

모바일용 저잡음 6축 관성센서 IC의 설계

김창현*, 정종문^o

Design of a Low Noise 6-Axis Inertial Sensor IC for Mobile Devices

Chang Hyun Kim*, Jong-Moon Chung^o

요약

본 논문에서는 최근 스마트폰이나 웨어러블 디바이스처럼 IoT/M2M 을 위한 여러 종류의 모바일 기기에 사용되는 센서 중에서 각속도를 검출하는데 사용되는 3축 자이로스코프 센서 IC와 가속도를 검출하는데 사용되는 3축 가속도 센서IC를 1 chip으로 하는 6축 관성센서 IC를 설계하였다. 특히 본 논문에는 자이로스코프 센서의 잡음을 분석하고 이를 효과적으로 제거하기 위한 구조를 제안하였다. 자이로스코프 센서는 가속도 센서, 지자기 센서와 더불어 사용자의 동작을 인식하고, 상대적 위치를 추정하기 위한 용도로 사용되는 센서이다. 위치를 추정할 때 사용되는 센서는 아주 작은 잡음이라도 오차로 누적되기 때문에, 정확도를 높이기 위해서 저잡음 IC 설계가 아주 중요한 요소이다. 본 논문에서는 자이로스코프 센서를 모델링하고 MEMS(micro-electro-mechanical system)와 회로에서 발생하는 잡음의 주파수 특성을 분석하여 이를 효과적으로 제거하기 위한 회로 구조를 제안하였으며, 초소형, 저전력 환경에서 사용 가능하면서 잡음 수준이 아주 낮은 3축 자이로스코프 센서와 3축 가속도 센서를 포함하는 6축 1 chip IC를 제작하였다. 제작된 IC는 자이로스코프 센서 잡음의 주요 원인이 되는 quadrature error를 효과적으로 제거하기 위한 회로 구조를 사용하였고, 0.18um CMOS공정을 이용하여 0.01dps/√Hz의 자이로스코프 센서 잡음밀도를 가지는 IC를 제작하였다.

Key Words : inertial sensor IC, gyroscope, low noise, quadrature error, modeling

ABSTRACT

In this paper, we designed 1 chip IC for 3-axis gyroscope and 3-axis accelerometer used for various IoT/M2M mobile devices such as smartphone, wearable device and etc. We especially focused on analysis of gyroscope noise and proposed new architecture for removing various noise generated by gyroscope MEMS and IC. Gyroscope, accelerometer and geo-magnetic sensors are usually used to detect user motion or to estimate moving distance, direction and relative position. It is very important element to designing a low noise IC because very small amount of noise may be accumulated and affect the estimated position or direction. We made a mathematical model of a gyroscope sensor, analyzed the frequency characteristics of MEMS and circuit, designed a low noise, compact and low power 1 chip 6-axis inertial sensor IC including 3-axis gyroscope and 3-axis accelerometer. As a result, designed IC has 0.01dps/√Hz of gyroscope sensor noise density.

* 본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2013R1A1A2012082) 및 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송연구개발사업(13-911-05-002, 다양한 IoT 서비스를 위한 액세스 네트워크 제어 기술)의 일환으로 수행하였음.

• First Author : School of Electrical & Electronic Engineering Yonsei University, chkim318@yonsei.ac.kr, 정희원

^o Corresponding Author : School of Electrical & Electronic Engineering Yonsei University, jmc@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-10-419, Received October 16, 2014; Revised November 6, 2014; Accepted November 6, 2014

I. 서 론

최근 다양한 센서와 IC, 기기간 통신 기술의 발전에 따라 IoT/M2M 기술이 주목받고 있다. 키보드나 마우스 등 기존의 PC에서 사용하던 입력 장치의 사용이 제약되는 모바일 기기에서 좀 더 자유롭고 편리한 조작에 대한 사용자의 요구가 증대함에 따라 여러 종류의 동작을 인식할 수 있는 다양한 센서의 탑재가 활발히 이루어지고 있다. 또한 모바일 기기는 기본적으로 Bluetooth나 WiFi 와 같은 무선 연결기능이 기본으로 탑재되어 다양한 디바이스와의 상호연결이 용이하도록 되어있다. 이러한 무선 접속 기술과 센서 기술이 접목된 다양한 모바일 기기의 조합은 IoT/M2M의 다양한 서비스를 구축하기 위해 아주 좋은 환경을 제공하고 있다. 특히 센서의 위치정보를 포함하는 경우에 더 효율적으로 네트워크를 구성하는데 도움이 될 뿐만 아니라 높은 부가가치를 가지는 서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.^[1,2] 일반적으로 위치정보를 얻기 위해 사용하는 GPS는 높은 수준의 위치 정보를 제공하지만 실내에서 활용도가 높은 디바이스의 경우에는 GPS가 정확한 위치를 나타내지 못하는 경우가 많다. 이렇게 GPS 가 제대로 동작하지 않는 환경에서 위치를 추정하기 위해서, 최근 가속도 센서, 자이로스코프 센서, 지자기 센서, 압력 센서 등 다양한 센서의 융합 (fusion) 기술과 Bluetooth, WiFi 등의 무선기술, 지리 정보 등을 종합하여 모바일 기기의 위치를 추정하는 기술이 연구되고 있다.^[6] 이러한 위치 추정 기술은 그 동안 연구를 통해 많은 발전이 이루어졌지만, 여전히 더 높은 정확도가 요구되고 있다. 가속도 센서와 자이로스코프 센서는 가속도와 각속도를 출력하기 때문에 움직이는 모바일 기기의 진행하는 거리와 방향을 얻기 위해서는 센서 출력 값의 누적 적분을 사용하게 된다. 이러한 경우에 작은 오차가 누적되어 시간이 지날수록 부정확한 거리나 방향을 나타낼 수 있다. 누적 오차에 의한 방위각의 부정확성을 보정하기 위하여 지구의 자기장을 검출하는 지자기 센서를 사용하기도 한다. 하지만 지구 자기장에 의한 방향 탐지는 주변에 강한 자기장을 띄는 물체가 있거나 건축물의 철골 구조, 교량, 터널 등 주변 환경에 따라 자기장 방향이 왜곡될 경우 상당히 큰 오차가 발생하기 때문에 독립적으로 사용할 수 없고 여러 센서를 동시에 사용하면서 상호 보완되어야 한다.

