



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2016년 2월  
박사학위논문

# 개인용 이동수단의 모바일 역진자 실시간 자세제어에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

임성빈

# 개인용 이동수단의 모바일 역진자 실시간 자세제어에 관한 연구

A Study on the Real Time Attitude Control of Mobile  
Inverted Pendulum for Personal Mobility

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

임성빈

# 개인용 이동수단의 모바일 역진자 실시간 자세제어에 관한 연구

지도교수    정 상 화

이 논문을 공학박사학위 논문으로 제출함.

2015년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

임 성 빈

# 임성빈의 박사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교    교수    장완식 印

위    원    조선대학교    교수    정재강 印

위    원    조선대학교    교수    성윤경 印

위    원    전주비전대학교    교수    정영득 印

위    원    조선대학교    교수    정상화 印

2015년 12월

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	IV
LIST OF FIGURES .....	V
NOMENCLATURE .....	VII
ABSTRACT .....	IX
<b>제 1 장 서 론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구배경 및 목적 .....	1
제 2 절 국내외 연구 동향 .....	3
제 3 절 연구방법 및 내용 .....	5
<b>제 2 장 이론적 고찰</b> .....	<b>8</b>
제 1 절 동역학 이론 .....	8
제 2 절 역진자 전달함수 고찰 .....	9
제 3 절 PID 게인 추정값 설계 .....	14

<b>제 3 장 시스템 구성</b> .....	17
제 1 절 6축-가속도/자이로센서 .....	17
제 2 절 블루투스 통신 .....	20
제 3 절 모터 드라이버 .....	23
제 4 절 ATmega328 .....	26
제 5 절 조향시스템 .....	28
<b>제 4 장 제어기 설계</b> .....	30
제 1 절 센서 필터링 .....	30
1. 반복 데이터 처리 .....	30
2. 상보필터 고찰 .....	31
3. IPSS-FA 모델 .....	33
제 2 절 PID-close loop .....	35
제 3 절 PWM 출력 .....	37
제 4 절 메인 제어 프로그램 .....	40
<b>제 5 장 실험 및 분석</b> .....	45

제 6 장 결 론 ..... 59

참고문헌 ..... 60

부 록 ..... 64



## LIST OF TABLES

Table 2-1 Transfer function parameter .....	13
Table 2-2 Design of PID gain range .....	16
Table 3-1 MPU6050 specification .....	18
Table 3-2 DC motor drive specification .....	23
Table 3-3 DC motor driver control condition .....	25
Table 3-4 ATmega328 specification .....	26
Table 4-1 Designation of control variable and constant .....	41
Table 5-1 Experimental conditions .....	46

## LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Segway .....	4
Fig. 1-2 PUMA (GM, Segway) .....	4
Fig. 1-3 Schematic diagram of two-wheeled mobile .....	5
Fig. 1-4 Contents composition .....	7
Fig. 2-1 Relationship of dynamic and mechatronics .....	8
Fig. 2-2 Inverted pendulum dynamics modeling design of the two-wheeled mobile .....	9
Fig. 2-3 Response time versus percent overshoot .....	14
Fig. 2-4 PID gain predict of matlab design .....	15
Fig. 2-5 Condition of PID step response .....	15
Fig. 3-1 MPU6050 6axis-Acceleration/Gyro sensor .....	17
Fig. 3-2 nRF24L01 electric circuit .....	21
Fig. 3-3 nRF24L01 block diagram .....	21
Fig. 3-4 Bluetooth install .....	22
Fig. 3-5 L298 DC motor driver .....	24
Fig. 3-6 DC motor driver circuit .....	24
Fig. 3-7 Atmega328 pin layout .....	27
Fig. 3-8 Degine of aduino firmware picture .....	27
Fig. 3-9 Joy stick .....	28
Fig. 3-10 Receive-body part flow chart .....	29

Fig. 4-1 Gyro/Acceleration degree diagram .....	31
Fig. 4-2 IPSS-FA model program flow chart .....	34
Fig. 4-3 Configuration of PID controller .....	35
Fig. 4-4 Pulse and pulse width .....	37
Fig. 4-5 Various PWM signal on duty cycle .....	38
Fig. 4-6 PWM control program .....	39
Fig. 4-7 Main control flow chart .....	40
Fig. 4-8 Main program loop control flow chart .....	42
Fig. 4-9 Total signal process diagram .....	43
Fig. 5-1 Control program upload .....	44
Fig. 5-2 Acquisition of sensor signal .....	44
Fig. 5-3 Gain: P=20, I=0.1, d=200 .....	47
Fig. 5-4 Gain: P=20, I=0.1, d=500 .....	49
Fig. 5-5 Gain: P=20, I=0.15, d=800 .....	51
Fig. 5-6 Gain: P=20, I=0.2, d=800 .....	53
Fig. 5-7 Gain: P=80, I=0.1, d=800 .....	55
Fig. 5-8 Gain: P=20, I=0.1, d=800 .....	57

## NOMENCLATURE

$I$	Moment of inertia of the mass center
$M$	Mass of the body
$m$	Mass of the pole
$l$	Distance of the pole
$x_p$	Distance between the mass center of x-axis
$y_p$	Distance between the mass center of y-axis
$\delta x$	Variation of x of displacement
$\delta y$	Variation y of displacement
$x$	Displacement of x-axis
$\dot{x}$	Velocity of x-axis [m/s]
$\ddot{x}$	Acceleration of x-axis [m/s <sup>2</sup> ]
$y$	Displacement of y-axis
$\dot{y}$	Velocity of y-axis [m/s]
$\ddot{y}$	Acceleration of y-axis [m/s <sup>2</sup> ]
$\theta$	Pole angle from vertical [rad]
$\dot{\theta}$	Pole Rotation velocity [rad/s]
$\ddot{\theta}$	Pole Rotation acceleration [rad/s <sup>2</sup> ]

$b$	Friction forces between the ground and the wheels
$g$	Gravity
$F$	Initial force acting on body
$P$	Reaction forces between the perpendicular
$N$	Reaction forces between the horizontal direction
$K_p$	Proportional gain
$K_i$	Integral gain
$K_d$	Derivative gain

## ABSTRACT

### **A Study on the Real Time Attitude Control of Mobile Inverted Pendulum for Personal Mobility**

Im, Sung Been

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

In these days, a number of systems become complicated according to customers' demands. At the same time, it is now getting difficult to meet a variety of demands with the existing control theories as the non-linearity in the systems increases. The purpose of this research is to model the nonlinear attributes and design the fast and precise controller, which can maintain stability when it reaches the target. The controller should also be able to come back to the target from the unstable conditions caused by random external input.

In this thesis, two-wheeled transportation has been designed as follows. The inverted pendulum control theory was utilized to design 6 axis-acceleration and gyro sensor, which are integrated as one. A motor controller for direction setting using a joy stick and operation was also manufactured. Because transportation system is limited by filtering and mathematization of sensor signal, system is unstable according to in-external condition of that. The PID value should be adjusted to stabilize the system according to the attributes of the real-time transportation.

The stable driving method utilizes non-linear control algorithm to design a controller, which finds the PID gain value by analyzing the drive speed for the robot's drive stability and information obtained from the steering sensor. The attitude control on the two-wheeled robot through the analysis suggests a possibility of applying this onto other robots' attitude control and various systems. Since the robot is operated vertically on two wheels, there must be a consideration for errors to drive it on vertical attitude. These errors are measured from the angles, drive algorithm and sensor signals.

The two-wheeled transportation was handled stably through the sensor-signal filtering and controller algorithm design. In addition, the sensor only uses 6-axis acceleration and gyro sensor in order to get precise an

gles. In order to maintain the vertical attitude of the two-wheeled robot, a system should be designed to compensate for the changes of angles and correspond to it properly. Through the experiment, the stability of the personal mobility has been affirmed through the analysis on the sensor state according to the PID control gain.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경 및 목적

오늘날 내연기관의 이송수단으로 인해 지구 대기환경 오염, 소음의 심각성이 높아지고 있으며, 화석연료 고갈화로 대체이송수단 방법을 고려하여야 한다. 이에 최근에는 연료전지 또는 전기자동차가 상용화 단계에 있으나, 기존 차량에 비해 높은 가격으로 인하여 대중화 되기 어렵다. 따라서, 가격이 저렴하고 편리하게 이용할 수 있는 이동수단이 필요하다<sup>[1][2]</sup>.

반도체 전자기술의 발전으로 자이로센서, 바퀴구동용 모터, 마이크로컨트롤러 및 제어시스템으로 두바퀴 이동수단인 세그웨이가 개발되었다<sup>[3][4]</sup>. 세그웨이는 이송장치 동체의 양 옆에 바퀴를 배치함으로써, 피치(pitch) 방향으로 무게중심의 이동을 인지하여, 앞뒤로 넘어지지 않게 제어함과 동시에 그 방향으로 이동할 수 있도록 되어 있다. 이것은 좁고 복잡한 도로를 쉽게 원하는 장소로 이동 할 수 있으며, 배터리에 의한 친환경 이동수단이다<sup>[5]</sup>. 크기도 작아 공간적 제약이 없으며, 좁은 공간에서도 회전이 가능하다. 일반적인 세 개, 네 개의 바퀴방식의 구조보다 단순하지만, 두 바퀴이므로 넘어지지 않고 균형을 유지하기 위해서는 까다로운 이론과 적용기술이 필요하다. 그래서 역진자를 이용한 많은 자세유지 기술들이 나오고 있다<sup>[6][7]</sup>.

기존 두바퀴 이동수단의 경우 2개 또는 3개의 센서를 이용하므로, 세그웨이에 내장된 배터리가 약해질 경우 자세 유지에 충분한 동력이 모자라 세그웨이가 넘어지는 등 안전사고가 발생하고<sup>[8]</sup>, 다중 센서의 사용으로 오류발생시 문제 해결에 취약하다. 오류 발생시 즉각적인 대응이 미흡하고, 각각의 센서를 연결하기 위해 부피도 커지며, 다수의 고가 센서를 사용하므로 가격이 비싼 단점으로 인해 대중적으로 사용하기에 어려움이 많다. 자세유지를 하기 위하여 기존 두바퀴 이동수단의 2개 또는 3개의 센서의 개수보다 적은 1개의 6축-가속도/자이로 센서로 자세유지 시스템을 설계하였다. 1개의 센서를 사용하므로 오류발생에 대한 대처가 쉽고, 금액 부담이 적고, 내장된 배터리를 더욱더 오래 사용 할 수 있다. 6축-가속도/자이로센서 신호에 중력변화정보를 수치화하면, 각도의 변화량을 측정하여 무게중심의 균형을 조절하려한다. 여기서 자이로센서에서는 시간에 따라 오차가 발생하는데 이러한 오차를 줄이기 위해 반복 데이터 처리 알고리즘



(recursive data processing algorithm)과 상보필터의 특성을 이용하여 IPSS-FA(invert pendulum single sensor - filtering algorithm)모델을 설계하였다. 동역학에서 시스템은 제어 대상의 정확한 수학적 모델링이 필요하다. 그러나 복잡하고 다양한 수학적 모델링은 비선형화이며, 이것을 선형화한다고 해도 실시간으로 외부환경의 변화에 대처하며 안정된 자세유지를 한다는 것은 어려움이 따른다. 마이크로컨트롤러의 사용은 불필요한 기능은 없애고, 간단한 프로그램을 사용하여 반응 및 제어속도를 안정된 수직상태를 유지하기 위한 프로그램을 구성하기 위함이다. 고전적 제어방법인 PID제어이론으로 6축-가속도/자이로센서의 정보를 시간에 따른 미분과 적분으로 필터링 알고리즘 결과 값을 PID close-loop제어로 자세유지를 위한 모터구동의 PWM출력으로 변환하는 시스템을 설계하였다<sup>[9-12]</sup>. 이는 진행하고자 하는 방향정보와 현재 각도를 비교하여 안정적인 자세를 유지하며 이동하는 시스템으로서 두바퀴 이동수단 시스템의 수직상태를 유지하는 게인 값을 구하여, 최대한 안정된 자세를 유지하기 위한 시스템이다.

## 제 2 절 국내외 연구동향

로봇의 상용화를 위해서는 소비자들의 요구에 부합하여야 한다. 국내 Mobile 로봇에 대한 연구는 내비게이션 시스템을 갖춘 장애물 회피 이동 메커니즘에 의한 지능형 모바일의 형태로 발전해 왔으며, 최근까지 지능형 로봇에 대한 관심이 높아 왔다. 최근 Two wheel mobile balancing robot의 기술과 동일한 세그웨이(segway)의 유입으로 역진자(invert pendulum)를 이용한 자세 제어 연구가 진행되고 있다<sup>[13]</sup>. 국내 기업에서 Two wheel mobile balancing robot의 산업화를 위하여 기술개발에 박차를 가하고 있으며, 동시 위치 지정 및 지도 작성(SLAM; Simultaneous Localization And Mapping)기술로서, Mobile robot이 자신의 위치를 추적하는 동안 국부적인 주변 지역의 지도를 제작하여 동적 환경을 제거하는 알고리즘이 연구되고 있다.

