

A Two Dimensional Digital Clinometer with Dual Axis Micromachined Accelerometers

宋基武[†]
(Ci-Moo Song)

Abstract - This paper deals with a new two dimensional clinometer based on dual axis micromachined accelerometers. The clinometer is a small and low-cost product, which is mainly developed to help golfers read easily the tilt of a putting green. First, this paper proposes the principle of two dimensional clinometer and also a calibration method with respect to the offset voltage and sensitivity of a accelerometer. Experimental results on the developed clinometer show that the proposed clinometer can provide useful information on the tilt angle and direction of an inclined plane.

Key Words : 경사계, Clinometer, Calibration, Micromachined Accelerometer, MEMS

1. 서 론

미소 전기기계 시스템(MEMS : Micro Electro Mechanical Systems)기술의 발달로 가속도 센서의 응용분야가 더욱 확대되고 있으며, 가속도 센서의 응용분야는 크게 자동차 산업과 가전산업 등에 적용되어 움직임을 모니터링(monitoring)하고 상황을 검출하는 분야와 종래에 상대적으로 고가의 미소 기계 부품을 사용하던 산업과 항공 및 관성항법 산업 등에 적용되는 계측제어분야로 나눌 수 있다. MEMS 제품이 자동차 산업에서 성공을 거두는 데는 거의 20년이 걸렸으며, 오늘날 성숙한 기술을 바탕으로 한 저가의 양산을 통하여 전통적인 관성 응용분야와 새롭게 부각하는 응용분야에서 성공적으로 적용되기에 이르렀다[1][2][3].

가속도 센서는 센서에 작용하는 동적인 가속도와 정적인 가속도를 동시에 측정하는 센서로서 동적인 가속도가 영인 상태, 즉 정지한 상태에서 측정한 정적인 가속도는 중력 가속도에 의한 가속도 성분이며, 이를 적절히 이용하면 경사각을 구할 수 있다[4]. 한편 어떤 평면의 경사각 측정을 요구하는 응용분야는 다양하며, 본 논문은 새로운 응용분야로서 퍼팅그린(putting green)의 경사각과 경사방향을 간단하고 편리한 방법으로 측정할 수 있는 고품용 경사계인 볼마크(ball marker) 겸용 디지털 수평계 개발과 관련된 것이다. 골프 경기에서 정확한 퍼팅을 하기 위해서는 퍼팅그린의 경사를 정확하게 읽어야 할 필요성이 있으며, 개발된 소형 2차원 디지털 수평계는 이 필요성을 심분 충족할 수 있을 것으로 예상된다. 기존에 제안된 경사각 측정 방법은 1차원 경사계에 대한 것이며[4], 저가의 MEMS 가속도 센서는 소자에 따라서, 동작 조건에 따라서 각각 센서의 응답특성이 변

하므로 이를 보정하기 위한 적절한 보상방법을 사용하여야 한다[5][6].

본 논문에서는 2차원 평면의 경사각과 경사방향을 측정하기 위한 2축 가속도 센서를 이용한 경사계의 원리를 제시하고, 퍼팅그린의 경사 측정 사용 환경에 적합한 소형의 휴대용 2차원 디지털 경사계를 제작하고 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 보이고자 한다.

2. 2축 가속도 센서를 이용한 2차원 경사계

2축 MEMS 가속도 센서를 이용한 2차원 경사계와 관련하여 먼저 선정된 MEMS 가속도 센서의 특성을 살펴보고, 평면의 경사각과 경사방향을 측정하기 위한 2차원 경사계의 원리를 살펴보기로 하자.

2.1 MEMS 가속도 센서

표 1 KXM52-1040 가속도 센서의 주요 사양
Table 1 Major specifications of accelerometer KXM52-1040

Acceleration range	±2.0[g]	-
Sensitivity	660[mV/g]	@3.3V
Sensitivity vs. Temp.	±2.0[%] typical (±3.0[%] max.)	-40℃ ~85℃
0g Offset vs. Temp.	±100[mV]	-40℃ ~85℃
Span	±1320[mV]	@3.3V

MEMS 기술을 사용한 저가의 소형 가속도 센서는 오프셋 전압(offset voltage)과 감도(sensitivity)가 변동하는 특징이 있으며, 표 1에 나타낸 Kionix사의 2축 가속도 센서인 KXM52-1040은 온도에 따라 오프셋 전압과 감도가 변하며,