레이저로 구동하고 광섬유를 이용하는 자이로스코프(fiber optic gyroscope, FOG)는 잡음이 적고 정밀한 출력을 얻을 수 있지만 시스템이 크고, 복잡하기

때문에 모바일용으로 사용하기 적합하지 않다.^[3-5] 최근에는 표면 마이크로머시닝 (surface micromachining) 기술을 이용한 튜닝 포크 (tuning fork) MEMS 자이로스코프가 모바일용으로 많이 연구되고 있으며^[7-9] 압전소자 (piezo electric)를 이용한 자이로스코프도 연구되고 있다.^[10] 센서에서 신호를 검출하는데 필수적인 역할을 하는 IC에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있으며 특히 소형, 저전력으로 구현 가능한 다양한 신호처리와 디지털 제어 등이 적용되고 있다.^[11-15]

본 논문에서는 모바일 기기에 사용되는 가속도 센서와 자이로스코프 센서의 잡음을 줄임으로써 오차를 최소화하여 동작 인식이나 위치 추정의 정확도를 높이고 부가가치가 높은 서비스를 제공할 수 있도록 한다. 모든 방향으로부터의 관성력을 측정하기 위해서 가속도와 자이로스코프는 각각 x, y, z축 3방향을 감지하기 위한 센서가 탑재되었다. 가속도 센서와 자이로스코프 센서는 관성력을 감지하는 MEMS와 MEMS의 물리적 변형을 전압이나 디지털 신호로 변환하여 host로 전달하는 IC로 구성된다. 본 논문에서는 특히 자이로스코프 센서를 모델링하여 MEMS와 신호처리 IC에서 발생하는 다양한 잡음을 분석하고, 이를 제거하기 위한 효율적인 IC 구조를 제안한다. 본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 관련된 기술에 대해서 언급하고 3장에서는 자이로스코프의 모델링에 대해서 기술한다. 4장에서는 이를 기반으로 실제 설계된 IC에 대해 설명하고 5장에서 제작된 IC의 결과를 기술하고 6장에서 결론을 맺도록 한다.

II. Related Work

마이크로머시닝을 이용한 MEMS 센서 기술과 IC 설계 기술의 발전에 따라 저전력, 소형의 자이로스코프 센서와 가속도 센서가 많은 모바일 기기에 장착되고 있다. 최근 모바일 기기에 탑재되는 자이로스코프는 단순한 동작인식 사용자 인터페이스 (user interface, UI) 뿐만 아니라 다양한 응용분야에 적용할 수 있도록 더 낮은 잡음과 높은 정확도가 요구되고 있다. 그 동안 자이로스코프 센서의 잡음을 낮추기 위해서 MEMS구조 설계 분야에 많은 연구가 진행되었다. Guo는 [7]에서 자이로스코프MEMS의 구동부와 감지부 질량체간에 발생하는 진동 간섭을 제거하여 잡음을 줄이는 MEMS구조를 제안하였다. Sharma와 Sonmezoglu가 각각 제안한 구동주파수와 감지주파수

의 차이를 줄이는 mode-matching은 MEMS에서 아주 큰 가속도 감도와 상대적으로 낮은 잡음을 얻을 수 있다^[16,18]. 하지만 낮은 주파수 대역과 느린 응답 속도 때문에 빠른 응답 특성이 요구되는 응용 분야에는 사용이 어려운 단점이 있다. 구동 질량체의 운동이 감지 질량체에 영향을 주는 quadrature error는 자이로스코프 센서의 잡음에 큰 영향을 주는 주요 요인 중 하나이다. MEMS는 제작 시 발생하는 공정 오차에 따른 비대칭 형상에 의해 원하는 동작 이외의 진동을 일으키거나 다른 진동에 영향을 받기도 한다. 이러한 원하지 않는 진동을 MEMS에서 완전하게 차단하는 것이 불가능하기 때문에 IC의 다양한 신호처리나 구동 제어를 이용해서 quadrature error를 보상하는 방법이 연구되어왔다. Raman은 [13]에서 Sigma-Delta Force-Feedback을 사용하여 quadrature error를 보상하는 방법을 제안하였고, Norouzpour -Shirazi는 [14]에서 디지털 위상 복조기를 이용한 자이로스코프 신호처리를 제안하였다. Tatar는 [23]에서 decoupled MEMS구조에 DC 전압을 인가하여 quadrature error를 제거하는 방법을 제안하였으며, Saukoski는 [26]에서 DAC를 포함하는 디지털 feedback loop를 이용한 quadrature error 보상방법을 제안하였다. 기존에 발표된 이러한 방법들은 주로 quadrature error가 발생하지 않도록 MEMS를 구동하는 힘을 보상하는 방법이다. 이러한 보상 방법은 MEMS에 지속적인 힘을 가하면서 MEMS가 선형적으로 동작하는 범위가 작아지기도 한다.

본 논문에서는 2개의 구동 방향을 가진 각각의 질량체를 이용하여 3축 방향의 각속도를 측정하는 자이로스코프 센서를 제안한다. 이 때 두 질량체 사이에 발생하는 맥놀이 (beat)를 모델링하고 센서의 잡음에 미치는 영향을 분석하였다. 이렇게 맥놀이와 함께 발생하는 quadrature error는 단순히 하나의 주파수를 가진 신호가 아니라 맥놀이에 의해 주파수가 섞여 좀 더 복잡한 파형을 나타낸다. 본 논문에서는 quadrature error를 보상하는 방법으로 기존의 방법과 다르게 구동신호는 그대로 두고 감지신호에서 발생하는 quadrature error를 유사한 위상과 크기를 가진 신호로 빼는 방법을 제안한다. 이러한 방식은 센서의 구동을 위한 회로를 간단하게 설계할 수 있는 장점이 있으며 맥놀이에 의해 복잡한 파형을 나타내는 quadrature error를 제거하는데도 효과적이다. 특히 본 논문에서는 감지 신호의 quadrature error를 제거하여 preamp에서 발생할 수 있는 신호의 포화를 막으면서 충분한 이득을 확보하여 시스템 전체의 잡음을 줄이는 방법

을 제안하고 있다.

III. 자이로스코프 센서 모델링

3.1 MEMS 모델링

자이로스코프 센서는 질량체를 한 방향으로 구동시키고, 구동과 직교하는 방향으로 회전시킬 때 발생하는 코리올리력을 이용하여 각속도를 측정하는 센서이다.

그림 1은 압전형 자이로스코프 MEMS를 나타낸다. 압전형 자이로스코프 MEMS는 압전체에 전압을 가할 때 변형되는 힘을 이용하여 센서를 구동시키고, 코리올리력에 의해 변형되는 압전체에서 발생하는 전하량을 측정하여 각속도를 검출한다. 3방향의 각속도를 검출하기 위하여 자이로스코프 MEMS는 y축 방향으로 구동하는 질량체와 x축 방향으로 구동하는 질량체로 구성되어 있다. y축으로 구동하는 질량체는 x축 방향과 z축 방향으로 회전하는 각속도를 검출하고, x축 방향으로 구동하는 질량체는 y축 방향으로 회전하는 각속도를 검출하게 된다.

