

工學碩士 學位論文

지능형 이족보행 로봇을 위한  
센서시스템 연구

Sensor System Study for Intelligence

Biped Walking Robot

指導教授 崔 炯 植

2004 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

機 械 工 學 科

金 庚 信

本 論 文 을 金 庚 信 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 工 學 博 士 柳 三 相 (印)

委 員 工 學 博 士 崔 炯 植 (印)

委 員 工 學 博 士 王 之 錫 (印)

2004 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

金 庚 信

# 목 차

Abstract

기호설명

그림 목차

표목차

제 1 장. 서론 .....	1
제 2 장. 이족보행 로봇(KUBIR)의 구조 및 해석 .....	4
2.1. 이족보행 로봇의 구조 .....	4
2.2. 이족보행 로봇의 기구학적 해석 .....	6
2.1.1 순기구학에 의한 해석 .....	6
2.1.2 역기구학에 의한 해석 .....	8
2.2. 이족보행 로봇 관절 구동부의 동역학적 해석 .....	12
제 3 장. 이족보행 로봇의 시스템 구성 .....	15
3.1. 이족보행 로봇의 시스템 구성 .....	15
3.1.1. 이족보행 로봇의 기구부 .....	15
3.1.2. 이족보행 로봇의 제어부 .....	17

<b>제 4 장. 이족보행 로봇의 지능을 위한 센서 및 비전 메커니즘 .....</b>	<b>20</b>
4.1. 이족보행 로봇의 센서 메커니즘 .....	20
4.1.1. 초음파센서 .....	20
4.1.2. 자이로센서 .....	23
3.1.3. 압전센서 .....	26
3.1.4. 적외선센서 .....	29
4.2. 이족보행 로봇의 비전 메커니즘 .....	30
4.2.1. 비전 시스템 .....	31
4.2.1.1 비전 시스템의 구동부 .....	31
4.3. 센서융합 및 비전 시스템 .....	34
<b>제 5 장. 센서융합 및 비전을 이용한 이족보행 로봇의 보행 .....</b>	<b>35</b>
5.1. 센서 융합을 이용한 보행 .....	35
5.1.1. 센서융합 시스템 장치 구성 .....	35
5.1.2. 센서 융합을 이용한 보행 알고리즘 .....	48
5.2. 비전을 이용한 보행 .....	51
5.3. 보행 실험 및 고찰 .....	56
<b>제 6 장. 결론 .....</b>	<b>61</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>63</b>

# Sensor System Study for Intelligence Biped Walking Robot

You – Shin Kim

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University

## Abstract

In this paper, for intelligence of the biped walking robot which has been developed in the intelligent robot and automation lab was studied and applied to the robot. Various sensors were applied for the developed BWR to autonomously and intelligent walk in unknown environments. To measure the distance between the object and BWR to avoid obstacle, ultrasonic sensor and infrared-rays sensor were used. To identify surrounding environments, vision system was used. Gyro sensor was used to control the posture of BWR. Also, piezoelectricity sensor was used to identify foot landing on the surface the tilt detection of the floor. Sensors applied to the robot have measurement errors according to the condition of noise or walking environment. To improve the function of these sensors, influences of noise or errors were minimized using the sensor fusion scheme. An experiment using the sensor fusion system was performed.

## 기 호 설 명

$A_i$	각 관절의 동차 변환 행렬
$l_i$	각 관절의 링크 길이
$\alpha_i$	각 관절의 비틀림
$d_i$	각 관절의 오프셋
$\theta_i$	각 관절의 각도
$T_0^4$	기구의 동차 변환 행렬
$\bar{p}$	말단 장치의 위치 벡터
$S$	왜대칭 행렬
$\bar{\omega}$	관절의 각속도 벡터
$J_v$	선속도 자코비안 행렬
$J_\omega$	각속도 자코비안 행렬
$d_{bi}$	각 관절 구동부의 볼 나사 변위
$\dot{d}_{bi}$	각 관절 구동부의 볼 나사 선 속도
$\ddot{d}_{bi}$	각 관절 구동부의 볼 나사 선 가속도
$a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}$	각 관절부의 고정 링크 길이
$\beta_i$	각 관절부의 회전각
$\phi_i$	$d_{bi}$ 와 $a_{i4}$ 가 만나는 점의 회전각
L	초음파 센서 검출 거리
$\theta$	반사각
T	초음파 반사 시간
V	음파의 속도

## 그림 목차

Fig. 2.1	Structure of the joint actuator .....	5
Fig. 2.2	A coordinate system D-H of the BWR .....	6
Fig. 2.3	Joint actuator of the BWR .....	13
Fig. 3.1	Appearance of the BWR .....	16
Fig. 3.2	The total control system of the BWR .....	18
Fig. 3.3	Embedded computer .....	18
Fig. 3.4	MMC(Multi Motion Controller) .....	19
Fig. 3.5	Batteries for the BWR .....	19
Fig. 4.1	A separated transmission-reception system .....	21
Fig. 4.2	A unified transmission-reception system .....	21
Fig. 4.3	Ultrasonic Sensor .....	22
Fig. 4.4	Ultrasonic Sensor system .....	22
Fig. 4.5	Block diagram of the ultrasonic sensor .....	23
Fig. 4.6	Block diagram of the gyro sensor .....	24
Fig. 4.7	A two-axis accelerometer to measure 90° tilting .....	24
Fig. 4.8	Appearance of the gyro sensor .....	26
Fig. 4.9	Block diagram of the gyro sensor .....	26
Fig. 4.10	Outline of the FSR sensor.....	27
Fig. 4.11	Structure of the FSR sensor.....	27
Fig. 4.12	Resistance of the FSR sensor by force and pressure .....	28
Fig. 4.13	Appearance of the FSR Sensor .....	28

Fig. 4.14 Structure of the infrared rays sensor .....	29
Fig. 4.15 Appearance of the infrared rays sensor .....	30
Fig. 4.16 Appearance of the vision system .....	30
Fig. 4.17 Appearance of the PC Cam .....	31
Fig. 4.18 Actuator of the vision system .....	32
Fig. 4.19 Circuit of the actuator control system .....	32
Fig. 4.20 Actuator board of the vision system .....	33
Fig. 4.21 Block diagram of the sensor signal process .....	34
Fig. 5.1 Block diagram of the actuating BWR .....	35
Fig. 5.2 Composition of the sensor fusion system .....	36
Fig. 5.3 Circuit of the infrared rays sensor board .....	37
Fig. 5.4 Infrared rays sensor board attached on the BWR .....	37
Fig. 5.5 Circuit of the piezoelectric sensor board .....	38
Fig. 5.6 Piezoelectric sensor and piezoelectric sensor board attached on the BWR .....	38
Fig. 5.7 Circuit of the gyro sensor board .....	39
Fig. 5.8 The experimental board of the gyro sensor .....	40
Fig. 5.9 Gyro sensor board for calibration .....	41
Fig. 5.10 Structure of the gyro sensor device for calibration .....	41
Fig. 5.11 Calibration result of the tilt test gyro sensor .....	42
Fig. 5.12 Output of the gyro sensor at the standstill condition while BWR is walking .....	42
Fig. 5.13 Output of the gyro sensor during the walking test .....	43
Fig. 5.14 The experimental data of the Gyro sensor .....	43

Fig. 5.15 Gyro sensor board attached on the BWR .....	44
Fig. 5.16 Circuit of the ultrasonic sensor .....	45
Fig. 5.17 The experimental data of the ultrasonic sensor .....	46
Fig. 5.18 Ultrasonic sensor board attached on the BWR .....	46
Fig. 5.19 Walking flow chart of the BWR .....	49
Fig. 5.20 GUI program of the BWR .....	51
Fig. 5.21 Structure of the pixel .....	53
Fig. 5.22 Walking test of the BWR using sensors including vision sensor .....	55
Fig. 5.23 Sensor fusion board is attached on the BWR .....	57
Fig. 5.24 Walking test data of the BWR using ultrasonic sensor .....	58
Fig. 5.25 Walking test data of the BWR using gyro sensor .....	58
Fig. 5.26 The leaned appearance by 10 degrees while BWR is walking .....	59
Fig. 5.27 Test ultrasonic sensor and gyro sensor fusion of the BWR .....	59
Fig. 5.28 Walking test data of the BWR using piezoelectric sensor .....	60

## 표 목 차

Table 2.1 Link parameter of the Biped Walking Robot .....	7
Table 3.1 Specification for Biped Walking Robot .....	15
Table 4.1 How the X and Y axes respond to changes in tilt .....	25

## 제 1 장 서론

1960년대 후반 Vucobratovic이 이족보행 로봇의 모델링을 제안한 이후 이족보행 로봇에 대해 많은 연구가 수행되었다. 초기 연구의 형태로서 이족보행 로봇의 모델링과 보행 동작 제어는 로봇의 외형에 따라 하체의 다리부만 고려한 연구로 동적 보행시에 로봇의 걸음새 특성을 파악하고 제어하는 연구[1-2], 보행 동작의 모델링과 선형화 제어로 인한 상태공간의 안정도 해석[3], 토크 센서를 이용하여 9자유도의 로봇의 보행 제어[4], 3자유도 이족보행 로봇의 토크를 줄이기 위하여 경로계획을 이용한 제어에 관한 연구[5]등이 수행되었다.

위의 연구는 정형화 되어 있지 않은 환경에서의 보행 즉, 계단이나 문턱, 요철, 경사로 등의 이동성이 많은 환경에서는 보행을 위한 어려움이 있다. 또한, 하체의 다리 부분만으로 구성된 이족보행 로봇은 상체의 균형 관절을 가진 이족보행 로봇보다 훨씬 복잡한 알고리즘을 필요로 하며, 보행전 균형점 궤적이나 균형운동을 검증 또는 결정하기 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위하여 시스템의 안정도 보상을 위해 상부에 균형관절을 갖는 형태의 이족보행 로봇에 대한 연구를 수행하여왔다[6]. 이족보행 로봇의 균형관절의 개념이 소개된 이후 직진운동관절[7-9]과 회전운동관절[10-12]의 두 가지 형태로 연구 되어 왔다.

1990년대 후반부터 연구들은 이족보행 로봇의 걸음새나 로봇의 몸체 추적 궤적에 많은 연구가 이루어졌으며[13-14], 이들 연구는 역동역학 연산에 의한 토크 제어를 하는 연구들[15]과 신경회로 알고리즘을 이용한 걸음새를 구현하는 연구들이었다[16-17].

이족보행 로봇의 무거운 하중을 지지하며 보다 안정된 보행을 하기 위해서는 각 다리관절을 구동하는 구동기의 설계 및 제작과 상/하체 관절, 균형 및 보행을 제어하는 제어 시스템 구성 방법이 고려되어야 한다. 관절 구동기의 설계 및 제작 과정에서 구동 모터의 구동 토크 한계와 감속기 강성의 한계로 인해 로봇의 크기에 제한을 두는 구조적 한계를 가지고 있다[18]. 이를 해결하기 위해 스프링 메커니즘을 이용하여 구동기의 토크의 높이는 연구를 실행하였으나 만족스러운 결과를 얻지 못했다[19].

본 논문에서는 기존의 개발된 이족보행 로봇의 지능화를 위하여 다양한 센서 시스템을 구성하여 이족보행 로봇에 적용하였으며, 로봇 스스로 자율 보행을 하기 위한 목적으로 연구하였다. 즉 개발된 이족보행 로봇이 미지의 환경 내에서 지능적으로 원활한 자율 보행을 위해 각종 센서들 마다 직접 회로를 구성하고 실험을 하여 사용하였으며, 각각의 센서들 중에서 물체의 거리 측정 및 장애물을 회피 하기 위해 초음파 센서, 적외선 센서가 사용되었으며[20-23], 주변환경이나 대상물체를 탐색을 위해 비전 시스템이 사용되었다[24]. 또한 이족보행 로봇의 자세를 정확하게 추정하기 위해 자이로 센서가 사용되었으며[25-26], 보행시 로봇의 발바닥 착지 유무 및 바닥의 기울기 검출을 위해 압전 센서를 사용하였다. 위와 같은 센서들은 노이즈나 환경의 조건에 따라 측정값의 오차를 가지게 되고, 작업환경에 따라 센서들은 어느 정도 오차를 가지게 된다. 이런 센서들의 단점을 보완하기 위해 각각의 센서로부터 얻은 정보를 융합함으로써 잡음이나 오차에 대한 영향을 최소화하여 주변환경을 보다 정확히 인식하기 위한 다중 복합 센서 시스템을 이용하였다[27-29].

본 논문은 제 2장에서 이족보행 로봇의 구조 및 기구학적 해석과 관절 구동부의 동력학적 해석을 소개하였다. 제 3장에서는 이족보행로봇의 기구부와 제어부를 소개하였으며, 제 4장에서는 지능을 위해 각종 센서와 비전 시스템을 소개하였다. 제 5장에

서는 보다 원활한 자율보행을 위해 각각의 센서를 융합하고 비전을 이용하여 로봇의 보행 실험을 하였고, 마지막으로 6장에서는 실험의 결론과 향후 계획에 관하여 나타냈다. 본 논문을 통해 보다 안정적인 형태의 지능형 이족로봇의 보행의 가능성을 확인할 수 있었다.

## 제 2 장 이족보행 로봇(Korea maritime Universtiy Biped Robot)의 구조 및 해석

### 2.1 이족보행 로봇의 구조

인간과 닮은 이족보행 로봇을 만들기 위해서는 관절구동을 하는 메커니즘이 필요하다. 여기서 관절구동이란 인간의 골격형태의 프레임을 만들어서 관절에 해당되는 부분을 구동하여 인간과 비슷한 동작을 하기 위한 동력의 공급을 말한다. 이러한 관절구동을 이용하여 보행동작을 할 경우 한 다리로 자체의 중량과 상부의 하중을 모두 지탱해야 하므로 로봇의 크기가 커질수록 관절에 작용하는 토크 또한 커지게 된다. 이러한 제약조건을 만족시키기 위해서는 고강성 고토크의 시스템이 요구 된다.

관절구동을 위하여 감속기를 부착한 구동기를 회전관절에 직결할 경우 로봇의 크기가 커질수록 감속비도 커지고 구동기의 용량 또한 커지게 된다. 이는 로봇의 자체중량의 증가로 인한 효율 문제와 부피의 증가로 인해 인간의 다리형상에서 조금은 동떨어진 형태를 갖추게 되는 문제점을 가지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 자체 개발한 이족보행 로봇은 다리부의 발목, 무릎, 허리에 해당하는 관절에 고강성을 가지고 토크의 변화율도 아주 큰 볼나사를 사용한 관절구동기 사용하였다. 적용된 관절구동기는 볼나사를 채용하여 볼나사의 직선운동을 사절링크시스템을 이용하여 관절의 토크형태로 변환되어 구동되는 구조이다. 실험에 사용된 이족보행 로봇의 관절구동기의 구조는 Fig. 2.1과 같다.

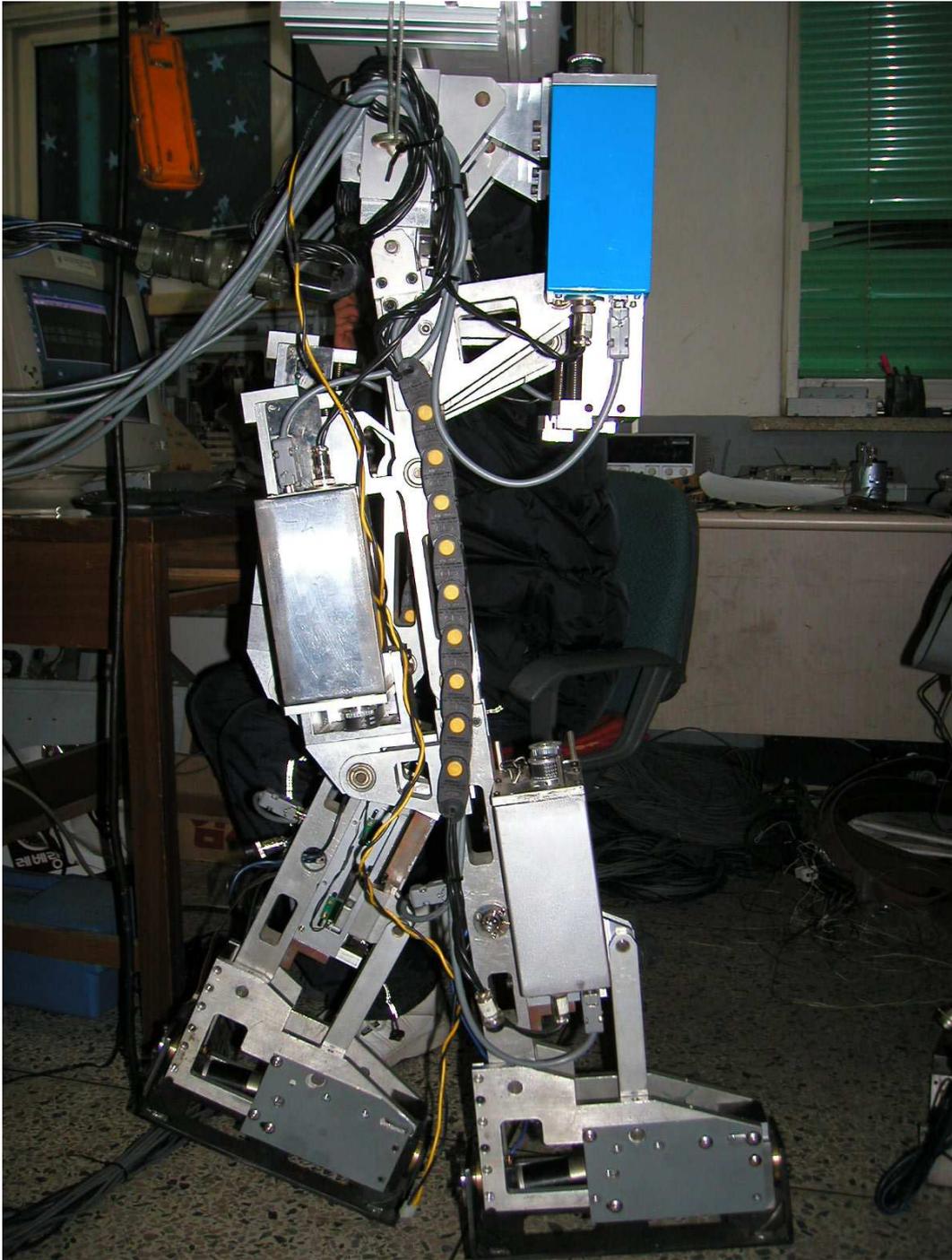


Fig. 2.1 Structure of the joint actuator

## 2.2. 이족보행 로봇의 기구학적 해석

### 2.2.1. 순기구학(Forward Kinematics)에 의한 해석

로봇의 관절 변수가 주어졌을 때, 말단 장치의 위치와 방향을 결정하기 위한 이족 보행 로봇 하체의 순기구학 방정식은 Fig. 2.2과 같이 Denavit-Hartenberg(D - H) 규약에 의해 정의된 좌표계를 이용하여 유도한다.

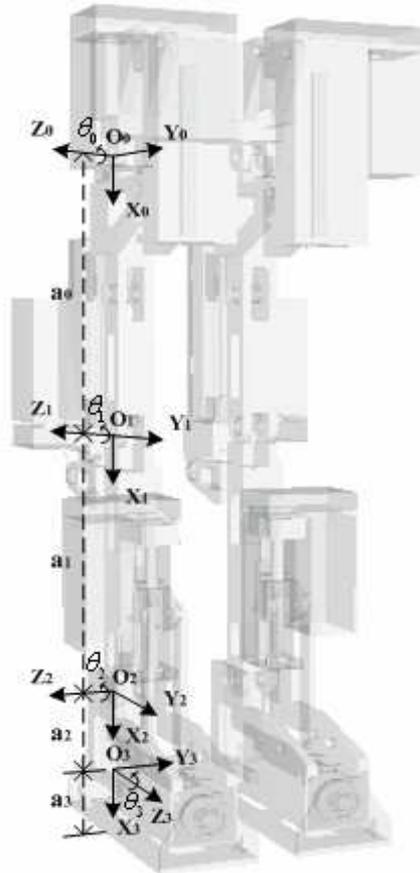


Fig. 2.2 A coordinate system D-H of the Biped Walking Robot

D - H 규약은 4개의 기본 변환 행렬의 곱으로 각 관절의 동차 변환 행렬  $A_i$ 로 표현하는 것이다. 즉,

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (2.1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서  $a_i$ 는 각 관절의 링크 길이(length),  $\alpha_i$ 는 비틀림(twist),  $d_i$ 는 오프셋(offset),  $\theta_i$ 는 각도(angle)이다.

Fig. 2.2에 의해 설정된 매개 변수는 Table 2.1 과 같다.

