

Autocalibration Method of Three-axis Micromachined Accelerometers

宋基武[†]
(Ci-Moo Song)

Abstract - This paper deals with a novel autocalibration method of three-axis micromachined accelerometers applied to a new digital intelligent putter for golfers. This putter can help golfers monitor and analyze their putting posture and therefore modify their putting action to get better score and enjoy their lives through golf. The micromachined accelerometers to get information of the motion are the essential part of the putter to measure the three-axis acceleration as accurately as possible. This paper presents an efficient autocalibration algorithm to find the offset and sensitivity of accelerometers by only using the static measurement data at six different positions. The experimental results on the developed putters show the validity of the proposed algorithm for the new smart putter.

Key Words : 자동교정, 가속도, Putter, Autocalibration, 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].

3축 가속도 센서와 3축 자이로(gyroscope) 센서를 이용하여 항체의 가속도와 회전 각속도를 각각 측정할 수 있으며, 측정된 값을 활용한 연산을 통하여 움직이는 항체의 자세, 속도, 위치 등의 운동에 관한 정보를 얻을 수 있다. 본 논문은 이러한 개념의 새로운 응용분야로서 소형 MEMS 관성 센서를 골프 퍼터(putter)에 적용하여 시계추 스윙(swing) 이론에 기초한 운동 정보를 제공하는 신제품 개발과 관련된 것이다. 본 제품은 감각에 의존하던 종래의 퍼팅(putting) 훈련방법에서 벗어나 과학적인 훈련이 가능하도록 하여 퍼팅과 관련된 올바른 Set-up자세, 방향의 정확성, 거리의 정확성 등에 대한 안정적인 퍼팅 스킬(putting skills)을 숙련하도록 하는데 커다란 도움을 줄 수 있을 것으로 예상되며,

이를 통하여 골퍼들의 퍼팅 만족도를 크게 향상시킬 것으로 보인다.

최근 반도체 집적기술과 MEMS기술의 발달로 저가의 소형 관성 센서가 개발되고 있으나 저가의 MEMS 가속도 센서는 소자에 따라서, 동작 조건에 따라서 각각 센서의 응답 특성이 변하므로 이를 보정하기 위한 적절한 보상방법을 사용하여야 한다[4][5].

본 논문에서는 신제품 퍼터의 다양한 기능 구현과 관련하여 저가의 소형 3축 MEMS 가속도 센서를 사용하는데 있어서 기초가 되는 센서를 포함한 가속도 측정회로의 오프셋(offset)전압과 감도(sensitivity)를 정지한 상태의 서로 다른 위치에서 측정된 6쌍의 데이터를 이용하여 계산하고 교정하는 방법을 제안하고, 개발된 제품을 사용한 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 보이고자 한다.

2. 3축 가속도 센서의 자동교정 방법

3축 MEMS 가속도 센서를 이용한 퍼터 개발과 관련하여 먼저 선정된 MEMS 가속도 센서의 특성을 살펴보고, 3축 MEMS 가속도 센서의 오프셋전압과 감도를 자동으로 계산하기 위한 방법을 살펴보기로 하자.

2.1 MEMS 가속도 센서

MEMS 기술을 사용한 저가의 소형 3축 가속도 센서는 오프셋전압과 감도가 온도에 따라 변동하는 특징을 가지고 있으며, 또한 소자에 따라서도 변하는 특성을 보인다. 표 1에 나타난 Kionix사의 3축 가속도 센서인 KXM52-1050은 -40℃~125℃의 온도 범위에서 0g 오프셋전압 변동이 최대 ±167mV이고 감도 변동은 ±5%이며, 3.3V 전원 에 대한 오프

[†] 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 8日

셋 전압이 1.65V로서 온도에 따른 영향이 크다. 따라서 온도에 따른 적절한 보상을 하여야 정밀한 오프셋전압을 얻을 수 있으며, 감도에 대해서도 역시 정밀한 가속도 측정을 위한 보정이 필요하다.

표 1 KXM52-1050 가속도 센서의 주요 사양

Table 1 Major specifications of accelerometer KXM52-1050

Acceleration range	$\pm 2.0[g]$	-
Sensitivity	660[mV/g]	@3.3V
Sensitivity vs. Temp.	$\pm 2.0[\%]$ typical ($\pm 3.0[\%]$ max.)	$-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$
0g Offset vs. Temp.	$\pm 100[\text{mV}]$	$-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$
Span	$\pm 1320[\text{mV}]$	@3.3V

식 (1)은 가속도 센서의 출력전압 방정식으로 정밀한 오프셋 전압 V_{OFF} 와 감도 K_a 를 적용하여야 정밀한 가속도 a 의 측정이 가능함을 알 수 있다.