자이로스코프 MEMS 는 1 자유도(1-Degree of Freedom, DOF)의 공진기 질링-스프링-댐퍼 모델을 조합하여 모델링 할 수 있다. 이 때 진동 모델의 전달 함수는 식(1)과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{m} \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}} \quad (2)$$

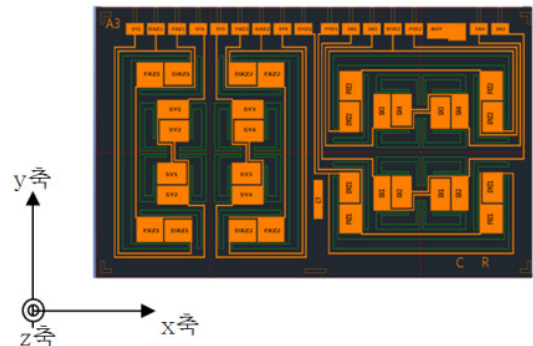


그림 1. 자이로스코프 MEMS top view
Fig. 1. Gyroscope MEMS top view

여기서 m 은 진동자의 질량, ω_0 는 고유진동수, f_0 는 공진주파수, Q 는 quality factor를 나타낸다.

그림 2는 Matlab Simulink를 이용한 자이로스코프 MEMS의 1자유도를 가진 공진기 질량 - 스프링 - 댐퍼 모델이다. y축 구동을 위해 사용된 진동자의 공진 주파수는 22kHz이며, Q 는 560이다. 구동 특성이 유리한 압전 소자를 사용하여 Q 가 높은 진공 패키지 대신 상압 패키지를 사용하였기 때문에 본 논문에서 사용된 MEMS 센서의 Q 가 정전 방식의 MEMS보다 상대적으로 낮게 설계되었다. Q 가 낮을 경우 센서의 감도가 낮고 잡음이 많지만 공정오차가 발생하더라도 일관된 센서 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 압전 전극은 바이어스를 인가하기 위한 저항과 함께 고주파 대역 통과 필터의 역할을 한다. 바이어스 저항은 신호의 왜곡을 줄이기 위해 큰 값을 선택하는 게 유리하지만, 압전 소자를 포함하는 전극이 큰 정전용량을 가지기 때문에 너무 큰 저항을 사용할 경우 센서를 구동하는 초기 시간을 지연시킬 수 있다. 그림 3은 그림 2의 구동부 모델을 시뮬레이션하여 주파수에 대한 신호 크기와 위상 특성을 나타낸 것이다. 공진주파수는 22kHz이고 공진주파수에서의 위상은 270도를 나타내고 있다. 그림 2에서 이득 K 로 표현된 입력대 출력 신호의 비를 결정하는 값은 구동하는 질량체의 무게와

압전소자의 압전상수에 의해서 결정된다. 본 논문에서는 질량을 측정하는 대신 전압으로 입력 신호를 주고 출력의 전압값을 측정하여 입력대 출력이 약 3dB가 되도록 K 값을 정하였다.

그림 4는 3축 자이로스코프 센서의 x축 감지부를 모델링 한 것이다. 감지부를 움직이는 힘은 회전에 의해 발생하는 코리올리력(F_c)이다.

$$F_c = 2mV\Omega \tag{3}$$

그림 4에서 속도 V 는 구동의 변위 d 를 시간에 대해 미분하여 얻어지는 값이고 Ω 는 측정하고자 하는 각속도이며 m 은 질량체의 무게를 나타낸다. 이 때 감지부의 공진주파수는 22.6kHz, Q 는 480으로 구동부보다 낮은 Q 를 가지도록 설계하였다.

그림 5는 3축 자이로스코프 MEMS의 Simulink 모델이다. x, y, z, 3축 방향의 각속도를 모두 검출하기 위해서 y축으로 구동하는 센서와 x축으로 구동하는 센서 2개를 이용하였다. y축 구동을 이용해서 x와 z축 방향을 감지하고, x축 구동으로 y축 방향을 감지하도록 하였다. 크기가 1 degrees per second(dps), 주파수가 30Hz의 사인파(sine wave)를 각속도 입력으로 하였으며 이 때 출력이 약 1 μ V가 되도록 감지부의 이득을 모델링하였다.

자가 발진 (self - oscillation) 이 일어나도록 하기 위해서 1 μ sec동안 1 μ V의 전압을 초기값으로 입력하였다. 이상적인 센서는 각각 질량체의 운동이 분리되어 서로에게 영향을 주지 말아야 한다. 하지만 실제로는 공정상의 오차에서 발생하는 비대칭에 의해서 다양한 운동의 간섭이 발생하게 된다. 대표적인 운동 간의 간섭으로는 2가지를 들 수 있는데 그 중 첫 번째로 y축 방향으로 구동하는 질량체와 x축으로 구동하는 질량체 사이의 간섭이 있다. 두 질량체는 프레임으로 연결되어 있는데 이 프레임을 통해서 상호 간섭이 발

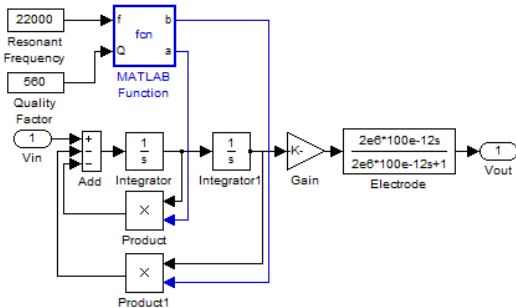


그림 2. Y축 구동부의 1-DOF 질량-스프링-댐퍼 모델
Fig. 2. 1-DOF mass-spring-damper model of Y driving mass

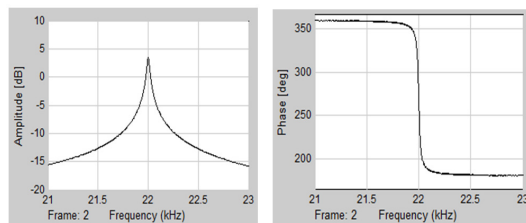


그림 3. 1-DOF 질량-스프링-댐퍼 모델의 주파수 특성
Fig. 3. Frequency characteristics of a 1-DOF mass-spring-damper model

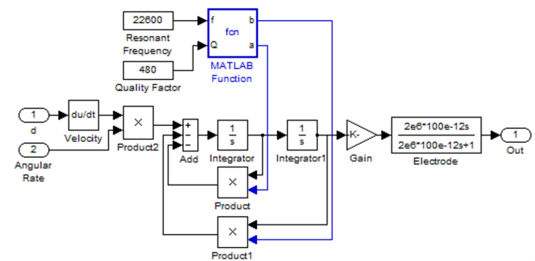


그림 4. X축 감지부의 1-DOF 질량-스프링-댐퍼 모델
Fig. 4. 1-DOF mass-spring-damper model of X sensing mass