1999년 Dean Kamen의 Fig. 1-1과 같이 모바일 역진자 시스템을 세그웨이에 적용하여 서서 타는 이륜 차량 세그웨이가 개발되었다. 서서 타는 이륜 차량 세그웨이는 자이로 센서에 의하여 자율 제어 기능을 갖추고 액셀이나 브레이크의 조작 없이 체중 이동만으로 부드럽게 출발과 정지를 할 수 있어 작은 회전반경의 조작성을 가지고 있다. 이는 전기 충전식으로 환경오염을 줄이고, 근거리 이동이 편하여 개인 이동수단으로 2001년부터 각광받아왔다. 세그웨이는 세그웨이의 자세 제어 분야에서 한발 더 나아가 에너지 효율을 높이는 연구를 진행 중에 있으며, 2025년까지 세그웨이는 시민 한면 당 이산화탄소 배출량을 30%이상 삭감하는 것을 목표로 세그웨이 연구 개발 중에 있다<sup>[14]</sup>. MIT에서는 복도를 걷고 문을 여는 Two wheel mobile balancing robot이 개발되었고, 카네기 멜론 대학에서는 축구 선수 Two wheel mobile balancing robot을 연구하였으며 샌디에고 신경과학 연구소 Einar Gall에서는 2050년까지 Two wheel mobile balancing robot의 축구 대회를 통하여 Two wheel mobile balancing robot에 관하여 연구 중에 있다. 2009년에는 GM, Segway사에서 18개월간 공동 연구 개발 끝에 Fig. 1-2과 같이 퍼스널 자동차인 세그웨이 PUMA(Personal Urban Mobility & Accessibility) 시제품을 발표하였다. 푸마(PUMA)는 1인용 세그웨이와 마찬가지로 두 바퀴로 움직이지만, 두 사람이 앉을 수 있도록 운전석과 조수석 등 2개의 좌석과 작은 보조바퀴가 앞뒤로 부착돼 있다. 무게는 135kg이며 리튬 이온 배터리를 사용하여 1회 충전으로 40~56Km까지 주행이 가능하고, 최고 속도는 56Km/h에 이르러 초경량화 및 해외 원유 의존도를 줄일 수 있는 편리한 이동수단이다. 이와 같이 각 학교와 연구 기관별로 조금씩 연구 방향이

다르나 세그웨이에 대해 활발하게 연구가 진행 중에 있다<sup>[15]</sup>.



Fig. 1-1 Segway



Fig. 1-2 PUMA (GM, Segway)

### 제 3 절 연구방법 및 내용

세그웨이는 기본적으로 타고 있는 사람이 움직이는 방향으로 이동한다. 전체 시스템의 무게중심의 이동에 따라 전.후.좌.우 방향으로 이동한다. 탑승한 사람이 무게중심과 근접하면 정지하는 구조이다. 본 논문에서는 블루투스 무선통신을 이용하여 방향전환을 하도록 설계하였다. Fig. 1-3은 센서신호 필터링, 제어출력 알고리즘을 실험하기 위해 설계한 두바퀴 이동수단 장치의 구조도이다.

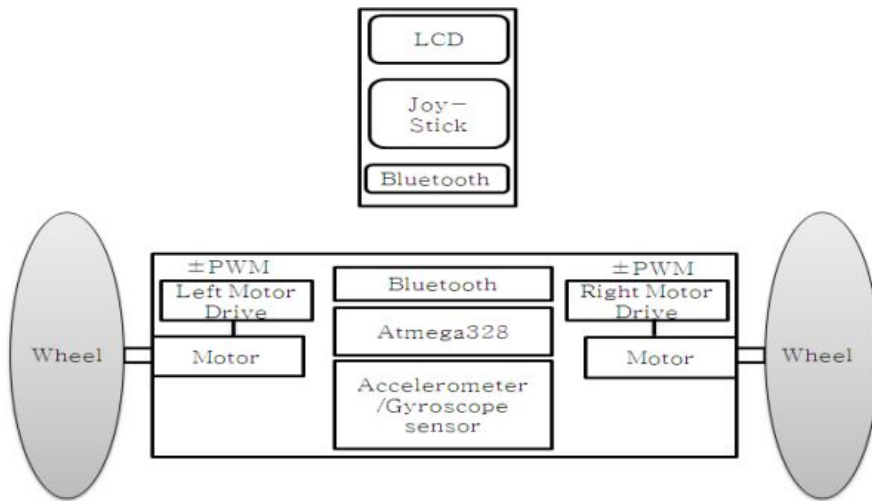


Fig. 1-3 Schematic diagram of two-wheeled mobile

동적 자세유지 알고리즘을 통해 센서와 마이크로컨트롤러는 최소한으로 하였다<sup>[16][17]</sup>. 이것은 여러 개의 센서를 활용하면 안정된 자세를 유지하는데 도움이 될 수 있지만, 여러 개의 센서중 어느 한부분이 오류가 발생하거나 고장이 나면 예상에 없던 일이 발생하여 사고의 원인이 될 수 있기 때문이다. 그래서 제안한 방법을 기준으로 실시간 이동수단의 구조 및 제어기법을 다루고자 한다. 자이로센서는 특성상 누적오차가 발생하기 때문에 반복 데이터 처리 알고리즘과 상보필터의 특성을 조합한 IPSS-FA을 설계한다<sup>[18][19]</sup>. 비선형 정보를 선형화하여 가장 좋은 PID 게인값을 얻어내 해당하는 이동수단만의 안정된 제어출력을 낼 수 있는 PID-close loop 제어알고리즘을 설계한다<sup>[20][21]</sup>. 한 개의 6축-가속도/자이로센서를 이용하여 균형된 자세유지형 두바퀴 이동수단 시스템

탐을 무게중심의 수직상태로 유지하는 각도정보를 만드는 것이 핵심이라고 할 수 있다.

본 논문의 구성으로 Fig. 1-4의 flow chart에 나타내었다. 1장에서는 본 연구배경 및 목적, 국내외 동향, 연구방법 및 내용에 대해 설명하였고, 2장에서는 연구하고자 하는 이동수단의 이론적 배경으로 동역학이론으로 비선형을 선형화 알고리즘 대해 설명하였다. 3장에서는 본 연구를 실험하기 위한 시스템 구성에 대해서 다루었다. 6축-가속도/자이로센서, 블루투스 통신, DC모터 제어 드라이버, 마이크로컨트롤러, 조향시스템의 시스템 구성에 대해 기술하였다<sup>[22]</sup>. 4장에서는 제어기 설계로서 센서 신호 필터링을 위한 반복 데이터 처리 알고리즘과 상보필터에 대해 고찰하였으며, PID-close loop 제어설계 방법과, PWM출력과 메인 제어 프로그램에 대해 설명하였다. 5장에서는 이동수단 장치에 PID 게인값에 따라 센서에서 반응하는 데이터를 추출하여 PID 게인에 대한 자세유지 제어에 대한 시간값의 변화량을 비교하였다. 6장에서는 본 연구에서 다른 연구방법과 실험을 통해 얻어진 결과에 대해 설명과 함께 향후 연구에 대해 설명하였다.

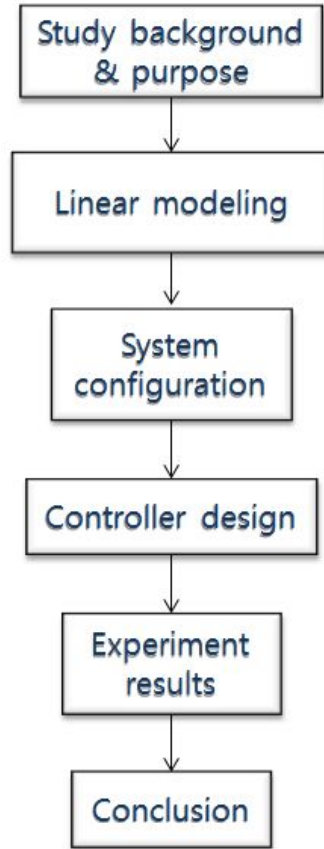


Fig. 1-4 Contents composition

## 제 2 장 이론적 고찰

### 제 1 절 동역학 이론

오늘날 사람들이 이용하는 자동차, 가전제품, 비행기, 의료기기, 로봇 등은 재료공학, 기계공학에서 다루는 메카니컬 분야와 전기, 전자, 반도체공학에서 다루는 센서, 유공압, 모터 등 구동기 분야와 IT공학에서 다루는 소프트웨어 분야가 Fig. 2-1와 같은 메카트로닉스라는 구조를 이루고 있다. 그중에서 메카니컬 분야에서 역학(mechanics)은 정역학(statics)과 동역학(dynamics)은 시간으로 나누고, 이것의 변화를 다루는 것에 따라 구분한다. 기구학(kinematics)은 운동을 해석하는 운동학이고, 동역학(kinetics)은 운동을 발생시키는 힘을 다루는 운동역학이다.

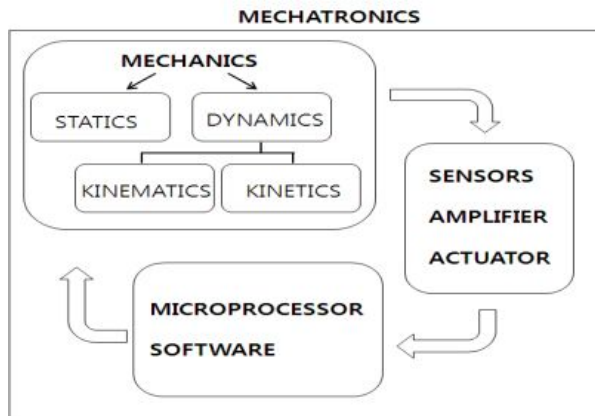


Fig. 2-1 Relationship of dynamics and mechatronics

## 제 2 절 역진자 전달함수 고찰

두바퀴 이동수단의 역진자 시스템에 대한 동역학 방정식을 유도하기 위해서, 시스템에 작용하는 모든 힘의 방향과 힘을 정의할 수 있는 자유 물체도를 설계한다. 두바퀴 이동수단의 역진자 시스템의 동역학 모델링은 힘과 에너지 이론방식에서 많이 사용하는 Lagrange이론을 적용하였다. Fig. 2-2에서와 같이 두바퀴 이동수단의 역진자 시스템에 대해 힘 방향에 대한 두 개의 수직과 수평의 반발력을 알 수 있다<sup>[23][24][25][26]</sup>.

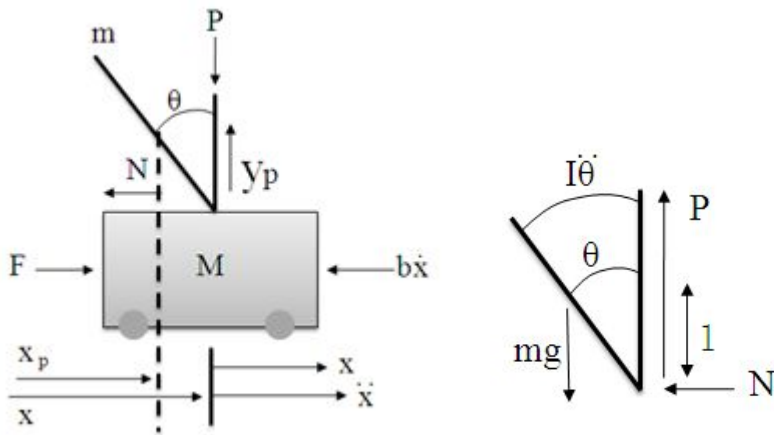


Fig. 2-2 Inverted pendulum dynamics modeling design of the two-wheeled mobile<sup>[13]</sup>

Fig. 2-2에서 몸체에 작용하는 힘 또는 모멘트는 외부의 힘(모터) F라 하고, 몸체에 작용하는 폴(pole)이 미치는 수평 반발력 N, 폴이 누르는 수직 반발력 P에 해당한다.  $x$ 는  $x$ 축의 몸체의 위치를 의미하고,  $x$ 축의 가속도는  $x$ 를 두 번 미분한 것이다.  $y$ 는  $y$ 축의 몸체의 위치를 의미하고,  $y$ 축의 가속도는  $y$ 를 두 번 미분한 것이다. 폴은 몸체에 붙어있어 중력방향의 병진운동으로 인해 떨어지는 경우는 없는 조건이므로, 그 힘을 Fig. 2-2의 오른쪽에 있는 P로 보고, 몸체를 밀려는 힘을 N으로 한다.

두바퀴 이동수단의 역진자가 F에 의해 움직인다면, 속도성분에 비례하는 마찰력과 기울어지는  $\theta$ 에 반대로 작용하는 힘은 뉴턴 방정식에  $F=Ma$  의해 식 (2-1)과 같이 표현할 수 있다.