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

중력가속도의 크기 1[g]가 정역 방향으로, 즉 $\pm 1[g]$ 가 센서에 각각 작용하도록 센서를 정확하게 위치시키고, 각각의 정지상태에서 측정된 출력전압을 이용하면 식 (1)의 관계식으로부터 식 (2)와 같이 오프셋 전압 V_{OFF} 를 구할 수 있으며, 식 (3)을 이용하여 감도 K_a 를 간단히 구할 수 있다. 다만 이 경우에는 3축 가속도 센서 각각에 대하여 정확한 $\pm 1[g]$ 가 센서에 작용하도록 센서를 정밀하게 위치시키는 것이 필요하다.

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

$$K_a = \frac{V_{out}(+1g) - V_{out}(-1g)}{2} \quad (3)$$

2.2 정지상태 측정값을 이용한 자동교정 방법

MEMS 가속도 센서의 오프셋과 감도를 보정하는 방법은 온도에 따른 데이터를 사용하는 방법이 있으나 이 방법에 의해서는 온도외의 요인에 의한 변동을 보정할 수 없는 단점이 있다. 따라서 이를 해소하는 방법은 필요시 오프셋과 감도를 구할 수 있는 방법을 적용하는 것이다. 즉 사용초기에 초기화를 통하여 자동교정하거나 사용 중에 동작조건이 변동한 경우에 다시 자동교정을 한 후 사용한다면 정밀한 가속도 값을 계속하여 측정하는 것이 가능하며, 퍼티와 같이 사용조건이 까다롭지 않은 경우에 이러한 자동교정 방법이 적절할 것으로 보인다. 또한 제품 생산시 공정 중에 사용하면 시간과 비용을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

3축 직각 좌표계 상의 각축에 위치한 가속도 센서의 구조

때문에 센서가 정지한 상태일 때 임의의 자세에서 측정된 각축의 가속도 값을 이용하면 항상 중력가속도 g 를 구할 수 있으며, 이것은 지표상에서 중력이 시간에 관계없이 항상 일정한 크기로 지표에 대해서 수직으로 작용하기 때문이다. 여기서 가속도 센서는 운동에 의한 가속도 성분과 중력가속도 성분을 구분하지 않고 동시에 측정하기 때문에 완전히 정지한 상태에서 측정된 값을 사용하여야 중력가속도를 정확하게 구할 수 있다. 그러므로 자기측정 센서에 사용하는 자동교정 방법을 적용하는 것이 가능하다[6].

완전히 정지한 상태에서 이상적인 3축의 가속도 센서로 측정된 가속도 성분을 각각 g_x, g_y, g_z 라 하면 중력가속도 g 는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$g_x^2 + g_y^2 + g_z^2 = g^2 \quad (4)$$

식 (4)는 오프셋전압과 감도에 대한 오차가 없는 이상적인 센서인 경우에 성립하는 것으로 이 조건을 활용하면 각 센서의 오프셋전압과 감도를 구할 수 있기 때문에 각 센서의 오차를 보정하는 것이 가능하다.

3축 가속도 센서의 오프셋전압과 감도를 각각 $a_{x0}, a_{y0}, a_{z0}, s_x, s_y, s_z$ 라 하면 각 센서의 출력 전압은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} a_x &= s_x \frac{g_x}{g} + a_{x0} \quad [V] \\ a_y &= s_y \frac{g_y}{g} + a_{y0} \quad [V] \\ a_z &= s_z \frac{g_z}{g} + a_{z0} \quad [V] \end{aligned} \quad (5)$$

먼저 식 (5)를 정리하여 식 (6)을 얻고 이를 식 (4)에 대입하면 식 (7)과 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{g_x}{g} &= (a_x - a_{x0})/s_x \\ \frac{g_y}{g} &= (a_y - a_{y0})/s_y \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{g_z}{g} = (a_z - a_{z0})/s_z$$

$$\left\{ \frac{g_x}{g} \right\}^2 + \left\{ \frac{g_y}{g} \right\}^2 + \left\{ \frac{g_z}{g} \right\}^2 = 1 \quad (7)$$

$$\frac{(a_x - a_{x0})^2}{s_x^2} + \frac{(a_y - a_{y0})^2}{s_y^2} + \frac{(a_z - a_{z0})^2}{s_z^2} = 1 \quad (8)$$

3축 센서의 출력전압 측정치 a_x, a_y, a_z 는 항상 식 (8)을 만족하여야 한다. 따라서 식 (8)을 이용하여 각 센서의 오프셋 전압 a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} 와 감도 s_x, s_y, s_z 를 구할 수 있다.