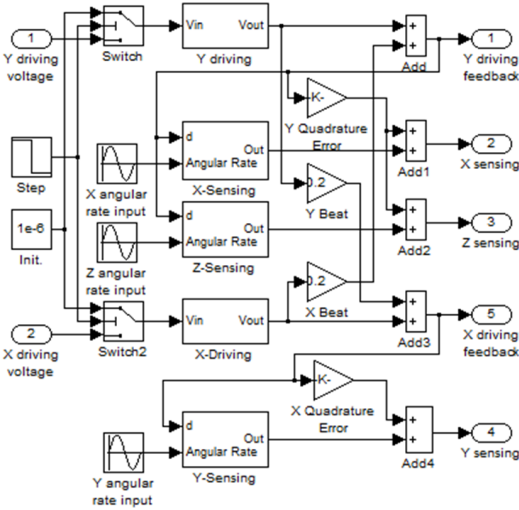


그림 5. 자이로스코프 MEMS 모델
Fig. 5. Gyroscope MEMS model

생하고 있다. 이러한 간섭은 각각의 구동 신호에 더해지는 형태로 나타난다. 공진신호의 간섭의 영향을 최소화하기 위해서 각각의 질량체는 서로 다른 주파수에서 공진하도록 설계되어 있으며 이 때 공진 주파수 차이에 의해서 맥놀이 현상이 발생하게 된다.

표 1은 3축 자이로스코프의 공진 특성 파라미터를 나타낸다. 본 논문에서는 y축과 x축 구동 사이에는 3kHz의 주파수 차이를 두어 공진 시 발생하는 간섭의 영향을 줄이고자 하였다. 또한 구동 주파수와 감지 주파수 사이에는 약 600 또는 800Hz의 주파수 차이를

표 1. 자이로스코프 MEMS 파라미터
Table 1. Gyroscope MEMS parameters

| Item | Value | Unit |
|------------------------------------|-------|-------------------|
| driving frequency of a y-axis | 22 | kHz |
| quality factor of a y-axis driving | 560 | - |
| sensing frequency of a x-axis | 22.6 | kHz |
| quality factor of a x-axis sensing | 480 | - |
| sensing frequency of a z-axis | 22.8 | kHz |
| quality factor of a z-axis sensing | 480 | - |
| driving frequency of a x-axis | 25 | kHz |
| quality factor of a x-axis driving | 560 | - |
| sensing frequency of a y-axis | 25.6 | kHz |
| quality factor of a y-axis sensing | 480 | - |
| mass | 60 | μg |
| x-axis sensitivity | 4.0 | $\mu\text{V/dps}$ |
| y-axis sensitivity | 3.3 | $\mu\text{V/dps}$ |
| z-axis sensitivity | 3.2 | $\mu\text{V/dps}$ |

가진다. 구동 주파수와 감지 주파수의 차이가 적을수록 센서의 감도는 커지기 때문에 x축과 z축 사이에서는 감도 차이가 발생한다. 또한, 구동 주파수가 높을수록 센서의 감도가 작아지기 때문에 y축 감도가 x축보다 상대적으로 작다.

그림 6은 그림 5의 센서 y축 구동부 위치를 모니터링하기 위해서 출력되는 피드백 신호의 시뮬레이션 파형이다. 구동 피드백 신호 22kHz의 y축 공진주파수와 25kHz의 x축 공진주파수가 섞여서 맥놀이 파형을 나타낸다.

두 번째로 구동 질량체 간의 간섭에 의해서 발생하는 맥놀이 이외에 구동 질량체와 감지 질량체 간의 간섭에 의해서 quadrature error가 발생하기도 한다. 이때 구동 질량체에서 발생하는 맥놀이는 구동부 피드백 신호뿐 아니라 그림 7에서와 같이 감지부의

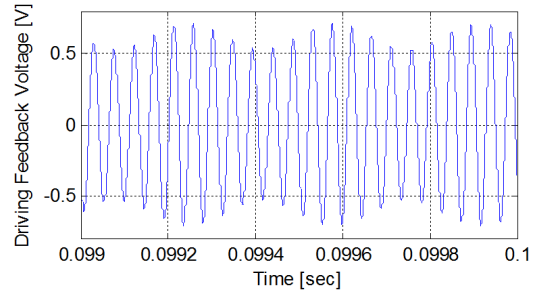


그림 6. 자이로스코프 y-축 구동 피드백 신호
Fig. 6. Gyroscope y-axis driving feedback signal

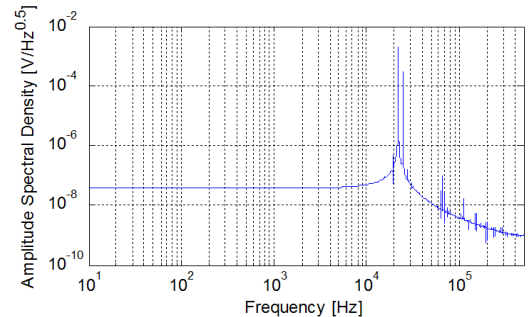
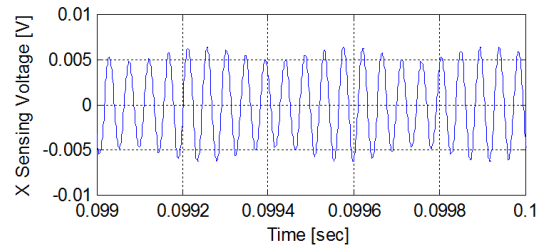


그림 7. 자이로스코프 x축 감지 출력 신호
Fig. 7. Gyroscope x-axis sensing mass output signal

quadrature error에도 영향을 주어 quadrature error의 파형을 복잡하게 만든다. 그림 7의 위 그래프는 30Hz, 1dps의 각속도가 입력되었을 때 자이로스코프의 x축 감지신호를 시간 축에서 나타낸 것이고 아래 그래프는 이를 주파수 영역에서 amplitude spectral density로 나타낸 것이다. 각속도에 의한 신호는 약 1.57uVpp수준이며 이 때 발생하는 quadrature error는 각속도 신호의 약 3200배인 5mVpp로 아주 큰 값이다. 그러므로 quadrature error에 의해 발생하는 신호는 복조기를 거치면서 원래 주파수인 구동주파수의 2배가 되며 이 신호는 저주파 대역 통과 필터를 통해 제거된다. 하지만 각속도에 의해 발생하는 신호에 비해 너무 큰 값이기 때문에 필터를 통해서 완전히 제거하기가 어렵고 quadrature error가 가진 작은 잡음도 복조화하는 과정에서 전체 출력에 상당한 영향을 받게 된다.

3.2 Quadrature Error 보상

Quadrature error는 구동 질량체의 운동이 감지 질량체를 흔들어 발생하기 때문에 구동 질량체와 유사한 신호의 파형과 위상을 나타내게 된다. 그러므로 본 논문에서는 구동 질량체의 운동을 이용하여 quadrature error를 보상하고자 한다.