[†] 교신저자, 正會員 : 세종대 항공우주공학과 교수 · 공학박사
E-mail : cmsong@sejong.ac.kr
接受日字 : 2006年 7月 19日
最終完了 : 2006年 8月 19日

소자에 따라라도 변하는 특성을 보인다. 따라서 오프셋 전압과 감도에 대한 적절한 보상을 하여야 각각 정밀한 오프셋 전압 V_{OFF} 와 감도 K_a 를 식 (1)에 적용하여 정밀한 가속도 a 의 측정이 가능함을 알 수 있다.

$$V_{out} = V_{OFF} + K_a \cdot a [V] \quad (1)$$

식 (1)에서 오프셋 전압은 가속도가 영인 상태에서의 센서 출력전압이므로 센서에 작용하는 가속도가 영인 수평 정지상태에서 센서 출력전압을 측정하면 V_{OFF} 을 구할 수 있다. 또한 식 (1)에서 중력가속도인 $1[g]$ 가 정역 방향으로, 즉 $\pm 1[g]$ 가 센서에 작용하도록 센서를 배치하고 각각의 정지상태에서 측정된 출력전압을 이용하면 식 (2)와 같이 감도 K_a 를 구할 수 있다.

$$K_a = \frac{V_{out}(+1g) - V_{out}(-1g)}{2} \quad (2)$$

2.2 2차원 디지털 경사계

그림 1은 2축 가속도 센서를 장착하는 평면상의 xy 축 기준 좌표를 나타내고 있으며, 경사각 θ 만큼 기울어진 정지한 평면상에 중력가속도 g 에 의해 가장 크게 나타나는 가속도, 즉 지면에 가장 가까운 원주상의 점과 원의 중심점 Z 를 연결하는 선분위에 나타나는 최대 정적 가속도 g_θ 를 나타내고 있다. 한편 중력 가속도 g 의 크기와 작용방향은 지표면에 대하여 항상 일정하기 때문에 그림 1의 최대 정적 가속도 g_θ 는 항상 식 (3)과 같고, 경사각 θ 와의 관계는 식 (4)와 같다.

$$0 \leq g_\theta \leq g \quad (3)$$

$$g_\theta = g \cdot \cos(\pi/2 - \theta) = g \cdot \sin\theta \quad (4)$$

그러므로 가속도 센서를 이용하여 중력 가속도에 의한 g_θ 를 측정하면 식 (4)의 관계로부터 경사각 θ 를 식 (5)와 같이 구할 수 있으며, 식 (3)에 의하여 경사각의 범위는 식 (6)과 같다.

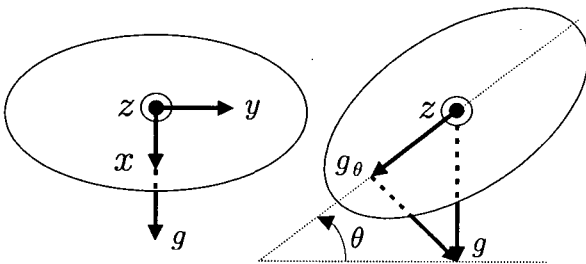


그림 1 평면상의 xy 축 기준 좌표와 경사각
Fig. 1 Reference coordinate of xy axis on a plane and a tilt angle

$$\theta = \sin^{-1}(g_\theta/g) \quad (5)$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (6)$$

그림 2는 정지한 평면, 즉 중력가속도만 작용하는 평면에서의 가속도 관계를 나타낸 것으로 xy 축에 각각 위치한 가속도 센서에 의한 xy 축 가속도 g_x, g_y 를 나타내고 있다. 그림 2에서 최대 정적 가속도 g_θ 와 기준좌표에 대한 경사 방향을 나타내는 각 θ_z 를 이용하여 가속도 g_x, g_y 를 구하면 식 (7)과 같다.

$$g_x = g_\theta \cdot \cos \theta_z, \quad g_y = g_\theta \cdot \sin \theta_z \quad (7)$$

식 (7)에서 최대 정적 가속도 g_θ 를 구하면 식 (8)과 같다.

$$g_\theta = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (8)$$

한편, 식 (7)을 이용하여 경사 방향을 나타내는 각 θ_z 를 구하면 식 (9)와 같으며, θ_z 의 범위는 식 (10)과 같다.