$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= M\ddot{x} + b\dot{x} + N - F \\
 \ddot{\theta} &= \Sigma M = -Nl\cos\theta + Pl\sin\theta
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

$$\begin{aligned}
 x_p &= x - l\sin\theta \\
 y_p &= l\cos\theta \\
 N &= -m\ddot{x}_p \\
 P - mg &= m\ddot{y}_p
 \end{aligned}
 \tag{2-2}$$

여기서,  $x_p$ 는  $x$ 축의 질량중심까지의 거리,  $y_p$ 를  $y$ 축의 질량중심까지의 거리를 의미한다.  $l$ 은 폴의 길이,  $\theta$ 는 폴이 기울어진 각도,  $\ddot{\theta}$ 은 각가속도를 의미한다.  $b$ 는 몸체와 지면 사이의 마찰계수를 말한다.

속도와 가속도 특성에 의해

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_p &= \dot{x} - l\cos\theta\dot{\theta} \\
 \ddot{x}_p &= \ddot{x} + l\sin\theta\dot{\theta}^2 - l\cos\theta\ddot{\theta} \\
 \dot{y}_p &= -l\sin\theta\dot{\theta} \\
 \ddot{y}_p &= -l\ddot{\theta}\sin\theta - l\cos\theta\dot{\theta}^2
 \end{aligned}
 \tag{2-3}$$

식(2-3)을 식(2-2)에 대입하여 폴의 기울어지는 각도를  $\theta$ 라고 했을 때, 그 가속도 성분은  $\theta$ 자체가 가지는 마찰력과 무게중심을 폴의 정중앙이라고 하면  $N$ 과  $P$ 의 삼각함수로  $X$ 축과  $Y$ 축 방향으로 표현하면 식 (2-4)와 같은 수평력이 된다.

$$\begin{aligned}
 N &= -m[\ddot{x} + l\sin\theta\dot{\theta}^2 - l\cos\theta\ddot{\theta}] = -m\ddot{x} - ml\sin\theta\dot{\theta}^2 + ml\cos\theta\ddot{\theta} \\
 P - mg &= m[-l\ddot{\theta}\sin\theta - l\cos\theta\dot{\theta}^2] = -ml\ddot{\theta}\sin\theta - ml\cos\theta\dot{\theta}^2
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

여기서,  $M$ 과  $m$ 은 몸체의 질량과 폴의 질량을 말한다.

위의 두 개의 미분방정식을 식 (2-5)과 같이 두바퀴 이동수단 역진자 구동부의  $F$ 값

을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F - b\dot{x} + [-m\ddot{x} + ml\cos\theta\ddot{\theta} - ml\sin\theta\dot{\theta}^2] &= M\ddot{x} \\
 F &= (M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\sin\theta\dot{\theta}^2 - ml\cos\theta\ddot{\theta}
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

이번에는 수직력에 대해서 방정식을 보면 두바퀴 이동수단 역진자 기구부의 질량 중심에서 작용하는 힘을 식 (2-6)와 수직력 P값으로 정리하면 식 (2-7)와 같다.

$$M = I\ddot{\theta} = -Pl\sin\theta - Nl\cos\theta \tag{2-6}$$

$$P = ml\ddot{\theta}\sin\theta + ml\dot{\theta}^2\cos\theta + mg \tag{2-7}$$

수직력과 수평력에 대한 동역학 방정식을 구하면 식(2-8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 I\ddot{\theta} &= (mg - ml\ddot{\theta}\sin\theta - ml\cos\theta\dot{\theta}^2)l\sin\theta - (-m\ddot{x} + ml\cos\theta\ddot{\theta} - ml\sin\theta\dot{\theta}^2)l\cos\theta \\
 &= [mgl\sin\theta - ml^2\ddot{\theta}\sin^2\theta - ml^2\sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2] + [m\ddot{x}\cos\theta - ml^2\cos^2\theta\ddot{\theta} + ml^2\sin\theta\cos\theta\dot{\theta}^2] \\
 &= mgl\sin\theta - ml^2\ddot{\theta}(\sin^2\theta + \cos^2\theta) + ml\ddot{x}\cos\theta \\
 &= mgl\sin\theta - ml^2\ddot{\theta} + ml\ddot{x}\cos\theta
 \end{aligned}$$

그러므로,

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\sin\theta = ml\ddot{x}\cos\theta \tag{2-8}$$

위의 식은 비선형방정식이기 때문에 선형화하기 위해 수직 방향에 대하여  $\theta, \dot{\theta}$ 는 0에 가깝다고 하면,

$$\cos(\theta) = 1, \quad \sin(\theta) = \theta \tag{2-9}$$

식(2-5)와 식(2-8)에 식(2-9)에 대해 정리하면 식(2-10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (M+m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\theta} &= F \\
 (I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\theta - ml\ddot{x} &= 0
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

초기조건을 0으로 가정하고 Laplace 전달형식으로 표현하면

$$(M+m)[s^2X(s) + sx(0) - \frac{dx(0)}{dt}] + b[sX(s) - x(0)] - ml[s^2\theta(s) - s\theta(0) - \frac{d\theta(0)}{dt}] = F(s)$$

그러므로,

$$(M+m)s^2X(s) + bsX(s) - mls^2\theta(s) = F(s) \quad (2-11)$$

$$(I+ml^2)[s^2\theta(s) - s\theta(0) - \frac{d\theta(0)}{dt}] - mgl\theta(s) = ml[s^2X(s) - sX(0) - \frac{dx(0)}{dt}]$$

$$\Rightarrow (I+ml^2)s^2\theta(s) - mgl\theta(s) = mls^2X(s)$$

여기서,  $X(s) = s^2X(s) - sX(0) - \frac{dX(0)}{dt}$ ,  $\Phi(s) = s^2\theta(s) - s\theta(0) - \frac{d\theta(0)}{dt}$  이다.

$$X(s) = \frac{(I+ml^2)s^2\theta(s) - mgl\theta(s)}{mls^2} = \frac{I}{ml}\theta(s) + l\theta(s) - \frac{g}{s^2}\theta(s) \quad (2-12)$$

식 (2-12)을 식(2-11)에 대입하여 정리 하면

$$(M+m)s^2[\frac{I}{ml}\theta(s) + l\theta(s) - \frac{g}{s^2}\theta(s)] + bs[\frac{I}{ml}\theta(s) + l\theta(s) - \frac{g}{s^2}\theta(s)] - mls^2\theta(s) = F(s)$$

그러므로,

$$[(M+m)\frac{I}{ml} + ml]s^3\theta(s) + [b\frac{I}{ml} + bl]s^2\theta(s) - (M+m)gs\theta(s) - bg\theta(s) = F(s) \cdot s$$

Laplace의 전달함수로 표현하면

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{s}{[(M+m)\frac{I}{ml} + ml]s^3 + [b\frac{I}{ml} + bl]s^2 - (M+m)gs - bg} \quad (2-13)$$

즉, 식(2-13)은 비선형 방정식을 선형 방정식으로 풀어낸 전달함수의 결과이다.

Table 2-1은 역진자 전달함수에 들어가는 변수의 파라미터이다.

Table 2-1 Transfer function parameter

M	Mass of body	2.0 kg
m	Mass of pole	1.0 kg
b	Friction coefficient of wheel	0.1N/m/sec
l	Displacement of pole	10 cm
I	Moment of inertia of the mass center	0.01 kg · cm <sup>2</sup>
F	Initial force acting on body [N]	
x	Displacement of x-axis [cm]	
$\phi$	90° - Angle of body	
$\theta$	Angle of body	

### 제 3 절 PID 게인 추정값 설계

close-loop 제어를 위한 PID게인값은 제어시스템의 성능규격의 성질을 이용하여 제 2 절에서의 전달함수와 두바퀴 이동장치의 역진자 시스템의 기구적, 전기적 파라미터를 Matlab Simulink를 통해 적절한 게인을 얻어내어 Table 2-1의 요구하는 안정화시간에 따라 각도, 속도에 대한 게인값 범위를 설정하였다. 이것은 시뮬레이션과 실제 몸체가 움직이면서 발생하는 다양한 센서에러, 바퀴의 마찰, 전원공급의 불규칙성 등에 의해 최적의 값을 찾지 못하기 때문에 시행착오적 방법에 의해 최적의 제어 게인을 찾아 두바퀴 이동장치의 역진자 시스템이 수직 자세유지를 할 수 있는 시스템설계를 제시하는 것이다.<sup>[27]</sup>

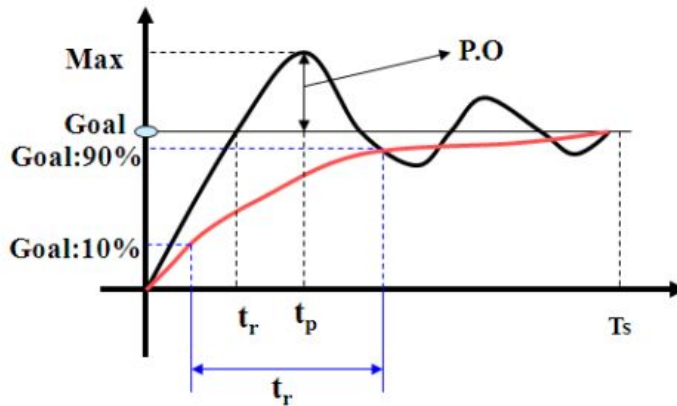


Fig 2-3 Response time versus percent overshoot

Fig 2-3은 적용하는 안정된 시간과 목표값에 대비 오버슈트의 요구조건 만족하는 비율로 시뮬레이션 결과를 통해 필요한 게인값을 찾는 것이다. 입력  $t_r, t_p$ 는 목표값을 몇 시간 뒤에 찾아갈 수 있는지의 신속성을 알 수 있고, P.O(percent overshoot)는 목표값을 찾아가는 적응성을 알 수 있다.

Fig. 2-4는 Matlab을 시뮬링크를 이용한 PID 게인 추정을 위한 설계이다. Fig. 2-5는  $t_s < 0.5s, P.O < 10\%$  요구조건 만족과  $t_s < 2s, P.O < 35\%$  요구조건 만족에 대한 matlab의 PID제어기의 반응을 실험한 그래프이다.

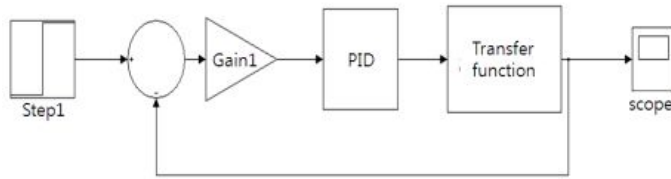
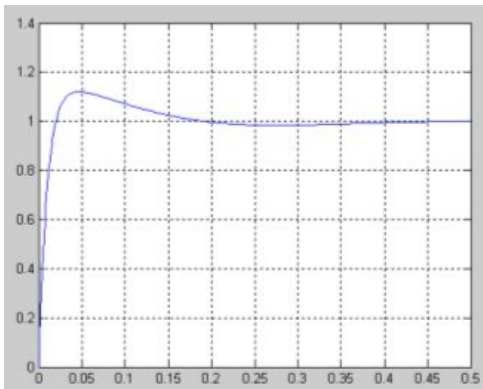
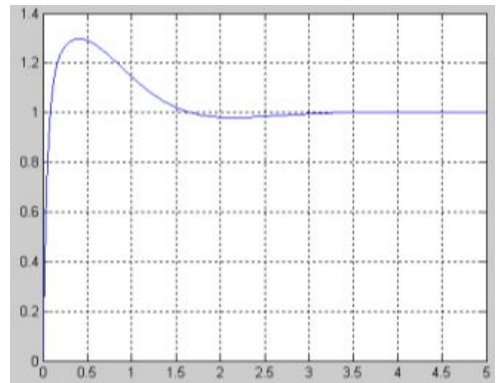


Fig 2-4 PID gain predict of matlab design



(a)  $t_s < 0.5s$ , P.O < 10%



(b)  $t_s < 2s$ , P.O < 35%

Fig 2-5 Condition of PID step response

이와 같이 선형화과정을 통해 전달함수식을 matlab 시뮬레이션으로 얻어낸 결과는 두바퀴 이동장치 역진자 시스템이 수직 자세유지할 때 발생하는 다양한 외부환경요인들을 고려할 수 없다. 특히 모터와 바퀴, 센서 신호의 오류를 고려하면서 제어하기에는 많은 어려움이 있다. 그래서 Table 2-2은 수직자세를 유지하는 안정화 시간에 대해 각도, 속도 보상을 하기 위한 PID 게인의 범위를 만들었다. 실제적으로 무게, 전압, 전류, 각도, 속도에 대한 관계가 비례, 반비례, 비선형식으로 되어 이러한 특성을 고려하여 6축-가속도/자이로 센서 한 개와 모터제어 만으로 수직 자세유지 시스템을 구축하였고, 이러한 제한 조건을 고려하여 실제 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 상태에 따라 센서의 반응을 실험을 통해 확인하였다.