그림 8은 그림 5의 자이로스코프 MEMS 모델을 포함한 IC의 신호처리 블록을 모델링 한 것이다. y축과 x축 구동을 위한 2개의 피드백 회로가 있고, 각각의 피드백 회로를 통해서 신호의 복조를 위한 클럭(Y Dmod Clk, X Dmod Clk)을 만든다. 센서의 감지부에서 출력되는 신호는 아주 작기 때문에 preamp.와

amp. 2단을 사용하여 신호를 증폭한다. Quadrature error에 의해서 신호가 포화되지 않도록 preamp의 증폭비가 설정된다. 복조된 신호는 amp.에서 2차로 증폭되기 전에 저주파 대역 통과 필터를 이용해 공진주파수 대역의 quadrature error 잡음을 제거해 신호가 포화되는 것을 방지한다. Amp.에서 출력된 신호는 다시 저주파 대역 통과 필터로 고주파 잡음 및 amp. 잡음을 제거하고 ADC를 통해서 디지털 출력으로 변환된다.

그림 9는 quadrature error 보상을 위한 preamp 구조를 모델링한 것이다. Preamp는 입력단에 최대 2mV의 오프셋 전압이 있고, 공진주파수 대역에서 10nV/√Hz의 input referred 잡음과 1/f 잡음을 가지고 있으며 센서의 구동 피드백으로부터 입력을 받아 quadrature error를 제거하기 위한 보상회로와 DC 오프셋을 제거하기 위한 보상회로가 포함되어 있다. 자이로스코프의 잡음은 크게 센서의 quadrature error 신호가 복조될 때 발생하는 잡음, preamp의 오프셋 전압이 복조될 때 발생하는 잡음, 그리고 preamp.와 amp의 열잡음과 1/f 잡음이 있다. Quadrature error는 복조 클럭과 동일한 주파수와 90도의 위상차를 가진다.

그러므로 quadrature error가 복조 될 경우에 신호의 DC값은 '0'이고 주파수는 원래 신호의 2배가 된다. 맥놀이에 의해서 y축 구동과 x축 구동이 합쳐진 경우에는 두 주파수의 차이만큼 맥놀이에 의한 주파수가 발생하게 된다. 그러므로 이 잡음을 제거하기 위해서 이 차이 주파수 이하로 대역을 제한하는 저역 통과 필터를 설계해야 한다. 본 논문에서 사용된 센서의 구동 주파수간 차이는 약 3kHz이다. CMOS 반도체로

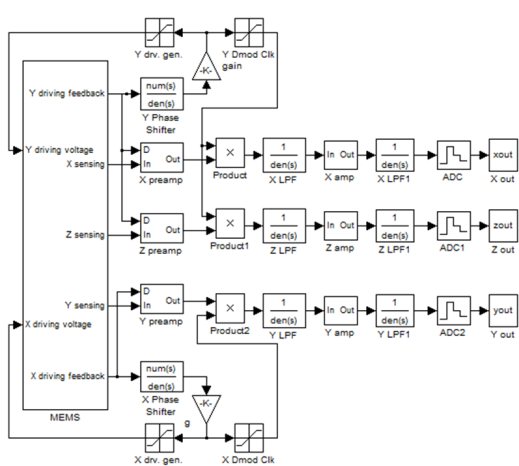


그림 8. 3축 자이로스코프 신호 처리 모델링
Fig. 8. Modeling of a 3-axis gyroscope signal processing

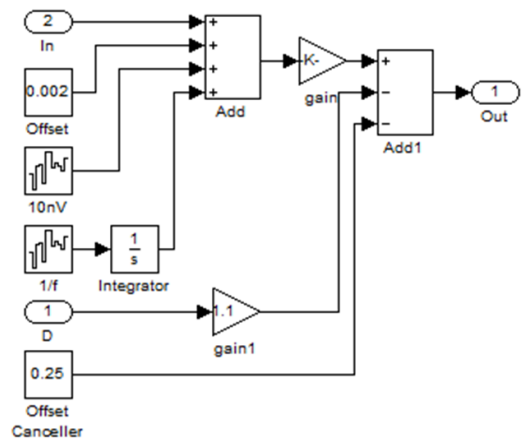


그림 9. Quadrature error와 오프셋 보상을 위한 preamp 블록
Fig. 9. Preamp block for quadrature error and offset compensation

amp.를 만들 때 공정 또는 설계 등의 여러 가지 이유로 입력단에 옴셋이 발생한다. Preamp 입력단에 2mV 옴셋이 발생하게 되면 125배의 증폭을 거치게 될 경우 출력에서는 250mV의 높은 전압의 dc 옴셋이 출력된다. 이 옴셋 전압이 복조회로를 거쳐 복조 클럭과 같은 주파수의 잡음을 출력하게 된다. 이 잡음은 저주파 대역 통과 필터를 통해 제거한다. 낮은 차단주파수와 높은 차수를 가진 저주파 대역 통과 필터를 설계할수록 맥놀이에 의한 잡음과 preamp.의 옴셋에 의한 잡음을 많이 제거할 수 있지만, 회로의 크기가 커지고 소비전류가 증가하는 역효과가 발생한다. 그러므로 저주파 대역 통과 필터의 차단 주파수와 차수는 설계하고자 하는 IC의 크기, 전류, 잡음 목표를 고려해 결정되어야 한다. 본 논문에서는 500Hz의 차단주파수를 가지는 2차의 필터를 amp. 앞, 뒤에 두어 고주파 잡음을 제거하도록 하고 있다.

Preamp.의 증폭비를 A_p , input referred 잡음을 N_p 라 하고 amp.의 증폭비를 A_m , input referred 잡음을 N_m 이라고하면 amp.를 거치면서 발생하는 잡음 N_{total} 은 아래식 (4)와 같다.

$$N_{total} = A_m \sqrt{A_p^2 N_p^2 + N_m^2} \quad (4)$$

$A_m \times A_p$ 는 IC의 최종 이득으로, 목표 감도를 맞추기 위해 일정한 상수값을 가진다. 위 식 (4)에서 A_m 은 작고 A_p 가 클수록 잡음특성은 좋아진다. 하지만 A_p 가 클수록 quadrature error에 의해 preamp.의 출력에서 신호의 포화가 발생할 가능성이 높아진다. 그러므로 포화를 막고 잡음을 줄이기 위해서 quadrature error의

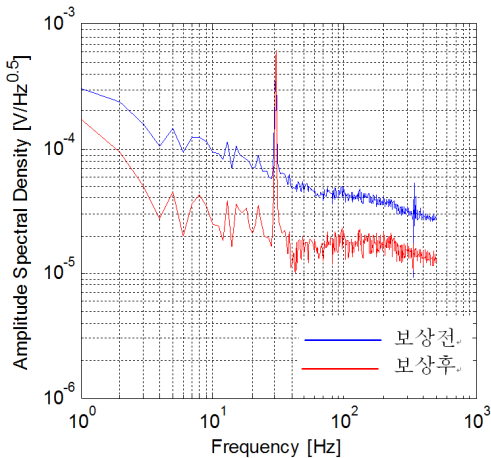


그림 10. 자이로스코프 출력의 주파수 특성
Fig. 10. Frequency characteristic of a gyroscope output

보상은 필수적이다.