Table 2.1 Link parameter of the Biped Walking Robot

링크	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$a_1$	0	0	$\theta_1$
2	$a_2$	0	0	$\theta_2$
3	$a_3$	$-90^\circ$	0	$\theta_3$
4	$a_4$	0	0	$\theta_4$

A 행렬들은 식(2.1)로 부터 다음과 같이 얻어 진다.

$$\begin{aligned}
A_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
A_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\sin\theta_3 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_4 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & a_4 \cos\theta_4 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & a_4 \sin\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

따라서 변환 행렬  $T$  행렬은 식 (2.2) 의 행렬들에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$T_0^4 = A_1 A_2 A_3 A_4 \tag{2.3}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4 & -\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \sin\theta_4 & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & P_x \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4 & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \sin\theta_4 & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & P_y \\ -\sin\theta_4 & -\cos\theta_4 & 0 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (2.3) 에서 말단 장치의 위치 벡터  $p$  는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4 \\ a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4 \\ -a_4 \sin\theta_4 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

### 2.2.2. 역기구학(Inverse Kinematics)에 의한 해석

앞에서 개발된 이족보행 로봇 하체의 말단 장치 위치와 방향을 관절 변수로 나타내는 방법을 설명하였다. 이번에는 말단 장치의 위치와 방향에서 관절 변수를 역으로 찾아내기 위하여 보행 시 각 관절의 부드러운 궤적을 생성하기 위한 자코비안 행렬을 유도하고 관절각의 역속도 방정식을 유도한다.

식 (2.3) 에서 정의된 이족보행 로봇의 기구학 정의를 재정의 하면 다음과 같다.

$$T_0^4(\theta) = \begin{bmatrix} R_o^4(\theta) & d_o^4(\theta) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

여기서,  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$  는 관절 변수의 벡터이다. 말단 장치의 좌표계로부터 기저 좌표계로의 변환을 나타내면 이족보행 로봇이 움직임에 따라 관절 변수  $\theta_i$  와 말단 장치 위치 벡터  $d_o^4$  와 방향  $R_o^4$  는 시간의 함수가 된다. 여러 개의 링크로 연결되어 있는 이족보행 로봇의 보행 시 각각의 링크는 각기 다른 선속도와 각속도를 가진다. 따라서 말단 장치의 선속도와 각속도를 기저 좌표계에 대한 관절 속도의 벡터  $\dot{\theta}(t)$  와 연관 지어야 한다.

$$S(\omega_o^4) = \dot{R}_o^4 (\dot{R}_o^4)^T \quad (2.6)$$

식 (2.6) 에서  $S(\omega)$  는 왜대칭 행렬이며 이 식이 각속도 벡터  $\omega_o^4$  를 정의한다.

$$v_o^4 = \dot{d}_o^4 \quad (2.7)$$

식 (2.7) 이 말단 장치의 선속도를 나타낸다.

이때 식 (2.6) 과 (2.7) 에 의해 다음과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$v_o^4 = J_v \dot{\theta} \quad (2.8)$$

$$\omega_o^4 = J_\omega \dot{\theta} \quad (2.9)$$

식 (2.8) 과 (2.9) 에서  $3 \times 4$  행렬인  $J_v, J_\omega$  는 선속도 자코비안 행렬과 각속도 자코비안 행렬이다. 또한 두 식을 같이 쓰면 다음과 같이 된다.

$$J_0^4 = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

식 (2.10) 에서  $6 \times 4$  행렬  $J_0^4$  는 이족보행 로봇의 자코비안 행렬이며 이를 벡터의 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -(a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4) \\ a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -(a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4) \\ a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -a_4 \sin\theta_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ -a_4 \sin\theta_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \left( -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)(a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4) \right) \\ \left( -\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)(a_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos\theta_4) \right) \\ -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} -a_4 \sin \theta_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ -a_4 \sin \theta_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \left( \begin{array}{c} -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)a_4 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \\ -\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)a_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \end{array} \right) \\ -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

식 (2.8) 와 (2.9) 에서는 관절 속도와 말단 장치의 속도를 자코비안 행렬로 정의했다. 이를 역으로 정의를 하면 이족보행 로봇의 역속도 방정식을 얻을 수 있으며 다음과 같다.

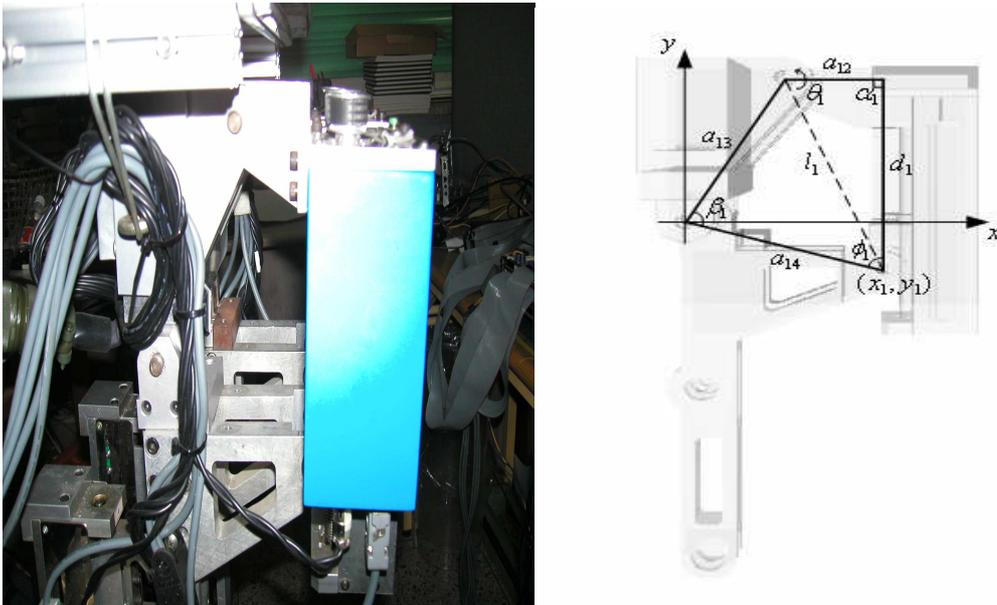
$$\dot{\theta} = J_v^{-1} v_0^4 \quad (2.15)$$

$$\dot{\theta} = J_\omega^{-1} \omega_o^4 \quad (2.16)$$

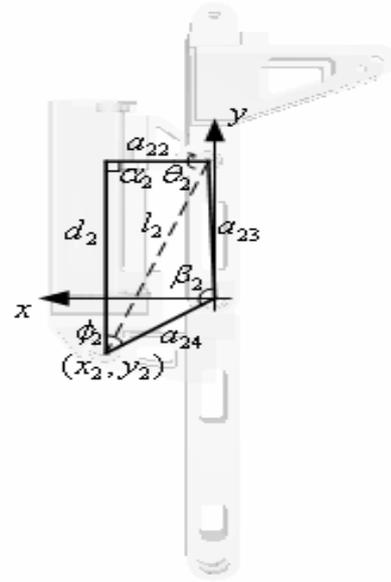
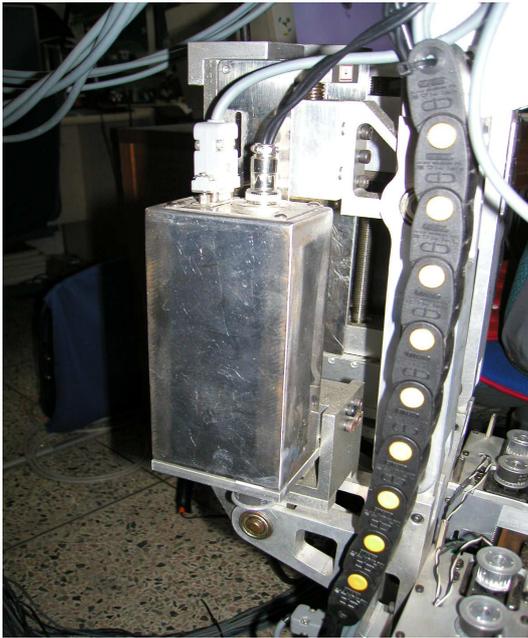
식 (2.15) 과 (2.16) 를 만족하기 위해서는  $\det J_0^4 \neq 0$  이어야 한다. 또한 자코비안 행렬의 역을 구하기 위한 필요 충분 조건은  $\dot{\theta} \in R^4$  일 때 첨가 행렬  $[J_0^4 | \dot{\theta}]$ 의 계수가 자코비안 행렬  $J_0^4$ 의 계수가 같아질 경우이다.

### 2.3. 이족보행 로봇 관절 구동부의 동역학적 해석

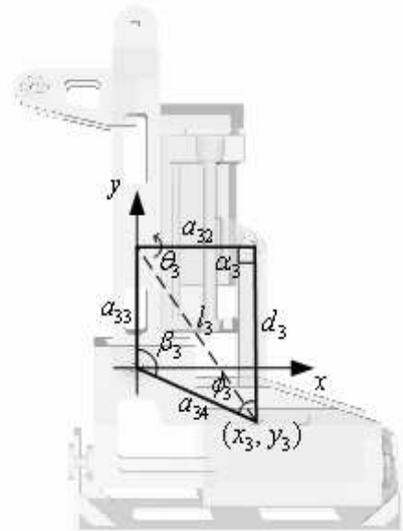
본 실험실에서 연구하고 있는 이족보행 로봇의 하체는 8 개의 자유도를 가지는 형태로 2 자유도의 허리관절과 무릎, 발목관절로 구성되어진다. 이러한 관절 구동을 위해서 관절구동기를 사용하며 볼나사를 이용한 사절 링크 시스템을 채용하였다. 세개의 변의 길이( $a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}, i=1,2,3$ )가 고정이고, 나머지 한변은 볼나사변위( $d_i, i=1,2,3$ )로 만들고, 볼나사 지지부와 다리부가 이루는 각을 고정각으로 하여 볼나사 변위와 관절각의 관계로 나타낼 수 있다.



(a) The actuator of the hip joint and Four-bar-link modeling



(b) The actuator of the knee joint and Four-bar-link modeling



(c) The actuator of the ankle joint and Four-bar-link modeling

Fig. 2.3 Joint actuator of the Biped Walking Robot

Fig. 2.3 의 사절 링크에서  $l_i (i = 1, 2, 3)$  를 이용하여  $\cos$  법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$l_i = a_{i2}^2 + d_i^2 - 2a_{i2}d_i \cos \alpha_i = a_{i3}^2 + a_{i4}^2 - 2a_{i3}a_{i4} \cos \beta_i$$

$$d_i = \frac{C_i + [C_i^2 + 4(A_i + B_i \cos \beta_i)]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (2.17)$$

$i = 1$  이면 허리 관절,  $i = 2$  이면 무릎 관절,  $i = 3$  이면 발목 관절이며 식(2.17)에서

$$A_i = a_{i3}^2 + a_{i4}^2 - a_{i2}^2$$

$$B_i = -2a_{i3}a_{i4}$$

$$C_i = 2a_{i2} \cos \alpha_i$$

이다. 그리고 링크 길이  $a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}$  와 링크 각  $\alpha_i$  는 고정된 값이다.

회전각  $\beta_i$  와  $d_i$  의 속도 및 가속도 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\beta = \cos^{-1} \left[ \frac{d_i^2 - A_i - C_i d_i}{B_i} \right] \quad (2.18)$$

또한  $\phi_i$  에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\phi_i = a \cos \left( \frac{X_i x_i + Y_i y_i}{X_i^2 + Y_i^2} \right) \quad (2.19)$$

## 제 3 장 이족보행 로봇(KUBIR)의 시스템 구성

### 3.1. 이족보행 로봇의 시스템 구성

#### 3.1.1. 이족보행 로봇의 기구부

개발된 이족보행 로봇은 전체 키가 1710mm, 몸무게가 90kg이며, 다리당 4자유도, 팔당 2자유도, 머리부분 3자유도를 가져 총 15자유도를 갖는 인체형 이족보행 로봇이다. 한편 로봇의 머리 부분의 3자유도는 로봇의 눈에 해당하는 화상 캠이 2대 장착되어 있어 각각 yaw운동이 가능하고 목에 해당하는 부분에 pitch운동이 가능한 구조로 구성되어 있다. 팔의 2자유도는 팔목에 해당하는 pitch가 어깨의 pitch에 구속된 구조로 구성되어 있다. 다리의 4자유도는 pitch-pitch-pitch-roll의 구조로 되어 현재는 직진 보행만 가능한 구조로 설계되어 있다. Table 3.1은 이족보행 로봇의 제원을 나타냈으며, Fig. 3.1는 이족보행 로봇의 관절의 구성과 전체 외형을 나타냈다.

Table 3.1 Specification for Biped Walkig Robot

	Leg				Arm	Head	
	Foot (roll)	Ankle (pitch)	Knee (pitch)	Pelvis (pitch)	Shoulder (pitch)	Eye (yaw)	Neck (pitch)
Motor	DC Servo 90W	DC Servo 90W	DC Servo 90W	DC Servo 90W	BLDC 50W	RC Servo	DC Servo 90W
Voltage	15V	15V	15V	15V	24V	5V	15V
Reduction Ratio	278.4:1	5.8:1	5.8:1	5.8:1	100:1		14:1
Ballscrew Lead		4 mm	4 mm	4 mm			

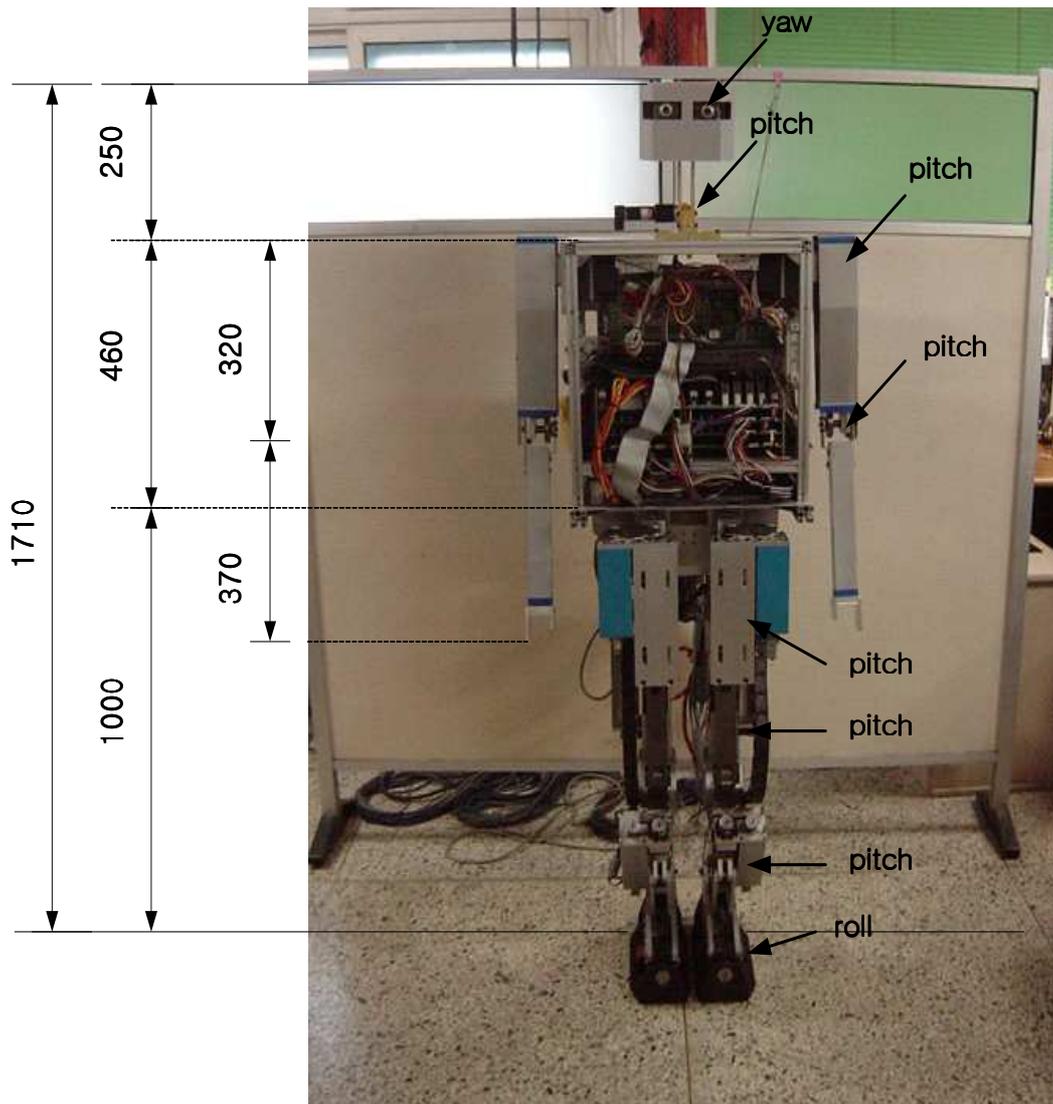


Fig. 3.1 Appearance of the BWR

### 3.1.2. 이족보행 로봇의 제어부

이족보행 로봇의 자율보행을 위해서는 로봇 자체에 제어시스템을 탑재해야한다. 자체 제어시스템은 각종 센서 및 비전을 통해 사물인식 및 지형조건에 맞는 보행 등 스스로 판단하여 동작할 수 있도록 구성되며 외부에서 원격 제어가 가능하도록 구성되어야 한다.

자체 개발한 인체형 이족보행 로봇에 탑재된 전체 제어시스템의 구성을 살펴보면 임베디드 컴퓨터, 주 제어기인 모션 컨트롤 보드, 모터와 각종 센서 등을 연결하는 인터페이스부, 그리고 모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. Fig. 3.2은 전체 제어 시스템의 구조를 나타내고 있다. 임베디드 컴퓨터에서는 센서 및 비전의 정보를 입력 받아 각 관절의 이동 궤적을 연산을 하게 되며 주제어기인 다축 모션제어기를 통해 궤적을 추종하게된다. 모션제어기에서 출력되는  $-10V \sim +10V$ 의 아날로그 파형은 다채널 AD Converter를 거쳐 디지털 신호로 변환되어 Micro-Controller인 PIC(Master)에 입력된다. PIC(master)에서는 모션제어기에서 출력된 아날로그 신호에 대응되는 디지털 신호를 각 축의 모터제어 출력하는 PIC(slave)로 RS232 시리얼 통신으로 보내게 된다. PIC(slave)는 모터 제어 신호인 PWM과 방향신호를 출력하게 된다. 또한 PIC(slave)는 데드타임 컨트롤 및 전류센서 입력을 통해 전류제한을 하게된다. 임베디드 컴퓨터로는 Fig. 3.3 Adlink사의 NuPRO770를 사용하였고, 모션제어기는 Fig. 3.4의 삼성전자에서 개발한 MMC(Multi-Motion Controller)를 사용하였다. 로봇에 사용된 전원은 로봇의 자율 보행을 위해 배터리로 구성되어 있다. 로봇에 사용된 배터리는 Fig. 3.5과 같다.