Table 2-2 Design of PID gain range

stability time > 2 sec	$19 < P < 21$ $0.9 < i < 0.11$ $780 < d < 820$
stability time $\leq$ 2 sec	$17 < P < 23$ $0.8 < i < 0.12$ $650 < d < 950$

## 제 3 장 시스템 구성

### 제 1 절 6축-가속도/자이로 센서

현재 가속도/자이로 센서는 실생활에서도 많이 사용하고 있다. 특히 스마트폰에 장착되어 있는 가속도/자이로 센서의 경우 사용자가 움직이는 모션을 감지하고 활용할 수 있는 다양한 앱이 있다. 이 외에도 자이로 센서와 가속도 센서는 기본적으로 움직이는 물체의 자세를 측정할 때 많이 쓰인다<sup>[28][29][30]</sup>.

두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 자세를 의미하는 각도에는 롤, 피치, 요(roll, pitch, yaw)로 나타내며, 요는 z축 방향 회전을 의미하고, 롤은 좌우로 회전하는 것을 의미한다. 이러한 자세 측정에서 롤과 피치는 중력방향을 기준으로 얼마나 기울어져 있는지를 나타낸다. 롤과 피치를 측정하기 위해 사용하는 센서가 바로 가속도 센서와 자이로 센서이다. 보통 MEMS(micro electro mechanical system) 기술을 적용한 칩 형태의 센서로서 Fig. 3-1에 MPU6050 Invensense 사의 제품의 모듈이다. Table 3-1은 MPU6050의 사양이다.

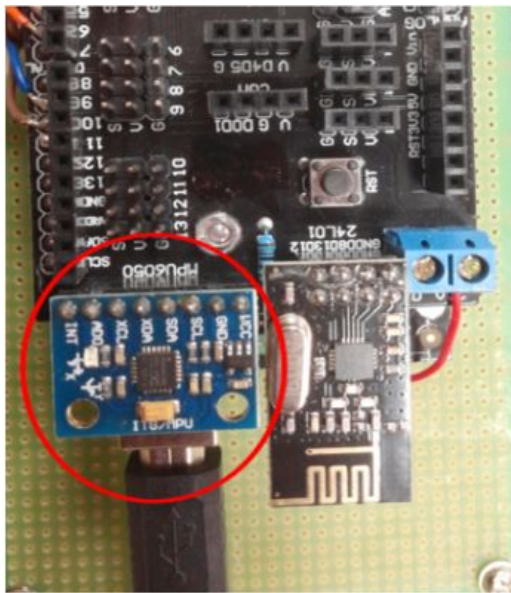


Fig. 3-1 MPU6050 6axis-Acceleration/Gyro sensor



자이로는 각속도를 측정하여 단위는 degree/sec이며, 가속도 센서의 단위는 g로 나타낸다. 가속도 센서는 세 개의 센서가 3차원에서 움직일 때 x축, y축, z축 방향의 가속도를 측정한다.

기본적으로 가속도 센서는 가만히 정지한 상태에서 중력 가속도를 감지하기 때문에 z축 방향으로 -g 만큼의 값을 출력한다. 센서의 초기 출력은 모두 '0'이다. 이 상태에서 물체를 y축 방향으로 45도 기울이면 기울어진 상태에서 z축 방향과 x축 방향으로 동일한 값의 가속도가 출력된다. 이때, 0.707g 만큼 z축과 x축 사이 방향으로 값이 출력된다. 결과적으로는 z축과 x축 값의 비율을 atan에 넣으면 그 결과 값이 45도 기울어진 값을 알 수 있게 된다. 4장의 IPSS-FA모델 에서 설명이 되어 있다. 그러나 정지하지 않은 움직임 상태에서 가속도 센서의 기울기 값을 측정할 수 없다.

Table 3-1 MPU6050 specification

Name	MPU6050 Specification	
	Accelerometer	Gyroscope
Full scale range	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16g$ dps	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ (°/sec) dps
Sampling rate	16bit ADC	
Operating current	500uA	3.6mA
I2C	400kHz	
I2C Address	0x68(except R/W 0x1)	

자이로센서는 가속도센서와 달리 시간당 회전하는 각도값인 각속도를 측정한다. 수평한 자세를 유지하고 있는 상태는 각속도가 0도/sec이다. 10초 동안 50도만큼 기울어지면 10초 동안에는 0이 아닌 각속도 값을 갖게 되고, 10초 동안의 평균 각속도는 5도/sec이다. 여기서 다시 기울어지는 동작을 한 후 멈춰서 50도를 유지하다고 보면 각속도는 0도/sec가 된다. 이러한 과정속에서 각속도는 0 → 5 → 0으로 변하고, 각도는 0도에서 50도 변하게 된다. 각속도에서 각도를 구하려면 전체 시간에 해당하는 만큼 적분을 한다. 자이로센서는 각속도를 출력으로 내보내기 때문에 전체 시간동안 이 각속도를 적분하면 기울어진 각도를 계산할 수 있다. 그런데 적분을 하면서 측정되는 각속도는 노이즈와 함께 측정값 에러가 계속 발생한다. 결국 오차가 누적이 되어서 최종 값이 드리프트 현상이 나타나기도 한다<sup>[31]</sup>.

가속도/자이로센서에 대해 정리해보면 정지상태가 긴 시간의 관점에서 가속도센서에 의해 계산된 각도는 올바른 값을 출력하지만 자이로센서는 틀린 값을 보낸다. 반대로, 움직이는 짧은 시간의 관점에서 자이로센서는 올바른 값을 출력하지만 가속도 센서는 부정확한 값을 보낸다<sup>[32]</sup>. 이러한 이유로 가속도/자이로센서는 상보 필터링이 필요하고, MPU6050과 ATmega328의 처리속도 차이 때문에 반복 데이터 처리 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 위 두가지 필터링의 성질을 이용하여 데이터를 필터링 하였다. 자이로센서는 온도가 변하면 그 값이 같이 변하는 특성이 있다. 따라서 온도센서와 함께 온도보상을 하여야 정확한 각도값을 얻을 수 있다.

## 제 2 절 블루투스 통신

블루투스(bluetooth) 기술은 작고, 저렴한 가격, 저전력 소모(100mW이하)로 근거리 송·수신기를 모빌 디바이스(mobile device)에 직접 또는 PC카드와 같은 어댑터를 통해 탑재되어 무선 환경을 제공해 주는 하나의 기술적인 규격 사양이다.

무선환경은 세계적으로 이용 가능한 전역 주파수 대역인 2.45GHz band를 이용하고 721kbps 데이터 전송 속도와 3개의 음성 채널을 지원한다. 또한 블루투스는 전력 소모량이 30micro amps인 ‘대기모드’에서부터 3에서 30milli amps 범위의 전송량이 많은 장치에 이르기 까지 다양한 제품을 대상으로 하고 있다. 도달 거리 측면에서 블루투스는 “In Room(사무실/회의실/가정)”과 “Personal(사용자의 주변)” 공간 내에서 지원하도록 개발 되었다. 블루투스장치는 사용요구에 따라 다양한 거리를 지원하는 장치들과 10미터 반경 내에서 정보 교환 능력을 갖는다. 그리고 data access point로 강력한 전송수단(+20dB 정도)과 감도 좋은 수신단(-90dB 정도)을 사용한다면 개방된 공간에서 100m까지 도달 할 수 있다.

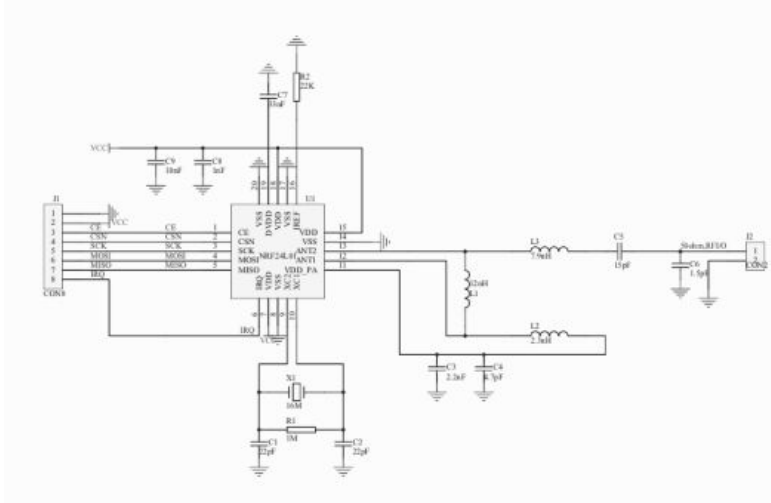


Fig. 3-2 nRF24L01 electric circuit

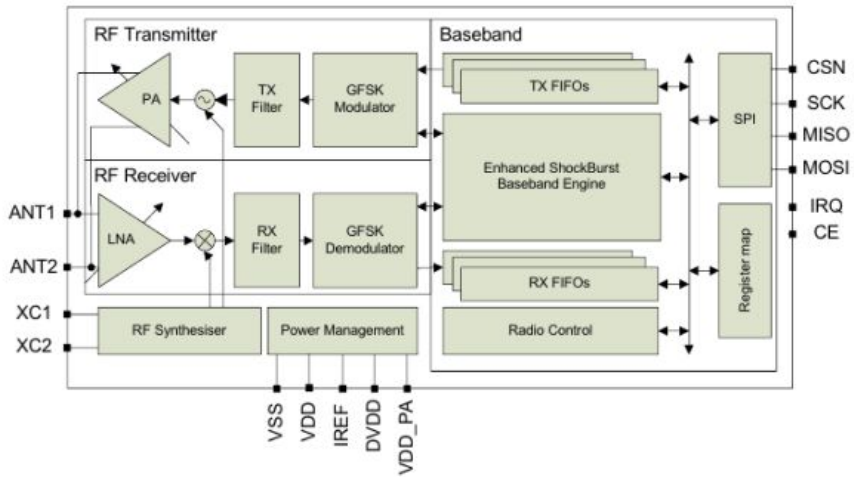


Fig. 3-3 nRF24L01 block diagram

최근에 Fig. 3-2과 같은 nRF24L01이라는 모듈형식으로 SPI통신 방식을 통해 2.4Ghz의 양방향 신호 전달이 가능한 저가의 통신 모듈이다. Fig. 3-3는 nRF24L01의 내부 블록이다. DC전원 3.3V 기반이라 DC-레귤레이터를 통해 DC 5V 변환하거나 마이크로컨트롤러에 맞는 전원설정이 필요하다.

nRF24L01의 최대 속도는 2Mbps이고, 도달거리 실험자료가 있지만, 개방된 장소에서도 모듈에 따라 10m만 도달하는 경우가 있고, 공간이 넓은 실내에서는 통신이 고르지 못하다. 특히, 벽이 있으면 신호가 잡히지 않기도 한다. 별도 외장 안테나를 달아야 한다. 그러므로 송/수신 모듈을 한 조로 제작하였다. Fig. 3-4은 두바퀴 이동수단 역진자 시스템에 블루투스 모듈을 설치한 그림이다. 그림의 좌측이 몸체부이고, 우측이 조이스틱부이다.

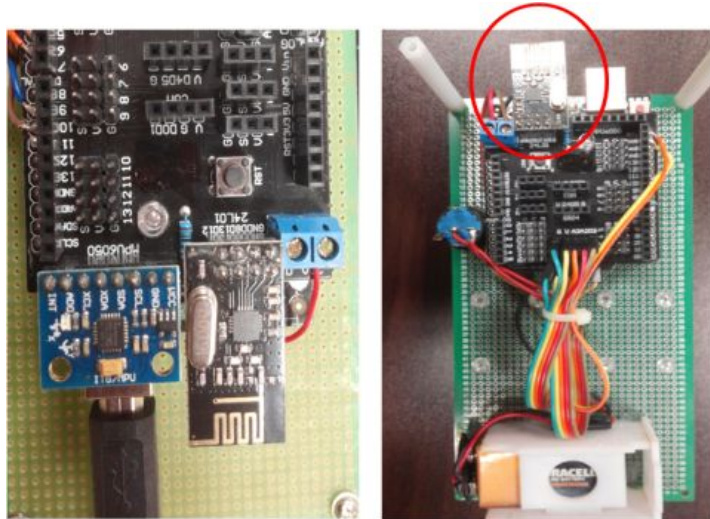


Fig. 3-4 Bluetooth install

### 제 3 절 모터 드라이버

두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 자세유지 제어를 위해 모터에 전압을 공급하는 드라이버이다. 여기에는 DC모터 2채널 L298 DC모터 전용제어부품으로 구성되었다. Table 3-2는 모터 드라이버의 사양이다.

Table 3-2 DC motor drive specification

Name	L298 DC Motor driver
Type	Half-bridge DC motor control circuit
Numbers of I/O channels	2 Channels
Operating Input voltage	4.7~24V
Operating Temperature	-25~130°C
Max appliance current	2A per channel
Logic Max voltage	1.5V

Fig. 3-5의 좌측은 드라이버이고 우측에는 실제 장착하여 구성한 그림이다. Fig. 3-6에 DC 모터 드라이버의 회로도를 나타내었다.

