

# 이동로봇의 추측항법 정확성을 개선하기 위한 자이로스코프의 정확도 교정

## Precision Calibration of Gyroscopes for Improving Dead-Reckoning Accuracy in Mobile Robots

고재평, 윤재무, 이장명\*  
(Jae-Pyung Ko, Jae-Mu Yun, and Jang-Myung Lee)

**Abstract :** This paper describes a method aimed at improving dead-reckoning accuracy with gyroscopes in mobile robots. The method is a precision calibration procedure for gyroscopes, which effectively reduces the ill effects of nonlinearity of the scale-factor and temperature dependency. This paper also describes the methods of gyro data collection for all ambient temperature(-40°C ~+80°C) using cubic spline interpolation and defining the error function. The sensor used was a vibrating gyroscope called the EWTS82NA21, which is low lost and commonly used in car navigation system, made by Panasonic. This angular rate sensor utilizes Coriolis force generated by a vibrating tuning fork. The paper also provides experimental results to check the performance and the effectiveness of the proposed method.

**Keywords :** gyroscope, dead-reckoning, precision calibration method, cubic spline interpolation, mobile robot

### 1. 서론

이동로봇에서 추측항법(Dead-Reckoning)은 이동로봇에 설치된 센서를 이용하여 기준점으로부터 이동한 거리와 방향을 이용하여 현재의 위치 및 방향을 구하는 방법이다[1-8]. 이 방법은 주위환경에 관계없이 항상 위치정보를 구할수 있다는 장점이 있어 이동로봇 항법시스템에 많이 사용되고 있다. 추측항법시스템에 주로 사용되는 센서는 이동한 거리와 방향각을 제공하는 엔코더와 상대적인 방향각을 제공하는 자이로스코프(이하 자이로 or Gyro)이다. 이전의 연구에서 보면 자이로를 이용한 추측항법은 많은 오차를 유발함을 알 수 있고 이에 따라 오차를 줄이기 위해 칼만필터 등의 알고리즘을 이용하였다[1-4]. 그런데 근본적인 자이로의 bias drift error를 줄이지 않으면 필터링 알고리즘을 이용하더라도 전체 시스템의 성능을 보장할 수 없다. 자이로는 온도에 따라 영향을 많이 받아 bias 및 scale factor가 비선형적으로 변화하고 bias drift 값이 크게 변화하므로 이에 대한 error calibration이 되지 않으면 문제가 될 수 있다. 자이로는 이전에 FOG(Fiber Optic Gyroscope)를 이용해 정밀 calibration하여 이동로봇에 많이 이용하였으나 이 자이로 센서의 가격보다 더 저렴한 일반적으로 차량항법시스템[5,6]에 많이 사용되는 진동형 자이로를 이동로봇의 항법시스템에 적용하였다. 이전의 연구에서 사용한 FOG 자이로는 상온 30°C~40°C 정도에서 자이로 데이터를 수집하여 이의 특성을 분석한 결과 scale factor의 비선형성이 3차 다항식으로 표현 가능하였고 이에 따른 calibration 알고리즘을 구현하여 사용하였다[7-8]. 그러나 본

논문에서는 진동형 자이로에 대해서 상온뿐만 아니라 전체 자이로 사양에 포함된 전체 온도 범위(-40°C ~ +80°C)에서 자이로 데이터를 수집하여 분석한 결과로는 비선형적인 변화가 각 온도에 따라 다르게 나타나고 불규칙하게 표현되는 15차 이상의 다항식으로 표현이 가능함을 알 수 있었다.

표 1. 자이로(EWTS82NA21)의 전기적 사양.

Table 1. Electrical specification of gyro(EWTS82NA21).

NO	Item	Spec.	Unit	Comments
1	Operating Temperature	-40°C~+85°C	°C	
2	Operating Voltage	5±0.25	V	
3	Sensitivity	25±2	mV/deg/sec	-40°C~+85°C
4	Sensitivity Drift	±4	%	-40°C~+85°C
5	Zero Point Output	2.5V±0.4	V	-40°C~+85°C
6	Zero Point Drift	±10	%	-40°C~+85°C
7	Dynamic Range	±100	deg/sec	
8	Zero Point Stability	±10	mV	
9	Frequency Response	7	Hz	
10	Temperature Dependence of Zero Point Output	-40~+40	mV	-40°C~+85°C
11	Linearity	±0.5 ±5.0	%	< 50°/sec 50°/sec to 60°/sec
12	Startup Time	1	Sec	

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 11. 1., 채택확정 : 2005. 3. 13.

고재평 : 동아대학교 미디어디바이스 연구센터(jeffko@dau.ac.kr)

윤재무, 이장명 : 부산대학교 전자공학과

(yunjaemu@hanmail.net/jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 연구는 정보통신부 대학 IT연구센터 육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

표 2. 온도센서(AD7414)의 전기적 사양.

Table 2. Electrical specification of temp. sensor(AD7414).

NO	Item	Spec.	Unit	Comments
1	Operating Temperature	-40℃~+125℃	℃	
2	Operating Voltage	2.7~5.5	V	
3	Resolution	0.25	℃	10bit ADC
4	Accuracy	±0.5	℃	@40℃

본 논문에 사용한 자이로는 차량 네비게이션 시스템에 많이 사용되는 저가형인 Panasonic사의 EWTS82NA-21 angular rate sensor를 사용하였고, 온도센서는 Analog Devices사의 AD7414를 적용하였다[9-10]. 자이로는 온도에 따라 영향을 많이 받아 bias 및 scale factor가 비선형적으로 변화하게 된다. 이의 예를 들면 bias drift가 사양서에 명시되어 있는 것으로 판단할 때  $0.002\text{deg/sec} = 0.12\text{deg/min} = 7.2\text{deg/hr}$ 가 된다. 이는 자이로 데이터를 가지고 동작시 직선주행을 하더라도 초기 위치에서 출발하여 10분이 지난 경우 그 오차가 계속 누적되어 적어도 1.2deg의 오차를 나타낼 수 있다. 따라서 자이로에 대해 온도에 따른 bias 및 scale factor의 calibration이 중요한 요소이다.