정지한 서로 다른 자세에서 6쌍의 가속도 센서 출력 전압을 측정하고 이를 식 (9)와 같이 나타내기로 한다. 여기서 6쌍의 데이터를 얻는 중에 센서의 오프셋과 감도는 일정하다

고 가정한다.

$$(a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}), i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (9)$$

(i), (i + 1) 번째 측정치를 식 (8)에 대입하여 정리하고 차이를 구하면 식 (10)과 같다.

$$a_i a_{x0} + b_i k_1 a_{y0} + c_i k_2 a_{z0} + d_i k_1 + e_i k_2 = f_i \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a_i &= 2(a_{xi} - a_{xi+1}), \quad d_i = -(a_{yi}^2 - a_{yi+1}^2) \\ b_i &= 2(a_{yi} - a_{yi+1}), \quad e_i = -(a_{zi}^2 - a_{zi+1}^2) \\ c_i &= 2(a_{zi} - a_{zi+1}), \quad f_i = (a_{xi}^2 - a_{xi+1}^2) \\ k_1 &= \frac{s_x^2}{s_y^2}, \quad k_2 = \frac{s_x^2}{s_z^2}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \end{aligned}$$

위의 식에서 미지수는 a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} 와 k_1, k_2 의 5개이고 방정식이 $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 의 5개이므로 연립방정식의 해를 구하면 각 센서의 오프셋 전압 a_{x0}, a_{y0}, a_{z0} 과 k_1, k_2 를 구할 수 있으며, 이를 식 (8)에 대입하여 감도 s_x 를 구하고 s_x 와 k_1, k_2 의 관계로부터 감도 s_y, s_z 를 각각 구하면 3축 MEMS 가속도 센서의 오프셋 전압과 감도를 모두 구할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (5) 또는 식 (1)에 의한 가속도를 측정하면 정확한 각 축의 가속도 정보를 얻을 수 있다. 한편, 식 (10)의 연립방정식의 해는 수치해석법인 가우스 소거법(Gauss elimination method)을 사용하면 쉽게 구할 수 있다[7].

3. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 자동교정방법에 대한 실험은 신제품 퍼터(DIXX)를 사용하여 수행하였으며, 퍼터 구성도를 나타낸 그림 1의 주요 부분은 3축 가속도 및 각속도 센서와 LCD 표시장치, 그리고 중앙연산 처리장치이다. 퍼터의 가속도 측정 시스템은 TI사의 DSP320VC550 DSP와 표 1에 나타난 Kionix사의 3축 가속도 센서인 KXM52-1050을 사용하여 구성하였으며, A/D는 TI사의 12-bit ADS7829를 사용하였다. 개발된 신제품 퍼터(DIXX)의 제어 보드(control board) 사진은 그림 2와 같으며, 그림 3은 개발된 퍼터의 사진이다.

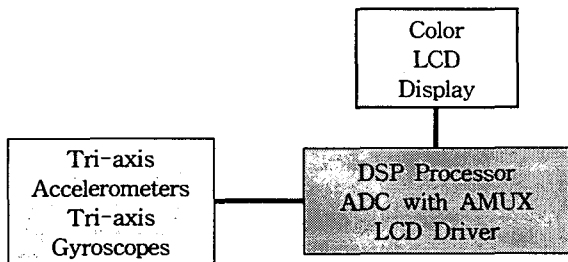


그림 1 신제품 퍼터(DIXX)의 구성도
Fig. 1 Block diagram of a new putter(DIXX)

실험은 완전히 조립된 제품(Dixx)을 사용하여 진행하였으며 측정의 정밀도를 높이기 위하여 1024개의 데이터를 평균한 값을 측정하였다. 표 2는 제안한 방법을 적용하기 위한 식 (9)에 해당하는 3축 가속도 센서의 디지털 측정값의 한 예이고, 표 3은 표 2의 데이터에 의한 식 (10)에 대한 가우스 소거법의 해이다. 따라서 표 3의 가우스 소거법의 해를

