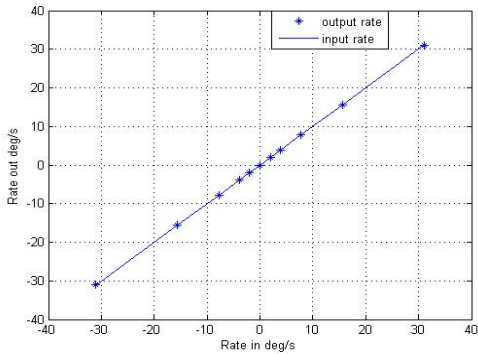


그림 10. 회전에 따른 FOG 출력
Fig 10. FOG response against rotation rate

Scale factor error는 그림 10의 회전율 응답특성을 근거로 각 입력 회전에 대한 출력의 에러율을 계산하였으며, 그림 11은 ±30deg/sec 범위에서의 오차를 나타낸 것이다.

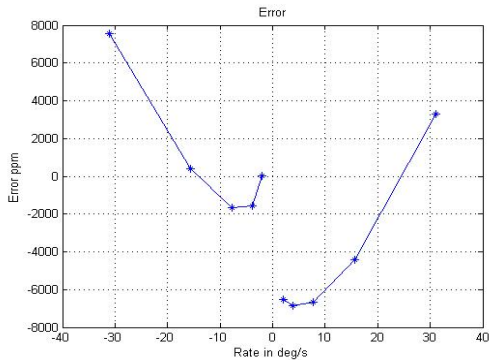


그림 11. 입력 회전에 대한 에러율
Fig. 11. Error rate against input rotation rate

그림 11에서 Scale factor error는 최대 7549ppm으로 측정되었으며, Scale factor error를 교정하기 위한 4th Order 수식을 식(4)에 나타내었다.

$$y = a_0x^4 + a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x^1 + a_4 \quad (4)$$

$$a_0 = -30.7459e-008$$

$$a_1 = -1.0271e-005$$

$$a_2 = 0.00033106$$

$$a_3 = 1.0045$$

$$a_4 = 0.0065457$$

여기서 x 는 입력 회전을 나타낸다. 그림 12는 그림 10의 입력 회전에 대한 출력을 식(4)를 통해 교정한 에러율을 나타낸 것이며, Scale factor error의 최대크기는 2036ppm으로 측정되었다.

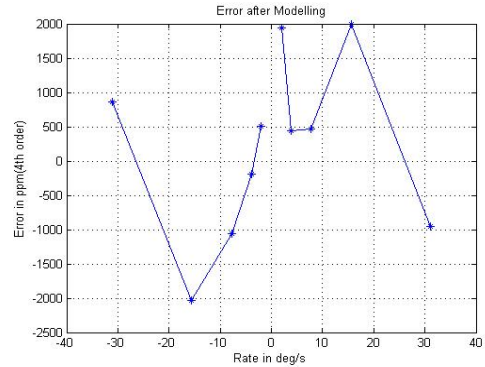


그림 12. 교정식을 적용한 에러율
Fig 12. Correction equation applied to error rate

제작된 FOG의 Bias instability와 Angle random walk 측정하기 위해 Allan variance[10]를 이용하여 분석하였다. Allan variance는 식(5)로 표현되며,

$$AVAR^2(\tau) = \frac{1}{2(n-1)} \sum [y(\tau)_{i+1} - y(\tau)_i]^2 \quad (5)$$

n 은 데이터의 개수, y 는 τ 구간의 평균을 나타낸다. 그림 13에 나타낸 FOG 정지 상태 출력에 대한 Allan variance를 그림 14에 나타내었다. 그림 13은 ±5°C의 상온에서 측정된 FOG 출력이다.

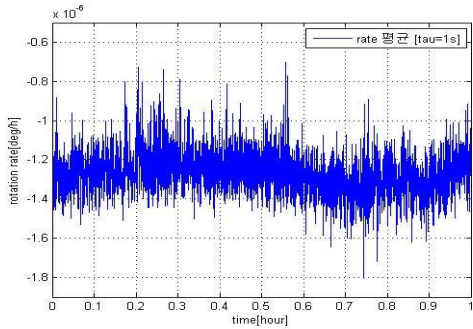


그림 13. FOG 정지상태 출력
Fig 13. FOG static output

그림 14에서 가로축은 출력 평균을 구하기 위한 단위 시간의 길이(τ)이며, 세로축은 출력 평균의 편차이다. Allan variance 분석의 결과로 FOG의 Bias instability는 0.22deg/h로 측정되었으며, Angle random walk는 0.07deg/ \sqrt{hr} 로 측정되었다.