본 논문의 연구 결과에선 자이로의 동작 온도 범위에서의 정적 오차 특성 및 동적 오차 특성을 파악하였고 동적환경에서 온도가 1℃ 단위로 변화하는 데이터를 cubic spline interpolation 방법[11-13]을 사용해 전체 데이터를 수집하였으며, 이 데이터를 사용하여 온도에 따른 bias 변화 및 scale factor 변화를 calibration하는 오차 calibration 방법을 구현하여 이를 실제로 전체 온도에 대해 회전 속도를 변화시키며 검증해 본 결과  $\pm 1.0\text{deg/sec}$  이내로 오차를 줄일 수 있음을 확인하였다.

## II. 오차의 측정(calibration data 수집)

자이로는 장착된 곳의 한축에 대한 회전 각속도를 감지하여 그에 해당하는 전압을 출력한다. 변이각을 측정하기 위해서는 자이로의 출력을 다시 sensitivity에 따라 각속도로 환산하고, 이 각속도를 적분해서 상대적인 변이각을 알아낸다. 자이로의 정적/동적 오차 특성을 알아내기 위해 회전 각도와 각속도를 정확히 제어할 수 있는 AC 서보 모터를 이용한 calibration tool을 제작하였다.

그림 1은 제작된 자이로 calibration tool을 나타낸다. Calibration tool에 적용된 AC 서보 모터는 60:1의 감속비를 가지고 회전 원판이 상단면에 있고 그 위에 자이로 시험용 보드가 장착이 된다. 여기에서 처리한 자이로 데이터를 PC로 보내기 위해 시리얼 데이터로 변환해 전송하고 360도 회전에 문제가 없도록 슬립링(slip ring)을 이용해 전원 및 통신라인 등 6라인으로 외부와 연결을 하는 형태로 제작이 되었다.

Calibration data를 수집하는 환경은 자이로가 온도에 의해 영향을 많이 받으므로 주위 온도를 적정하게 제어하고 변화시킬수 있도록 고온/저온 환경 챔버를 이용하였다. 자이로의 동작 온도가 -40℃~+85℃ 이므로 이의 변화에 대해 자이로 센서의 아날로그 신호를 10bit ADC를 사용해 디지털로 변환하고, 20ms 마다 A/D 변환한 값을 얻어 데이터를 수집하였다.

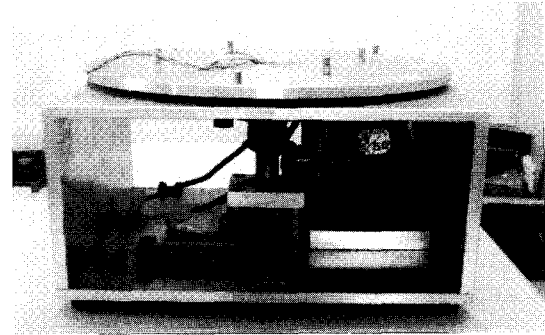


그림 1. 자이로스코프 교정용 툴.

Fig. 1. Gyroscope calibration tool.

자이로 calibration tool의 각속도는  $\pm 150\text{deg/sec}$ 까지 제어가 가능하고 0.1deg/sec의 resolution을 가지며 모터 및 통신을 제어하는 제어부가 별도로 구성되어 있다. 자이로 시험용 보드는 자이로 센서 및 온도 센서를 가지고 있고 자이로 센서의 저대역 필터링한 결과를 사용하고 또한 두 센서의 데이터를 받고 처리하여 시리얼로 보내주는 역할을 하는 16bit MCU로 구성되어 있다. 자이로 데이터 수집은 두가지 형태로 이루어 지는데 첫번째는 자이로의 정적 오차 모델을 얻기 위한 것이고 두번째는 자이로의 동적 오차 모델을 얻기 위한 것으로 온도 변화에 대해 다양한 각속도로 회전을 시킨 후 그에 해당하는 오차 모델을 찾아 보정하였다. 동적 오차 모델은 온도 범위가 -40℃~+85℃이므로 1℃ 단위로 변화시키며 데이터를 수집하기엔 시간적으로나 데이터량이 너무 방대하여 온도가 10℃ 단위로 변화될 때 회전 테이블의 기준 속도를 -60deg/sec~+60deg/sec로 변화시키며 전체 온도에 대해 자이로 데이터를 수집하였다. 그리고 온도가 1℃씩 변화되는 상태에서의 자이로 데이터를 얻기 위해 cubic spline interpolation 방법을 사용하여 전체 데이터를 수집하였다. 이 두 실험을 통해 얻은 오차 모델을 이용하여 실제로 보정한 결과를 가지고 다시 다양한 온도와 각속도에 대해 정상적으로 결과가 나오는지 확인/검증을 하였다.

### 1. 정지 상태에서의 자이로 출력의 변화

자이로를 회전판 위에 고정시키고 온도변화를 최소화하기 위해 환경 챔버의 온도를 25℃ 상온으로 설정한 후 30분 이상 자이로 데이터를 수집하여 static bias drift calibration을 행하였다. 그림 2는 약 1800초 동안 상온에서 자이로와 온도 센서의 출력을 나타낸 것으로 자이로 데이터의 변화는 AD 변환된 값으로 10bit ADC로 데이터를 얻으므로 정지 상태에서의 bias값은 중간 정도의 540에서 541사이의 값을 나타낸다. 이는 아주 미소한 bias drift가 생기는 것으로 볼 수 있다. 이를 각속도로 환산하면 0.2deg/sec의 drift 값을 나타낸다. 그리고 온도 데이터는 온도 센서의 resolution이 0.25이므로 처음 데이터를 수집하기 시작한 순간의 온도는  $28.5\text{℃} (=114 \times 0.25)$ 에서  $26.5\text{℃} (=106 \times 0.25)$ 의 분포에서 온도 변화를 가짐을 알 수 있다. 그림2의 자이로 데이터와 온도 데이터의 변화로 알 수 있듯이 두가지 센서 자체의 오차에 의해 여러가지 오차가 더 유발될 수 있음을 알 수 있다. 아래의 그림은 일정한 온도 영역에 대해 자이로의 바이어스가 변화되는 형태를 알고자 나타낸 것이다.