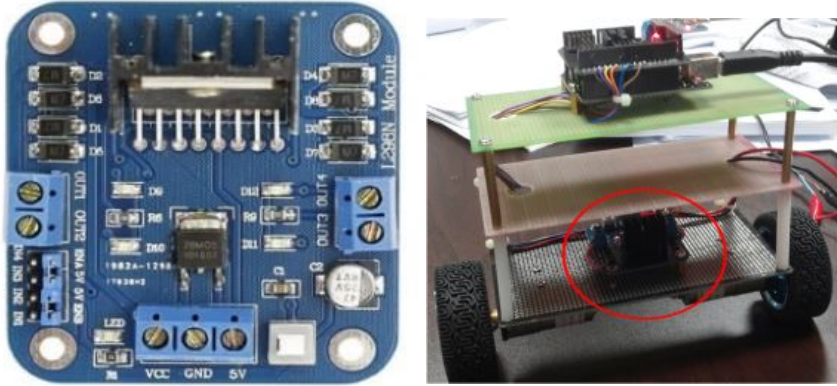


Fig. 3-5 L298 DC motor driver

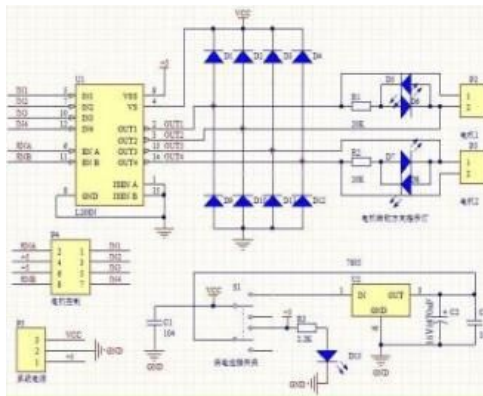


Fig. 3-6 DC motor driver circuit

모터를 제어하기 위해 A채널과 B채널로 구분한다. 각 채널에는 두 개씩의 제어입력 단자가 있다. 각 단자에 공급하는 신호에 따라 전/후진과 정지가 이루어지는 관계를 Table 3-3에 나타내었다. 각 단자에 제어신호를 공급할 때 PWM신호를 공급함으로써 속도제어가 동시에 이루어진다.

Table 3-3 DC motor driver control condition

Motor	Signal		Direction
	in1	in2	
A	Low	High	CCW
	High	Low	CW
	High	High	Brake
			.
B	Low	High	CCW
	High	Low	CW
	High	High	Brake
			.



## 제 4 절 ATmega328

임베디드는 컴퓨터의 일종이지만, 일반적인 컴퓨터와는 약간 다르다. 보통의 컴퓨터는 윈도우나 리눅스 혹은 맥OS 같은 운영체제를 설치하여 작동시키고, 그 운영체제 위에 사용자가 손쉽게 다양한 프로그램을 추가해서 자신의 필요대로 조작할 수 있다. 그러나 임베디드 컴퓨터는 작게, 간단하게 만드는 것을 목표로 하기 때문에 일반 컴퓨터와 같이 사용자 입맛에 맞게 무언가를 추가하거나 빼는 일이 상대적으로 어렵다. 극단적으로 단순한 임베디드 시스템의 경우 운영체제가 아예 없으며 이 경우에도 하드웨어를 제어 해주기 위한 소프트웨어는 필요한데, 이 소프트웨어를 보통 '펌웨어(firmware)'라고 부른다. 임베디드 마이크로컨트롤러는 일반 컴퓨터와 같이 기능들이 분리되어 있지 않고 반도체 칩안에 모든 기능(기억, 제어, 연산, 입/출력)들이 집적화 되어 있는 것이다. 대표적으로 Micorchip, Atmel, Freescale, Infineon의 반도체 업체들에서 생산되고 있다.

마이크로 컨트롤러는 Fig. 3-7에서와 같은 ATmega328을 이용하였다. 최근에는 Fig. 3-8의 화면에서와 같이 아두이노의 오픈소스 방식으로 많은 개발자들이 이용하고 있다. Table 3-4는 ATmega328의 사양이다.

Table 3-4 ATmega328 specification

Name	ATmega328
Processing speed	20MHz
EEPROM	1KBytes
Memory	32KBytes
RAM	2KBytes
Write/Erase Cycles	10,000 Flash/100,000 EEPROM
Sense channels	64 channels

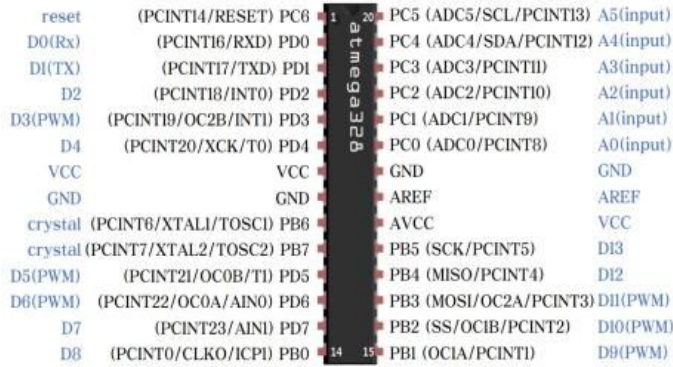


Fig. 3-7 ATmega328 pin layout



Fig. 3-8 Degree of aduino firmware picture

## 제 5 절 조향시스템

Fig. 3-9는 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 방향을 제어할 수 있는 조이스틱이다. Fig. 3-9의 프로그램은 부록B에 나타내었다. 왼쪽의 조이스틱을 상/하/좌/우 방향으로 움직이면 몸체가 전/후/좌/우 방향으로 진행한다. 특히 전/후진은 조이스틱뿐만이 아닌, 몸체의 각도가 수직이 되도록 균형을 유지한다. Fig. 3-9의 좌측에는 조이스틱과 LCD창에 현재의 각도, 출력정보가 표시하도록 하였다. Fig. 3-10는 조이스틱과 몸체와의 무선 통신방식으로 방향을 선택하도록 하였다. 몸체부가 수신용 프로그램, 조이스틱부가 송신용 프로그램이다. 송신부에는 좌측에 있는 조이스틱 신호만 처리하였다. 우측은 파라미터 변경을 위해 설계하였다. 송신부의 전송데이터는 조이스틱의 X축은 좌우 방향을 제어하며 가변저항값을 A0포트에 연결하였고, Y축은 전후 방향을 제어하며 A1포트에 연결하였다. Fig. 3-10의 프로그램은 부록C에 나타내었다.

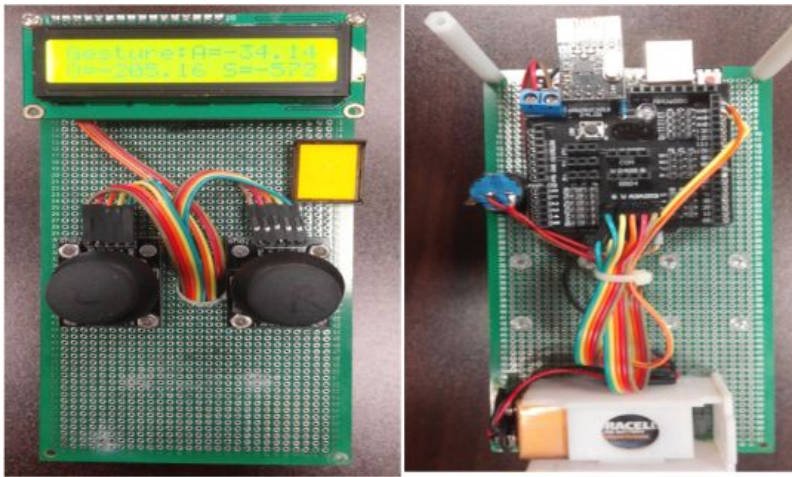


Fig. 3-9 Joy stick

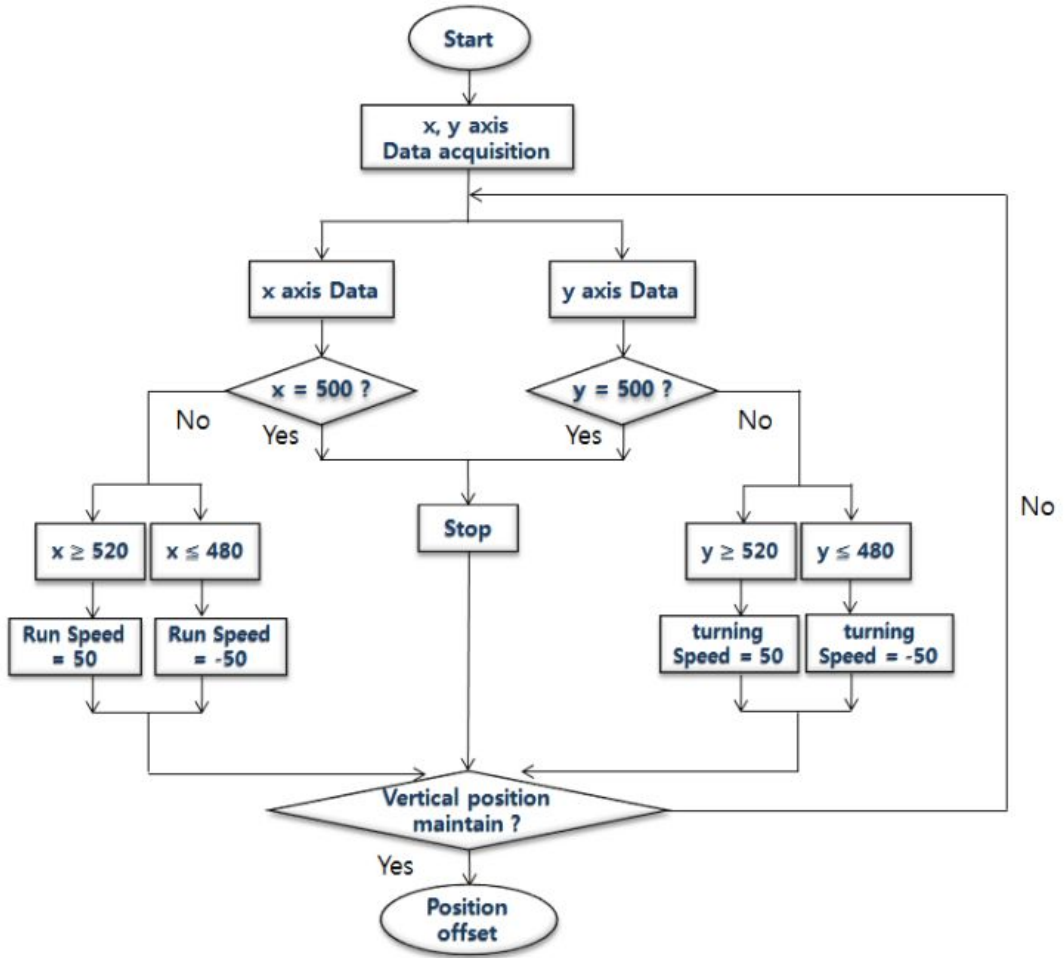


Fig. 3-10 Receive-body part flow chart

## 제 4 장 제어기 설계

### 제 1 절 센서 필터링

#### 1. 반복 데이터 처리

반복 데이터 처리(recursive data processing)는 불충분한 시스템 정보로부터 미지의 정보를 유추하는 방법 중 가장 일반화되고 광범위하게 사용되는 방법 중 하나이다. 반복 데이터 처리는 불규칙적인 동적 시스템에 적용하여 필터링을 반복적으로 수행함으로써 가장 좋은 상태를 예측하는 방법이다<sup>[33]</sup>. 0.5sec 동안 6축-가속도/자이로센서의 각도값을 얻기 위해 실제로 이 시간동안 100개의 데이터가 받을 수 있어, 순차적으로 100개의 데이터를 누적하여 100으로 나누면 0.5sec 동안의 각도값을 알 수가 있다. 그러나, 실제적으로 일정하게 데이터가 받을 수 없는 경우가 발생하면 큰 오류가 되어 시스템에 심각한 문제를 발생하게 된다. 그래서 데이터가 발생한 시점마다 누적하여 카운트된 누적수로 나누면 센서 신호가 불규칙하게 발생하여도 정확한 신호를 처리할 수 있는 것이다.<sup>[34]</sup>

마이크로컨트롤러의 인터럽트 타이머가 늦을 경우에는 매 시간마다 자료를 저장하였다가 한 번에 신호처리를 해도 되겠지만, 최근의 반도체 기술이 좋아져서 타이머가 매우 빠르게 처리되어 데이터가 많이 생성되거나 데이터를 받지 못하였을 때 쓰는 필터링이 될 수 있다.