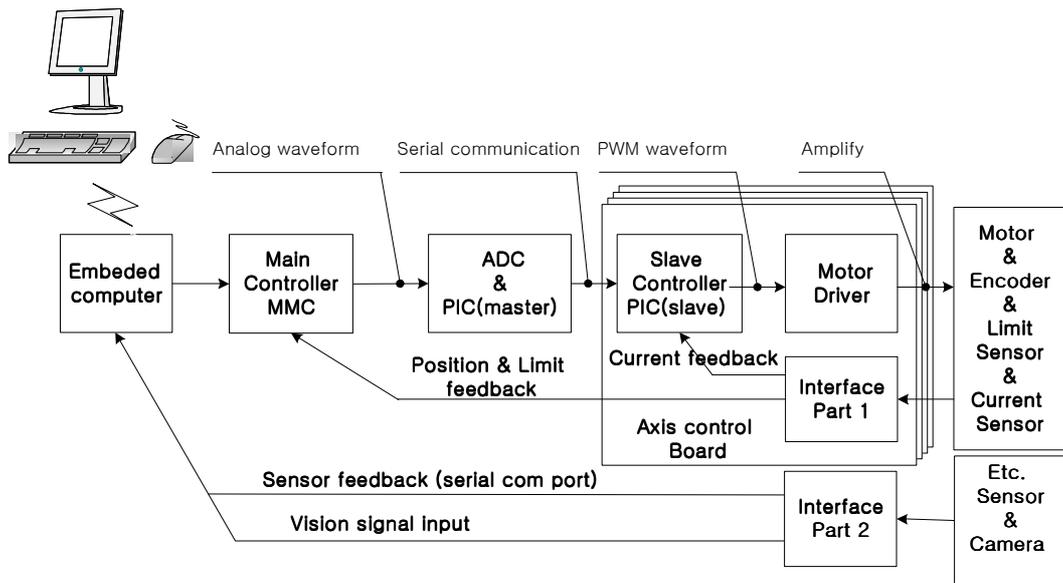


Fig. 3.2 The total control system of the BWR

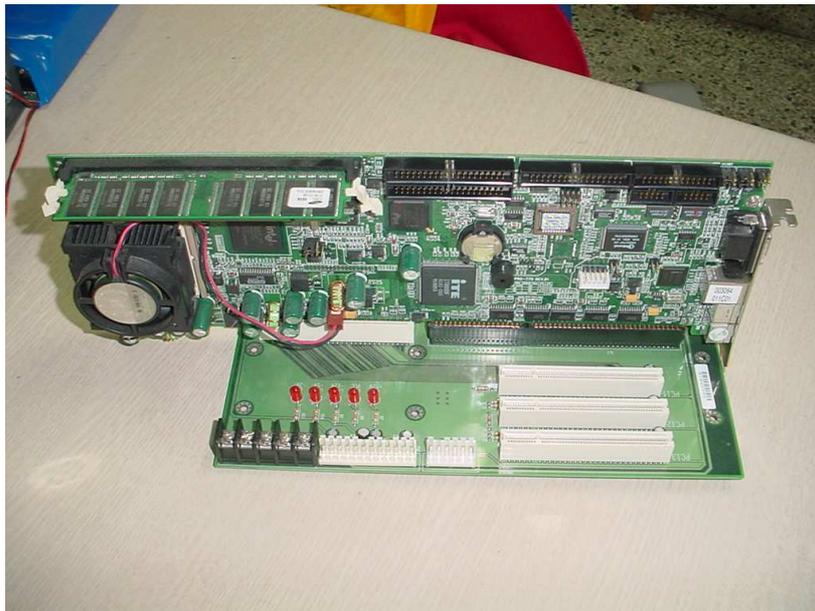


Fig. 3.3 Embedded computer

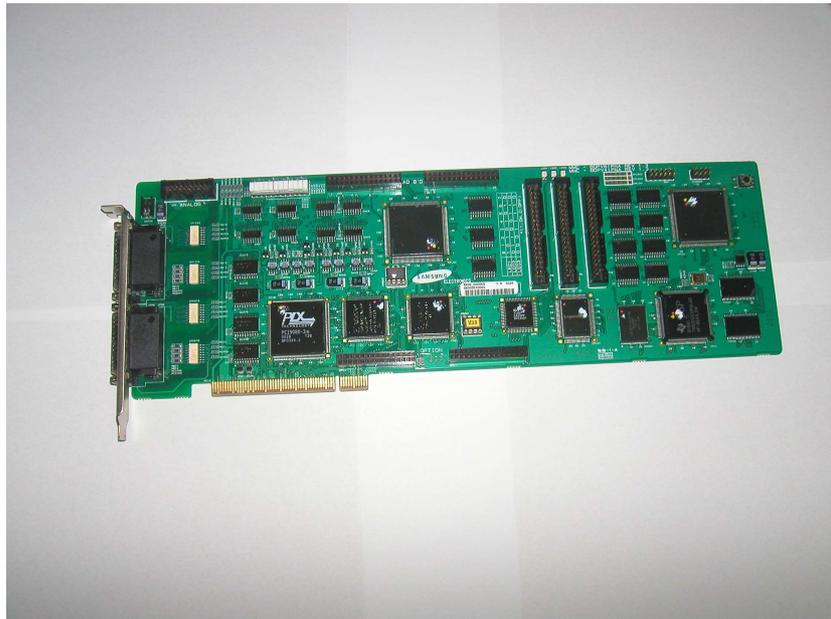


Fig. 3.4 MMC(Multi Motion Controller)

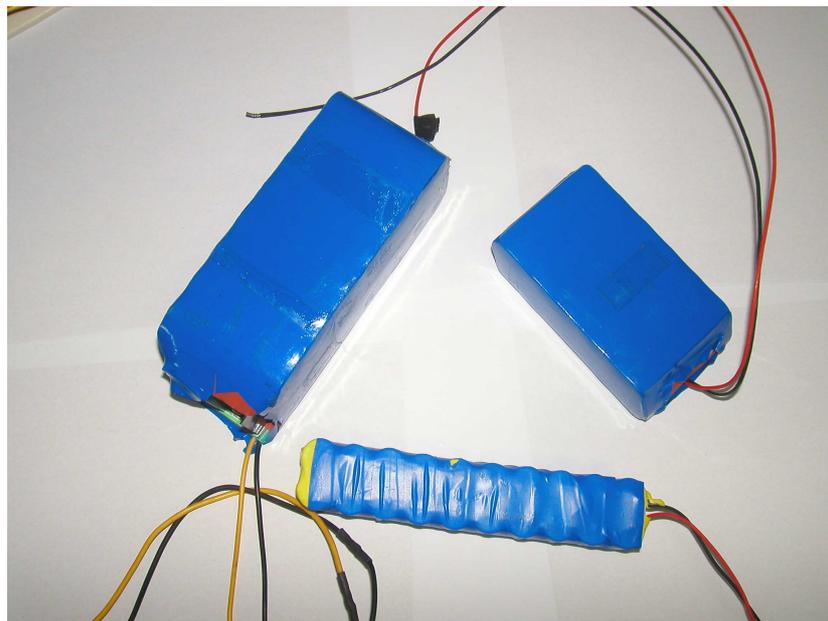


Fig. 3.5 Batteries for BWR

## 제 4 장. 이족보행 로봇의 지능을 위한 센서 및 비전 메커니즘

### 4.1. 이족보행 로봇의 센서 메커니즘

#### 4.1.1. 초음파센서

이족보행 로봇에 사용된 초음파 센서는 로봇의 보행시 물체의 거리를 측정하여 장애물과의 거리가 보행에 방해가 되지 않도록 하거나, 장애물을 회피 하기 위해서 사용된다. 초음파 센서는 일반적으로 압전 진동자를 이용하는 것이 대부분으로 압전 진동자는 압력이 발생하면 전압을 발생하고 반대로 전계를 가하면 뒤틀리거나 진동하는 성질을 가지고 있다(piezoelectric effect). 송신기는 진동의 성질을 이용하고, 수신기는 압전효과를 이용한다. 일반적으로 초음파 센서는 두 가지 형태를 가지고 있다. Fig 4.1 과 같이 송신기와 수신기가 따로 있어 송신기에서 40kHz 의 초음파를 송신하고 물체에 부딪혀 돌아오는 반사파를 수신하는 수신기가 있다. 또한 Fig 4.2 와 같이 송수 한 몸으로 되어 있어 한번은 40kHz 의 송신을 하고 다음번은 수신하는 형태로 되어 있다. 송수신기가 따로 있는 경우는 송신기와 수신기의 배치거리가 멀고 물체가 가까울수록 오차가 커지기 때문에 거리에 대한 보정이 필요하다. 송 수신기 일체형은 초음파 센서가 하나로 가능하나 가까운 거리의 물체를 검출하지 못하는 단점이 있다.

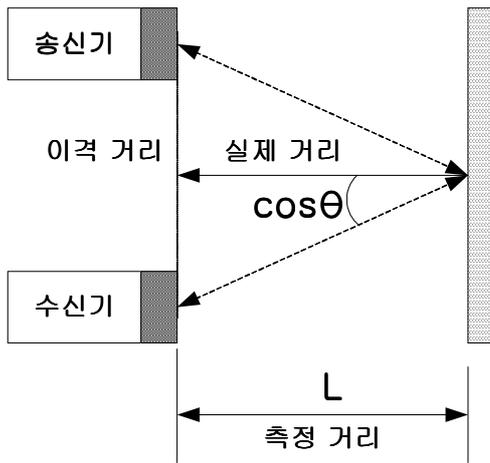


Fig. 4.1 A separated transmission-reception system

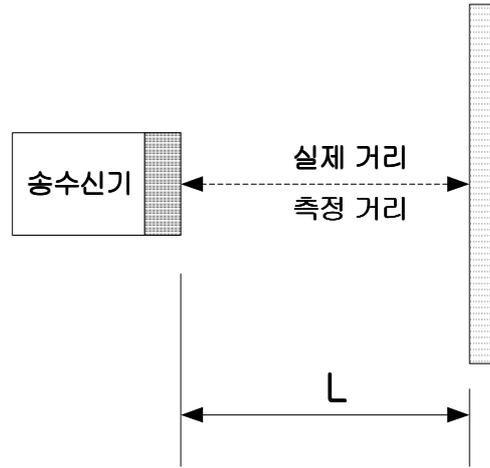


Fig. 4.2 A unified transmission-reception system

초음파 센서에 의한 물체의 거리를 구하는 식은 다음과 같다.

$$L = \frac{T \times V \times \cos \theta}{2} \quad (m) \quad (4.1)$$

L: 초음파 센서의 검출 거리,  $\cos\theta$ : 검출각, T: 초음파의 반사 시간, V: 음파의 속도

이 식에서 음속은 매질의 밀도에 따라 속도가 달라진다. 공기 중에서 온도에 따라 초음파의 음속이 변화기 때문에 기체의 온도(t)를 측정하여 음속을 보상하는 것이 필요하다. 일반적으로 공기중의 음속 V 는 다음과 같다.

$$V = 331.5 + 0.607 \times t \quad (m/s) \quad (4.2)$$

물체의 거리를 측정하기 위해서는 물체와의 반사각  $\theta$ 각이 작아야 하므로 송신기와 수신기의 거리를 짧게해야 한다. 그러나 거리에 대한 보정을 줄이기 위해 송신기와 수신기를 가까이 놓는다면, 송신기의 출력 신호가 바로 수신기로 들어올 수 있기 때

문에 차단 장치를 이용하거나, 송신 개시후 일정한 시간 수신을 금지하는 방법을 사용하는 등 송신기에서 수신기로 직접 들어 오는 입력을 방지해야 한다. 따라서 거리를 측정하는 식은 다음과 같다.

$$L = \frac{T \times (331.5 + 0.607 \times t) \times \cos \theta}{2} \quad (4.3)$$

로봇에 사용된 초음파 센서는 Fig. 4.3 과 같은 모양이며 송수신 분리형을 사용하였다. 이를 구성한 회로는 Fig. 4.4 와 같다. 초음파 센서의 입력을 최소 10uS 이상의 트리거 펄스를 삽입하면 출력은 100uS 에서 18mS 사이의 에코 펄스를 발생한다. 초음파로 물체를 검출하고 물체와의 거리를 구하는 회로의 블록도는 Fig. 4.5 과 같다. 이와 같이 초음파 센서는 로봇 보행시 물체의 거리를 측정하여 이족보행 로봇이 장애물을 회피하거나 물체 감지를 하는데 사용된다.



Fig. 4.3 Ultrasonic Sensor



Fig. 4.4 Ultrasonic sensor system

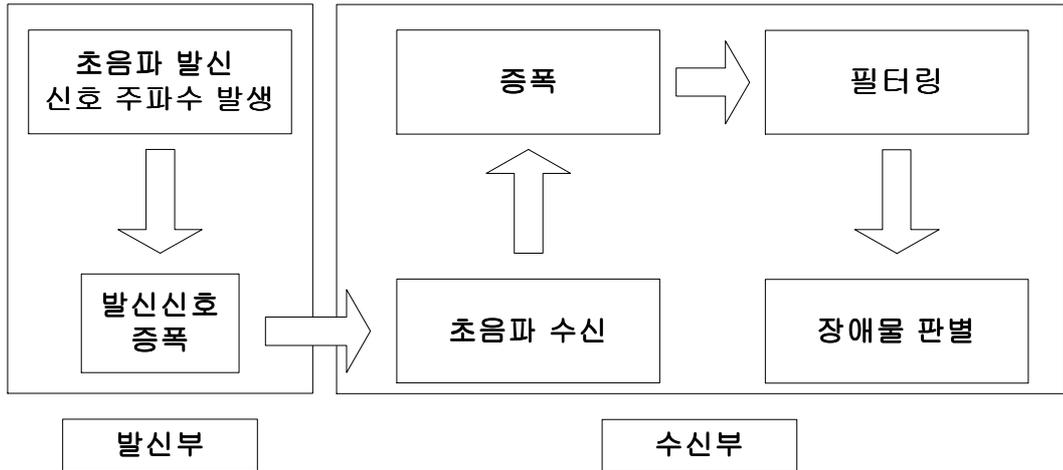


Fig. 4.5 Block diagram of the ultrasonic sensor

#### 4.1.2. 자이로 센서

자이로 센서는 이족로봇의 보행 시 지면과 로봇의 기울어진 각도를 측정하여 균형 관절을 제어하여 보다 안전한 보행을 하기위해 사용된다. 자이로 센서는 기계식 자이로, 가스레이트 자이로, 광 파이버 자이로, 압전효과 자이로, MEMS 형 자이로가 있다. 자이로 센서의 입력을 3V 에서 5.25V 를 삽입하면 두 축의 출력형태는 PWM 의 형태로 출력이 된다.

본 논문에서는 MEMS 형인 Analog Chip 사의 adxl202je 형인 자이로 센서를 사용한다. Adxl 202je 의 Block Diagram 을 보면 Fig. 4.6 과 같다.

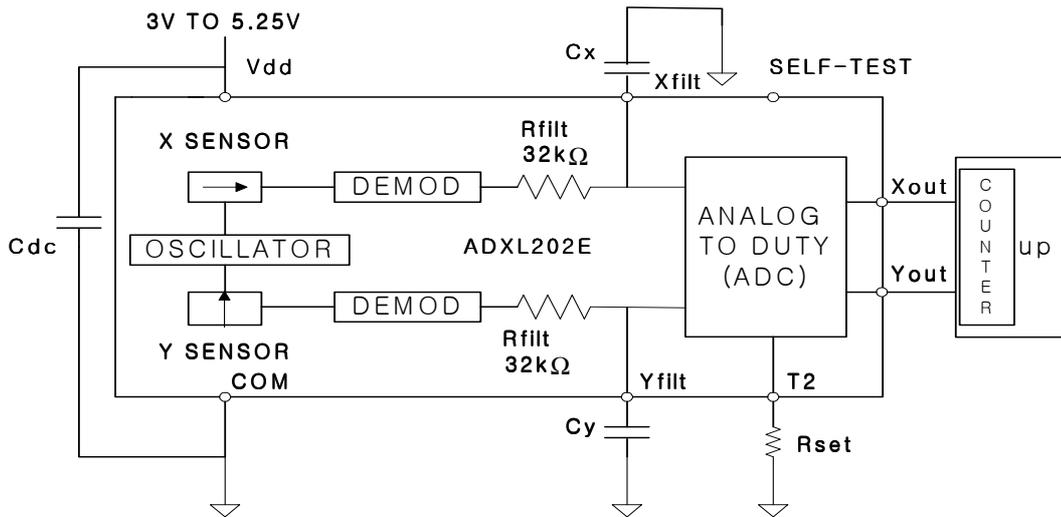


Fig. 4.6 Block diagram of the gyro sensor

Adxl 202je 는 PWM 을 출력으로 하는 저 비용 2 축 자이로 센서이며, X 축과 Y 축 을 동시에 측정 가능한 Single IC 칩 형태로 되어있다. 또한 60Hz 에서  $2 \times 10^{-3} g$  의 분해능을 가진다.

자이로 센서가 중력의 수직으로 받을 때, 센서의 출력은 기울기 각도 마다 거의  $17.5 \times 10^{-3} g$  에서 변한다. 그러나 45 도 각도에서는 경사 분해능과 각 마다  $12.2 \times 10^{-3} g$  에서 변한다.

Fig. 4.7 과 Table 4.1 은 중력을 통과한 자이로 센서가  $\pm 90$  도 기울기에서 X 축과 Y 축의 변화를 나타낸 것이다.

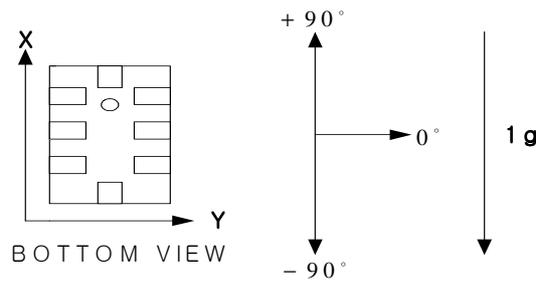


Fig. 4.7 A two-axis accelerometer to measure 90° tilting

Table 4.1 How the X and Y axes respond to changes in tilt

X Axis Orientation to Horizon(°)	X Output		Y Output	
	X Output(g)	$\Delta$ per Degree of Tilt(mg)	Y Output(g)	$\Delta$ per Degree of Tilt(mg)
-90	-1.000	-0.2	0.000	17.5
-75	-0.966	4.4	0.259	16.9
-60	-0.866	8.6	0.500	15.2
-45	-0.707	12.2	0.707	12.4
-30	-0.500	15.0	0.866	8.9
-15	-0.259	16.8	0.966	4.7
0	0.000	17.5	1.000	0.2
15	0.259	16.9	0.966	-4.4
30	0.500	15.2	0.866	-8.6
45	0.707	12.4	0.707	-12.2
60	0.866	8.9	0.500	-15.0
75	0.966	4.7	0.259	-16.8
90	1.000	0.2	0.000	-17.5

자이로 센서는 로봇의 균형 제어에 사용되었으며, 센서의 외형은 Fig. 4.8 과 같으며 자이로 센서 회로와 기울기 계산의 블록도는 Fig. 4.9 과 같이 구성하였다.



Fig 4.8 Appearance of the gyro sensor

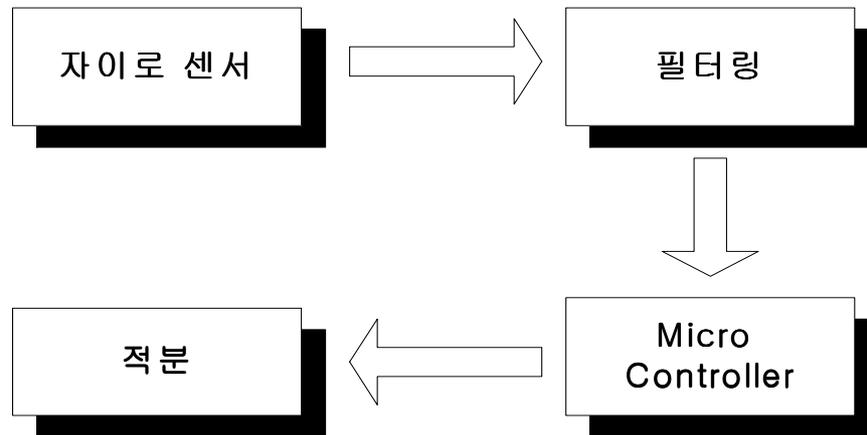


Fig. 4.9 Block diagram of the gyro sensor

#### 4.1.3. 압전센서

압전 센서는 이족보행 로봇의 보행 시 발 바닥의 착지 유무 및 바닥의 기울기를 검출하기 위해 사용된다. 본 논문에서는 압전 센서 즉 FSR(Force Sensing Resistor)를 사용하였다. FSR 센서는 작동표면에 인가되는 힘과 압력에 따라 전기적 저항이 변

화하는 것으로 전도체 내부에 구성된 회로의 접촉으로 인한 작동으로 힘이나 압력이 크면 클수록 더 적은 저항이 발생한다. Fig. 4.10 은 전형적인 FSR 센서의 개략도를 나타냈으며, Fig. 4.11 는 전형적인 FSR 센서의 구성에 대해 나타냈다.

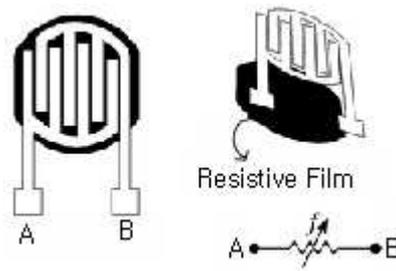


Fig. 4.10 Outline of the FSR sensor

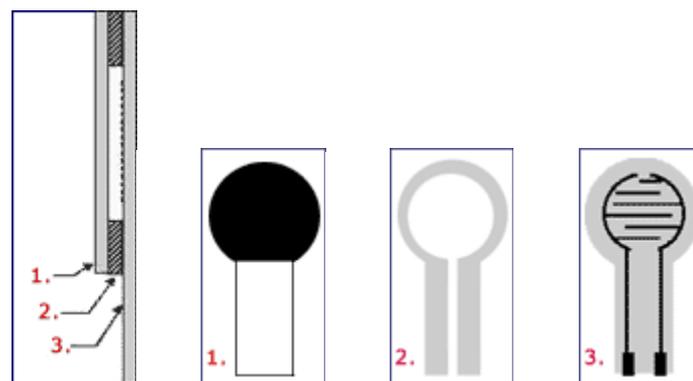


Fig. 4.11 Structure of the FSR sensor

FSR 센서의 구성은 기본체인 검은 하부 반도체의 폴리머와 접착층은 정확한 두께로 양면이 접착성을 가진다. 센서의 각 부분을 연결하며 일정한 거리를 유지하도록

되어 있으며 전도체 호일의 내부는 은도금화 되어 회로를 구성한다. 무 부하시 저항은 최대 2 M $\Omega$ 이며 작동 시 약 수 k $\Omega$ 으로 낮아진다.