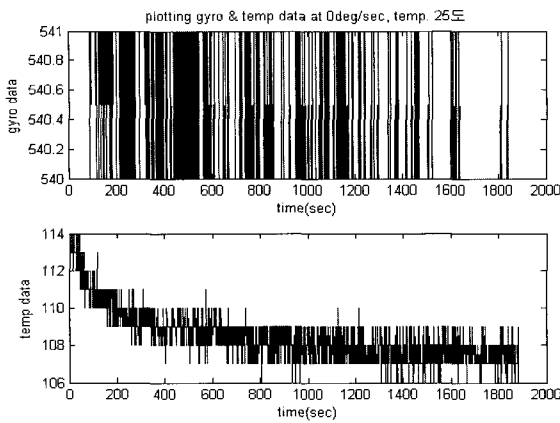


그림 2. 자이로와 온도 센서 데이터 @온도 25℃.  
Fig. 2. Data output of gyro and temp. sensor@temp. 25℃.

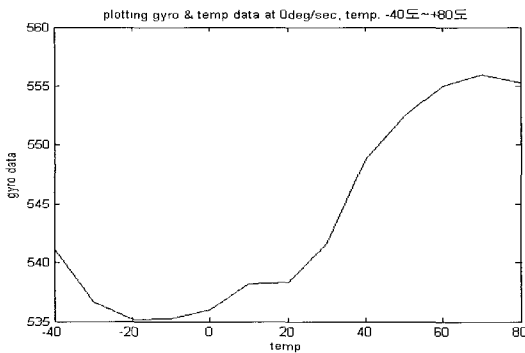


그림 3. 온도 변화에 따른 자이로 바이어스 데이터 변화 @온도 -40℃~+80℃.  
Fig. 3. Data output of gyro bias data for change of temperature@temp. -40℃~+80℃.

자이로 규격에서 zero point drift가  $\pm 10\%$ 로 되어 있는데 1%의 zero point drift는 25mV의 전압을 나타내고 이는 약 5의 A/D값 분포를 가진다. 그래서  $\pm 10\%$ 의 경우 A/D값은  $\pm 50$ 의 차이를 가지므로 온도 변화에 따라 정적 출력의 많은 변화가 예상된다.

그림 3은 실제로 온도를 -40℃에서 +80℃까지 변화시키면서 자이로 데이터를 수집하고 각각의 온도에 대해 평균한 값으로 이는 자이로 바이어스 값을 나타낸 것이다. 실험 결과에서 보면 각 온도에 대해 정적 바이어스 값이 영향을 많이 받고 자이로 출력값의 변화가 많음을 알 수 있다. 이에 따라 정적 바이어스 drift에 대한 calibration이 필요함을 알 수 있다.

2. 온도 및 회전 속도변화에 따른 자이로 출력의 변화

자이로는 -40℃에서 +85℃의 동작 온도 범위를 가지는데 이는 이 온도 내에서는 출력값의 선형성을 보장한다는 것이다. 이동로봇이 실제로 주행할 때 자이로가 장착된 보드의 내부 온도의 변화는 반드시 생기는데 자이로의 출력은 이 온도 변화에 민감한 것으로 알려져 있다. 따라서 온도에 대한 오차 보상 성분을 자이로의 오차 모델에 포함 시켜야 한다. 자이로 calibration tool의 회전판을 정속도로 회전시켜주기 위해 고정도의 AC 서보모터를 적용하였고 여기에 올려진 자이로 시험 보드에서 얻어지는 자이로 출력 데이터는 정해진 회

전 각속도에 해당하는 출력을 내보내게 되어 있다.

그림 4, 5, 6은 온도변화에 따른 자이로 출력 변화를 나타내는데 각각 회전 속도가 0deg/sec, -60deg/sec 및 +60deg/sec에 대해 자이로 데이터를 수집한 것이다. 이는 전체적으로 수집한 데이터에서 대표적인 3가지만을 나타낸 것으로 0deg/sec 및 60deg/sec 회전속도에 대해 방향은 다르지만 그림에서 알 수 있듯이 세개의 그래프의 형태가 제각각으로 나타남을 알 수 있으며 이로써 calibration시 어떤 정형화된 규칙을 찾기란 힘들어 보인다. 자이로의 출력은 여러가지 각속도의 변화에 대해 선형적으로 나와야 한다. 여기서 그 기울기는 scale factor가 되고 이것을 바탕으로 자이로의 출력을 각속도로 환산할 수 있다. 그림 7은 온도 -40℃에서 +80℃에서 각속도 변화에 따른 계산된 자이로의 출력 변화를 나타낸 것인데 선형적으로 나타남을 알 수 있고 다른 온도에 대해서도 출력 변화는 선형적으로 변화하였다. 이 그림은 온도 변화 및 회전 속도 변화에 따른 데이터를 모두 수집한 후 자이로 출력값을 계산하고 이를 온도 변화에 대해 하나의 그림으로 나타낸 것이다. 하나의 회전 속도에 대해서 온도 변화는 10℃씩 변화시켰으므로 온도 -40℃에서 +80℃에 대해 13개의 그래프가 얻어진다. 따라서 실험 결과에서 보면 온도에 따라 선형으로 나타나고 scale factor는 다르게 나타남을 알 수 있었다. 자이로 센서규격에서 scale factor에 해당하는 sensitivity는 0.025(V/deg/sec)이며, sensitivity drift가  $\pm 4\%$ 로 되어 있는데 이에 해당하는 오차로 scale factor 변화를 보였다.

그림 8은 회전속도와 온도변화에 따른 자이로의 출력 오차 변화를 3차원 형식으로 나타낸 것이다. 사용한 회전속도 데이터는 0 ~ +60deg/sec의 범위의 데이터를 사용하여 그래프를 나타내었고, 0 ~ -60deg/sec의 데이터도 동일한 형태의 오차 범위를 가지므로 0 ~ +60deg/sec 범위에 대해서만 나타내었다. 그림에서 보듯이 자이로의 출력 오차가 온도변화에 대해 다양한 오차를 가짐을 알 수 있다. 자이로 출력 오차는 0.1deg/sec resolution으로 보면  $\pm 5$ deg/sec의 분포를 가진다. 자이로의 출력에 대해 calibration 정보가 없고 온도 센서 정보가 없는 경우에 적용하는 기본적인 자이로의 바이어스 오차를 보상하는 방법을 실제 환경에서 적용해 볼 수 있다. 이는 자이로의 바이어스가 온도의 변화에 따라 계속 변화하기 때문에 생기는 것으로 이동로봇이 정지한 경우 또는 회전 성분이 없는 경우에 자이로는 0deg/sec를 출력해야 한다. 그러나 실제 자이로는 0이 아닌 다른 값을 출력하며 이를 자이로 바이어스라고 할 수 있다. 따라서 이동로봇이 정지한 상태에서 얻은 자이로의 출력은 자이로 바이어스라고 할 수 있다.