## 2. 상보필터 고찰

MPU6050 가속도-자이로 센서의 특성은 가속도 센서의 경우 시간이 지나도 오차에 강한 특징을 갖지만, 진동과 외력이 발생했을 때 측정값이 왜곡될 수 있다. 반면에 자이로 센서의 경우 진동이나 외력에 의한 노이즈에는 강하지만, 측정값은 회전이 발생했을 때 각속도 변화량으로 측정된다. 그래서 각도값을 구하기 위해서는 적분의 과정을 거쳐야 하며 적분 과정 중 센서의 노이즈가 발생하면 노이즈도 같이 적분이 되기 때문에 누적오차가 발생하게 된다. 결론적으로 자이로 센서는 실제 움직임과 비슷한 값을 출력하지만 누적오차가 발생한다. 따라서 MPU6050 가속도-자이로 센서에 반드시 상보필터를 사용해야 하고 이 때, 가속도 센서는 저역필터(low pass filter)로 필터링하고 자이로 센서는 고역필터(high pass filter)로 필터링한다<sup>[35][36]</sup>.

$$\Phi = \frac{as}{as+1} \left( \frac{1}{s} \dot{\Phi}_g \right) + \frac{1}{as+1} \Phi_a \quad (4-3)$$

High pass filter      Low pass filter

식 (4-3)에서  $\dot{\Phi}_g$  는 자이로 센서값에서 바이어스를 제거한 값이고,  $\Phi_a$  는 가속도 센서로부터 측정한 각도이다. 이것을 다시 정리하면

$$\Phi = \frac{1}{s} (\dot{\Phi}_g + \frac{1}{a} (\Phi_a - \Phi)) \quad (4-4)$$

식 (4-4)를 블록 다이어그램으로 표시하면 Fig. 4-1와 같다.

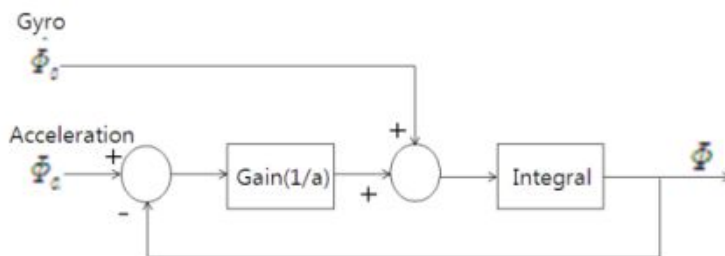


Fig. 4-1 Gyro/Acceleration degree diagram

Fig. 4-1을 보면 가속도 센서로부터 측정된 각도( $\phi_a$ )는 센서의 적분 각도( $\phi$ )와의 차를 이를  $1/a$ 를 곱하여  $\phi$ 에 적분한다. 그리고 자이로센서로부터 측정된 각속도( $\dot{\phi}_g$ )는  $\phi$ 에 그대로 적분하게 된다. 여기서  $\dot{\phi}_g$ 는 센서 좌표계를 기준으로 하는 각속도 값이고,  $\phi_a$ 는 전역좌표계를 기준으로 하는 각도 값이다. 이것 때문에 적분하는 방법에 차이가 있다. 이상적인 자이로센서는 움직이지 않을 때 '0'을 출력하여야 하지만 대부분의 자이로센서는 '0'이 아닌 바이어스가 되어 있는 값을 출력한다. 그래서 센서에서 측정된 값으로부터 바이어스 된 값을 제거해야 한다. low pass filter와 같은 역할을 하도록 측정하는 신호들의 평균은  $\omega_m \leftarrow \frac{n\omega_m + \omega}{n+1}$  으로 나타낸다.  $n$ 은 평균을 내기 위한 카운터이며, 어떠한 값 이상으로 커지지 않도록 제한하여야 한다. 즉,  $n$ 이 특정 값에 도달하기 전까지는 평균을 낼 때마다 1씩 증가하다가, 특정 값에 도달하면 고정된 값을 사용하도록 한다.

### 3. IPSS-FA 모델

반복 데이터 처리 알고리즘(recursive data processing algorithm), 고역필터(High pass filter)와 저역필터(Low pass filter)가 조합된 상보필터를 융합하여 IPSS-FA 모델을 설계하였다. MPU6050 센서의 데이터 처리속도는 400kHz, ATmega328의 처리속도는 20MHz이고 I2C 전송방식으로 통신되고 있다. 서로 데이터 처리속도가 다르므로 데이터의 누락이 발생된다.

각 시간에 따른 각도 데이터를 누락되지 않도록 취득하여야 하나, 누락이 발생하여 받지 못한 각도 데이터를 반복적 데이터 처리를 통하여 보상하고 각도에 따라서 가속도/자이로센서에서 발생하는 민감한 노이즈 등을 제거하기 위하여 상보필터를 사용한다. 또한 반복 데이터 처리 알고리즘은 저가형 센서인 경우 오차가 잘 추정이 되지 않거나 추정되더라도 수렴속도가 느린 단점이 존재한다. 뿐만 아니라 필터식 내에서 복잡한 자세변환 연산을 수행함으로써 계산량도 극히 많아진다<sup>[36]</sup>. 그래서 반복 데이터 처리 알고리즘과 상보필터의 특성을 결합하여 여러개의 센서가 아닌 한 개의 센서로도 자세가 안정될 수 있는 IPSS-FA(invert pendulum single sensor - filtering algorithm)모델을 설계하였다.

Fig. 4-1은 반복 데이터 처리 알고리즘과 보상필터의 특성을 이용하여 6축-가속도/자이로센서에서 출력하는 가속도  $x,y,z$ 와 각속도  $x,y,z$ 를 필터링하여 안전된 각도값을 만드는 것이다. 가속도/자이로센서 MPU6050에서 받은 가속도, 자이로 데이터를 취득하고 1msec마다 가속도  $y$ 와 가속도  $z$ 는 두 지점의 각도를 찾기 위해  $\text{atan2}()$ 함수로 연산, 자이로  $x$ 를 임의로 지정한 이득값 16.348로 나누어 오메가 값을 연산한다. 그리고 취득 데이터를 실시간으로 받을 수 있도록 반복 데이터 처리 알고리즘을 적용한다. 또한 각도값에 영향을 주는  $k$ 값을 임의로 지정하는데  $k$ 가 0.1~0.2일 경우에는 각도에 미치는 영향이 미비하고  $k$ 가 1.1~1.2, 즉 1.0 이상일 경우에 받은 각도값을 영향을 주기 때문에,  $k$ 값을 0.8로 설정하고  $\text{Angle\_Filtered} = A * (\text{Angle\_Filtered} + \text{omega} * dt) + (1 - A) * \text{Angle\_Raw}$ 의 프로그램으로 상보필터링 하였다. 즉 반복 데이터 처리 알고리즘과 상보필터의 성질을 융합한 새로운 필터인 IPSS-FA모델을 설계하였다. Fig. 4-2의 프로그램은 부록 D에 나타내었다.



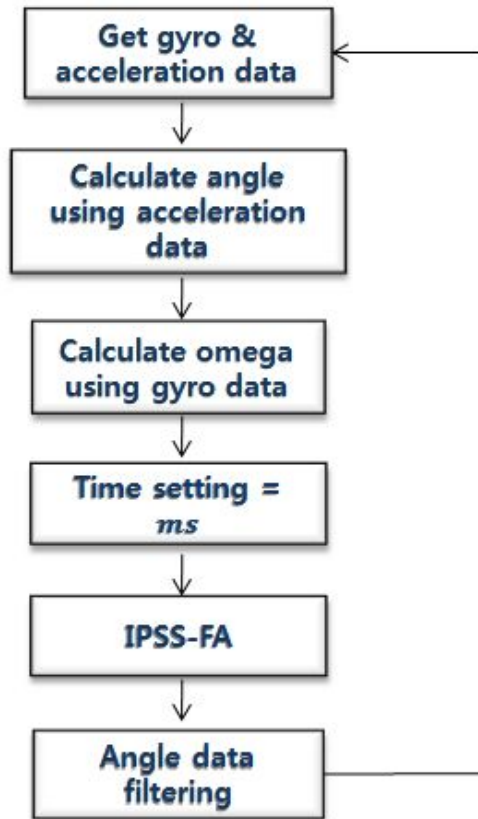


Fig. 4-2 IPSS-FA model program flow chart

## 제 2 절 PID-close loop

PID는 자동 제어 알고리즘 중의 한 가지 방법이다. PID 제어기는 제어성능이 우수하고 또한 제어이득의 조정이 비교적 쉽기 때문에 산업현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 제어기 설계법이다. 일반적인 PID제어기는 선형공정에 적용되어 사용된다.

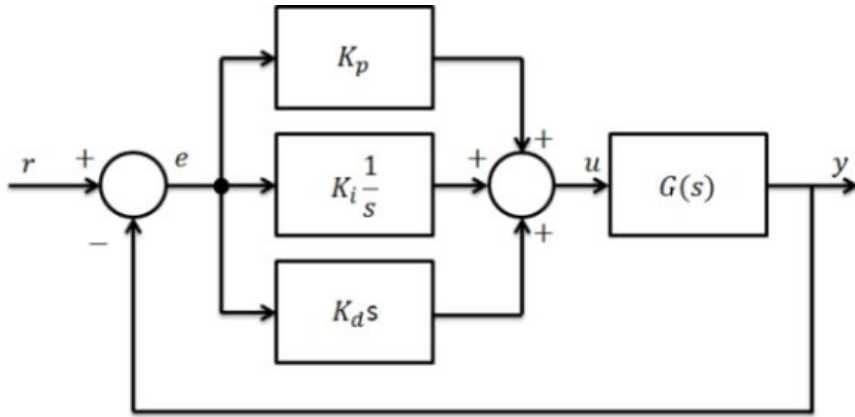


Fig. 4-3 Configuration of PID controller

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Fig. 4-3는 PID 컨트롤의 구조로 식 4.1과 같이 표현 가능하다<sup>[37]</sup>. P는 비례 제어, I는 적분 제어, D는 미분 제어를 나타내는데 이는 목표 값과 실제 값 사이의 차이에 대한 비례, 적분, 미분 제어를 뜻한다. PID제어는 모터 속도 제어, 보일러 온도 제어 등에 사용되어 좀 더 안정적이고 정확한 제어를 제공할 수 있다. PID제어를 통한 조작량은 아래의 식 (4.1)과 같다 .

$$\text{조작량} = K_p \times \text{편차} + K_i \times \text{편차의 누적값} + K_d \times \text{전회 편차와의 차}$$

$K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 는 각각 비례, 적분, 미분 제어에서의 상수로서 실험을 통해 이 상수들을 조정하여 가장 좋은 제어 알고리즘을 만들 수 있다.

### P(비례) 제어

$$\text{조작량} = K_p \times \text{편차}$$

오차(목표값-실제값)에 비례해서 제어량을 조절하는 제어 방식을 비례제어라고 한다. 이를 이용하면 목표값에 도달하는 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

### PI(적분) 제어

$$\text{조작량} = K_p \times \text{편차} + K_i \times \text{편차의 누적값}$$

P(비례) 제어가 제어할 수 없는 정상 상태 오차는 그 크기가 너무 작기 때문인데 이를 잔류편차라 한다. 적분 제어는 이런 잔류편차를 시간단위로 적분하여 그 값이 조작 가능한 크기가 될 때 조작하는 방식이다. 이와 같이 비례 제어와 적분 제어를 합한 방식을 PI제어라 부른다. 목표 값에 도달하는 도중 오차가 가장 많이 발생하는데 이를 오버슈트라고 부른다. 이는 제어할 장치에 따라 장치에 무리를 주거나 파괴할 수 있는 위험을 가지고 있으므로 좋지 않은 요소이다. 미분제어에서 이를 감소할 수 있다.

### PID(미분) 제어

$$\text{조작량} = K_p \times \text{편차} + K_i \times \text{편차의 누적값} + K_d \times \text{전회 편차와의 차}$$

오차의 변화량을 보고 조작량을 결정하는 방법을 미분 제어라 한다. 즉 오차의 변화의 반대방향으로 제어가 이루어지게 되는데, 이는 오차의 값을 미분한(즉 그래프의 기울기) 반대 방향으로 조작량을 변화시키는 방법이다. 때문에 구동기가 급변하는 것을 감소할 수 있다.

### 제 3 절 PWM 출력

Fig. 4-4과 같이 PWM(pulse width modulation) 또는 펄스폭 변조라고 하며, 프로세서의 디지털 출력으로 아날로그 회로를 제어하는 강력한 기법입니다. PWM은 계측과 통신에서 전력제어와 전력 변환에 이르기까지 광범위한 영역에서 사용되고 있다.