그림 10은 1dps, 30Hz의 각속도를 입력으로 하는 자이로스코프 센서의 출력을 나타낸다. 센서의 감도가 1μV/dps이고 회로의 최종 증폭비가 1000인 경우, 10Hz에서 잡음 밀도는 quadrature error와 옴셋을 보상하기 전에는 100μV/√Hz (0.1dps/√Hz) 이고 quadrature error와 옴셋을 보상한 후에는 30μV/√Hz (0.03dps/√Hz)으로, 약 1/3이상 잡음이 줄어드는 결과를 확인 할 수 있다. 보상 전에는 신호의 포화를 막기 위해 $A_p = 62.5$, $A_m = 16$ 이었으나 보상 이후에는 $A_p = 125$, $A_m = 8$ 로 하였다. ADC에서 1ksps (ksamples/second)로 데이터를 변환했기 때문에 500Hz 이상의 신호는 낮은 주파수로 folding되어 잡음 특성에 영향을 준다.

IV. IC 설계

본 논문에서는 TSMC의 0.18μm mixed CMOS 공정을 사용하여 3축 자이로스코프와 3축 가속도 센서를 포함하는 6축 관성센서 IC를 설계하였다.

그림 11은 6축 관성센서 IC의 블록도이다. 6축 관성센서 IC는 크게 가속도 신호처리, 자이로센서 신호처리, 디지털 회로와 기타 회로로 구성되어 있다. 가속도 신호처리 회로는 소비전류를 최소로 하기 위하여 하나의 회로를 이용해서 3축의 신호를 처리한다. 가속도 센서의 preamp 앞 단은 3개의 스위치로 구성되어 있어 3축의 신호를 순차적으로 받게 되며, preamp 뒷 단은 1개의 스위치로 구성되어 앞 단의 스위치와 함께 빠르게 스위칭을 하는 chopping 회로이다. chopping회로 이후에는 chopping 주파수를 제거

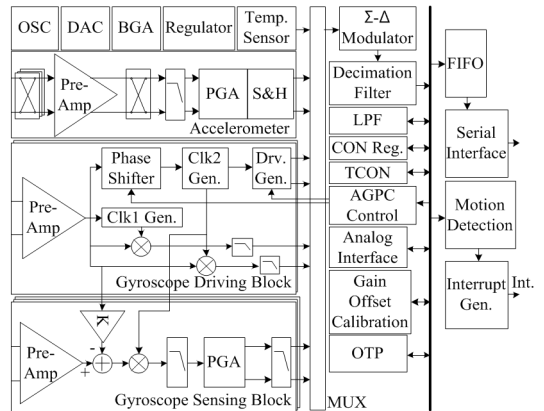


그림 11. 6축 관성센서 IC의 블록도
Fig. 11. Block diagram of a 6-axis inertial sensor IC

하기 위한 저주파 대역 통과 필터와 가변 이득 회로 (programmable gain amplifier, PGA), Sample & holder (S&H)를 거쳐 디지털로 변환된다. Chopping 회로를 이용해 입력되는 고속도 신호를 높은 주파수로 변환시키면 고속도 preamp에서 발생하는 낮은 주파수의 잡음을 상당히 줄일 수 있다.

자이로스코프 회로는 크게 2개의 구동회로와 3개의 감지회로로 구성된다. 구동 회로는 센서 출력을 전압으로 변환하는 preamp, 위상을 90도 지연시키는 위상 지연기(phase shifter), 변조기에 사용되는 클럭을 만드는 Clk2 Gen. 블록, 구동 피드백 신호의 크기를 모니터링하는데 사용되는 Clk1 Gen. 블록, 센서의 구동 전압을 만드는 Drv. Gen. 블록으로 구성되어 있다. Clk2 Gen. 에서 만들어진 클럭은 신호 감지부의 주파수 변조를 위해 사용될 뿐 아니라 위상 지연기가 정확하게 동작하는지를 모니터링하는데도 사용된다. 본 논문에서는 구동 피드백 신호의 크기와 위상을 모니터링해서 항상 일정한 크기와 위상을 가지도록 구동 신호를 제어한다. 자이로스코프의 감지 블록은 높은 증폭비를 구현하기 위해 preamp.에서 2단의 amp.로 구성된 instrument amp.를 사용하며, quadrature error 신호를 제거하기 위한 뺄셈 회로가 포함되어 있다. 또한 각속도를 구하기 위한 변조 회로, 500Hz 이하의 낮은 차단 주파수를 갖도록 switched capacitor로 설계된 저주파 대역 통과 필터, 이득 조절이 가능한 programmable gain amp (PGA)로 구성되어 있다. 3축의 고속도 신호와 3축의 자이로 신호, 온도센서 1채널과 자이로스코프의 구동을 모니터링하기 위한 4채널의 auto-gain-phase control (AGPC) 신호는 MUX를 통해 시그마-델타 모뮬레이터로 전달되고 decimation filter에 의해 16bit 디지털 신호로 변환된다. 디지털 회로는 유저의 선택에 따라 선택 가능한 저주파 대역 통과 필터와 동작인식 인터럽트 발생기, 이날로그 회로의 옵셋과 이득을 조절하기 위한 제어기, 각종 레지스터 값을 저장하기 위한 one time programmable memory (OTP), 타이밍 제어기 등으로 구성되어 있다. 기타 회로로는 디지털 회로를 구동하기 위한 2MHz 오실레이터 (OSC), 각 채널당 옵셋을 제어하기 위한 전류 DAC 6개와 자이로 센서를 구동할 때 구동 신호 크기를 조절하기 위한 전압 DAC 2개, 1.2V 전원을 만들기 위한 Bandgap Reference, 디지털 회로와 아날로그 회로의 전원을 공급하기 위한 2개의 1.8V regulator, 온도 보상을 위한 온도센서 회로가 있다.

V. 결 과

그림 12는 제작된 6축 관성센서 IC이다. IC 상단에 자이로스코프 센서와의 연결을 위한 PAD가 배치되어 있고 하단은 고속도 센서용 PAD가 배치되어 있다.