$$\theta_z = \tan^{-1}\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (9)$$

$$-180^\circ \leq \theta_z \leq 180^\circ \quad (10)$$

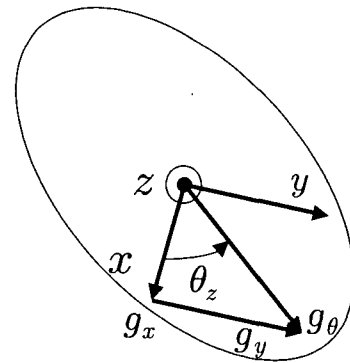


그림 2 정지한 평면상에서의 가속도와 경사방향
Fig. 2 Accelerations and tilt direction on the static plane

2차원 경사계는 2축 가속도 센서를 그림 1의 평면상 기준 좌표에 부착하고, 정지상태에서 2축의 가속도 성분을 각각 측정된 후에 식 (8)을 이용하여 최대 정적 가속도 g_θ 를 먼저 계산하고, 식 (5)에 의하여 경사각 θ 를 구하며, 식 (9)를 이용하여 경사 방향을 나타내는 각 θ_z 를 구한 값을 이용하여 만들 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 2차원 디지털 경사계는 퍼팅그린의 경사각과 경사방향을 측정할 목적으로 사용 환경을 고려하여 제품의 사양 및 설계가 이루어졌으며, 그림 3의 경사계 구성도에 나타난 바와 같이 경사계의 주요 구성 요소는 10-bit A/D 변환기와 LCD Driver를 내장한 Microchip사의 PIC16F913 마이크로컨트롤러(Microcontroller)와 그림 4에 나타난 전용 LCD, 그리고 표 1에 나타난 2축 MEMS 가속도 센서이며, 제작한 경사계의 사진은 그림 4와 같다. 그림 4에 나타난 전용LCD는 2자리 수를 표현하도록 되어 있으며, 경사 방향을 나타내는 각 θ_z 는 그림 4와 같이 가장 근사한 값을 12개의 눈금중 하나로 나타내도록 구성하였다.

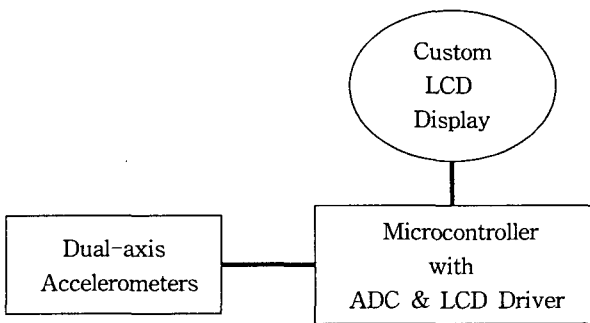


그림 3 2차원 디지털 경사계의 구성도
 Fig. 3 Block diagram of a two dimensional digital clinometer

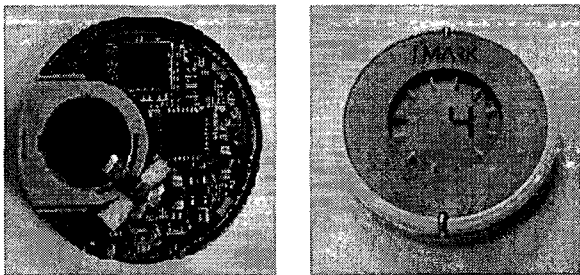


그림 4 2차원 디지털 경사계의 내부 및 외부 사진
 Fig. 4 Inner and outer pictures of a two dimensional digital clinometer

실험은 완전히 조립된 제품(I'MARK)을 사용하여 경사각 측정 정밀도에 대하여 진행하였으며, 측정의 정밀도를 높이기 위하여 256개의 측정값을 평균한 값을 사용하여 경사각과 경사 방향을 나타내는 각도를 각각 측정하였다. 그림 5는 2차원 디지털 경사계의 측정 정밀도를 나타낸 것으로 그림 5 (a)는 경사 방향을 나타내는 각 $\theta_z = 0^\circ$ 인 경우에 대한 실제 경사각에 대한 측정 경사각을 나타낸 것이다. 그림 5 (b), 그림 5 (c), 그림 5 (d), 그림 5 (e)는 각각 $\theta_z = 0^\circ$, $\theta_z = 30^\circ$, $\theta_z = 60^\circ$, $\theta_z = 90^\circ$ 에 대한 측정 오차 각도를 나타낸 것이다. 그림 5에서 센서의 공칭 데이터를 사용하여 측정된 경우를 "보상전"으로 표시하고, 실험으로 수평상태에서 측정된 오프셋 전압을 사용하여 측정된 경우를 "오프셋