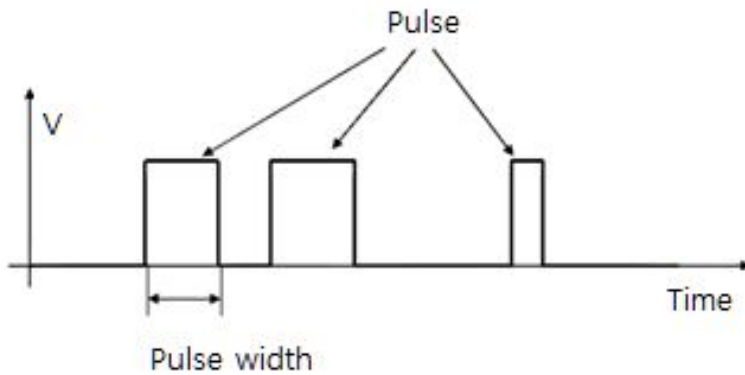


Fig. 4-4 Pulse and pulse width

PWM은 아날로그 신호를 디지털화 하여 인코딩 하는 방법이다. 사각형파의 duty cycle은 특정 아날로그 신호를 인코딩 하기 위해 변조하는 것이다. 직류전원 공급장치는 ON 아니면 OFF 이므로, 임의의 주어진 시간에 PWM 신호는 여전히 디지털 신호가 된다. 이것은 반복되는 ON, OFF 펄스를 통해 전압이나 전류가 아날로그 장치에 공급하는 것이다. On-time은 DC가 아날로그 장치에 공급되는 동안을 말하며 Off-time은 전원 공급 스위치가 꺼진 기간을 말한다. 충분한 대역폭이 주어진다면 어떠한 아날로그 값도 PWM을 통해 인코딩 될 수 있다. PWM의 장점중의 한 가지는 프로세서에서 컨트롤된 시스템에 이르는 모든 길이 디지털화 되어 있다. 아날로그 제어를 위해 PWM을 선택하면 제어를 위해 PWM을 사용하는 주요한 이유이다<sup>[38]</sup>.

Fig. 4-5은 YOKOGAWA DL1740 오실로스코프를 이용하여 시스템에 적용한 서로 다른 펄스폭의 PWM을 보여준다. ATmega328의 데이터 버스는 8bit이다. 디지털 데이터 50, 100, 150, 200은 20%, 40%, 60%, 80%에 해당하고 펄스폭 신호만큼 On-time 신호를 모터 드라이브에 전달하게 된다.



(a) duty ratio = 20%



(b) duty ratio = 40%



(c) duty ratio = 60%



(d) duty ratio = 80%

Fig. 4-5 Various PWM signal on duty cycle

Fig. 4-6와 같이 PWM출력 신호를 모터드라이브를 통해 두바퀴에 신호를 전달하게 된다. Fig 4-6은 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 수직 자세 유지를 위해 센서 필터링과 PID 연산이 끝나고 DC 모터 드라이버에 기울어진 각도를 보상하기 위한 PWM출력 처리 프로그램이다. 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 수직 자세 유지를 위해 센서 필터링과 PID 연산이 끝나고 DC 모터 드라이버에 기울어진 각도를 보상하기 위한 PWM출력 처리 프로그램이다. Fig. 4-6의 프로그램은 부록 E에 나타내었다.

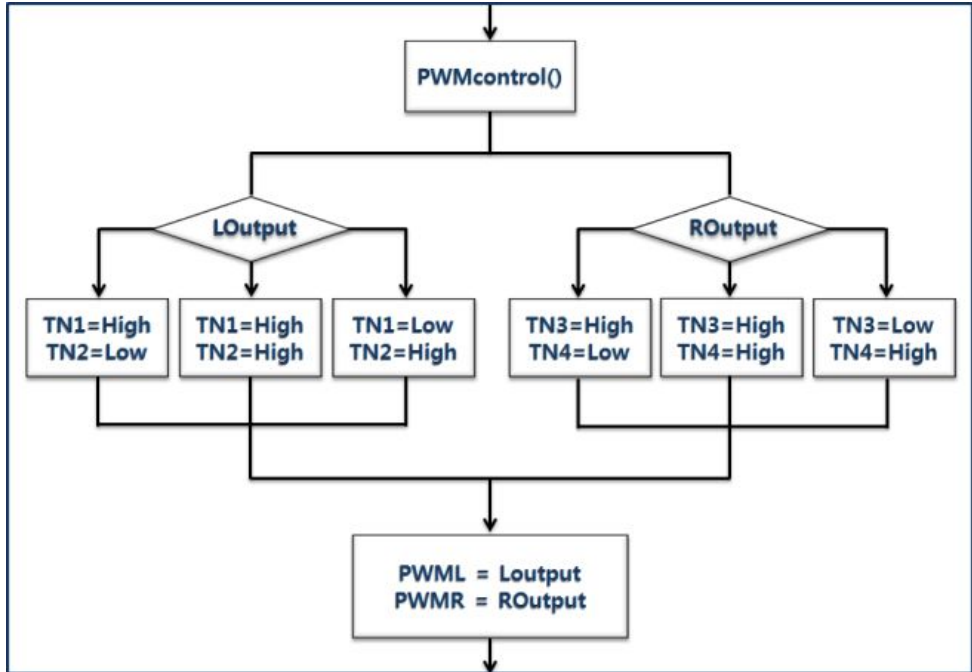


Fig. 4-6 PWM control program

## 제 4 절 메인 제어 프로그램

소프트웨어 및 하드웨어 구조의 흐름도를 Fig 4-7에 나타내었다. 두바퀴 이동수단 역진자의 자세유지 시스템의 메인프로그램은 Fig. 4-7와 같은 순서로 처리한다.

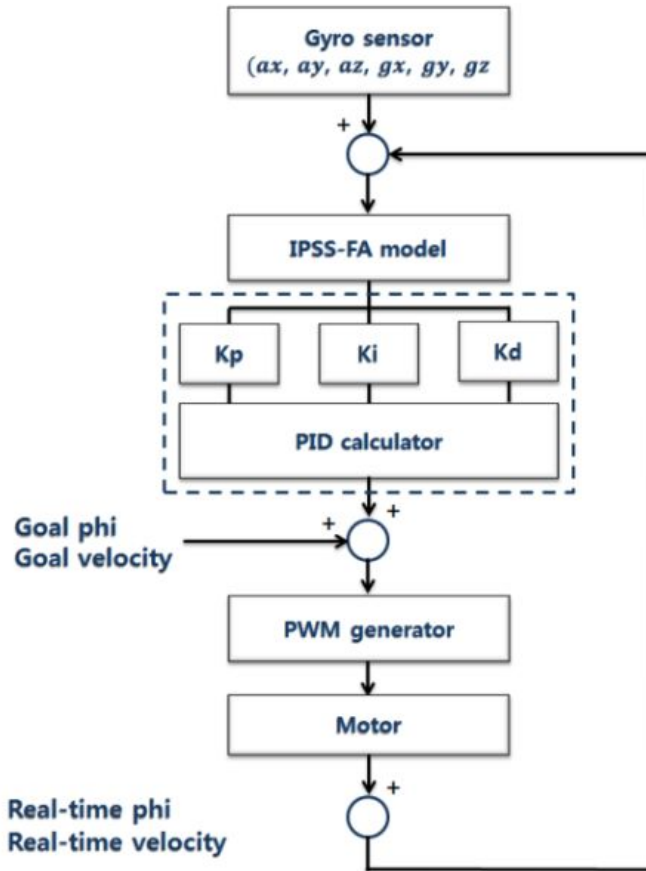


Fig. 4-7 Main control flow chart

IPSS-FA모델과 PID 연산이 끝나고 신호를 PWM generator에 전달하고 모터 신호의 출력에 따라 실시간 각도와 속도가 반응하면, 다시 6축-가속도/자이로 센서의 신호를 통해 오차를 감안하여 직전 목표값에 보상하는 과정을 반복하는 것이다.

Table 4-1은 제어 메인프로그램을 시작하기 전에 센서와 모터제어값에 대한 초기화 과정을 나타낸 것이다. 6축-가속도/자이로센서의 특성상 자이로 값은 시간에 따라 누적되면서 오차도 함께 처리된다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해 자이로 게인값과 오프셋값을 설정하였다. 같은 센서종류라도 센서마다 미세하게 출력값이 다르기 때문이다. 각도 오프셋은 현재 측정값과 이전시간에서 처리한 각도측정값의 차이를 오프셋만큼의 여유를 주어 몸체가 흔들리는 정도를 부드럽게 하기 위해서 정해준다. 회전시 속도제어를 위한 변수, PID 게인설정 및 시간에러, 각도에러 등을 보상하기 위한 초기화 부분이다.

Table 4-1 Designation of control variable and constant

```
#define Gry_offset 0 //The offset of the gyro
#define Gyr_Gain 16.348
#define Angle_offset 1.08 // The offset of the accelerator
#define RMotor_offset 0 // The offset of the Motor
#define LMotor_offset 0 // The offset of the Motor
#define pi 3.14159

float kp, ki, kd;
float Angle_Raw, Angle_Filtered, omega;
float Turn_Speed = 0, Turn_Speed_K = 0;
float Run_Speed = 0, Run_Speed_K = 0;
float LOutput,ROutput;

unsigned long preTime = 0;
unsigned long lastTime;
float Input, Output;
float errSum, dErr, error, lastErr;
int timeChange;
```



Fig. 4-8는 설계한 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 제어 메인 프로그램이다. 본 프로그램 실행하기 전에 6축-가속도/자이로센서 초기화 및 데이터 송/수신 가능여부 체크를 3실행하게 된다. Filter함수, Recive함수, PID함수, PWMcontrol함수를 실행한다. 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 안전을 위해 몸체 앞뒤 각도가 45도 이상 기울어지면 좌/우측 바퀴의 출력을 '0'으로 하여 모터 회전을 정지하게 되고, 몸체가 다시 45도 이내로 위치하면 2초 이내로 수직상태로 자동 복귀하도록 설계하였다. Fig. 4-8의 프로그램은 부록 F에 나타내었다.

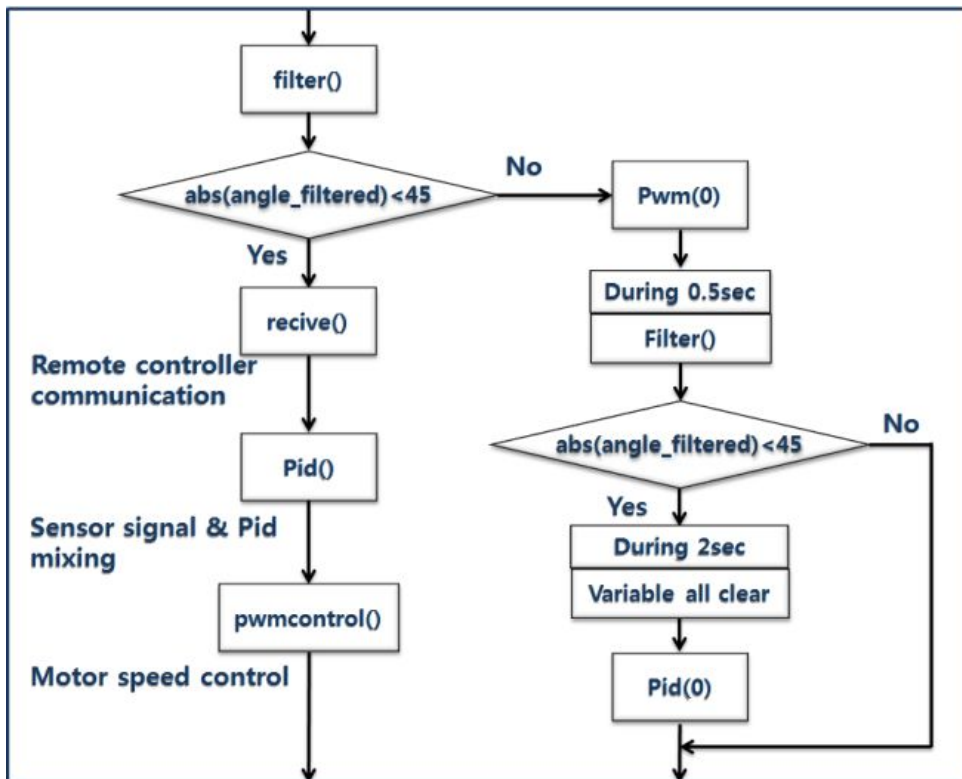


Fig. 4-8 Main program loop control flow chart

Fig. 4-9은 두바퀴 이동수단의 역진자 시스템 구현하기 위한 전체 과정의 프로세스를 나타내었다.