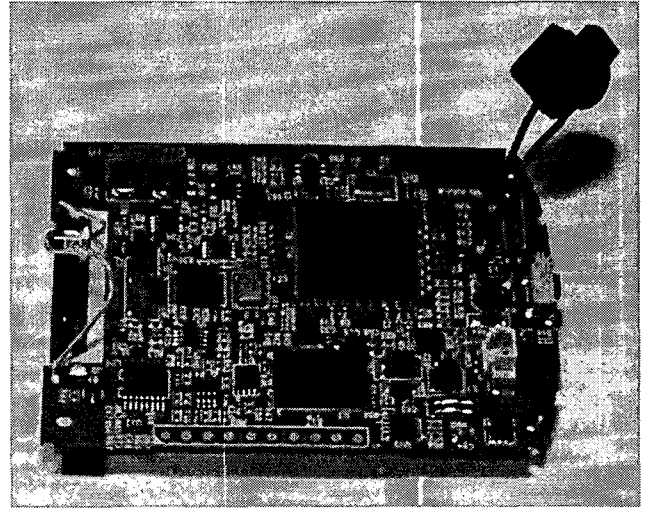


그림 2 신제품 퍼터(DIXX)의 제어보드
Fig. 2 Control board of a new putter(DIXX)

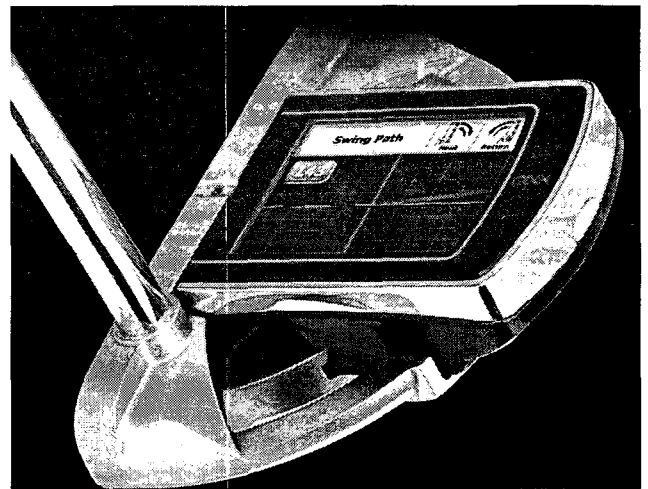


그림 3 신제품 퍼터(DIXX)의 사진
Fig. 3 Picture of a new putter(DIXX)

이용하여 앞에서 제안한 방법에 의한 3축의 감도를 계산하면 3축 가속도 센서의 오프셋전압과 감도를 모두 구할 수 있으며, 이 값들을 식 (1)에 적용하면 정밀한 가속도를 측정할 수 있다. 그림 4와 그림 5는 2개의 제품에 대한 실험결과로서 각 제품을 4회씩 측정하여 구한 데이터를 사용하여 오프셋전압과 감도를 구한 것을 그래프로 나타낸 것이다. 측정치(◆)는 식 (2)와 식 (3)에 의한 값이며, 계산치(▲)는 앞에서 설명한 제안한 방법을 사용하여 구한 값이다. 그래프에서 오프셋전압은 3축의 값이 각각 다르고, 센서에 따라서도 다르다는 것을 알 수 있다. 그러나 제안한 방법을 사

표 2 3축 가속도 센서의 측정값

Table 2 Measurement values of 3-axis accelerometers

i	1	2	3	4	5	6
Vout_x	2031	2048	2894	2040	1275	1617
Vout_y	1999	1227	2018	2853	2148	1429
Vout_z	1143	1925	2011	2028	1965	2233

표 3 가우스 소거법의 해

Table 3 Solution of a Gauss Elimination Method

$a_{x0} =$	2081.92752
$a_{y0} =$	2041.19224
$a_{z0} =$	1960.46792
$k_1 =$	0.995797
$k_2 =$	0.984876

용하면 3축의 오프셋전압을 정밀하게 측정 가능함을 알 수 있다. 한편 감도도 축에 따라서, 센서에 따라서 다르다는 것을 알 수 있으며, 제안한 방법을 사용하면 정밀하게 측정 가능함을 알 수 있다. 그림 4와 그림 5의 경우에 오프셋 전압