Fig. 4.12 은 FSR 센서의 특성 곡선을 나타낸 것이다. 출처는 [www.techstom.co.kr](http://www.techstom.co.kr)의 홈페이지에서 인용하였다.

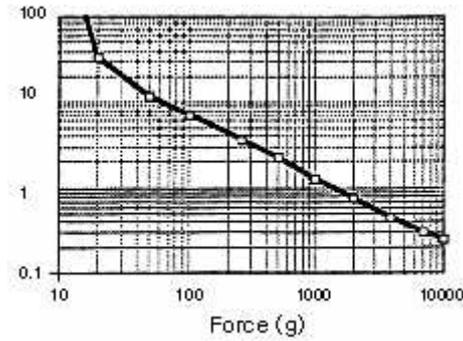


Fig. 4.12 Resistance of the FSR sensor by force and pressure

따라서 압전 센서는 로봇의 발 바닥의 착지 유무 및 바닥의 기울기를 검출하기 위해 사용 되었으며, 압전 센서의 외형은 Fig. 4.13과 같다.

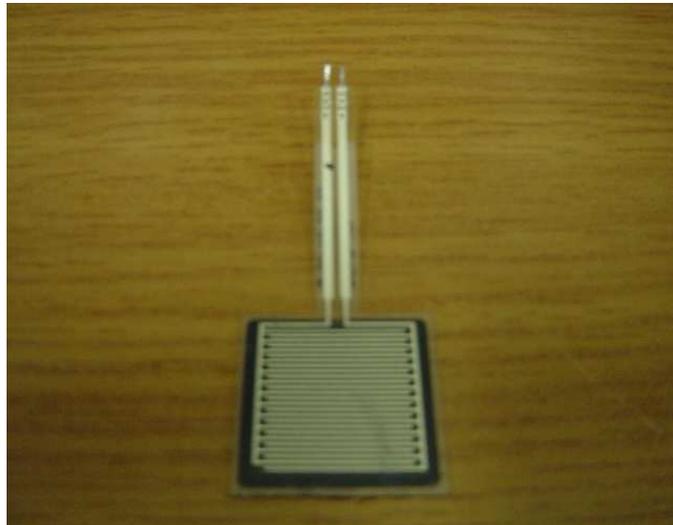


Fig. 4.13 Appearance of the FSR Sensor

#### 4.1.4. 적외선 센서

적외선 센서는 이족보행 로봇의 보행 시 물체 감지와 양 발의 착지 시 평형을 유지하기 위해 사용한다. 본 논문에서는 ST-5311 과 ST-3311 의 적외선 센서를 사용하였다. 적외선 센서는 빛의 스펙트럼에서 적색 부분의 바깥쪽에 해당하는  $0.75\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$  정도의 파장을 갖는 전자기파인 적외선을 이용하는 센서다. 적외선 센서는 일정 주파수의 빛을 받아 들이는 수광부를 항상 갖고 있지만 발광부는 있는 것과 없는 것이 있다. 발광부와 수신부를 모두 갖춘 적외선 센서에는 발광부에서 발생된 적외선이 물체에 부딪혀 반사되고 수광부에서는 이 반사된 빛의 변화량을 감지해 물체의 움직임을 알아내거나 반사된 빛의 세기를 측정해 물체까지의 거리를 알 수 있다. 또한 수광부의 출력은 전압으로 출력이 된다.

Fig. 4.14 은 적외선 센서의 구조를 나타냈다.

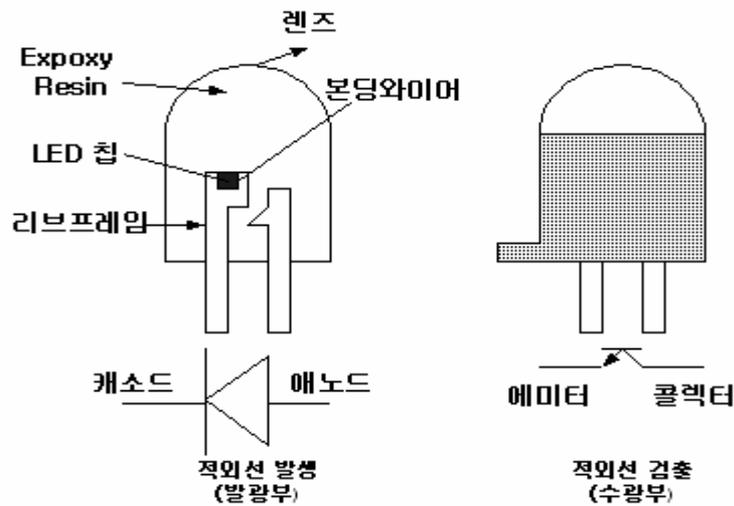


Fig. 4.14 Structure of the infrared rays sensor

따라서 적외선 센서는 물체 감지 및 양 발의 평형 유지를 위해 사용하였고, 적외선 센서의 외형은 Fig. 4.15 와 같다.



Fig. 4.15 Appearance of the infrared rays sensor

## 4.2. 이족보행 로봇의 비전 메커니즘

이족보행 로봇의 머리 부분은 3 자유도로 로봇의 눈에 해당하는 화상 캠이 2 대 장착하여 각각 yaw 운동이 가능하고 목에 해당하는 부분에 pitch 운동이 가능한 구조로 구성되어 있다.

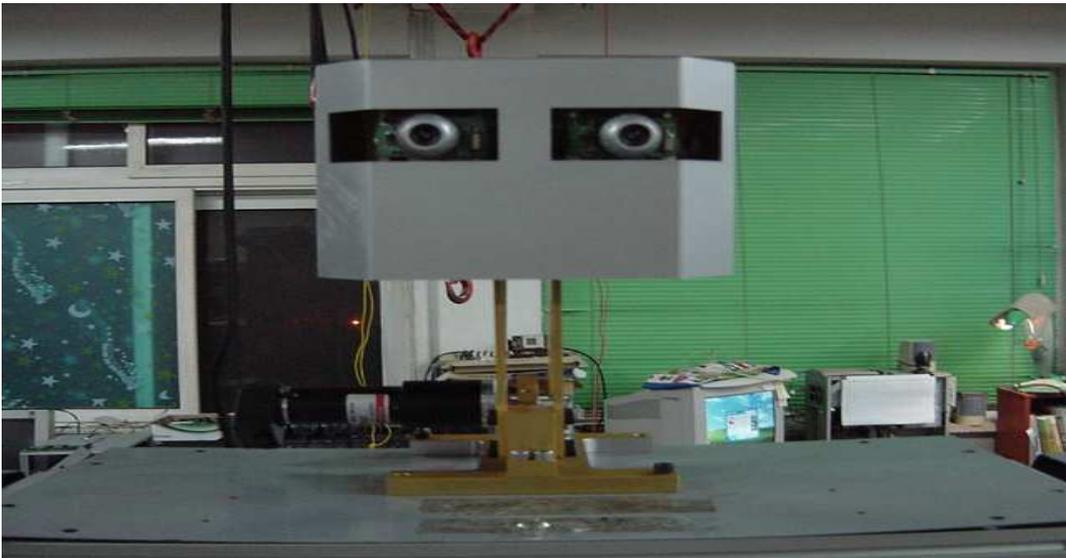


Fig. 4.16 Appearance of the vision system

#### 4.2.1. 비전 시스템

비전 시스템은 이족보행 로봇의 보행시 화상 캠을 이용하여 물체를 인식하고 인식한 물체를 따라 보행하기 위해 사용된다. 본 논문에서는 PROCHIPS 사의 PC 용 화상 캠을 사용하였으며, 제공되는 드라이버의 설치만으로 PC 의 USB 포트를 통하여 쉽게 제어 할 수 있는 저가형 장치이다. 비전 시스템에 사용된 화상 캠은 Fig. 4.17 과 같다.



Fig. 4.17 Appearance of the PC Cam

##### 4.2.1.1. 비전 시스템의 구동부

비전 시스템의 구동부는 2 자유도로 구성되어 있으며 yaw 운동을 한다. 구동부에 사용된 모터는 Hi-Tec 사의 HS-311 을 사용하였으며, 4.8V 에서 3.0kg/cm, 6.0V 에 서 4.5kg/cm 의 토크를 가지는 RC 서보 모터이다.

Fig. 4.18 는 비전 시스템의 구동부를 나타냈다. Fig. 4.19 은 구동 모터 제어 시스템 의 회로도 를 나타냈으며, Fig. 4.20 은 Fig. 4.19 의 회로도를 바탕으로 제작한 비전 시스템의 구동 보드이다.

구동모터

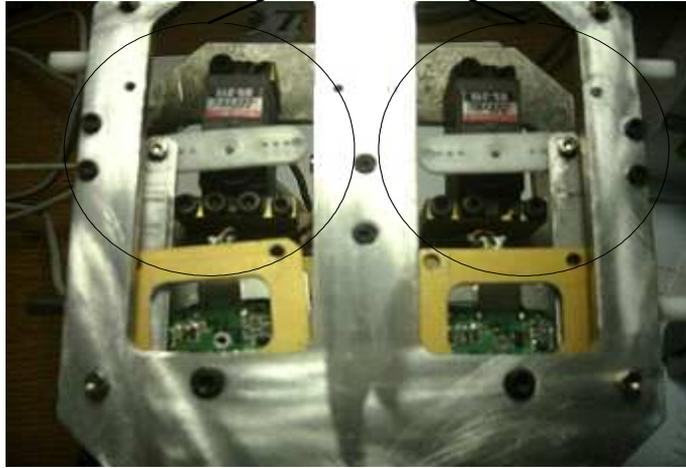


Fig. 4.18 Actuator of the vision system

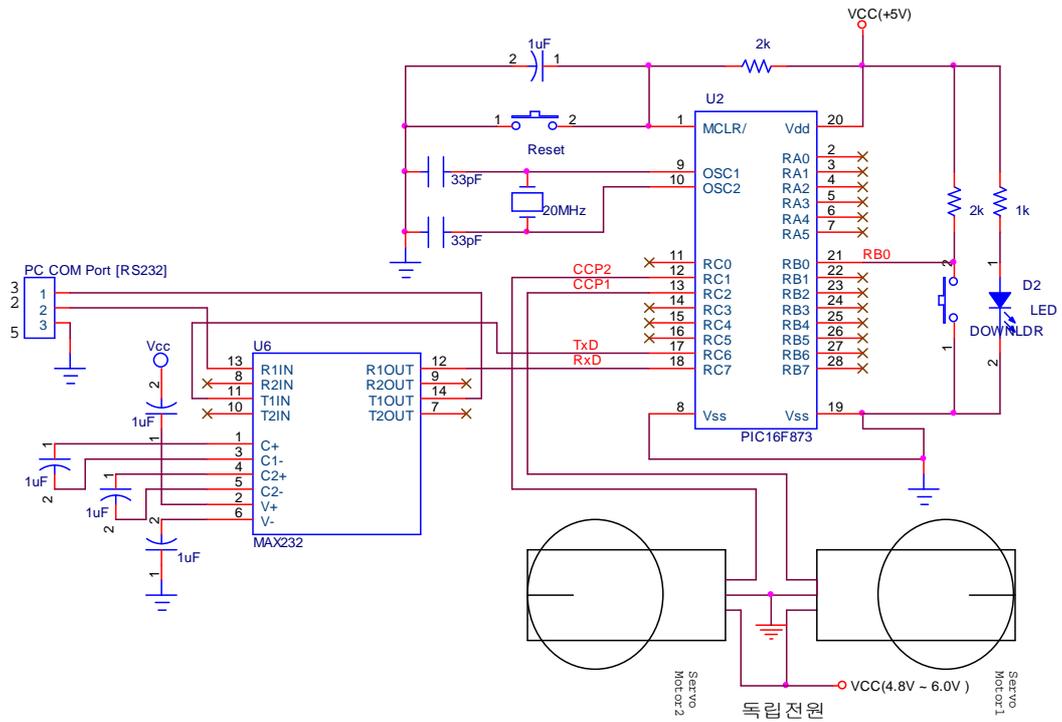


Fig. 4.19 Circuit of the actuator control system



Fig. 4.20 Actuator board of the vision system

### 4.3. 센서 융합 및 비전 시스템

자이로 센서, 초음파 센서는 이족보행 로봇에 부착 되어 로봇의 보행시 지면과 로봇의 기울어진 각도를 측정하여 균형 관절을 제어, 물체의 거리를 측정하고 장애물을 회피 하여 보다 안전한 보행을 위해 사용되며, 압전 센서와 적외선 센서는 이족보행 로봇의 발에 부착 되어 보행시 발 바닥의 착지 유무 및 바닥의 기울기를 검출, 물체 감지와 양발의 착지 시 평형을 유지 하기 위해 사용된다. 비전 시스템은 로봇의 보행시 화상 캠을 이용하여 물체를 인식 하고 인식한 물체를 따라 보행한다.

각각의 센서 신호들은 로봇 내부에 PIC16F873 센서 보드가 있어 측정된 신호 받아 계산하여 Mobile Computer 로 보낸다. 비전 시스템은 센서 보드와 별도로 PIC 16F873 보드가 있어 인식된 물체의 정보를 Mobile Computer 로 보낸다. 각각의 신호들은 이족보행 로봇이 자율보행을 하는데 필수적인 신호들이다. Fig. 4.21 는 센서의 신호의 흐름도를 나타냈다.

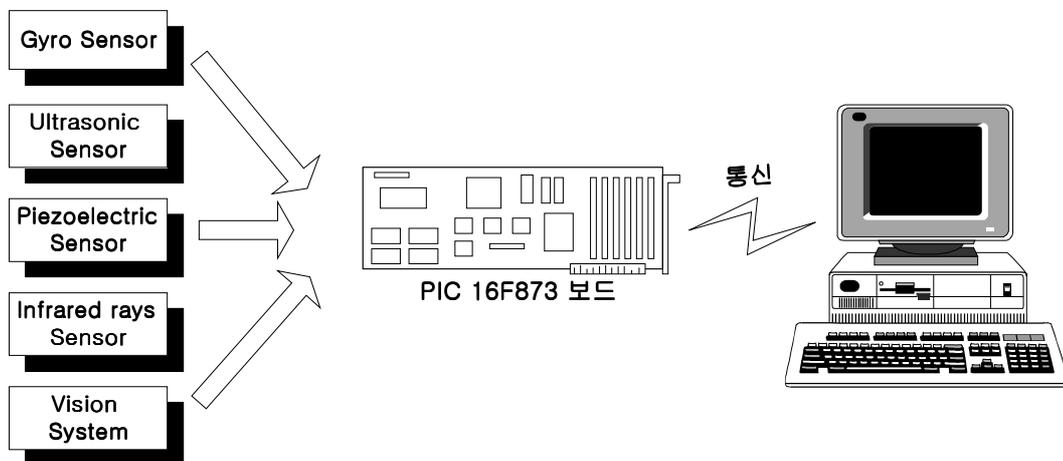


Fig. 4.21 Block diagram of the sensor signal process

# 제 5 장. 센서융합 및 비전을 이용한 이족보행 로봇의 보행

## 5.1. 센서 융합을 이용한 보행

### 5.1.1 센서융합 시스템 장치 구성

본 논문에서는 이족보행 로봇이 보행 궤적 생성시 필요한 각각의 센서 데이터를 융합하여 자율적으로 보행하는 실험을 하였다. 이족보행 로봇은 허리관절 1 자유도, 무릎 관절 1 자유도, 발목 관절 2 자유도를 가진다. 지능형 이족보행 로봇의 전체 구동 블록도는 Fig. 5.1 과 같고, 센서융합 시스템 장치 구성은 Fig. 5.2 와 같다.

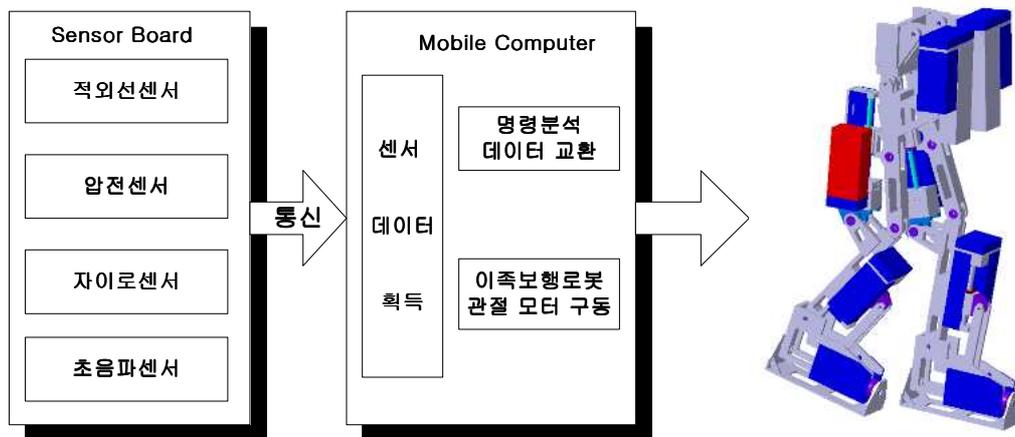


Fig. 5.1 Block diagram of the actuating BWR

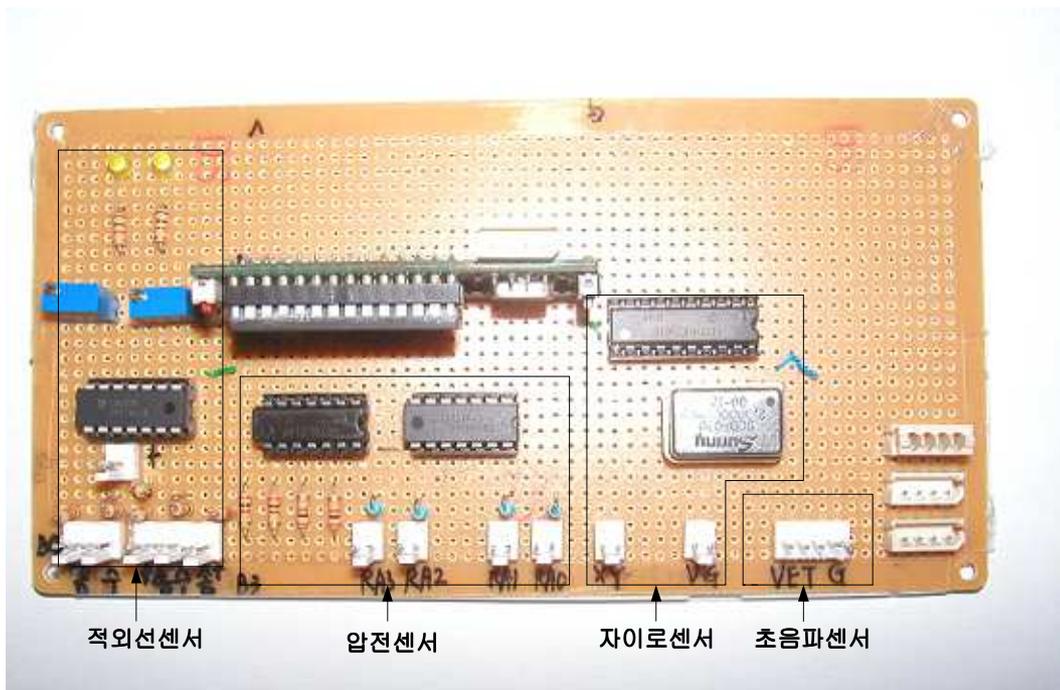


Fig. 5.2 Composition of the sensor fusion system

Mobile Computer 는 통신으로 Sensor Board 의 데이터를 획득하여 데이터의 명령을 분석한다. 지능형 이족보행 로봇의 구동을 위하여 분석된 데이터를 사용하여 관절 구동기에 연결된 볼나사 위치를 알려 준다. Sensor Board 는 센서 데이터를 실시간으로 획득하여 Mobile Computer 에 요구되는 센서 데이터를 실시간으로 전송하게 된다.

적외선 센서는 Fig. 5.3 와 같은 회로로 구성되었으며, Fig. 5.4 는 Fig. 5.3 바탕으로 제작한 적외선 센서 보드와 이족보행로봇에 부착된 적외선 센서 보드이다.