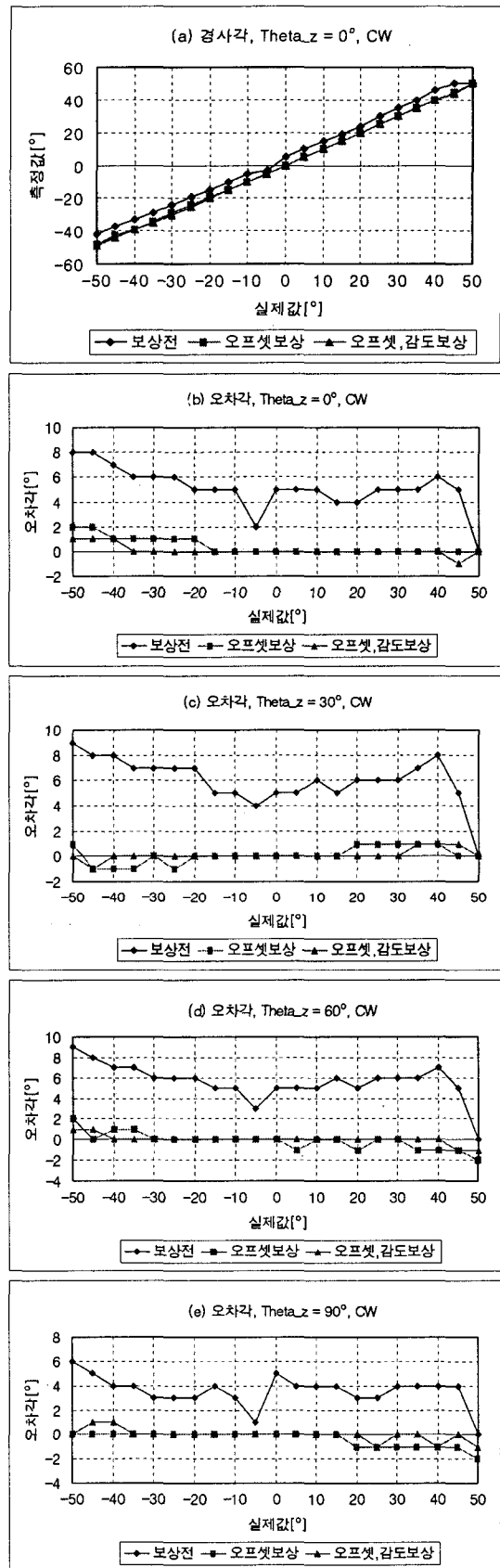


그림 5 2차원 디지털 경사계의 측정 정밀도 (#1)
 Fig. 5 Experimental measurement accuracy of a two dimensional digital clinometer (#1)