그림 13은 6축 관성센서의 레지스터를 설정하고 데이터를 PC에 저장하기 위한 프로그램이다. 센서의 I2C 출력을 USB 로 변환하여 PC와 센서간 통신을 하도록 설정하였다. 왼쪽 상단은 자이로스코프 3축 그래프를 표기하고 왼쪽 하단 그래프는 고속도 3축을 표기하였다. 그림 14는 IC의 테스트 핀을 이용해서 3축 자이로스코프의 출력 전압을 측정하는 것이다. 잡음을 측정하기 위하여 센서를 정지 상태로 두고 Audio Precision 장비를 이용하여 잡음밀도를 측정하였다. 증폭비 3072, 1536, 768, 384에 대해서 10Hz 에서 측정된 잡음은 40, 20, 10, 5uV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 로 input referred

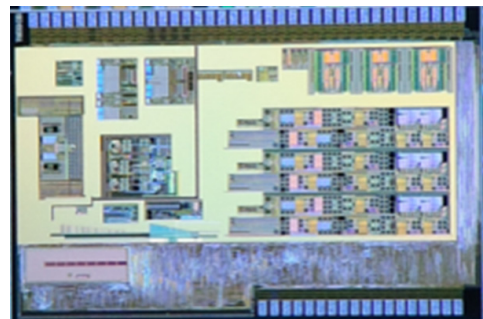


그림 12. 6축 관성센서 IC
Fig. 12. 6-axis inertial sensor IC

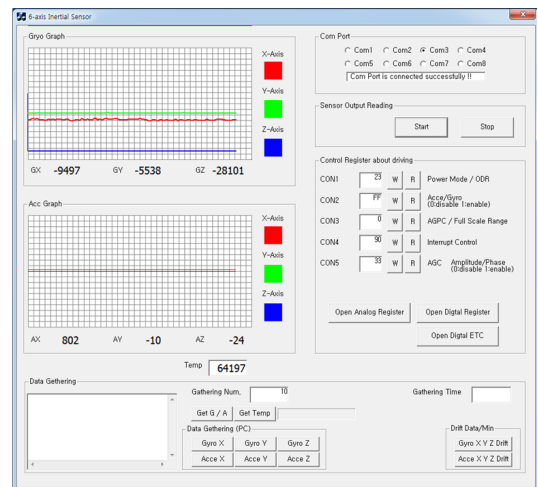


그림 13. 6축 관성센서 IC를 위한 PC 인터페이스 프로그램
Fig. 13. PC interface program for a 6-axis inertial sensor IC

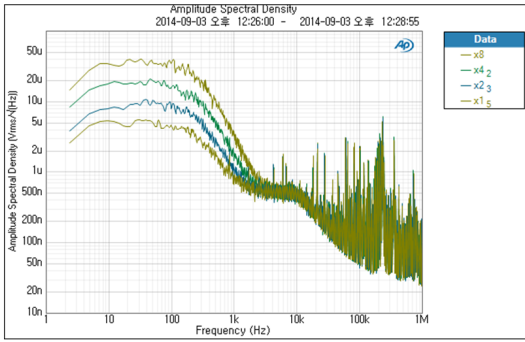


그림 14. 자이로스코프 IC 아날로그 출력의 잡음밀도
Fig. 14. Noise density of a gyroscope IC analog signal output

잡음 밀도로 환산하면 약 $13nV/\sqrt{Hz}$ 가 된다. 이 신호는 자이로스코프의 감도가 약 $1uV/dps$ 일 때 약 $0.013dps/\sqrt{Hz}$ 의 잡음 밀도이다.

그림 15는 rate table에 6축 관성센서를 장착하고 x축 방향의 각속도를 50dps씩 500dps까지 증가시켰을 때 자이로스코프의 출력을 PC 인터페이스 프로그램으로 받아서 나타낸 그래프이다. 회전 속도를 증가시켰을 때 회전 속도에 따라 정확한 각속도 값을 출력하고 있다.

표 2는 개발된 IC의 성능을 STMicro사의 LSM330과 최근 좋은 성능으로 스마트폰에 탑재된 Invensense사의 MPU-6500스펙과 비교하였다. 자이로스코프의 소비전류는 MPU-6500과 비슷한 스펙을 보여주고 있으며, 가속도의 경우는 LSM330이 $0.25mA$ 로 가장 낮다. 잡음 특성은 MEMS의 감도에 따라 조금씩 달라진다. $1uV/dps$ 의 자이로스코프

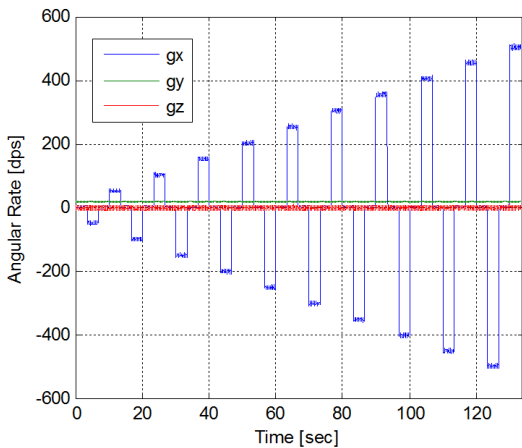


그림 15. 자이로스코프 센서 출력
Fig. 15. Gyroscope sensor output

표 2. 6축 관성센서 성능 비교
Table 2. Comparison of 6-axis inertial sensors

| Item | Value | LSM330 | MPU6500 | Unit |
|-----------------------------|-------|--------|---------|------------------|
| 6-axis mode current | 3.8 | 6.1 | 3.4 | mA |
| Gyroscope mode current | 3.4 | - | 3.2 | mA |
| Accelerometer mode current | 0.65 | 0.25 | 0.45 | mA |
| Gyroscope Noise Density | 0.013 | 0.03 | 0.01 | dps/ \sqrt{Hz} |
| Accelerometer Noise Density | 0.21 | 0.22 | 0.3 | mg/ \sqrt{Hz} |

MEMS 를 사용하였을 때 잡음밀도는 $0.013dps/\sqrt{Hz}$ 를 나타내었다. 실제 IC에서는 각각의 회로 블록을 시뮬레이션 잡음 보다 낮게 설계하였기 때문에 최종 출력에서 시뮬레이션에서 예상된 잡음 밀도보다 낮게 측정되었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 2개의 구동 방향을 가진 각각의 질량체를 이용하여 3축 방향의 각속도를 측정하는 자이로스코프 센서를 제안하였다. 두 질량체 사이에 발생하는 맥놀이 (beat)를 모델링하고 센서의 잡음에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 맥놀이에 의해 여러 주파수 특성이 혼재된 quadrature error 를 보상하는 방법을 제안하였으며 IC로 제작하여 quadrature error를 제거하고 자이로스코프 센서의 잡음 특성을 개선하였다.