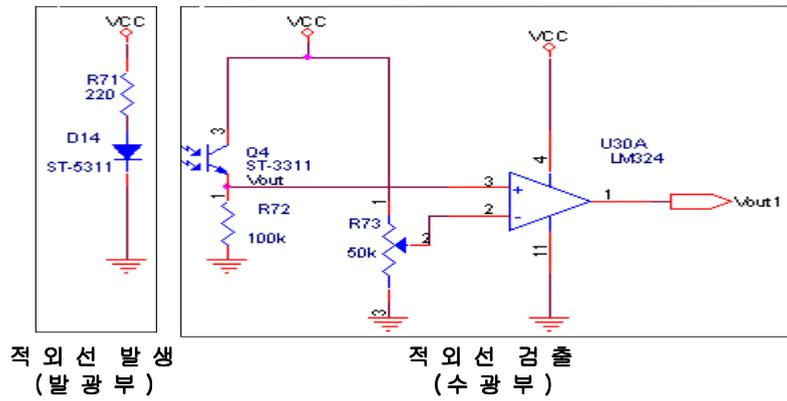


Fig. 5.3 Circuit of the infrared rays sensor board

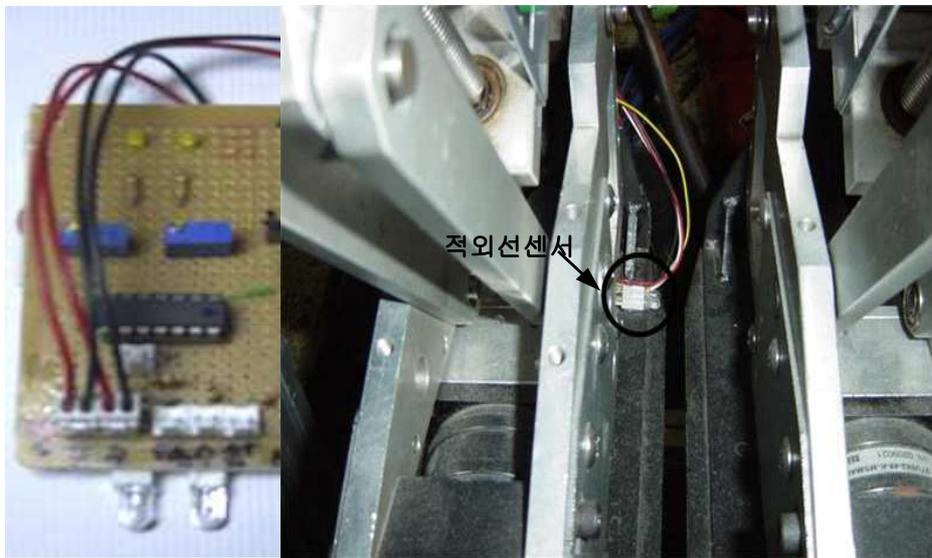


Fig. 5.4 Infrared rays sensor board attached on the BWR

발광부에서 적외선을 발생시키고, 수광부에서는 반사된 빛의 변화량을 감지한다. LM324 비교기를 달아서 기준 전압(비반전 단자에 가해진 전압) 보다  $V_{out}$  이 높으면 연산증폭기(operational amplifier)의 출력단자  $V_{out1}$ 로 5V가 출력이 되고 낮으면 0V가 출력이 된다.

압전센서는 Fig. 5.5 같은 회로로 구성되었으며, Fig. 5.6은 Fig. 5.5를 바탕으로 제작한 압전센서 보드와 이족보행로봇에 부착된 센서를 나타냈다.

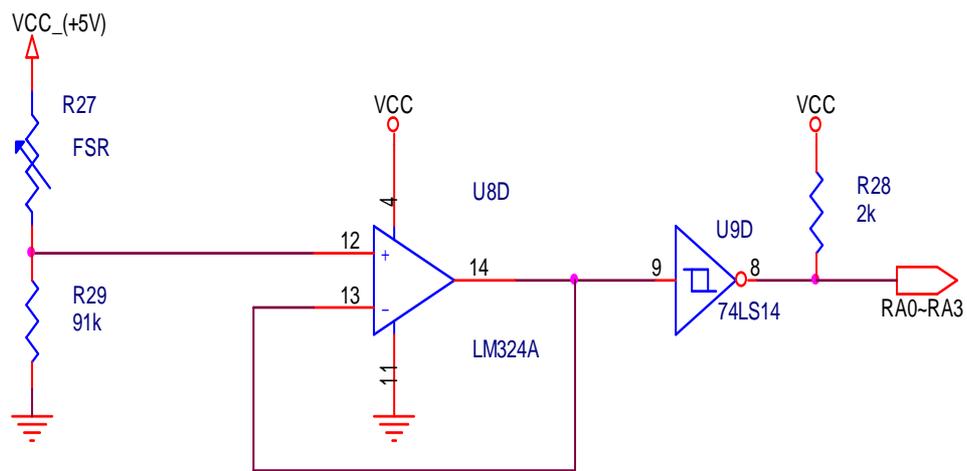


Fig. 5.5 Circuit of the piezoelectric sensor board

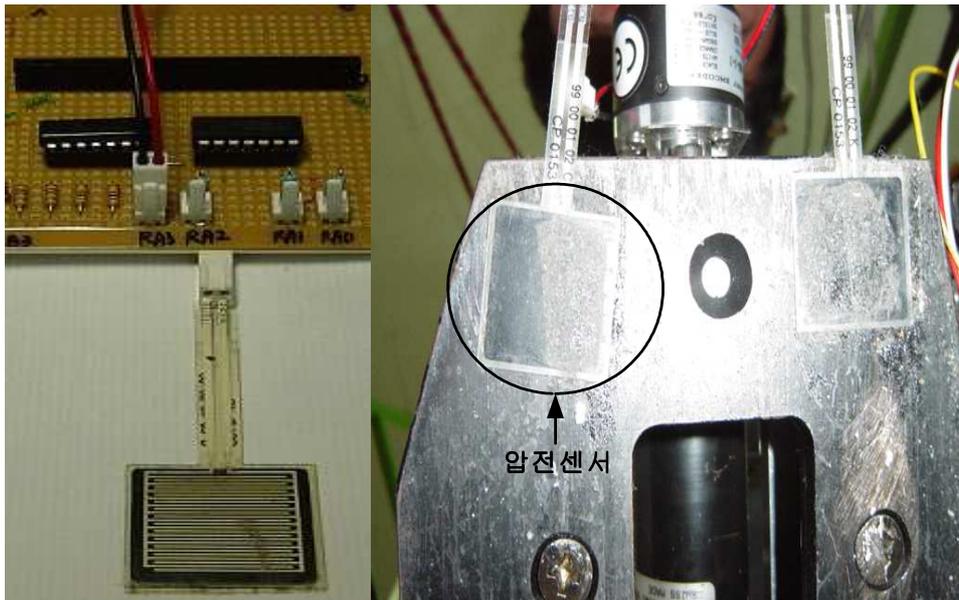


Fig. 5.6 Piezoelectric sensor and piezoelectric sensor board attached on the BWR

압전센서 즉, FSR 은 이족보행 로봇이 보행 착지시 FSR 에 힘을 가하면 저항의 변화가 생긴다. R29 저항의 크기에 따라 FSR 센서에 가하는 힘의 세기에 영향을 준다. R29 의 저항이 커지면 압전센서에 가하는 힘이 커진다. 따라서 본 실험에서는 91kΩ 의 저항을 사용하였으며, 이족보행 로봇의 보행 착지 시 로봇 발바닥의 착지 유무 및 바닥의 상태를 Fig. 5.23 KUBIR 의 GUI 구동 프로그램으로 확인 할 수 있다.

자이로 센서는 Fig. 5.7 의 회로를 구성하여 정지 시와 보행 시 자이로 센서의 기울기 데이터를 획득하여 보정 실험을 하였다.

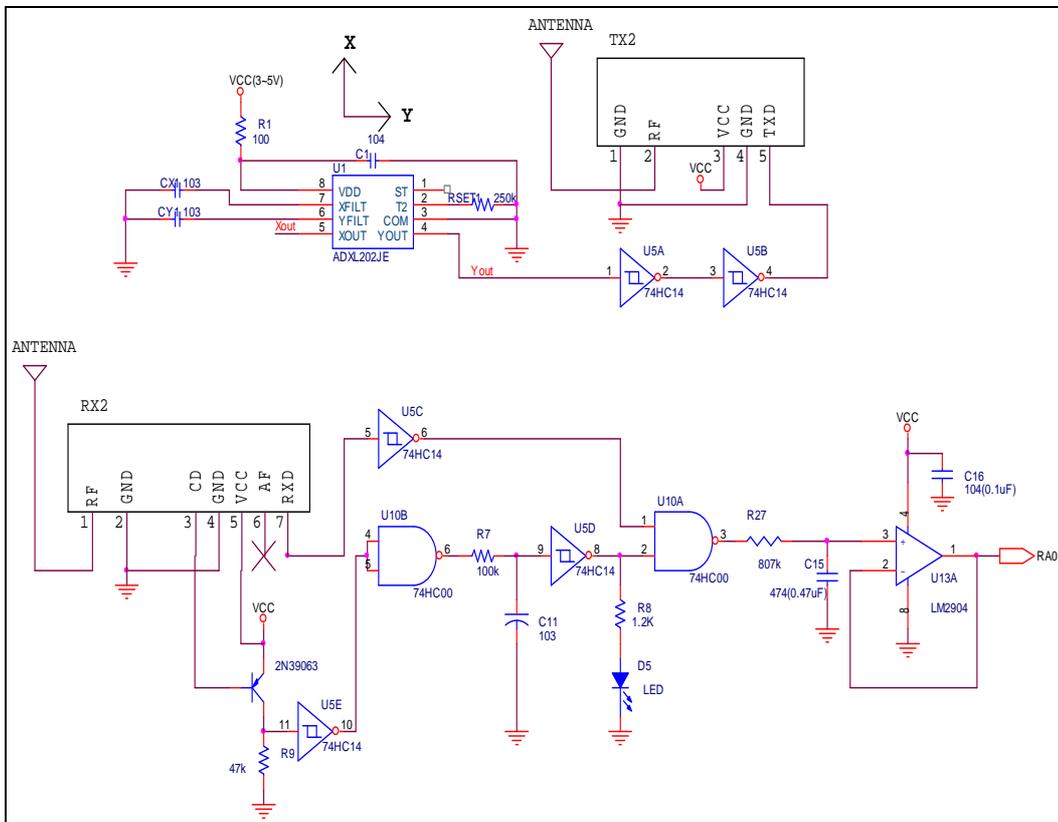


Fig. 5.7 Circuit of the gyro sensor board

Fig. 5.8은 Fig. 5.7의 구성 회로도를 바탕으로 제작한 자이로센서 테스트 보드이다.

Fig. 5.9는 calibration을 위한 자이로센서 보드이다. Fig. 5.10은 calibration을 위한 자이로센서 구성 장치를 나타낸 것이며, Fig. 5.11은 자이로 센서의 기울기를 테스트하기 위한 calibration을 나타낸 것이다.

Fig. 5.12 는 제작한 보드를 가지고 정지시 자이로 센서의 출력값을 얻은 것이다. 보행을 하기 전 정지된 상태에서 자이로 센서의 출력값이 465에서 476까지 출력된 것을 볼 수 있다. 이 센서 출력값은 보행 시 프로그램에서 보정한다.

Fig. 5.13에서 센서 출력값 470 근처에서 일정한 센서 출력 값은 움직이지 않고 정지된 상태를 나타내고, 제자리에서 움직인 상태와 50도로 기울어진 상태를 나타냈다.

이러한 실험을 바탕으로 이족보행 로봇에 사용된 자이로 센서는 PIC16F873 보드의 외부에 2MHz의 크리스탈과 74HC541 3-state buffer를 사용하였고, 타이머 0를 사용하여 측정된 값을 적분하여 기울기 값을 측정하는 방법으로 실험을 하였으며, Fig. 5.14 는 자이로 센서의 실험을 통한 데이터이며, Fig. 5.15 의 보드는 실제 이족보행 로봇의 몸체에 부착된 보드이다.

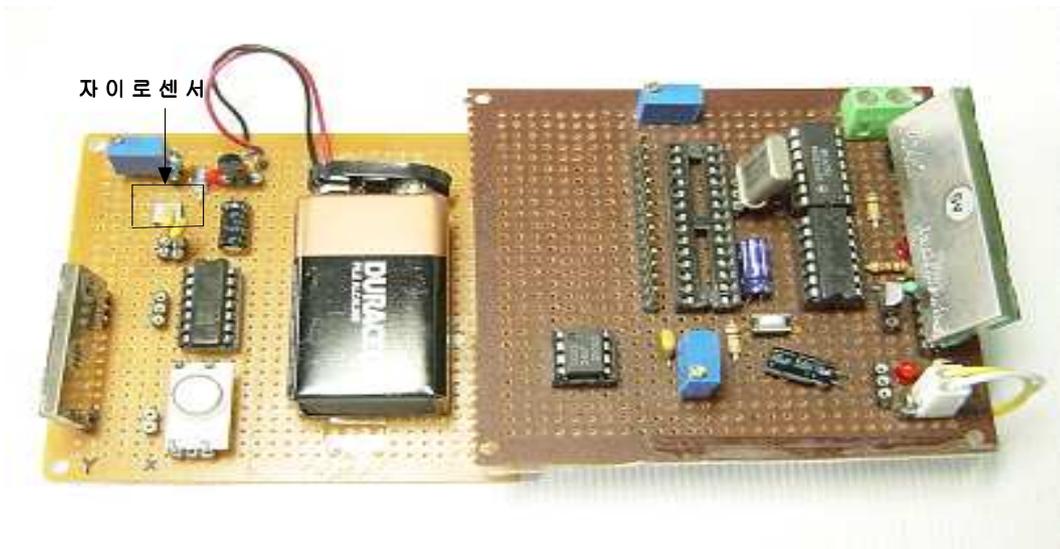


Fig. 5.8 The experimental board of the gyro sensor

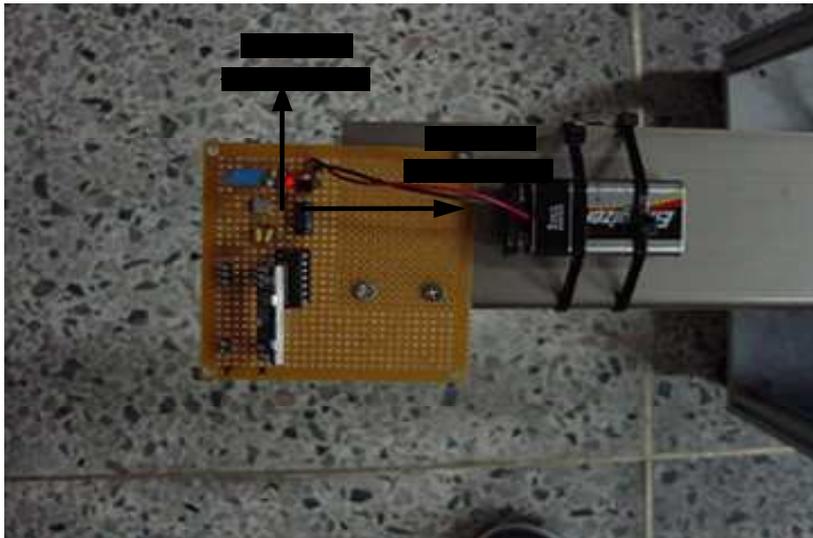


Fig. 5.9 Gyro sensor board for calibration

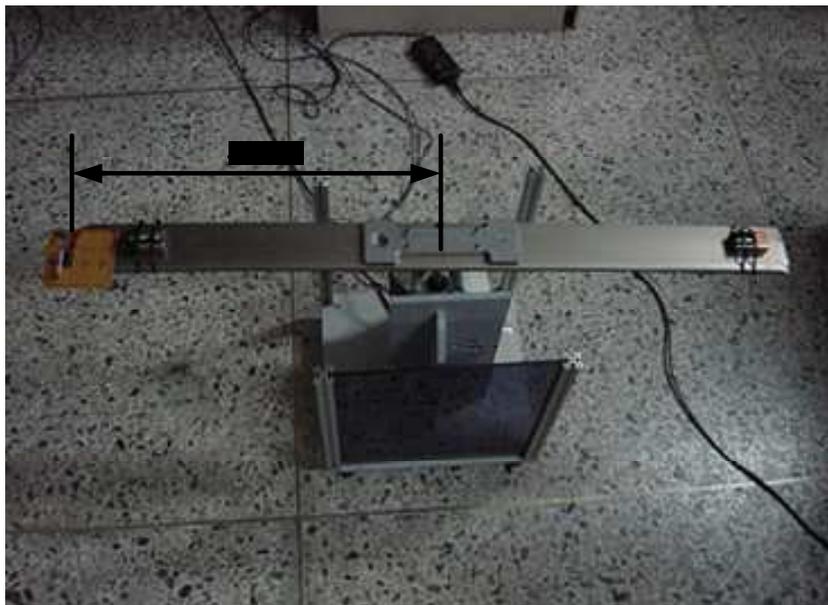


Fig. 5.10 Structure of the gyro sensor device for calibration

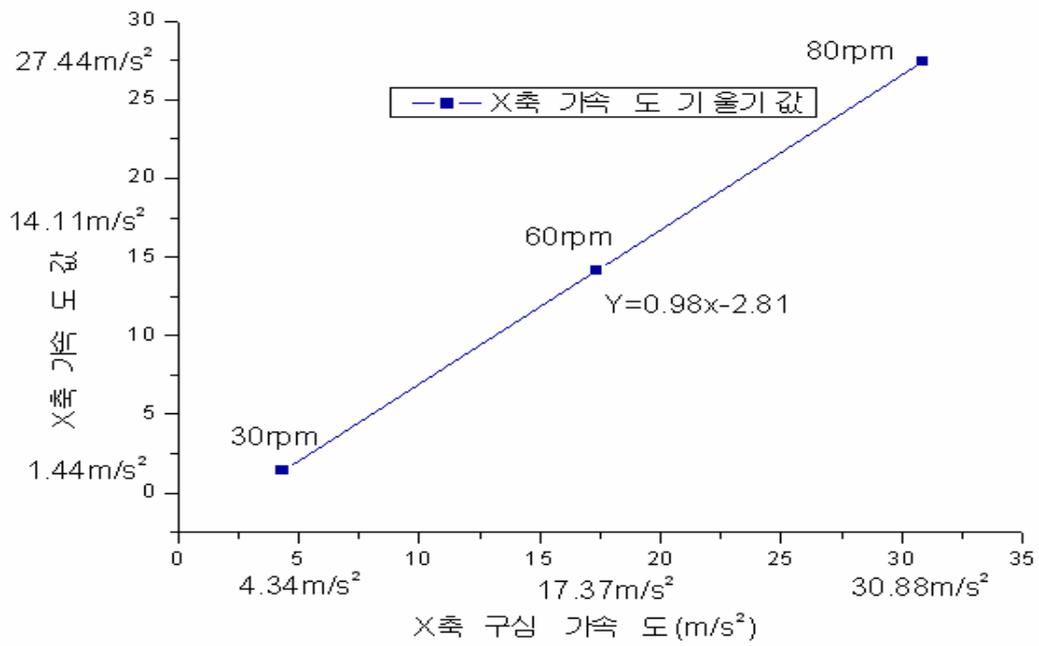


Fig. 5.11 Calibration result of the tilt test of gyro sensor

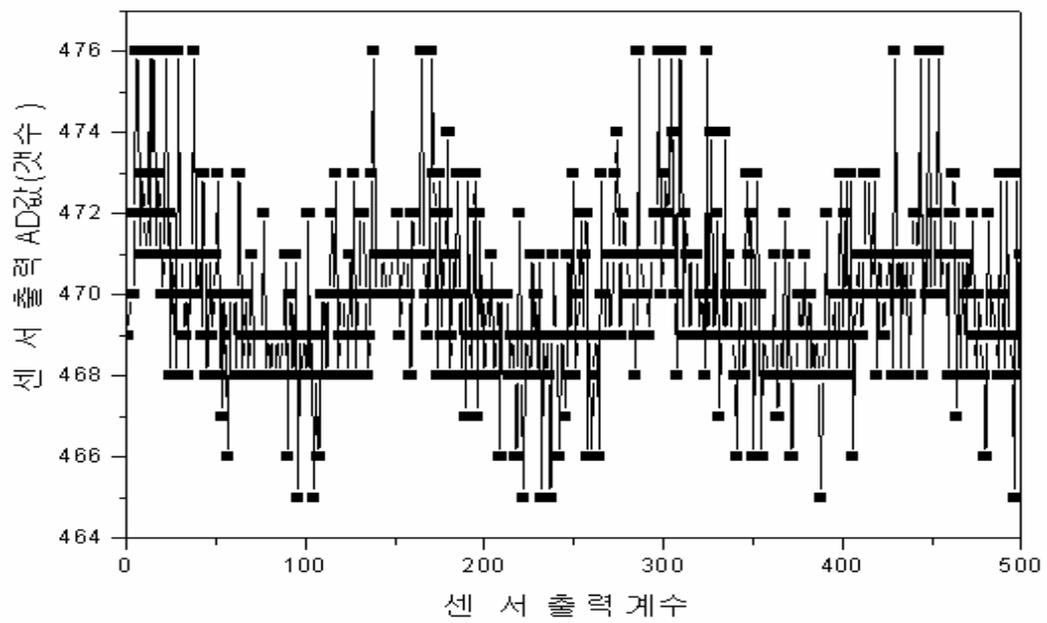


Fig. 5.12 Output of the gyro sensor at the standstill condition while BWR is walking