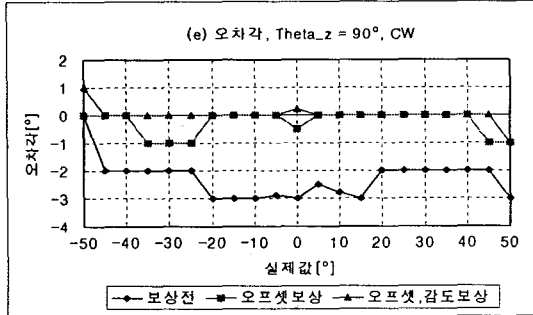
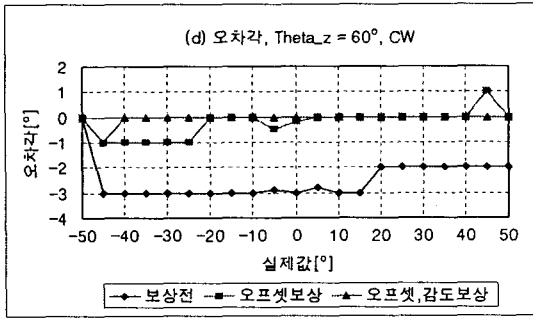
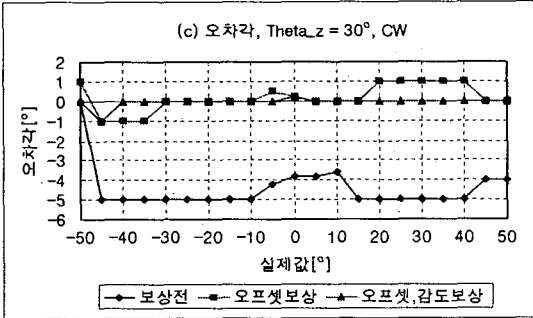
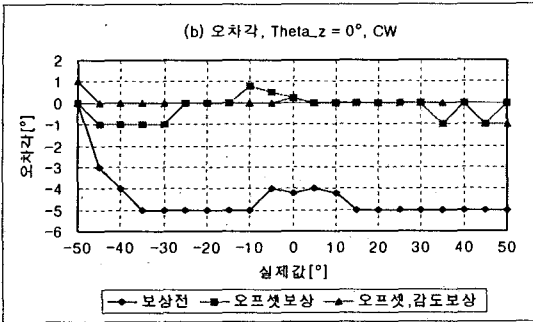
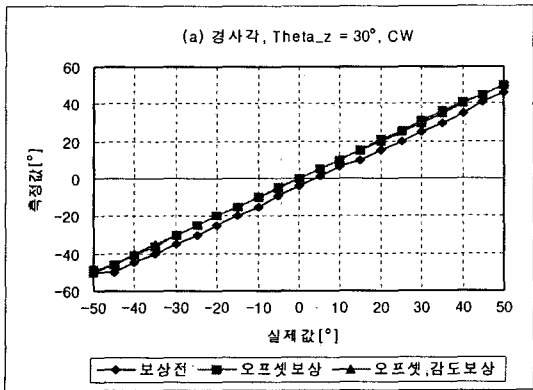


그림 6 2차원 디지털 경사계의 측정 정밀도 (#2)
 Fig. 6 Experimental measurement accuracy of a two dimensional digital clinometer (#2)

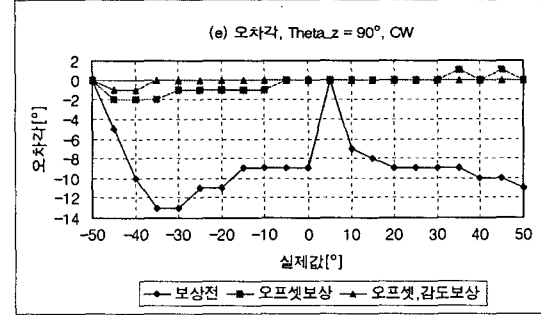
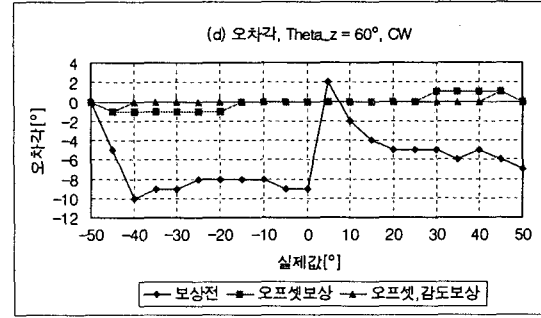
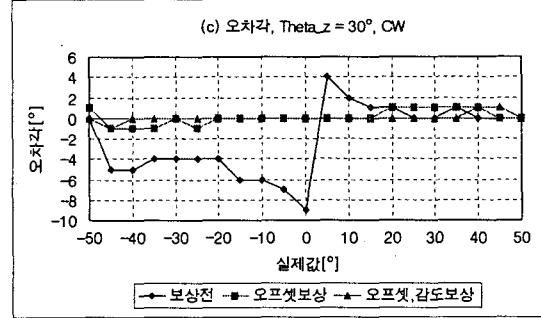
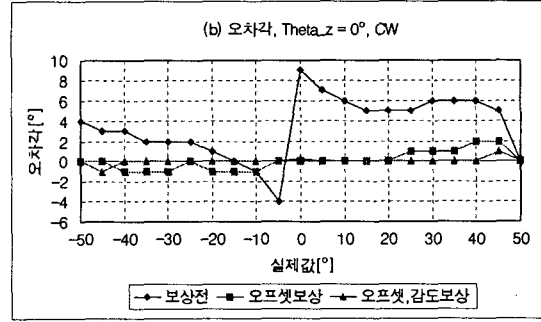
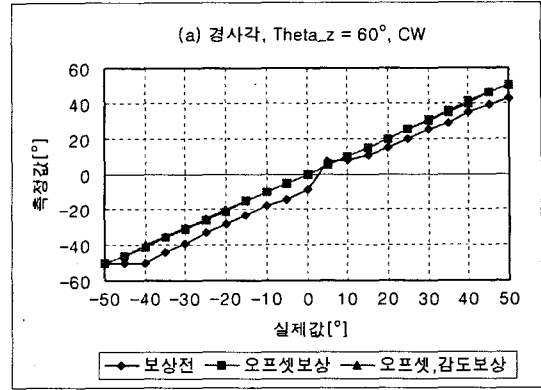