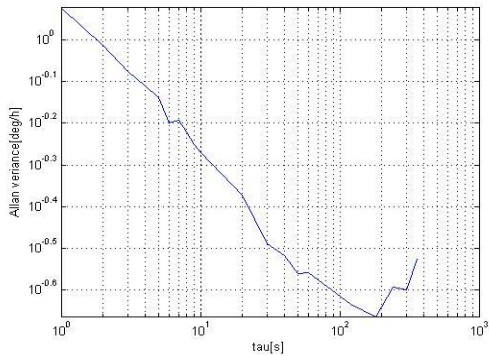


그림 14. FOG Allan variance 응답특성
Fig 14. FOG Allan variance response characteristic

V. 결 론

FOG 센서코일로 저가의 통신용 단일모드 광섬유를 사용한 비편광 FOG를 제작하고, 광검출기에서 직접 A/D변환하는 DSP 기반의 신호처리를 설계하여 FOG의 성능을 확인하였다.

CIC필터는 덧셈기와 Shift register만으로 구현할 수 있는 간단한 구조의 필터이므로 CIC필터를 적용한 신호

처리의 설계는 저가형 FOG의 설계에 적합하다. 또한 CIC 필터는 변조 주파수의 고조파에서 null을 가지도록 설계 할 수 있기 때문에 FOG의 광학부 출력에 포함된 변조 주파수의 배수 성분들을 매우 효과적으로 제거 시킨다. CIC필터를 적용한 신호처리로 9,794 FPGA Logic만을 사용해 CIC필터를 포함한 전체 신호처리 시스템을 설계 할 수 있었다.

본 논문에서 제작한 FOG의 성능은 0.07deg/ \sqrt{hr} 의 Angle random walk와 0.22deg/h의 Bias instability의 성능을 나타내었으며, 서론에서 제시한 PMF로 제작된 FOG의 성능에 가까운 결과를 보여 준다.

따라서 단일모드 광섬유를 FOG의 센서코일로 제작하면 고감도의 FOG를 저가로 제작하는 것이 가능하며, FOG의 신호처리가 CIC필터만을 사용하여 구현될 경우 일반적인 DSP 프로세서에서도 FOG의 신호처리를 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008~2009년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었으며, 이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음

참고문헌

- [1] V. Vali and R. W. Shorthill, "Fiber Ring Interferometer", *Appl. Opt.* 15, 1099, 1976.
- [2] W.K. Burns and R. P. Moeller, "Polarizer requirements for fiber gyroscope with high-birefringence fiber and broad-band source", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-2, no. 4, pp.430-435, 1984.
- [3] Aritaka Ohno, Ryuji Usui, Kazuo Suzuki, Kenchi Okada, Kazuhiro Sakuma, "Intermediate and moderate grade Fiber Optic Gyroscope for industrial applications", *SPIE Vol.* 2292, 166, 1994.
- [4] Bogdan Szafraniec, Member, IEEE, Member, OSA, and Glen A. Sanders "Theory of Polarization Evolution in Interferometric Fiber-Optic Depolarized Gyros",

Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 4, April 1999.

- [5] "The Digital Lock-in Amplifier", AMETEK, V3.1.
- [6] Adrian A. Dorrington, et al., "A simple microcontroller based digital lock-in amplifier for the detection of low level optical signals", in *IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications*, 2002.
- [7] Kalpana Arvind, et al., "Fiber Optic Gyroscope", Department of Space, Laboratory for Electro-Optics Systems-ISRO, 1stCross, 1stPhase, Peenya, Bangalore, INDIA-560058.
- [8] Ryuji Usui, et al., "Intermediate Grade FOG with Single Mode Fiber Coil", *SPIE* Vol. 2070, 152, 1993.
- [9] Brian Culshaw, Alan Rogers, and Henry Taylor, "The fiber-optic gyroscope", Artech House, 1993.
- [10] Dr. Walter Stockwell, "Bias Stability Measurement: Allan Variance", Crossbow Technology, Inc., <http://www.xbow.com>



이상혁(Sang-Hyuk Lee)

1988년 충북대학교
전기공학과 학사
1991년 서울대학교 자동제어 석사
1998년 서울대학교 자동제어 박사

2006년~현재 창원대학교 BK21 메카트로닉스
사업단 연구교수

※관심분야: 인지적 데이터해석, 퍼지이론

저자소개



윤영규(Yeong-Gyoo Yoon)

2008년 창원대학교
제어계측공학과 학사
2010년 창원대학교
제어계측공학 석사

※관심분야: FPGA 설계, Interferometric FOG



김재형(Jae-Hyung Kim)

1983년 고려대학교 전자공학과
학사
1985년 고려대학교 통신공학 석사
1989년 고려대학교 통신공학 박사

1991년~현재 창원대학교 제어계측공학과 교수

※관심분야: 무선모뎀 설계, FPGA 설계