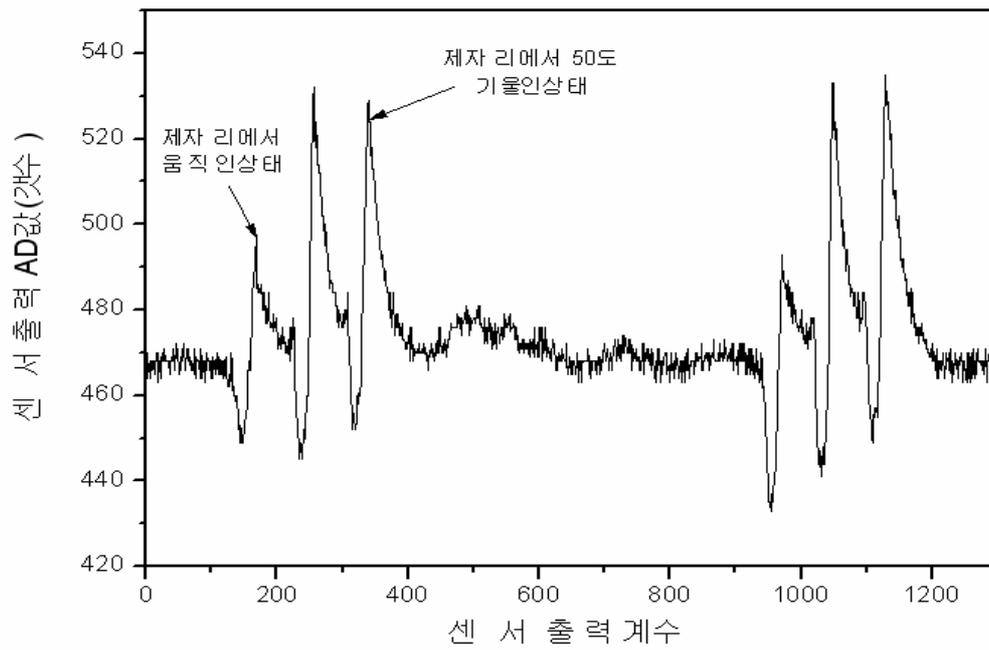


Fig. 5.13 Output of the gyro sensor during the walking test

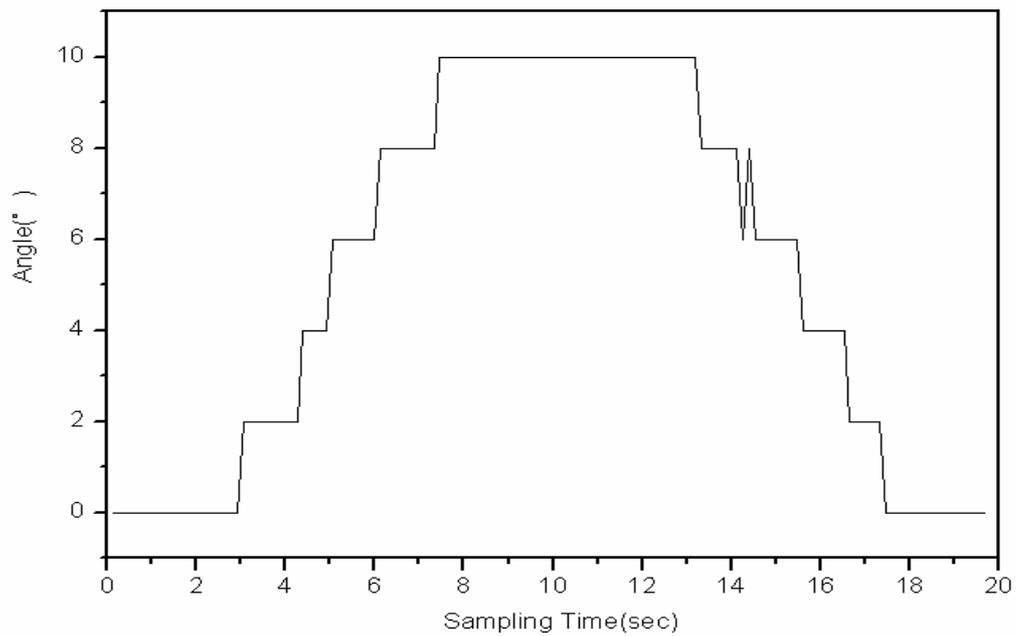


Fig. 5.14 The experimental data of the gyro sensor

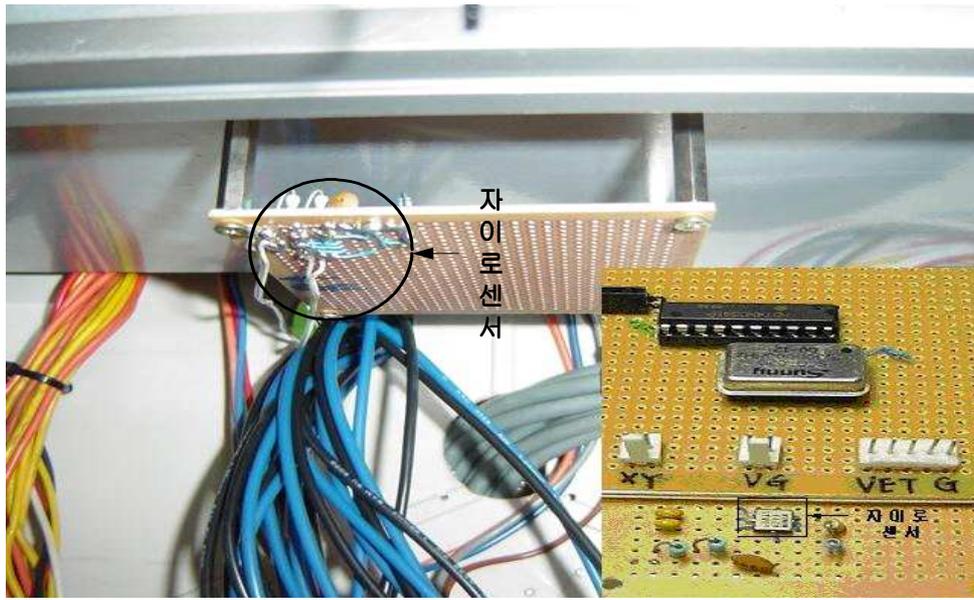


Fig. 5.15 Gyro sensor board attached on the BWR

초음파 센서는 Fig. 5.16 와 같은 회로로 구성되었으며, Fig. 5.17 는 초음파 센서의 실험 데이터를 나타낸 것이며, Fig. 5.18 은 Fig. 5.16 의 회로를 바탕으로 제작한 초음파 센서 보드와 이족보행 로봇에 부착된 초음파 센서이다.

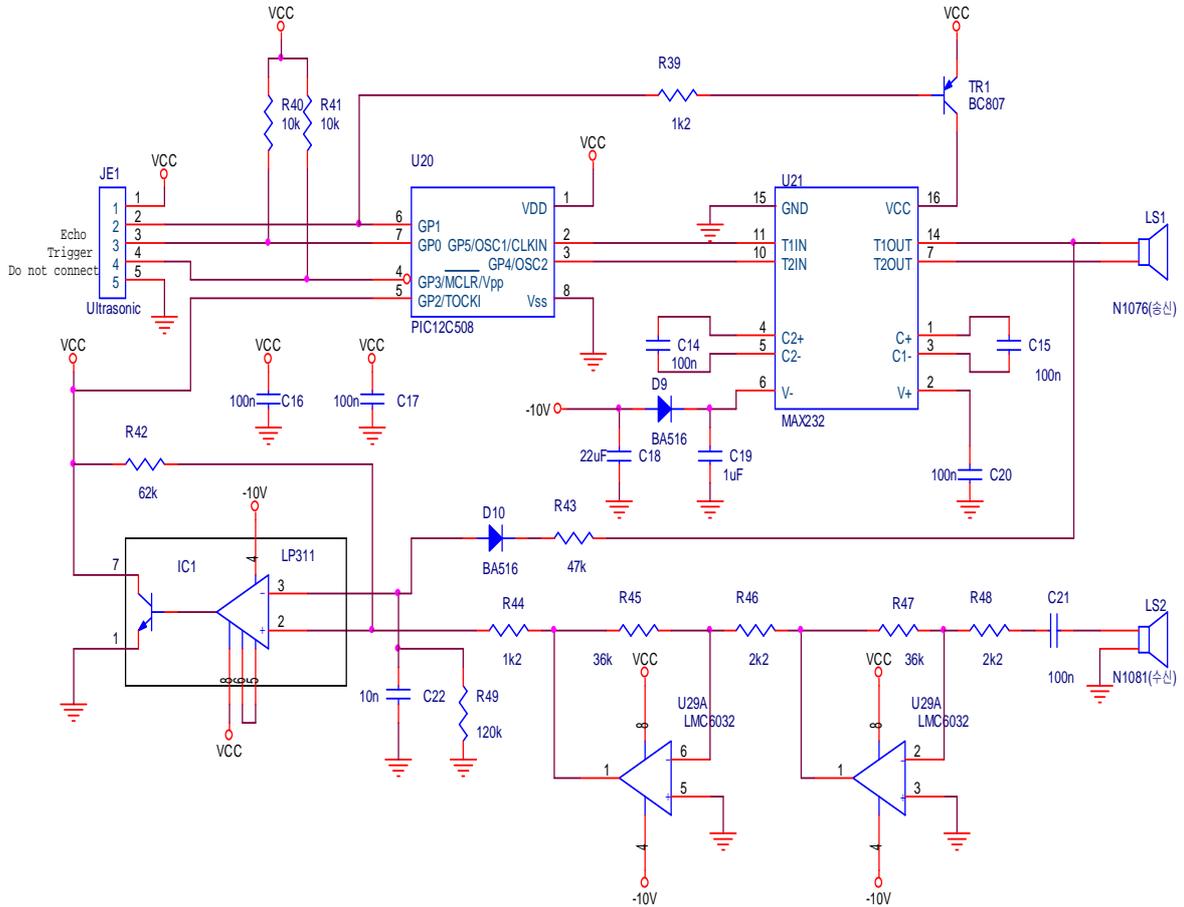


Fig. 5.16 Circuit of the ultrasonic sensor

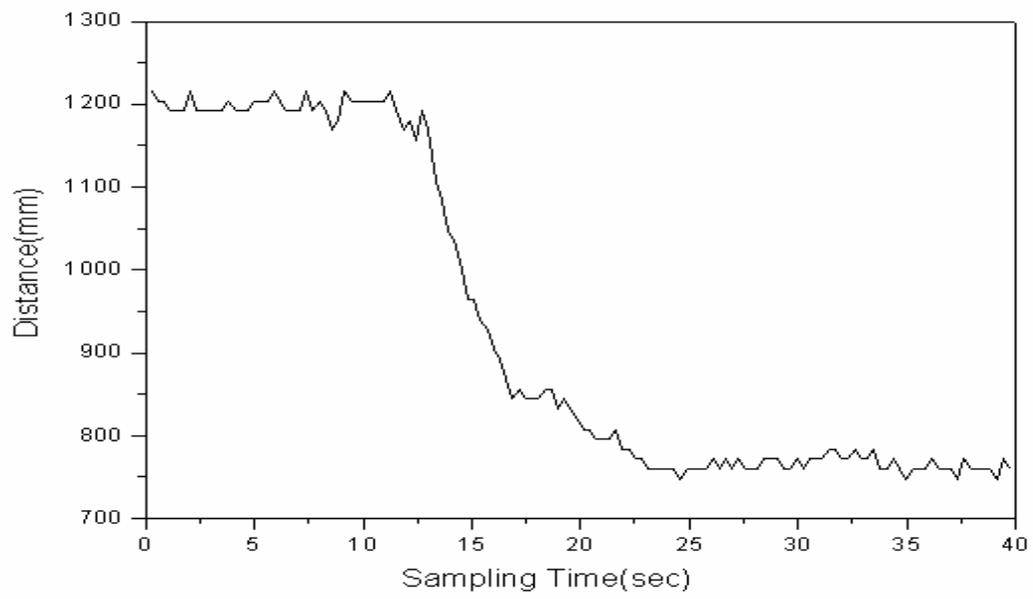


Fig. 5.17 The experimental data of the ultrasonic sensor

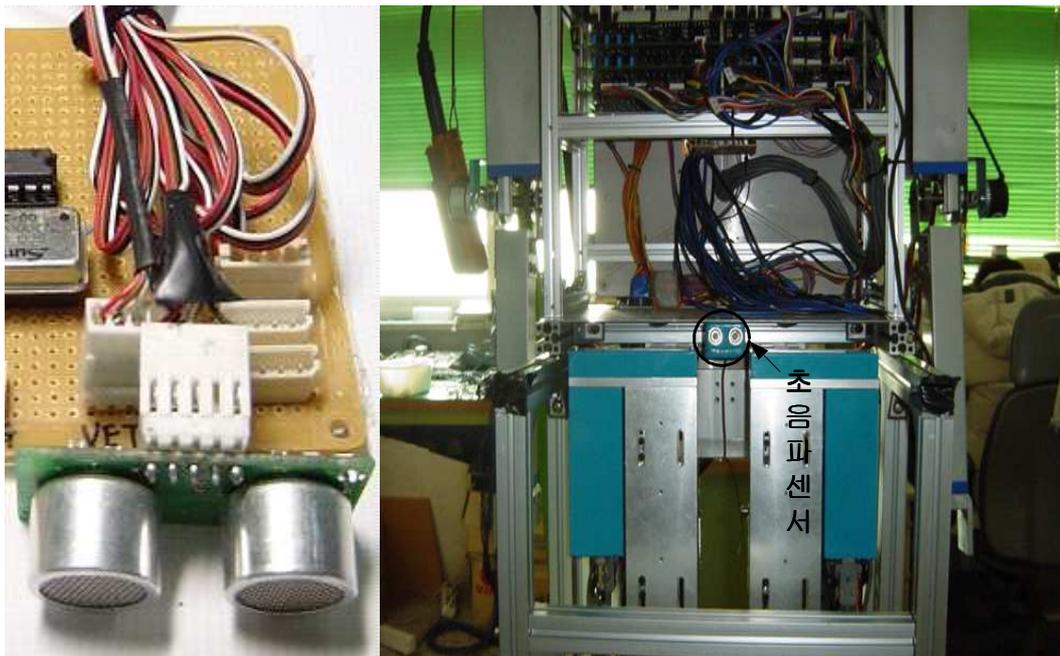
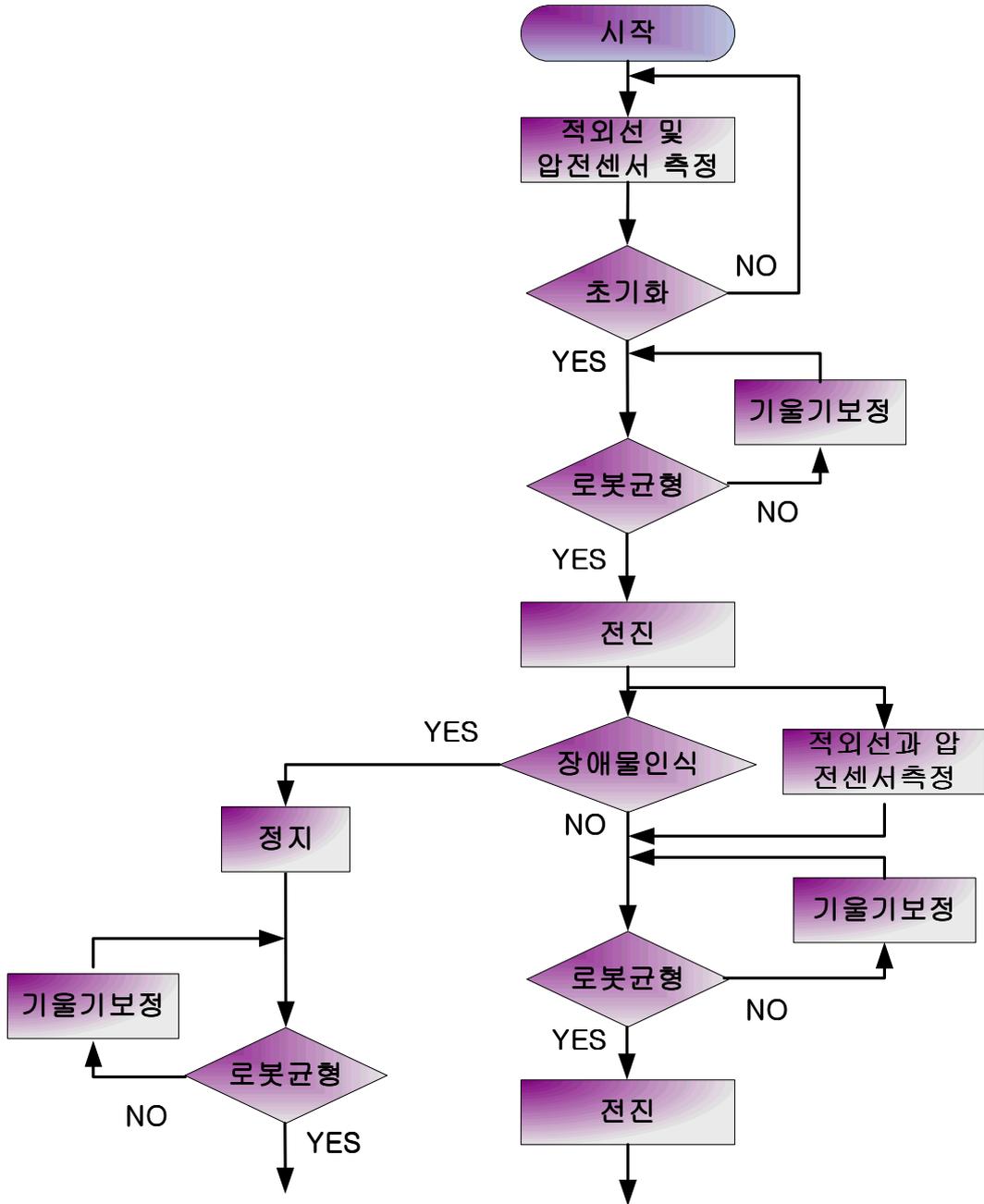


Fig. 5.18 Ultrasonic sensor board attached on the BWR

초음파 회로는 발신부와 수신부 두 부분으로 구성된다. 발신부에서는 표준 40kHz 압전 송신을 수행하기 위해 PIC12C508 을 사용한다. 가장 간단하게 PIC12C508 로 직접 연결되어 있어 송신기의 신호를 내 보낸다. 송신기는 20V 까지 구동될 수 있으며 이 레벨을 위해 16V 구동을 제공하는 Max232 칩과 회로로 연결되어있다.

수신부를 통하여 수신된 초음파 신호는 Opamp 에 의해서 2 단 증폭이 되며, 증폭기에서 증폭된 신호는 비교기에 들어 간다. Opamp 와 LM311 비교기의 마이너스 전압은 MAX232 에 의해 발생되었다. 그러나 이것은 상당량의 고주파 잡음을 발생시킨다. 고주파를 차단하기 위해 C22 의 콘덴서를 사용하여 충분히 긴 마이너스 극을 잡아서 잡음을 제거하였다. 비교기를 통과한 초음파 센서의 출력은 디지털 신호로 변환하는 기능을 하고 PIC12C508 은 Echo 펄스를 출력한다.