따라서 이 값을 얻었을 때 이를 바이어스로 보고 실험중에 이를 calibration하면 될 것이다. 이런 경우 온도에 따른 바이어스 변화가 이미 출력값에 반영되어 있으므로 실제 실험에서 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법의 문제점은 어느 시점에서 얻은 자이로 바이어스의 값이 계속 유지되지 않는다는 것이다. 즉 외부 온도의 변화에 따라 자이로 바이어스는 계속 바뀌고 실제 환경에서 주위 온도는 계속해서 변화하기 때문에 위의 자이로 바이어스를 얻는 과정은 지속적으로 이루어져야 한다. 이러한 방법은 자이로 바이어스를 어느 정도의 간격으로 바이어스를 구할 것인지를 정하는 문제,

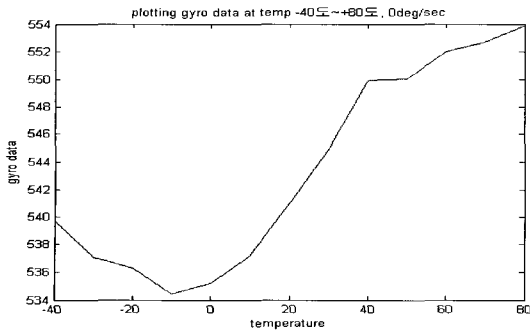


그림 4. 온도변화에 따른 자이로 데이터의 출력 변화 @0deg/sec.  
Fig. 4. The feature of gyro data output for temp. change @0deg/sec.

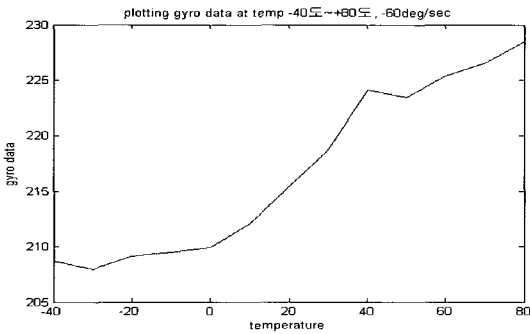


그림 5. 온도변화에 따른 자이로 데이터의 출력 변화 @-60deg/sec.  
Fig. 5. The feature of gyro data output for temp. change @-60deg/sec.

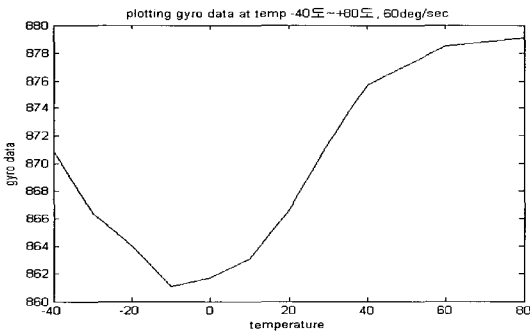


그림 6. 온도변화에 따른 자이로 데이터의 출력 변화 @60deg/sec.  
Fig. 6. The feature of gyro data output for temp. change @60deg/sec.

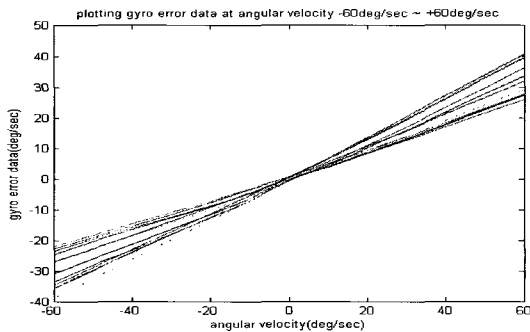


그림 7. 각속도 변화에 따른 자이로 데이터 에러의 출력 변화 @온도 -40℃에서 +80℃.  
Fig. 7. The feature of gyro data error for angular velocity change @temp. -40℃~+80℃.

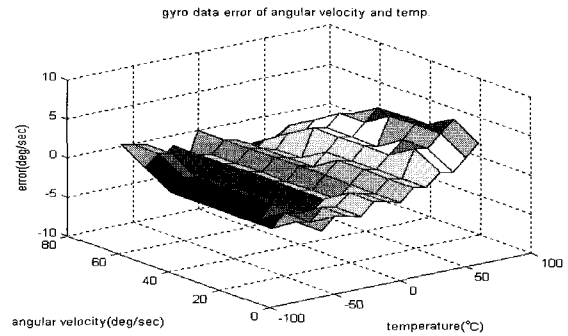


그림 8. 회전속도와 온도변화에 따른 자이로 데이터 오차.  
Fig. 8. The feature of gyro data error for the change of angular velocity and temperature.

scale factor 오차를 보상할 수 없다는 문제 및 이동로봇이 멈추지 않고 계속해서 주행하는 경우 오차 보상을 할 수가 없는 경우 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

따라서 실제 환경에서 주위 환경의 변화에 능동적으로 자이로 출력 오차를 보상할 수 있도록 calibration 작업이 필요로 하게 된다.

**III. Calibration**

자이로 센서는 온도변화에 민감하므로 gyro bias는 비선형적으로 변화하고 또한 scale factor도 변화하므로 calibration data 수집시 이를 고려한 주위 환경의 변화를 부여한 상태에서 자이로 데이터 수집을 하였다. 자이로의 데이터 수집시 온도변화는 -40℃에서 +80℃까지 10℃씩 변화시키고 또한 회전 속도도 -60deg/sec에서 +60deg/sec까지 10deg/sec씩 변화시키며 각 회전 속도별로 30분씩 데이터를 수집하여 calibration에 사용하였다.