그림 7 2차원 디지털 경사계의 측정 정밀도 (#3)
 Fig. 7 Experimental measurement accuracy of a two dimensional digital clinometer (#3)

보상"으로 표시하고, 실험으로 $\pm 1g$ 조건에서 식 (2)를 이용하여 측정된 감도와 앞에서 측정된 오프셋 전압을 함께 사용하여 측정된 경우를 "오프셋, 감도보상"으로 표시하였다. 실험에서 경사각의 측정범위는 실제 경사각을 측정할 수 있는 장비의 측정범위를 고려하여 $\pm 50^\circ$ 로 제한하였다. 그림 6과 그림 7은 각각 그림 5와 같은 실험 결과로서 다른 2개의 제품에 대하여 측정된 것이다. 표 1의 MEMS 가속도 센서의 주요 사양으로부터 알 수 있는 바와 같이 오프셋 전압과 감도를 해당 센서에 대해서, 사용 조건에서 직접 측정하여 보정함으로써 그림 5, 그림 6, 그림 7에 나타난 바와 같이 측정 정밀도를 상당한 정도로 개선할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 3개의 제품에 대한 위의 실험 결과로부터 경사각을 정밀하게 측정하기 위해서는 오프셋 전압과 감도를 보정하는 것이 필요함을 알 수 있으며, 이를 통하여 $\pm 1^\circ$ 범위내의 경사각 측정 정밀도를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 2축 MEMS 가속도 센서를 사용한 2차원 경사계의 동작원리를 제시하고, 퍼팅그린의 경사 측정 환경에 적절한 소형의 휴대용 2차원 디지털 경사계를 제작하고 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 보였다. 또한 실험을 통한 오프셋 전압과 감도를 구하여 센서에 따른 특성과 사용 조건에 따른 특성을 반영한 실험결과를 제시하여 정밀한 경사각 측정을 위해서는 오프셋 전압과 감도에 대한 보상이 필요함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] J. M. Stauffer, "Market Opportunities for Advanced MEMS Accelerometers and Overview of Actual Capabilities vs. Required Specifications", IEEE Position Location and Navigation Symposium, PLANS 2004, pp. 78-82, April 2004.
 [2] Navid Yazdi, Farrokh Ayazi, and Khalil Najafi, "Micromachined Inertial Sensors", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 8, pp.1640-1659, August 1998.

[3] B. E. Boser and R. T. Howe, "Surface Micromachined Accelerometers", IEEE Journal of Solid-state Circuits, vol. 31, no. 3, pp. 366-375, March 1996.
 [4] Application Note: Measuring Tilt with Low-g Accelerometers, Freescale Semiconductor, Inc., AN3107, pp. 1-7, 2005, 5.
 [5] 진용, 박찬국, 지규인, "온도에 따른 저급 IMU의 특성 분석 및 보상", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2365-2367, 2000, 7.
 [6] E. R. Bachmann, X. Yun, D. McKinney, R. B. McGhee, and M. J. Zyda, "Design and Implementation of MARG Sensors for 3-DOF Orientation Measurement of Rigid Bodies", Robotics & Automation Conf. pp. 1171-1178, 2003.

저 자 소 개



송 기 무 (宋 基 武)

1951년 12월 23일생. 1977년 연세대 공대 기계공학과 졸업. 1977~1982년 KIST 자동 제어/정밀기계연구실 연구원. 1987년 독일 베를린 공대 기계공학과 대학원 졸업(공학 박사). 1987~2004년 삼성종합기술원 로보트팀장/MEMS연구위원. 1999~2004년 과기부 국가지정연구실 연구책임자. 2004년~현재 세종대 항공우주공학과 교수.
 Tel : 02-3408-3411
 Fax : 02-3408-3333
 E-mail : cmsong@sejong.ac.kr