5.1.2. 센서 융합을 이용한 보행 알고리즘



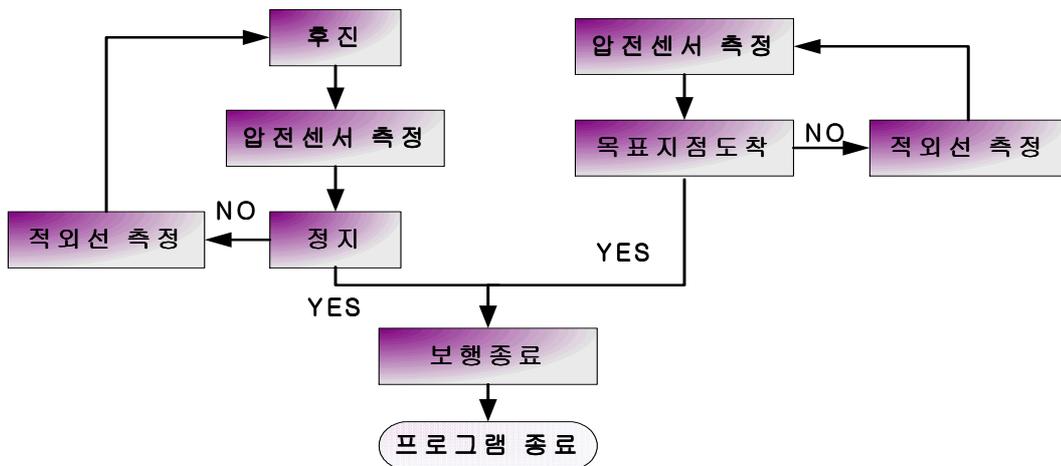


Fig. 5.19 Walking flow chart of the BWR

본 논문에서는 센서 융합을 이용한 지능형 이족보행 로봇의 보행을 위해 먼저, 적외선 센서와 압전센서의 데이터를 센서보드를 이용하여 획득한 후, 로봇의 발바닥 상태를 확인한다. 발바닥이 평행하게 착지되어 있는지를 알기 위해 적외선 센서의 데이터를 읽어온다. 바닥의 상태에 따라 두 발이 제대로 착지가 되었는지 아닌지를 알기 위해 압전센서의 데이터를 읽어 온다. 이는 Fig. 5.20 에서 확인 할 수 있다. 이러한 초기 데이터를 가지고 안전한 자율 보행을 위해 이족보행 로봇의 초기 자세를 잡아준다. 또한 전진 보행을 하기 전 로봇의 평형상태를 알기 위해 자이로 센서의 값을 획득하여 로봇의 균형을 잡아준다. 이는 로봇의 평형 정도에 따라 센서 보드에서 획득한 데이터 정보를 Mobile Computer 로 보내고 Mobile Computer 는 획득한 데이터 정보를 분석하여 관절 구동기에 볼나사의 위치를 알려준다. 그러면 지능형 이족보행 로봇은 균형을 유지하며 전진 보행을 한다. 전진 보행중에 항상 압전 센서와 적외선 센서 데이터를 읽어들인다.

지능형 이족보행 로봇의 보행 도중 장애물을 인식 한다면 거리를 측정하여 일정한 거리까지 보행하고 정지를 한다. 그리고 자이로 센서의 값을 받아서 균형을 유지해 준다. 충돌 방지를 위해 지능형 이족보행 로봇은 후진 보행을 하여 장애물과 충돌을 방지하며, 보행을 정지하여 장애물이 제거 되기를 기다리게 된다. 만약 장애물을 인식 못하였다면 자이로 센서의 데이터 정보를 받아서 균형을 유지하며 목표 지점까지 전진 보행을 수행 한 후 보행을 종료한다. 만약 목표 지점까지 도착하지 못 하였다면 적외선 센서를 측정하며 계속 전진 보행을 하는 실험을 하였다.

## 5.2. 비전을 이용한 보행

KUBIR 의 GUI 구동 프로그램은 Window NT 급의 OS 에서 microsoft 사의 visual C/C++ 를 이용하여 프로그램 되어 있으며, 캠은 USB 포트로 Mobile Computer 와 연결 되어있다. 또한 비전 드라이브 보드는 Mobile Computer 와 serial 통신으로 연결 되어있다. 물체를 인식한 캠은 데이터를 Mobile Computer 로 전송을 하며 다음 Fig. 5.20 으로 확인할 수 있다.

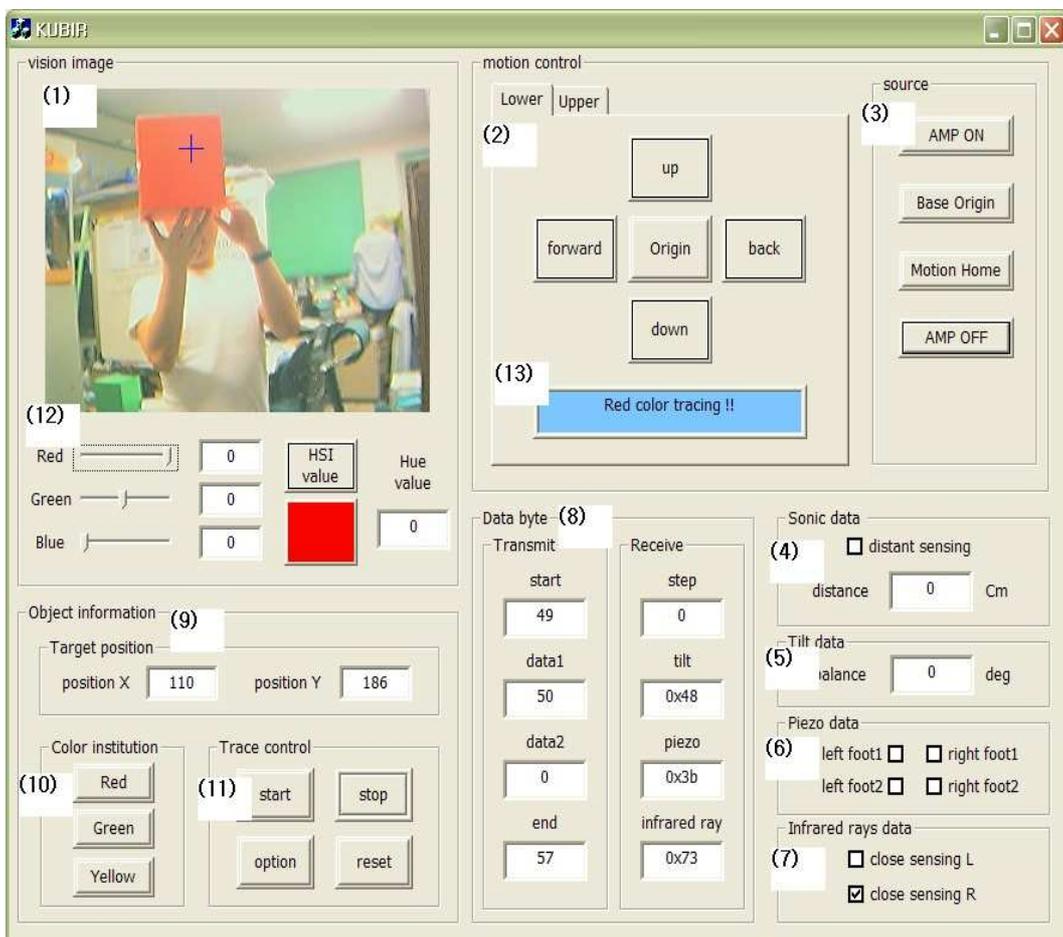


Fig. 5.20 GUI program of the BWR

- (1) Cam : 목표물을 추적할 수 있는 cam 의 영상정보를 나타내는 부분
- (2) Motion Control : 이족보행 로봇의 모션 컨트롤러 부분으로 상체와 하체를 각각 Control 한다.
- (3) Source : MMC 를 ON, OFF 하거나 로봇의 원점과 Home 을 잡아주는 부분
- (4) Ultrasonic Data : 초음파 센서의 거리 측정 부분
- (5) Gyro Data : 자이로 센서의 기울기 측정 부분
- (6) Piezo Data : 압전센서의 발바닥의 착지 유무 부분
- (7) Infrared rays Data : 적외선 센서의 물체 감지 부분
- (8) Trans & Receive code : Sensor Board 와의 Sensing Value 수신 및 모터 PWM 명령 송신 code
- (9) Trace : 목표물의 면적 중심을 나타내는 좌표값
- (10) Color set : 목표물의 color 를 선정
- (11) Trace Control : 모터의 구동 시작, 정지, 리셋 및 cam 의 조도량 조절
- (12) color 조합 : color 값을 R, G, B 값으로 표시
- (13) Message : 현재 상태 display

Fig. 5.20 에서 (1)의 +부분은 목표물을 추적할 수 있는 cam 의 영상정보를 나타내는 부분으로 이족보행 로봇이 물체를 인식하면 인식한 물체를 (1)의 부분에 나타낸다.

KUBIR 의 영상처리 방법은 목표물의 색상에 대한 R,G,B Value 를 설정(가변적)에 의해 저장하고 있다가 화상캠을 통하여 받은 영상을 Window 영역(본 실험에서는 24bit video format 으로 설정)에 표시, 비교한다. 24bit video format 으로 구성된 pixel 1 개는 3 개의 화소로 구성되어 3 개의 8bit 정보를 포함하고 있으며, 그 값이 R(8bit), G(8bit), B(8bit) 값이다. Fig. 5.20 은 이러한 Pixel 의 구조를 나타낸 것이다.

또한 color 인식의 알고리즘은 화상 캠을 통하여 표시되는 Window 영역의 각 pixel 들을 width  $\times$  height 만큼 매 loop 마다 검사하여 설정된 color 의 폐구간 영역이 나오면 그 중심의 좌표( + : 십자표시)를 검출하여 인식한다. Black & White 의 인식은 R , G , B 값을 검출한 후  $(R + G + B)/3$  을 연산하면 8bit 의 정보 0 ~ 255 까지의 검은색부터 흰색까지의 영상으로 변환된다. 200 정도 이상의 값이 되면 밝은 부분 즉 흰색에 가까운 폐구간 영역에 대해 그 중심의 좌표 ( + : 십자표시)를 검출한다.

본 논문에서는 이와 같은 방법을 사용하여 물체를 감지하고 인식된 물체를 추종하여 보행하는 실험을 하였다.

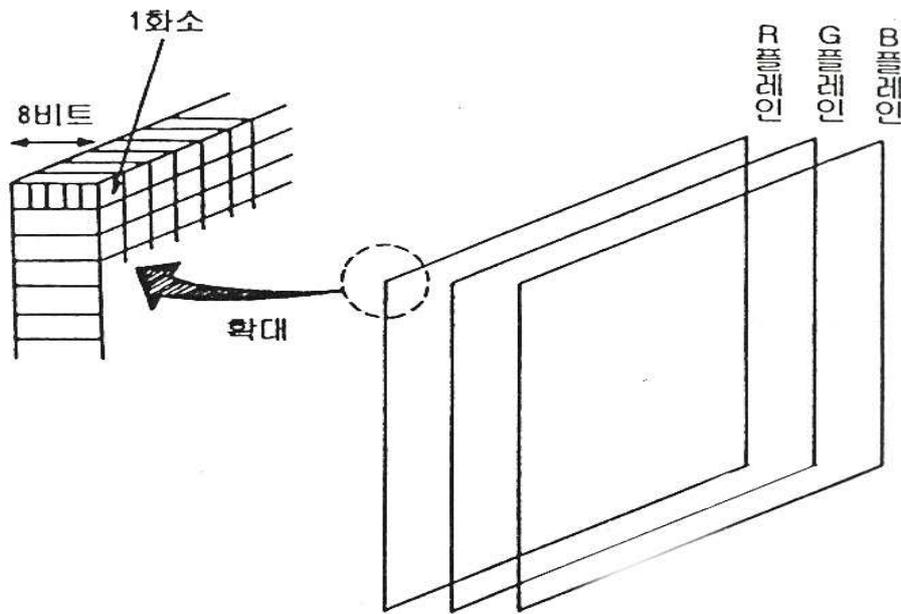
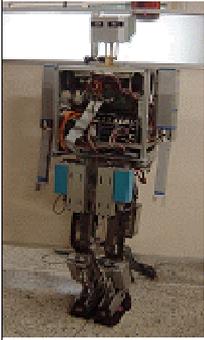
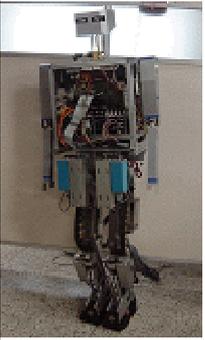
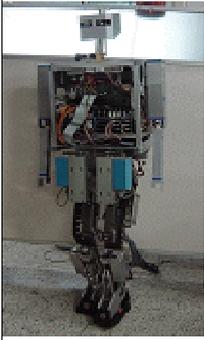
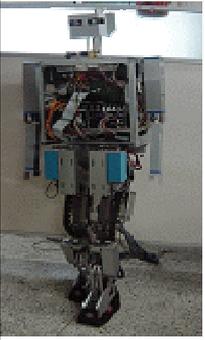
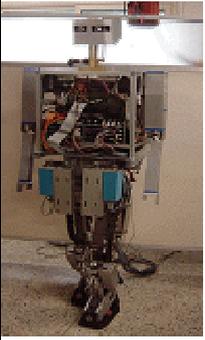


Fig. 5.21 Structure of the pixel

Fig. 5.22 는 비전 및 센서를 이용하여 물체를 감지 하고 각각의 센서의 데이터를 바탕으로 이족보행 로봇의 보행을 나타낸 것이다.

Steps	Walking posture	Steps	Walking posture	Steps	Walking posture
STEP 1		STEP 2		STEP 3	
STEP 4		STEP 5		STEP 6	

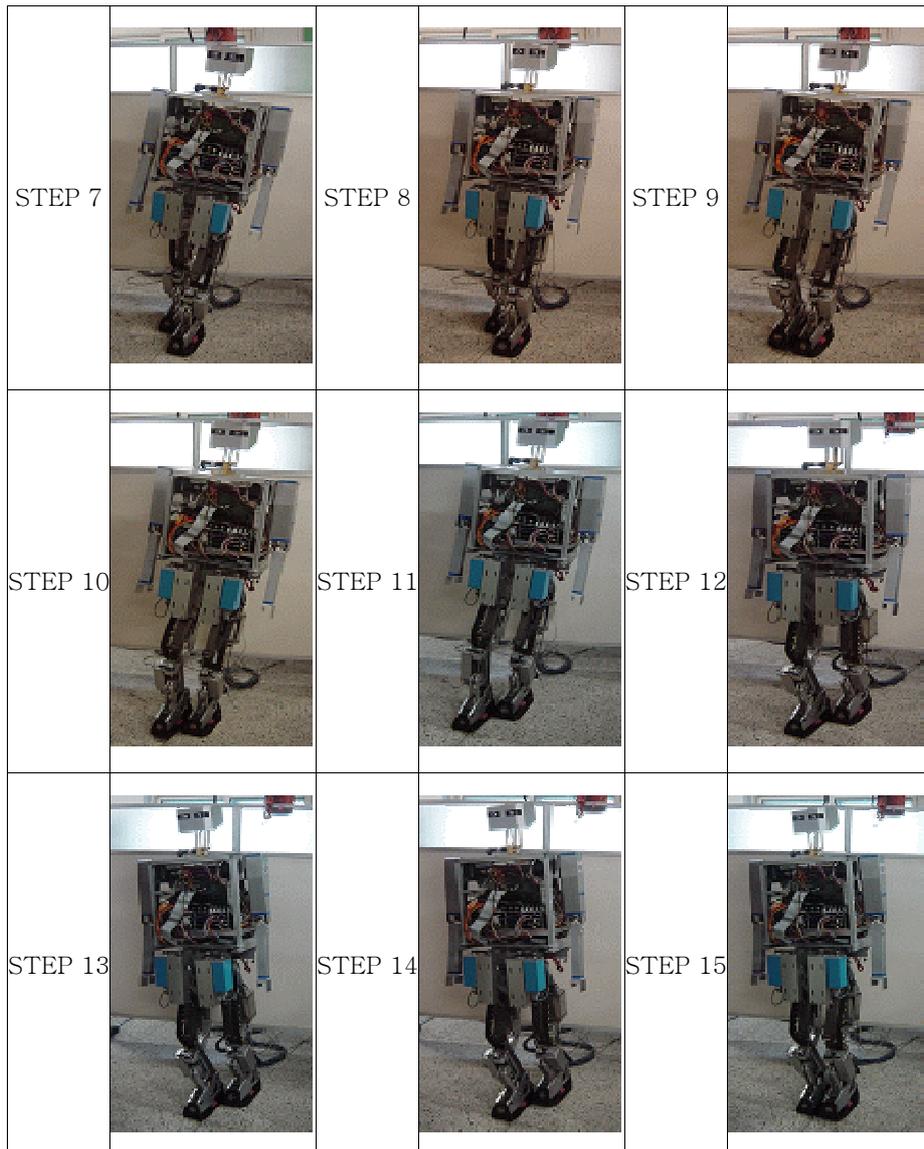


Fig. 5.22 Walking test of the BWR using sensors including vision sensor

### 5.3. 보행실험 및 고찰

본 논문의 보행 실험은 센서융합을 이용하여 보행 로봇의 자율 보행을 위해 발바닥의 착지 유무 및 장애물의 검출과 로봇의 균형을 잡기 위한 것이다. Fig. 5.23 은 이족 보행 로봇에 부착된 센서 통합 보드를 나타낸 것이다.

초음파 센서는 골반 부분에 부착되어 있으며, 장애물을 3m 까지 측정 가능하다. Fig. 5.24 는 초음파 센서의 데이터 값을 나타낸 것이며 이족보행 로봇이 보행 중 약 1420mm 에 장애물이 감지되면 Mobile Computer 에서 장애물을 감지하여 일정한 거리 만큼 보행을 하도록 명령을 내리고, 보행이 끝나면 정지한다. 이 그래프에서는 약 12sec 동안 1100mm 거리가 되면 보행을 정지하도록 나타낸 그래프이다.

자이로 센서는 로봇의 몸체 안에 부착 되어있으며, 측정 가능한 중력 가속도는  $2 \times 10^3 g$  로 60Hz 의 분해능을 가진다. Fig. 5.25 는 자이로 센서의 데이터를 나타낸 것이며 이 그래프에서 8sec 까지는 이족보행 로봇이 보행중에 오른발을 지지하고 왼발을 내밀 때 로봇 상체가 오른쪽으로 기울어지는 각도를 측정한 것이고, 오른발을 지지하며 상체를 앞으로 이동할 때 기울어진 각도가 5 초 동안 10 도를 유지한다. 그리고 8sec ~ 13sec 동안 왼발을 지지하며 오른발을 당기면 기울어진 상체가 원래 자세로 복원되는 각도를 측정한 것이다. 따라서 보행중 10 도 이상 기울어지면 Mobile Computer 는 관절 구동기를 제어하여 기울기를 보정하며 보행을 한다. Fig. 5.26 은 이족보행 로봇의 보행 중 자이로 센서로 측정한  $10^\circ$  기울어진 모습을 나타낸 것이다.

Fig. 5.27 은 이족보행 로봇의 보행 중의 초음파의 거리 데이터와 자이로 센서의 기울기 데이터를 융합하여 나타낸 것이다. 이족보행 로봇의 보행시 좌우 기울기가  $10^\circ$  정도 기울어진 것을 알 수 있다.

압전센서는 발바닥에 부착 되었으며, 적은 힘으로 출력 전압(5V)를 내 보낸다. Fig.5. 28 은 압전센서의 데이터를 나타낸 것이며, 로봇이 보행중에 발바닥을 착지하

면 발바닥에 부착된 압전센서가 압력을 받는다. 그러면 압전센서는 저항이 발생하고 압전센서 보드를 통해 전압을 발생시킨다. 이 실험에 사용된 압전센서는 1000g(1kg)이상의 압력을 받으면 5V의 전압을 발생시킨다. 따라서 이족보행 로봇의 무게가 90kg 이므로 보행시 로봇의 착지 유무를 Fig. 5.20 (6) 통하여 알수 가 있다.