자이로 데이터 수집시 온도 및 회전속도 변화 단계를 10단위의 일정한 값으로 설정해 변경한 이유는 1단위 형태로 하는 경우 데이터 수집하는 시간 및 비용이 너무 많이 소요되므로 이를 10단위로 해서 수집하고 calibration에 필요한 데이터는 온도변화에 대해서는 각각의 회전속도에 대한 데이터는 불규칙하게 동작하므로 비선형성을 고려해 cubic spline interpolation 방법을 사용하고 회전속도 변화에 대해서는 선형보간 방법을 사용하여 중간값을 채워 넣어 전체적인 자이로 데이터 수집을 완료하였다. 이 데이터를 바탕으로 calibration 함수를 결정하고 오차 모델을 얻었다.

실제 환경에서 수집한 데이터에 대해 분석하는 것은 굉장히 어려운 작업이다. 이러한 데이터들과 상관 관계가 충분한 어떤 함수를 얻어 내는 방법 또한 어려워면서 많은 방법이 존재한다. 수집한 데이터에 대해 수치해석을 하는 방법중에는 보간법(interpolation)과 근사화(approximation)하는 방법이 있다. 보간법은 실험을 통해 얻은 데이터의 범위 안에서 데이터를 만족하는 근사적인 함수를 추정하고 추정된 함수를 사용하여 다른점의 데이터값을 구하는데 사용된다. 선형보간법이란 두점 사이의 데이터를 추정하는데 사용하고 이 방법은 두 점 사이의 관계가 선형이라는 가정하에 삼각형의 원리를 이용한다. 그러나 수집한 자이로 데이터는 선형이 아니므로 다차원의 다항식으로 추정하여 보간을 해주어야 한다. 본

실험에서는 3차원의 다항식으로 표현하는 cubic spline 보간법을 사용하여 두 점 사이를 부드러운 곡선으로 연결하면서 중간값을 보간하였다.

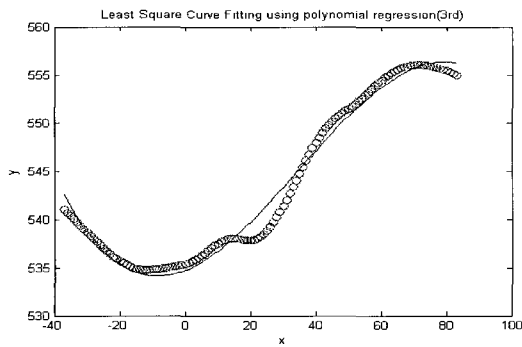
근사화 방법에서 최소자승법은 수집된 점들로부터 한 직선까지 거리의 제곱의 합이 최소가 되는 직선을 구하는 것으로 선형 회귀(linear regression)이라 한다. 그런데 자이로 데이터는 비선형이므로 n차 다항식을 사용한 회귀 곡선을 구해야 한다. 본 실험에서는 수집한 자이로 데이터가 어떤 차수의 다항식으로 근사화할 수 있는지를 확인해 보았다.

1. Polynomial Regression

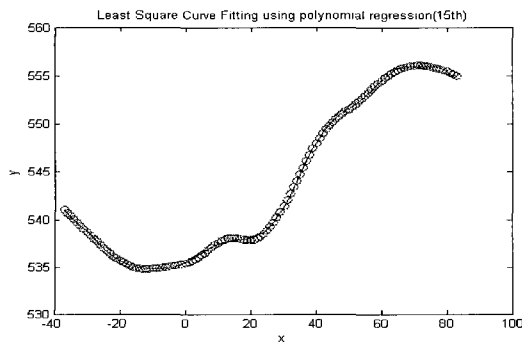
일반적으로 다항식 회귀곡선은 (1)과 같이 n+1개의 데이터에 대해 n차의 다항식으로 표현하면 모든 데이터를 표현할 수 있다.

$$f(x) = a_0x^N + a_1x^{N-1} + \dots + a_{N-1}x + a_N \quad (1)$$

수집한 자이로 데이터에 대해 다항식을 사용해서 회귀 곡선을 구하였고 가장 근사화 된 결과를 그림9에 나타내었다. 회귀 곡선이 3차인 경우 모든 데이터에 대해 근사화가 불가능하며 적어도 15차 다항식 이상이 되어야 근접한 근사화가 가능하였고 20차 다항식의 경우 수집한 데이터와 일치하는 함수를 추정 가능하였다. 회귀 곡선의 다항식을 고려한 calibration 방법은 문제가 있는데 이는 다항식의 계수가 20개가 되고 모든 데이터에 대해 개별적인 회귀곡선 다항식을 추정하여야 하는 등의 계산량이 많고 계수가 실수가 되어야 하는 문제점이 있다.



(a) 3<sup>rd</sup> polynomial regression



(b) 15<sup>th</sup> polynomial regression

그림 9. 다항식을 사용한 회귀 곡선 @3차 및 15차 다항식.  
Fig. 9. Polynomial regression curve @3rd and 15th polynomial.

실제 환경에 적용하기 위해서는 마이컴에서 처리를 함에 따라 실시간 계산과 메모리 사용량이 중요한 요소가 되므로 근사화 방법보다는 다음의 보간법을 사용한 calibration이 더 유용하다고 판단한다.

2. Cubic Spline 보간법

Cubic Spline 보간법의 아이디어는 기본적으로 엔지니어의 툴(Spline)에서 점 사이를 이을 때 부드러운 곡선으로 연결하는데서 유래되었다고 한다. 수치적인 spline은 이와 유사하게 점 사이를 보간하는 cubic polynomial의 계수를 구하여 점과 점사이에 부드러운 곡선 형태로 데이터가 보간이 되도록 하였다. Cubic spline과 다항식 회귀식은 둘다 polynomial이지만 가장 큰 차이점은 cubic spline는 각 segment마다 다른 3차 다항식으로 데이터를 정하는 것이고 polynomial regression은 전체 데이터를 대표하는 다항식을 정의하는 것이다. Cubic spline interpolation의 기본적인 아이디어는 (2)와 같은 형태의 piecewise 함수로 나타낸다.

$$S(x) = \begin{cases} s_1(x) & \text{if } x_1 \leq x \leq x_2 \\ s_2(x) & \text{if } x_2 \leq x \leq x_3 \\ \vdots & \\ s_{n-1}(x) & \text{if } x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $s_i$  는 (3)과 같이 3차원의 다항식으로 정의된다.