References

- [1] C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos, "Context aware computing for the internet of things: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 1, pp. 414-454, 2014.
- [2] C. Perera, A. Zaslavsky, C. H. Liu, M. Compton, P. Christen, and D. Georgakopoulos, "Sensor search techniques for sensing as a service architecture for the internet of things," *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 2, pp. 406-420, Feb. 2014.
- [3] S. W. Lloyd, S. Fan, and M. J. F. Digonnet, "Experimental observation of low noise and

- low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 31, no. 13, pp. 2079-2085, Jul. 2013.
- [4] H. Ma, W. Wang, Y. Ren, and Z. Jin, “Low-noise low-delay digital signal processor for resonant micro optic gyro,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 198-201, Jan. 2013.
- [5] F. Hakimi and J. D. Moores, “RIN-reduced light source for ultra-low noise interferometric fibre optic gyroscopes,” *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 3, pp. 205-207, Jan. 2013.
- [6] K. Lan and W. Shin, “Using smart-phones and floor plans for indoor location tracking,” *IEEE Trans. Human-Machine Syst.*, vol. 44, no. 2, pp. 211-221, Apr. 2014.
- [7] Z. Y. Guo, L. T. Lin, Q. C. Zhao, Z. C. Yang, H. Xie, and G. Z. Yan, “A lateral-axis microelectromechanical tuning - fork gyroscope with decoupled comb drive operating at atmospheric pressure,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 458-468, Jun. 2010.
- [8] A. Walther, C. L. Blanc, N. Delorme, Y. Deimerly, R. Anciant, and J. Willemin, “Bias contributions in a MEMS tuning fork gyroscope,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 303-308, Apr. 2013.
- [9] M. S. Weinberg and A. Kourepenis, “Error sources in in-plane silicon tuning-fork MEMS gyroscopes,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 479-491, Jun. 2006.
- [10] X. Li, X. Chen, Z. Song, P. Dong, Y. Wang, J. Jiao, and H. Yang, “A microgyroscope with piezoresistance for both high-performance coriolis-effect detection and seesaw-like vibration control,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 15, no. 6, pp. 1698-1707, Dec. 2006.
- [11] L. Aaltonen, A. Kalanti, M. Pulkkinen, M. Paavola, M. Kamarainen, and K. A. I. Halonen, “A 2.2mA 4.3mm² ASIC for a 1000degree/s 2-Axis capacitive microgyroscope,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 7, pp. 1682-1692, Jul. 2011.
- [12] A. Sharma, M. F. Zaman, and F. Ayazi, “A 104-dB dynamic range transimpedance-based CMOS ASIC for tuning fork microgyroscopes,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 42, no. 8, pp. 1790-1802, Aug. 2007.
- [13] J. Raman, E. Cretu, P. Rombouts, and L. Weyten, “A closed-loop digitally controlled MEMS gyroscope with unconstrained sigma-delta force-feedback,” *IEEE Sensors J.*, vol. 9, no. 3, pp. 297-305, Mar. 2009.
- [14] A. Norouzpour-Shirazi, M. F. Zaman, and F. Ayazi, “A digital phase demodulation technique for resonant MEMS gyroscopes,” *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 9, pp. 3260-3266, Sept. 2014.
- [15] S. Park and R. Horowitz, “Adaptive control for the conventional mode of operation of MEMS gyroscopes,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 101-108, Feb. 2003.
- [16] A. Sharma, M. F. Zaman, and F. Ayazi, “A sub-0.2degrees/hr bias drift micromechanical silicon gyroscope with automatic CMOS mode-matching,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 5, pp. 1593-1608, May 2009.
- [17] R. P. Leland, “Adaptive control of a MEMS gyroscope using lyapunov methods,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 278-283, Mar. 2006.
- [18] S. Sonmezoglu, S. E. Alper, and T. Akin, “An automatically mode-matched MEMS gyroscope with wide and tunable bandwidth,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 284-297, Apr. 2014.
- [19] M. Kirrko-Jaakkola, J. Collin, and J. Takala, “Bias prediction for MEMS gyroscopes,” *IEEE Sensors J.*, vol. 12, no. 6, pp. 2157-2163, Jun. 2012.
- [20] Z. W. Wu, M. L. Yao, H. G. Ma, and W. M. Jia, “De-noising MEMS inertial sensors for low-cost vehicular attitude estimation based on singular spectrum analysis and independent component analysis,” *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 14, Jul. 2013.
- [21] Y. Dong, M. Kraft, and W. Redman-White, “Micromachined vibratory gyroscopes controlled by a high-order bandpass sigma-delta modulator,” *IEEE Sensors J.*, vol. 7, no.

1, pp. 59-69, Jan. 2007.

[22] J. Georgy, A. Noureldin, M. J. Korenberg, and M. M. Bayoumi, "Modeling the stochastic drift of a MEMS-Based gyroscope in Gyro/Odometer/GPS integrated navigation," *IEEE Trans. Intell. Transportation Syst.*, vol. 11, no. 4, Dec. 2010.

[23] E. Tatar, S. E. Alper, and T. Akin, "Quadrature error compensation and corresponding effects on the performance of fully decoupled MEMS gyroscopes," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 656-667, Jun. 2012.

[24] S. Lee, S. Park, J. Kim, S. Lee, and D. Cho, "Surface/bulk micromachined single-crystalline-silicon micro-gyroscope," *J. Microelectromech. Syst.* vol. 9, no. 4, pp. 557-567, Dec. 2000.

[25] M. F. Zaman, A. Sharma, and F. Ayazi, "The resonating star gyroscope a novel multiple-shell silicon gyroscope with sub-5 deg/hr allan deviation bias instability," *IEEE Sensors J.*, vol. 9, no. 6, pp. 616-624, Jun. 2009.

[26] M. Saukoski, L. Aaltonen, and K. A. I. Halonen, "Zero-rat output and quadrature compensation in vibratory MEMS gyroscopes," *IEEE Sensors J.*, vol. 7, no. 12, pp. 1639-1652, Dec. 2007.

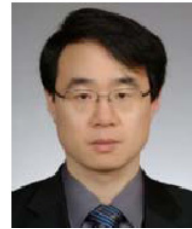
김 창 현 (Chang Hyun Kim)



1997년 2월 : 연세대학교 전기
공학과 졸업
1999년 2월 : 연세대학교 생체
공학 협동과정 석사
1999년 1월~현재 : 삼성전기 (주)
수석연구원
2006년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 전자공학, 통신공학, 반도체설계

정 종 문 (Jong-Moon Chung)



1992년 2월 : 연세대학교 전기
공학과 졸업
1994년 2월 : 연세대학교 전기
공학과 석사
1999년 2월 : Pennsylvania State
University 박사
2000년~2005년 : Oklahoma

Communication Laboratory for Networking and
Bioengineering (OCLNB) and the Advanced
Communication Systems Engineering Laboratory
(ACSEL) 연구소장 Oklahoma State University
부교수

2005년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 정
교수

2011년~현재 : Editor, IEEE Transactions on Vehicular
Technology

2012년 10월 : 방위사업청장 표창장 수상

2013년~현재 : Co-Editor-in-Chief, KSII Transactions
on Internet and Information Systems (TIIS)

<관심분야> 전자공학, 통신공학