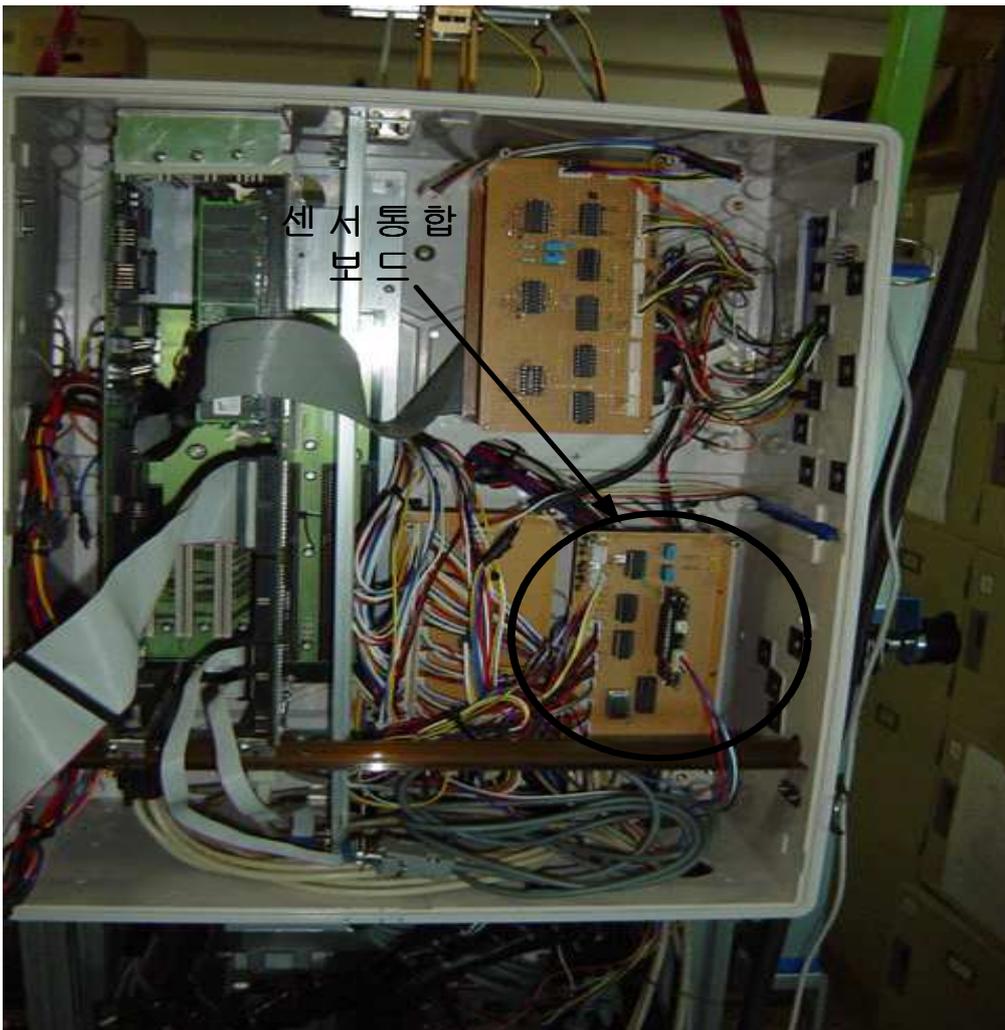


Fig. 5.23 Sensor fusion board attached on the BWR

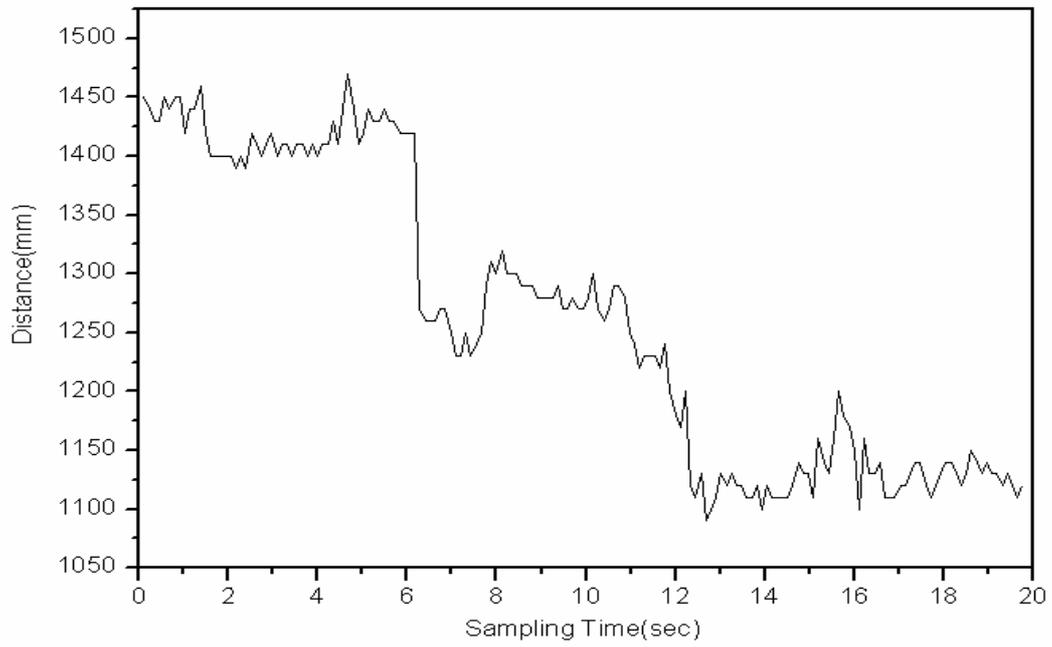


Fig. 5.24 Walking test data of the BWR using ultrasonic sensor

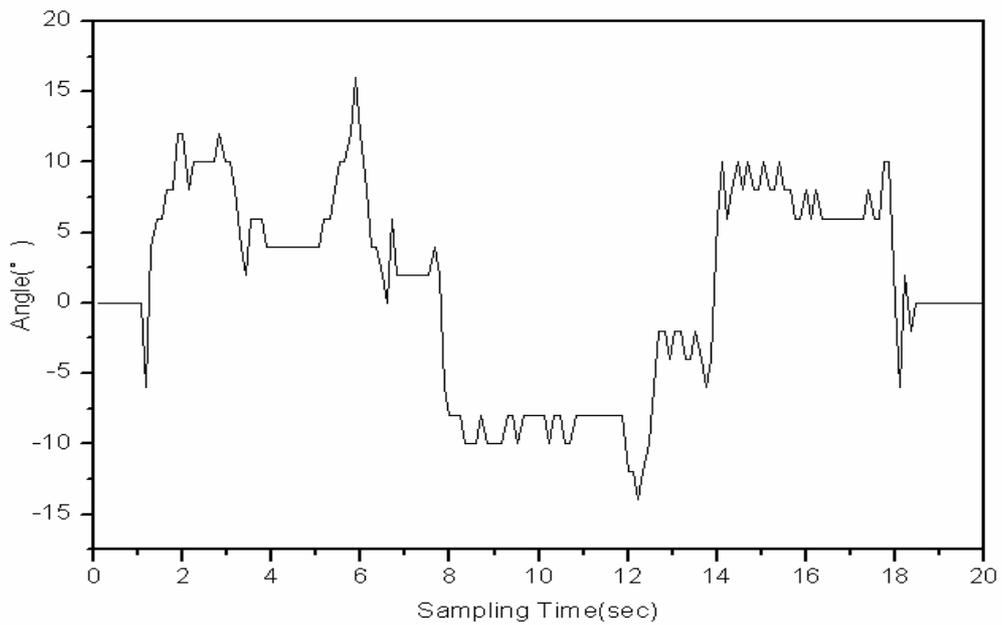


Fig. 5.25 Walking test data of the BWR using gyro sensor



Fig. 5.26 The leaned appearance by 10 degrees while BWR is walking

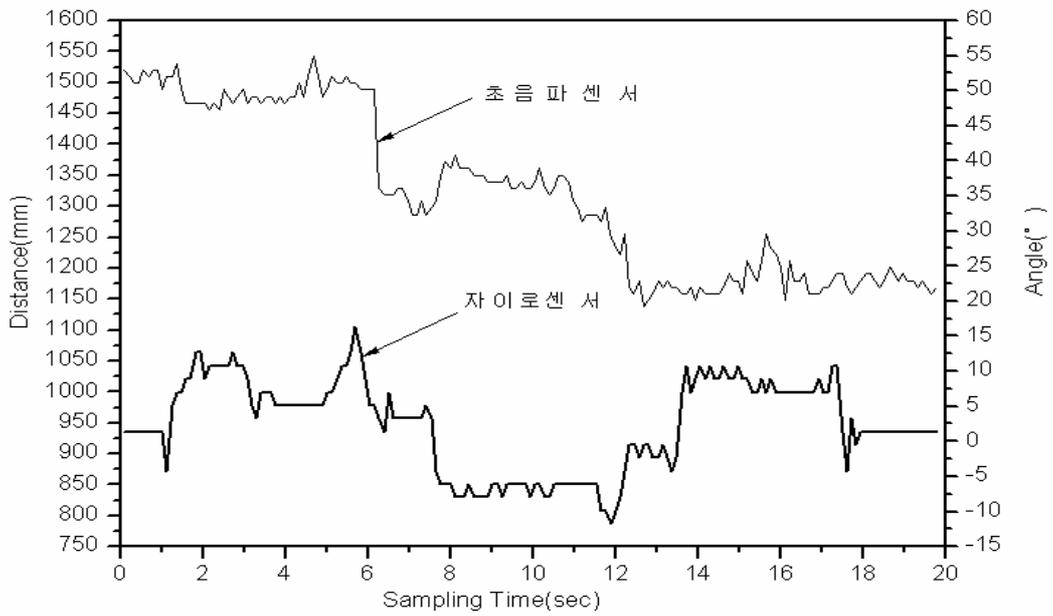


Fig. 5.27 Test ultrasonic sensor and gyro sensor fusion data of the BWR

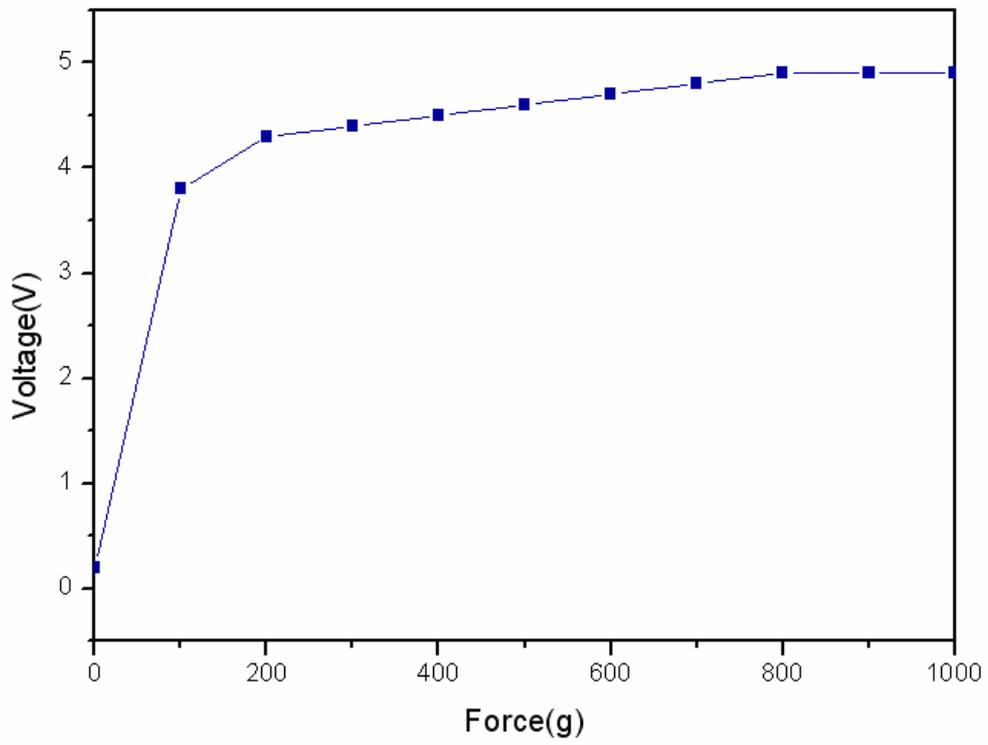


Fig. 5.28 Walking test data of the BWR using piezoelectric sensor

## 제 6 장 결론

본 논문에서는 지능로봇 및 자동화 실험실에서 개발된 이족보행 로봇의 지능화를 위하여 다양한 센서 시스템을 구성하여 이족보행 로봇에 적용하였다. 즉 개발된 이족보행 로봇이 미지의 환경 내에서 지능적으로 원활한 자율 보행을 하기위해 각종 센서들이 사용되었으며, 각각의 센서들 중에서 물체의 거리 측정 및 장애물을 회피하기 위해 초음파 센서, 적외선 센서를 사용하였다. 주변 환경이나 대상 물체의 탐색을 위해 비전 시스템이 사용되었으며, 이족보행 로봇의 자세를 정확하게 제어하기 위해 자이로 센서가 사용되었다. 또한 보행 시 로봇의 발바닥 착지 유무 및 바닥의 기울기 검출을 위해 압전 센서를 사용하였다. 위와 같은 센서들은 노이즈나 환경의 조건에 따라 측정값의 오차를 가지게 되고, 작업 환경에 따라 오차를 가지게 된다. 이런 센서들의 단점을 보완하기 위해 센서 데이터를 융합하여 잡음이나 오차에 대한 영향을 최소화 하였으며, 다중복합 센서 시스템을 사용하여 데이터를 비교 실험을 수행하였다.

물체를 감지하기 위한 적외선 센서는 양 발의 착지 시 평행을 유지 할 수 있었고, 초음파 센서는 2550mm 이내에서 물체의 거리 측정 및 장애물을 인식하여 잘 회피하였다. 자세 제어를 위한 자이로 센서는 로봇의 균형을 잘 잡아주었고, 압전 센서는 보행 시 로봇의 발바닥 착지 유무를 잘 나타냈다.

이러한 다중 복합 센서 시스템을 사용하여 지능형 이족보행 로봇의 보행을 인간의 보행과 유사한 형태의 보행을 목표로 이론과 실험적으로 접근하였으며, 각각의 센서에서 획득한 데이터를 가지고 지능형 이족보행 로봇이 보다 안정적으로 보행할 수 있었다.

본 실험실에서는 향후 과제로 좌·우 방향을 회전할 수 있는 회전 관절과 균형 관절을 추가한 기구부의 향상과 보다 정확한 물체감지를 위한 비전 시스템과 기타 센서들을 더 첨가 하여 로봇 스스로 작업을 할 수 있는 완벽한 지능을 가진 지능형 이족보행 로봇을 개발하고자 한다.

## 참고 문헌

- [1] A. Takanishi, M.Ishida, Y. Yamazaki, I. Kato, "The Realization of Dynamic Walking by The Biped Walking Robot WL-10RD ", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.3, No.4, pp.325-336, 1985.
- [2] F. Gubina, H. Hemami., R. B. McGhee, "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion", IEEE trans. On Biomed. Engineering, Vol, BME-21, pp. 102-108, 1974.
- [3] C. Leslie Golliday, Hooshang Hemami, "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls." IEEE, Transactions on Automatic Control, Vol. AC-22, No.6, pp.963-972, 1977.
- [4] J. Furusho, A. Sano, "Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped." Int. J. Robot. Res., Vol.9, No. 2, pp.83-98, 1990.
- [5] T. T. lee and J. Liao, "Trajectory Planning and Controll of a 3-link Biped Robot", IEEE Robotics and Automation, pp.820-823, 1988.
- [6] C. L. Golliday, H. Hemani, "An Approach to Analyzing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls", IEEE, Transactions on Automatic Control, Vol.AC-22, No.6, pp.963-972,1977.
- [7] S. H. Lim and J. G. Kim, "Biped Locomotion with Mechanical Compliance", (In Korea) Korea Robotics and Automation Workshop Conference, pp. 21-25, 1992.
- [8] Kawamura S. et al. "Realization of Biped Locomotion by Motion Pattern Learning ", (In Japanese) Journal of Robot Society of Japan Vol.3, No.3, pp.177-180, 1985.
- [9] C. L. Shih, "Analysis of the Dynamics of a Biped Robot with Seven Degrees of Freedom", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3008-3013. 1996.
- [10] K. J. Waldron, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion Under Known External Force", Advanced Robotics, pp.299-310, 1989.
- [11] T. A. Egusa. Y, Tochizawa. M, Takeya. M, and Kato. I, "Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized with Trunk Motion", RoManSy 7: Proc. Seventh CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, A.Morecki, G.Bianchi and KoJaworek, Eds. Hermes, Paris, pp.68-79, 1990.

- [12] J.I. YAMAGUCHI, A. TAKANISHI, and I. KATO, "Development of a Biped of a Biped Walking Robot Compensating for Three-axis Moment by Trunk Motion", IEEE/RSJ Internal Conference on Intelligent Robots and System, pp.561-566. 1993.
- [13] M. Yamada, J. Furusho, A. Sano, "Dynamics Control of Walking Robot with Kick-Action", ICAR, pp.405-412, 1985.
- [14] Eric R. Dunn, Robert D. Howe, "Toward Smooth Bipedal Walking", IEEE, pp.2489-2494, 1994.
- [15] S. Kajita and K.Tani, "Experimental Study of Biped Dynamic Walking", IEEE Control System Magazine, Vol.16, No.1, pp.13-19, 1996
- [16] T. Fukuda, Y. Komata, T. Arakawa, "Recurrent Neural network with Self-adaptive Gas for Biped Locomotion Robot", IEEE, pp. 1717-1714, 1997.
- [17] J. Hu, J. Pratt, G. Pratt, "Adaptive Dynamic Control of a Bipedal Walking Robot with Radial Basis Function Neural Networks", Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and systems, pp. 400-405, 1998.
- [18] 김창부, 조현석, "이족보행로봇의 궤적의 최적화 계획에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 15권 제 3호, pp.157-167, 1998
- [19] Jin'ichi Yamaguchi, Daisuke Nishino, Atsuo Takanishi, "Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Driven Joints", International Conference on Robotics & Automation Proc. Of IEEE, pp.2022-2029, 1998
- [20] 권영도, 이진수, "이동 로봇의 실시간 충돌회피", 한국자동제어학술회의 논문집, pp.434-439, 1993
- [21] "신경회로망을 이용한 이동로봇의 이동 장애물 충돌회피", Proc. 12<sup>th</sup> KACC, pp.1238-1241, 1997
- [22] 한영준, 한헌수, "2쌍의 초음파센서를 이용한 측정면의 위치측정 및 종류 분류 기법", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제6호, pp. 747-752, 1998
- [23] *Ömür* Bozma and Roman Kuc, 1991, "Building a sonar map in a specular environmet using a single mobile sensor", IEEE Trans. on Pattern Analysis and machine Intelligence, December, vol. 13, no 12.
- [24] 장도식, 이만희, 부창완, "Line Scan Camera를 이용한 검사 시스템에서의 새로운 영상 처리 알고리즘", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3권, 제4호, pp. 406-

414, 1997

[25] Fujiwara, K., et al, "Development of Guideless Robot Vehicle", Proc. 11th Int. Sysmp. On Industrial Robots, Oct. 1981, pp. 203-210.

[26] Chung, H., Ojeda, L. and Borenstein, J., 2001 "Sensor fusion for Mobile Robot Dead-reckoning with a Precision-calibrated Fiber Optic Gyroscope" Submitted for publication in IEEE International Conference on Robotics and Automation , May 21-26, pp.3588-3593.

[27] Lindsay Kleeman and Roman Kuc, "Mobile robot sonar for target localization and classification", The International Journal of Robotics Research, vol. 14, no.4, pp.295-318, 1995.

[28] Ren C. Luo, Min-Hsiung Lin, and Ralph S. Scherp, "Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 4, no. 4, pp. 386-396, 1988.

[29] Julliere, M., Marce,L.and Place, H., 1983,"A Guidance System for a Mobile Robot", Proceedings of 13th International Sysposium on Industrial Robots,pp.58-68.

## 감사의 글

실험실에 들어 와 생활한지 4 년이라는 긴 시간이 흘렀습니다. 지난 4 년 동안 실험실에서 참으로 많은 것을 배웠습니다. 항상 부족한 저를 제자로 때로는 동생처럼 이끌어 주시고 아낌없는 조언을 해 주셨던 저의 지도 교수님이신 최 형식 교수님에게 진심으로 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 바쁘신 와중에도 부족한 저의 논문을 세심하고 정성어린 마음으로 보아해 주신 왕 지식 교수님과 유 삼상교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

논문을 완성하기까지 정말 많은 도움을 주신 고마운 분들께 이렇게 글로써나마 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

저와 함께 실험실에서 수많은 밤을 지새우며 지능로봇 및 자동화 실험실 식구들, 지금은 사회에서 열심히 일하고 계시는 용현이형, 호식이형, 대원이형, 상혁이형 부족한 저를 열심히 가르쳐 주신 실험실 기둥이신 영식이형, 그리고 학부 때부터 같이 동고동락해온 결코 잊지 못할 이름들 정민이형, 창열, 정재, 경식이형, 바쁘다는 핑계로 많은 도움을 주지 못해서 항상 미안한 실험실 후배 창만, 무경, 규득, 창훈, 석봉, 정호, 주환, 막내 상준, 옆 실험실이의 종욱이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 저를 실험실로 이끌어주신 영상이형에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 실험에 많은 조언과 도움을 주신 조용성 선생님께도 감사의 마음을 전합니다.

멀리 서울에서 많은 도움주신 고모님들, 고모부님, 사촌형님, 형수님들, 누님과 매형들 모두 감사한 마음을 전하고 싶습니다. 그리고 언제나 옆에서 묵묵히 응원한 길만, 은숙, 상재, 민재, 승규, 명훈, 우람, 태은, 원섭, 병혁이게도 감사의 마음을 전합니다. 지면이 허락되지 않아 모두 이름을 통해 감사의 마음을 전하지 못한 점 죄송스럽게 생각합니다.

일찍 취업해서 열심히 일하는 사랑스런 나의 동생 민경이, 멀리 경산에서 열심히 공부하고 있는 동생 성신이 와도 기쁨을 나누고 싶습니다.

지금까지 물심양면으로 자식을 뒷바라지 하시며 사랑으로 키워주신 부모님께 진심으로 머리 숙여 감사의 절을 올립니다. 그리고 부모님의 한없는 사랑에 이 논문을 바칩니다.

2003 년 12 월 27 일

김 유 신