$$s_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i, \text{ for } i=1,2,\dots,n-1 \quad (3)$$

여기서 n-1 equations의 일차 및 이차 도함수는 보간 과정의 기본적인 요소이고 이는 다음의 (4), (5)와 같이 표현한다.

$$s'_i(x) = 3a_i(x-x_i)^2 + 2b_i(x-x_i) + c_i \quad (4)$$

$$s''_i(x) = 6a_i(x-x_i) + 2b_i \quad (5)$$

$$\text{for } i = 1, 2, \dots, n-1$$

위에서 piecewise 함수  $S(x)$  는 모든 데이터 점들을 보간이 가능하며 각 구간에서 연속성을 가지며 또한 일차, 이차 도함수도 각 구간에서 연속성을 가지게 되면 모든 데이터에 대해 보간이 가능하다. 그림10은 앞에서 본 그림3의 자이로 바이어스 데이터를 보간한 것을 나타낸 것으로 둥근점은 기준에 수집한 데이터를 나타내고 실선은 보간된 데이터를 나타낸다. 실험에서 수집한 자이로 데이터는 13개의 데이터 이지만 온도를 1°C씩 변화를 주면서 보간을 한 결과 130개의 데이터를 얻을 수 있었다. 이렇게 해서 수집된 데이터는 smooth한 curve를 가지고 또한 중간점에서 overshoot가 발생하지 않았다. 그림 11은 온도 변화에 따른 자이로 데이터에 대해 cubic spline 보간법을 사용하여 처리한 결과를 나타낸다. 회전 속도가 각각 +30deg/sec와 -30deg/sec인 경우에 대해 나타낸 것인데 두가지 그래프가 유사하긴 하나 다른 값을 나타내고 있고 이와 같은 방법으로 전체 수집한 자이로 데이터에 대해 보간하였다. 이에 따라 직접 실험을 통한 데이터 수집이 모든 경우에 대해 이루어지지 않았으나 cubic spline 보간법을 사용하여 온도 변화 및 회전 속도 변화가 1 step씩 변화하는 경우에 대해 전체 데이터를 수집할 수 있었다. 다음의 3.3장에서 수집한 데이터에 대해 error 함수를 정의한다.

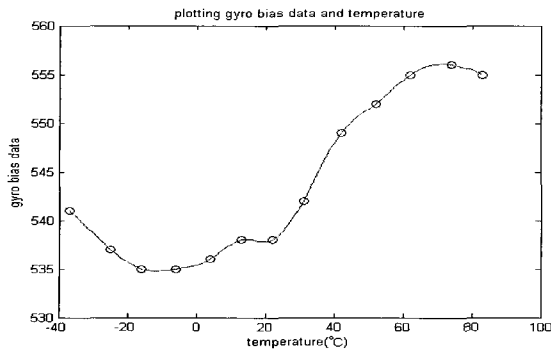
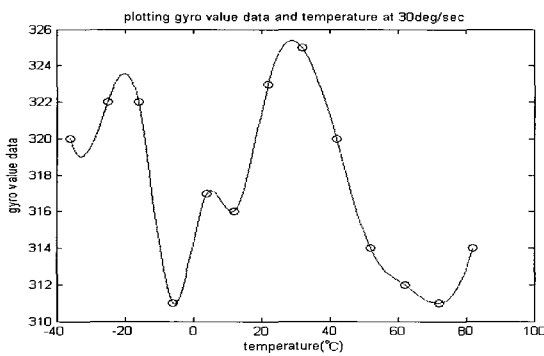
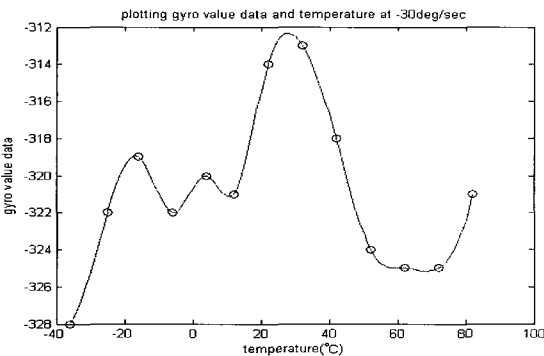


그림 10. Cubic spline 보간을 사용한 자이로 바이어스 데이터.  
Fig. 10. Gyro bias data using cubic spline interpolation.



(a) Angular velocity at 30deg/sec



(b) Angular velocity at -30deg/sec

그림 11. 보간법을 사용한 온도 변화에 따른 자이로 데이터 출력.

Fig. 11. The feature of gyro data output for temp. change using interpolation method

3. Error 함수의 정의

자이로의 calibration을 위한 데이터는 두가지 형태로 데이터 수집을 하였는데, 첫째 온도 변화에 따른 자이로 데이터의 변화는 cubic spline 보간법을 적용하여 1°C마다의 데이터를 얻었고, 둘째 회전속도 변화에 따른 자이로 데이터의 변화는 선형 보간 방법을 적용하여 1deg/sec 간격으로 자이로 데이터를 얻었다. 또한 자이로 바이어스 데이터도 온도 변화에 따라 cubic spline 보간 방법으로 데이터를 얻었다. 자이로 바이어스는 회전을 시키지 않은 상태에서 얻어진 값을 나타

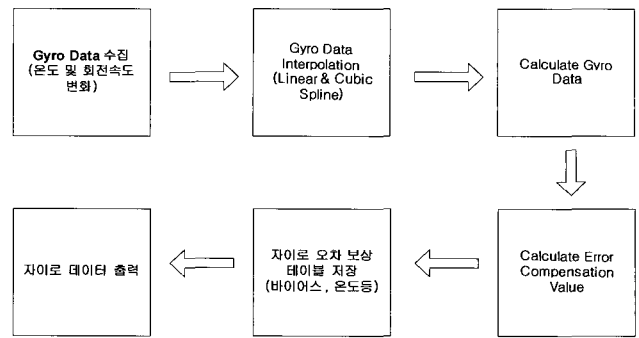


그림 12. 자이로 데이터 calibration procedure.  
Fig. 12. Calibration procedure of gyro data.

낸다. 이렇게 얻어진 데이터를 기반으로 error 함수에 대해 정의를 하였다.