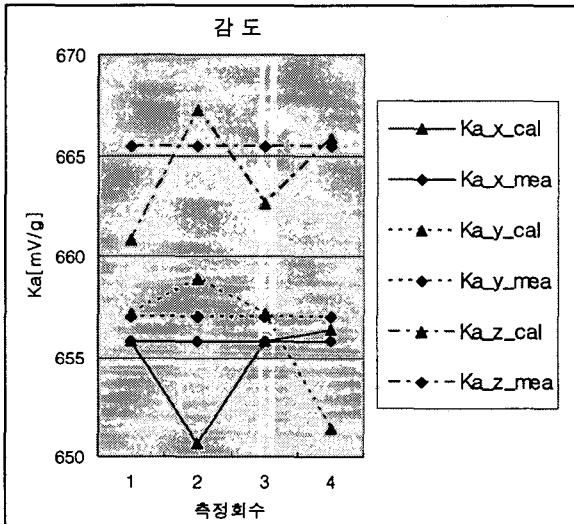


그림 4 가속도 측정시스템의 측정 정밀도 (#1)
Fig. 4 Experimental measurement accuracy of a acceleration measurement unit (#1)

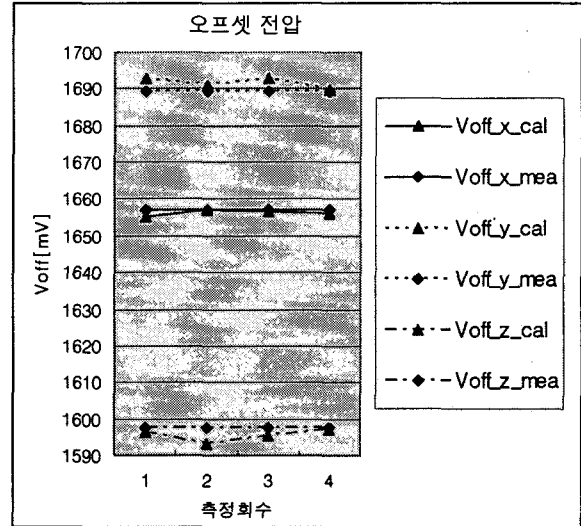
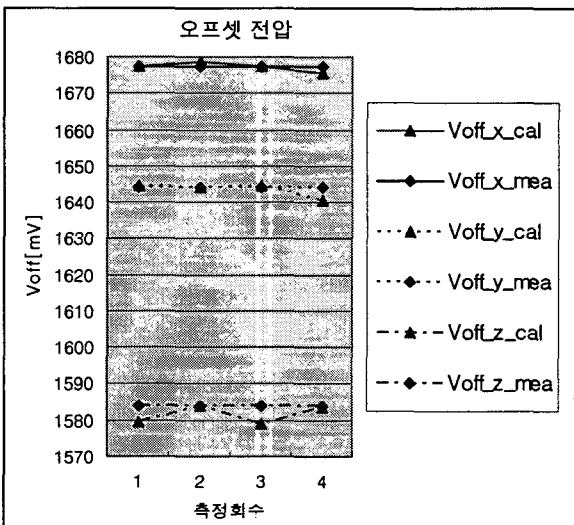


그림 5 가속도 측정시스템의 측정 정밀도 (#2)
Fig. 5 Experimental measurement accuracy of a acceleration measurement unit (#2)



과 감도를 각각 오차 1% 이내로 정확하게 측정 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안한 방법을 사용하면 정지상태에서, 서로 다른 위치에서 측정한 6쌍의 데이터를 사용하여 정밀한 오프셋전압과 감도를 구할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 퍼터(DIXX)에 적용된 저가의 소형 3축 MEMS 가속도센서를 사용한 가속도 측정 시스템의 측정 정밀도를 개선하기 위하여 정지한 서로 다른 위치에서 측정한 6쌍의 데이터를 이용하여 오프셋전압과 감도를 계산하는 방법을 제안하고, 개발된 퍼터를 이용한 실험을 통하여

오프셋전압과 감도를 각각 오차 1% 이내로 정밀하게 측정할 수 있음을 보였으며, 이를 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

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] 진용, 박찬국, 지규인, "온도에 따른 저급 IMU의 특성 분석 및 보상", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2365-2367, 2000, 7.

[5] 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.

[7] Curtis F. Gerald, Applied Numerical Analysis: Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1978.

[6] Application Note: Autocalibration algorithms for FGM type sensors, Speaker & Co Limited, pp. 1-6.

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 로봇 트립장/마이크로시스템연구위원. 1999~2004년 과기부 국가지정연구실 연구책임자. 2004년 ~현재 세종대 항공우주공학과 교수.

Tel : 02-3408-3411

Fax : 02-3408-3333

E-mail : cmsong@sejong.ac.kr