수집된 자이로 데이터에 대해 위의 두가지 보간법을 이용해 생성된 데이터는 온도 변화값, 회전 테이블의 속도에 대한 값, 계산된 자이로 값으로 표현가능 하다.

$$\omega_b = \begin{bmatrix} \omega_{b0} \\ \omega_{b1} \\ \dots \\ \omega_{bn} \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} a_{g00} a_{g01} \dots a_{g0n} \\ a_{g10} a_{g11} \dots a_{g1n} \\ \dots \\ a_{gn0} a_{gn1} \dots a_{gnn} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서  $\omega_{bi}$  는 회전속도가 0일 때 온도 변화에 따른 자이로 바이어스값을 나타내고  $\omega_{gi,j}$  는 행렬의 변화는 각각 온도의 변화와 회전속도 변화에 따른 값으로 보간된 값을 나타낸다.

$T_i$  는 온도의 변화값을 나타낸다. 다음 과정으로 위의 세 개의 데이터를 이용하여 자이로의 에러값을 구할수 있다.

$$\varepsilon = f(W, T) - \omega_b \quad (7)$$

여기서 자이로 데이터( $W$ )는 실제로 자이로가 가지는 scale factor 오차등을 포함한 값으로 이를 기준이 되는 자이로 calibration tool의 회전 테이블 속도값 및 static bias( $\omega_b$ )를 빼주게 되면 scale factor 오차를 보상해주는 에러값( $\varepsilon$ )을 얻을수 있다.

여기서 자이로 에러 보상값( $\varepsilon$ )은 2차원의 배열의 형태를 가지며 온도 변화 및 회전속도 변화에 대한 에러 보상값을 가지고 있다. 따라서 실제로 이동 로봇이 주행하면서 실시간으로 처리하게 되는 에러가 보상된 자이로값은 다음과 같이 구할수 있다.

$$\omega_g^* = \omega_g - \omega_{bg} - \varepsilon_g \quad (8)$$

여기서  $\omega_g^*$  는 최종적으로 얻게 되는 calibration된 자이로값을 나타내고,  $\omega_g$  는 실시간으로 처리되는 에러가 포함된 자이로값을 나타내며, 또한  $\omega_{bg}$  는 자이로 바이어스 값을 나타내며,  $\varepsilon_g$  는 온도 및 회전속도에 따른 자이로 오차 보상값을 나타낸다.

**IV. 오차 모델의 타당성 검증**

위에서 구한 오차 모델에 대해 검증을 하기 위해 자이로 데이터를 수집하지 않은 다른 보드에 대해 오차모델을 적용하고 이를 환경 챔버내에 설치하여 여러가지 방법으로 실험해 보았다. 첫번째 검증 실험은 챔버 온도가 70°C인 상태를 유지하고 회전판의 속도를 데이터 수집시는 -60deg/sec~+60deg/sec의 범위에서 10deg/sec 씩 변화시키며 데이터를 수집하였고 그 중간의 값은 보간법을 이용하여 데이터를 보충하여 사용하였다.

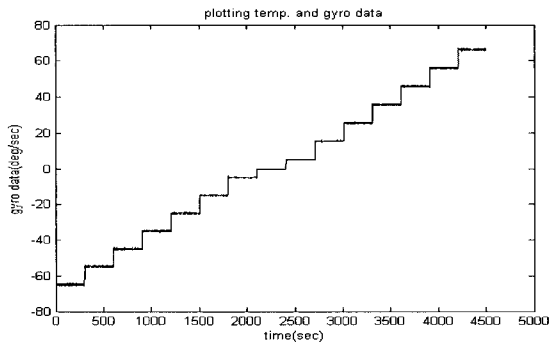


그림 13. 회전속도 변화에 따른 자이로 데이터 출력 @챔버 온도 70°C.

Fig. 13. The feature of gyro data output for angular velocity change @temp. 70°C in chamber.

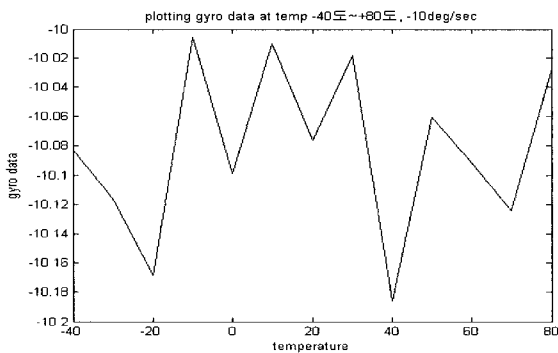


그림 14. 온도 변화에 따른 자이로 데이터 출력 @-10deg/sec.

Fig. 14. Gyro data output for temp. change @-10deg/sec.

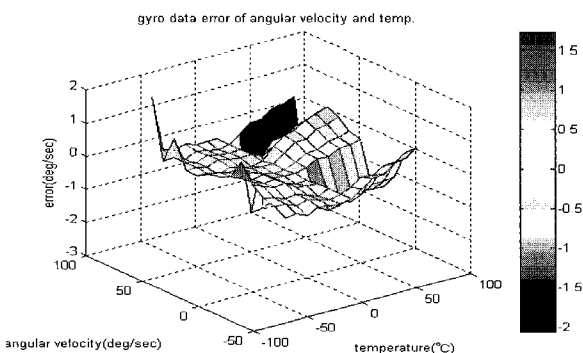


그림 15. Error compensation function을 적용한 gyro error data 실험결과.

Fig. 15. Experimental result of gyro error data using error compensation function.

따라서 이러한 보간법의 적용 및 오차 모델의 타당성 검증을 위해 보간법에 의해 보충된 데이터 범위에 대해 실제로 구현된 오차 모델값이 정상적인지 검증하는 목적으로 -65deg/sec~+65deg/sec로 10deg/sec씩 일정한 시간마다 변경시키며 수집한 자이로 출력 데이터를 그림 13에 나타내었다. 그림 13의 실험 결과에서 보면 각각의 기준 회전속도에 대해 ±1deg/sec 이내로 오차가 분포함을 알수 있다. 이러한 회전속도는 자이로 calibration을 위해 수집한 데이터에서 interpolation한 데이터로 오차 모델을 적용한 것으로 interpolation 방법으로 얻은 데이터에 대해서도 유효한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 또한 두번째 검증 실험은 환경 챔버의 온도를 -40°C에서 +80°C까지 변화시키며 각각의 온도변화에 대해 오차 모델을 적용한 자이로 시험 보드의 출력을 수집하여 그 결과를 그림14에 나타내었다. 자이로 calibration tool의 회전 속도 제어는 정밀 제어가 된다고 가정하고 정해진 속도로 회전시 그 출력값으로 얼마나 오차 모델링이 잘 되었는지를 판단 할 수 있다고 본다. 실험 결과 전체적으로 온도변화에 대해 기준되는 회전속도값(-10deg/sec)을 오차범위 ±0.2deg/sec 이내에서 출력하고 있음을 알 수 있으므로 calibration하기 전에 비해 어느 정도 정밀한 오차 calibration이 이루어졌다고 볼 수 있다.

마지막으로 세번째 검증 실험은 환경 챔버의 온도를 -40°C에서 +80°C까지 변화시키며 각각의 기준되는 회전속도 변화에 대해 오차 모델을 적용한 자이로 시험 보드의 출력을 수집하여 그 결과를 그림 15에 나타내었다. 그림 15의 결과에서 보면 자이로 데이터 오차 범위는 전체 회전 속도 및 온도 변화에 대해 ±1deg/sec 이내로 유지됨을 알 수 있다. 이로써 위에서 구한 오차 모델을 적용하는 경우 정확도가 개선된 자이로 데이터를 제공할 수 있다고 판단된다.

**V. 결론**

본 연구 결과는 자이로 센서에 대해 calibration procedure의 실험 결과를 나타낸 것이다. 이 실험 결과 및 방법은 5개의 Panasonic gyroscope EWTS82NA21를 이용해 calibration data를 수집하고 그 결과를 검증하였다. 본 연구에서 적용한 calibration 방법은 온도 변화에 따른 bias 및 scale factor의 변화를 충분히 calibration하여 자이로의 출력 오차를 최소화 할 수 있음을 보였다.

자이로 calibration을 위해 수집한 데이터를 보충하기 위해 cubic spline interpolation 방법을 적용하였고 이 데이터를 바탕으로 오차 모델을 정의하였다. 이 오차 모델은 실험 결과를 통해 전체 온도 변화 조건에서 ± 1deg/sec이하로 자이로 출력 오차를 줄일 수 있었다. 따라서 위 실험 결과를 통해서 볼 때 본 연구에 적용한 자이로 calibration 방법은 다른 회사 제품의 gyro calibration 응용에 적용이 가능하며 이동 로봇 시스템의 추측항법(dead-reckoning)에 적용하는 경우 주위 온도 변화에 적응하며 안정된 각속도 변이각을 제공할 수 있다고 판단된다. 향후 연구 과제는 자이로 센서를 직접 이동 로봇 시스템에 적용하여 동작의 신뢰성을 높이는 연구가 진행되어야 할 것이다.

**참고문헌**

[1] B. Barshan, and H. F. Durrant-Whyte, "Inertial navigation

systems mobile robots”, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, June, pp. 328-342, 1995.

[2] K. Komoriya, and E. Oyama, “Position estimation of a mobile robot using optical fiber gyroscope (OFG)”, *International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS '94)*, Munich, Germany, September 12-16, pp. 143-149.

[3] K. Park, H. Chung, and J. Lee, “Dead reckoning navigation of a mobile robot using the indirect kalman filter,” *Proc. of the IEEE/SICE/RSJ Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Washington D.C. USA, Dec. 8-11, pp. 132-138.

[4] H. Chung, L. Ojeda, and J. Borenstein, “Accurate mobile robot dead-reckoning with precision-calibrated fiber-optics gyroscope,” *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 1, Feb. 2001, pp. 80-84.

[5] N. Barbour and G. Schmidt, “Inertial sensor technology trends,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 4, Dec. 2001, pp. 332-339.

[6] E. Abbott and D. Power, “Land-vehicle navigation using GPS,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 87, no. 1, Jan. 1999, pp. 145-162.

[7] J. Borenstein, “Experimental evaluation of a fiber optics gyroscope

for improving dead-reckoning accuracy in mobile robots,” *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 16-21, pp. 3456-3461, 1998.

[8] L. Ojeda, C. Hakyong, and J. Borenstein, “Precision-calibration of fiber-optics gyroscopes for mobile robot navigation,” *Proc. of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, April 24-28, pp. 2064-2069.

[9] Panasonic Corporation, “EWTS82NA21 angular rate sensor,” <http://industrial.panasonic.com>.

[10] Analog Devices Corporation, “AD7414 temperature sensor,” <http://www.analog.com>.

[11] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and Flannery, B. P., “Numerical recipes in fortran, the art of scientific computing,” *Second Edition, Cambridge University Press*, Cambridge, Reprinted 1995.

[12] P. Henrici, “Essential of numerical analysis,” *John Wiley & Sons*, New York, 1982.

[13] S. McKinley, and M. Levine, “Cubic spline interpolation,” <http://online.redwoods.cc.ca.us/instruct/damold/laproj/Fall98/Sk yMeg/Proj.PDF>.



**고재평**

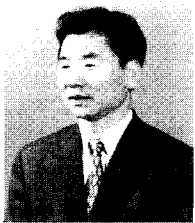
1993년 부경대학교 전자공학과 공학사. 1995년 경북대학교 전자공학과 공학석사. 2005년 부산대학교 공학박사. 2005년~현재 동아대학교 미디어다바이스연구센터 선임연구원. 관심분야는 임베디드 시스템 및 S/W, 텔레메틱스, 햅틱 인터

페이스.



**윤재무**

2001년 경성대학교 전자공학과 공학사. 2002년~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 석박사 통합과정 재학중. 관심분야는 실외위치추정시스템, 마이크로 프로세서 응용.



**이장명**

1980년 서울대학교 전자공학과 공학사. 1982년 서울대학교 전자공학과 공학석사. 1990년 University of Southern California 공학박사. 1992년~현재 부산대학교 전자공학과 교수. 관심분야 다관절 로봇 시스템 설계 및 제어, 협동제어, 햅틱 인터페이스, 마이크로 프로세서 응용 시스템 설계.

이스, 마이크로 프로세서 응용 시스템 설계.