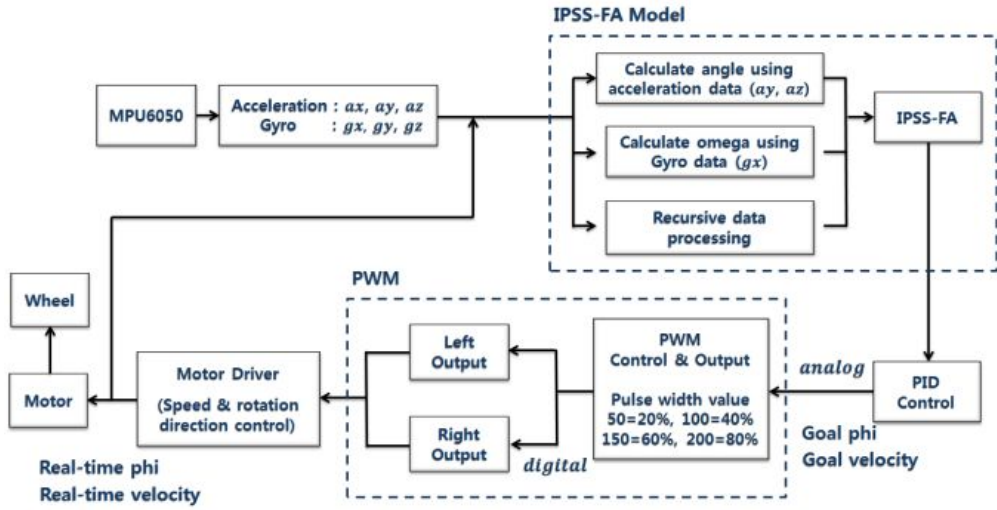


Fig. 4-9 Total signal process diagram

## 제 5 장 실험 및 분석

두바퀴 이동수단 역진자의 자세유지제어 실험을 위해 PID-close loop 제어와 6축-가속도/자이로센서 신호를 IPSS-FA을 통해 만들어진 알고리즘을 Fig. 5-1에서와 같이 마이크로컨트롤러에 업로드한다.

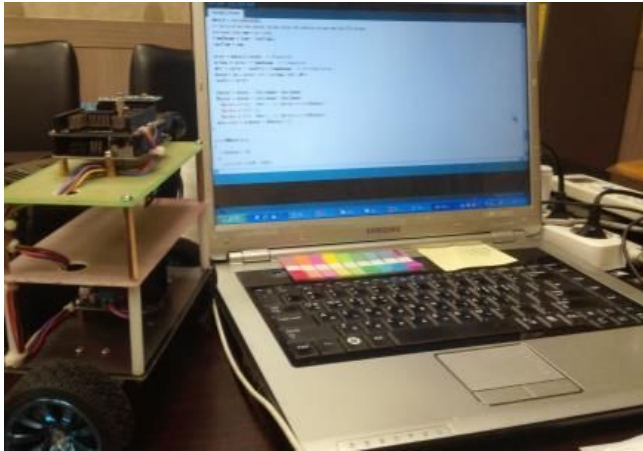


Fig. 5-1 Control program upload

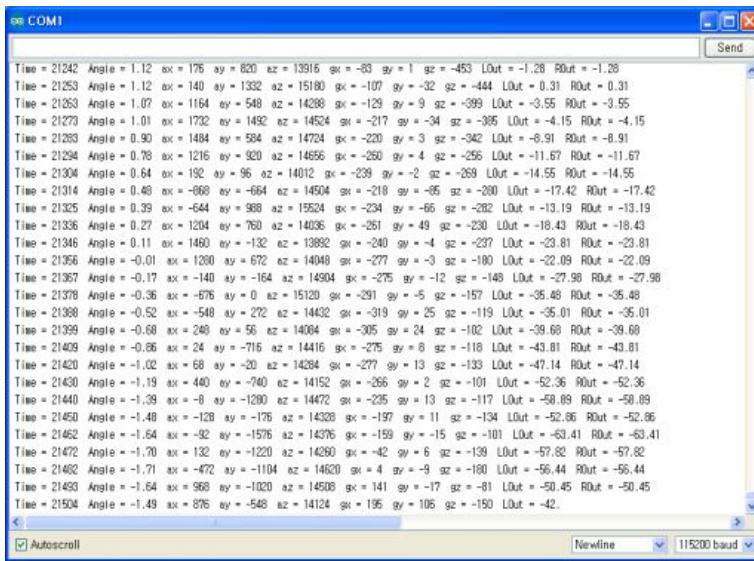


Fig. 5-2 Acquisition of sensor signal

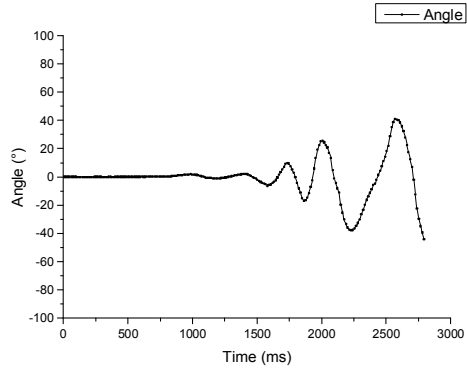
Fig. 5-2는 Table 5.1의 실험 조건으로 PID의 각각의 게인값에 따라 6축-가속도/자이로센서에서 반응하는 데이터를 시리얼 포트와 연결하여 컴퓨터에게 데이터를 전송한 것을 마이크로소프트 엑셀의 그래프를 통해 분석한 결과, 동역학 분석으로 얻어진 PID 각각 가장 좋은 게인값은 안정된 그래프가 출력되었지만, 좋은 값을 벗어난 경우에는 불규칙하거나, 신호 중심값에 많이 벗어나는 특징을 보였다.

Table 5.1 Experimental conditions

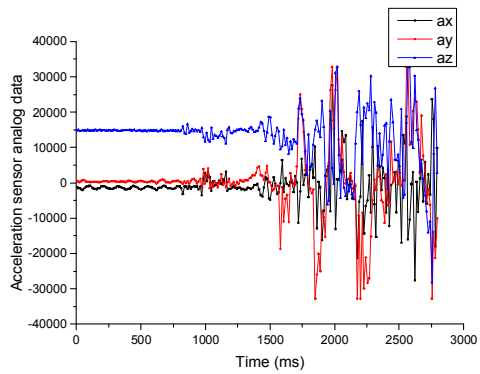
No.	P	I	D
1	20	0.1	200
2	20	0.1	500
3	20	0.15	800
4	20	0.2	800
5	80	0.1	800
6	20	0.1	800

실험 초기조건은 45도 물체를 기울이고 프로그램에서 설정한 것처럼 필터링이 이루어지도록 하여 수직 자세로 복귀하도록 한다. PID 게인값의 변화를 통해 센서에서 출력되는 데이터를 분석하여 각도, 가속도값의 편차가 작은 게인값을 가장 좋은 PID 게인으로 하여 각각의 게인값 변화에 따라 비교 분석하였다. 시간은 1ms동안 데이터 출력을 나타내어 비교하였고 시간에 따라서 각도값, 가속도 센서의 아날로그 데이터 x,y,z값, 자이로 센서의 아날로그 데이터 x,y,z를 그래프로 나타내었다. 전/후진 방향의 자세유지만 실험 하였다. 실험데이터 분석은 수직 자세를 유지하도록 초기에 센서 필터링과 PWM출력의 안정을 위해 5초 이후의 데이터를 분석하여 20초 까지 그래프를 비교하였다. 결과적으로 15초의 그래프 분석 하였다.

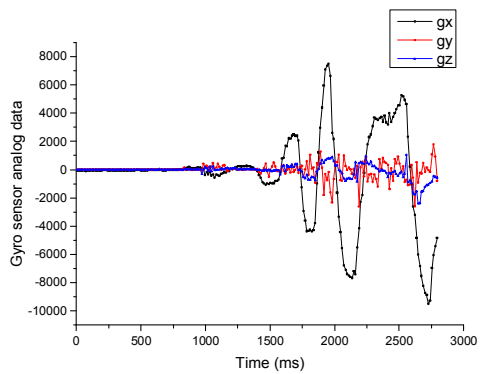
Fig. 5-3은 가장 좋은 PID 게인값중에서 'D' 시간을 0.2ms으로 PID 출력을 통해 후반부에 보면, 순간의 떨림에 현재 각도값과 바로 이전의 각도값을 읽어들이는 시간이 짧다 보니 PID-close loop 연산값이 폭주하면서 3초 후 넘어지는 현상이 발생하였다. Fig. 5-3(a)는 각도값을 측정하였고, Fig. 5-3(b)는 가속도값을 측정으며, Fig. 5-3(c)는 자이로값을 측정하였다.



(a) Angle



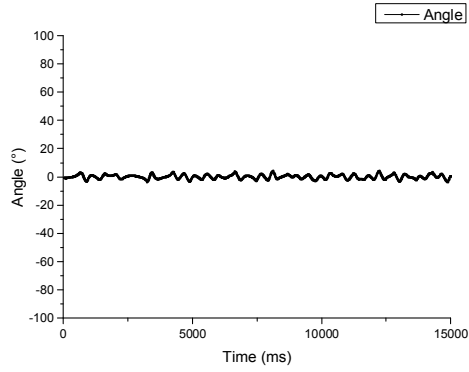
(b) Acceleration



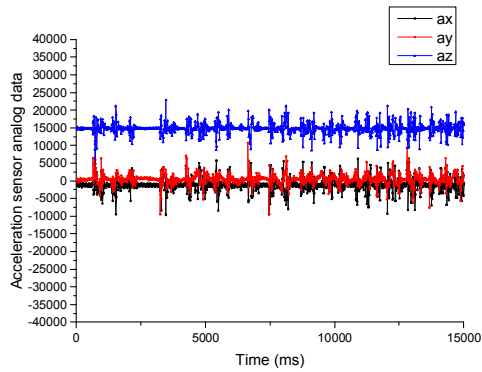
(c) Gyro

Fig. 5-3 Gain:  $P=20$ ,  $I=0.1$ ,  $d=200$

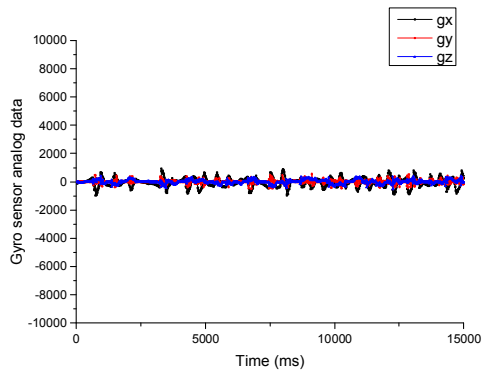
Fig. 5-4는 Fig. 5-3에서 'D' 시간을 2.5배를 부여하였다. Fig. 5-3보다는 안정적이지만 중심을 찾아가면서 몸체가 많이 흔들렸으나, 넘어지지는 않았다. Fig. 5-4(a)는 각도값을 측정하였고, Fig. 5-4(b)는 가속도값을 측정으며, Fig. 5-4(c)는 자이로값을 측정하였다.



(a) Angle



(b) Acceleration

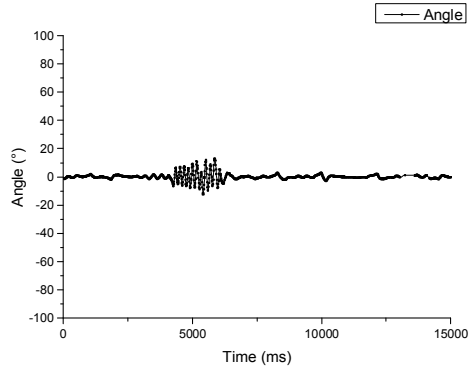


(c) Gyro

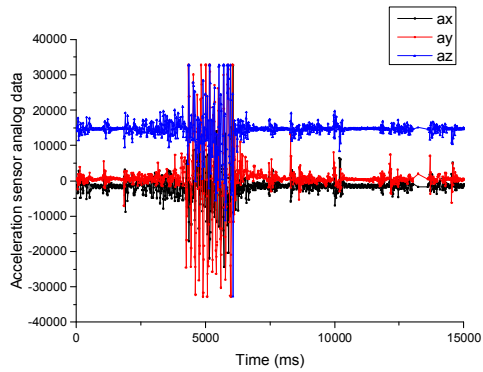
Fig. 5-4 Gain:  $P=20$ ,  $I=0.1$ ,  $d=500$



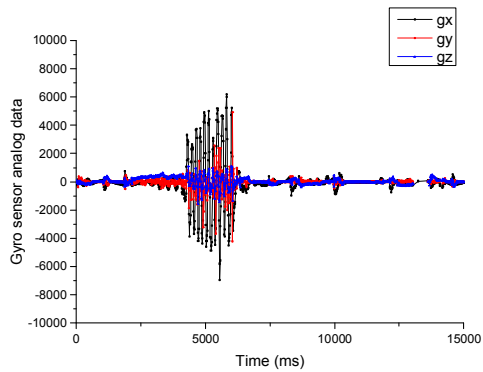
Fig. 5-5는 PID 게인값중에서 “I” 게인값을 0.1 보다 50% 높게 설정하였다. 앞에 “D” 시간을 줄였을 경우와 유사하지만 흔들거리는 간격은 줄었다. 5초에 중심을 잡기위해 각도 변화를 확인 할 수 있다. Fig. 5-5(a)는 각도값을 측정하였고, Fig. 5-5(b)는 가속도값을 측정으며, Fig. 5-5(c)는 자이로값을 측정하였다.



(a) Angle



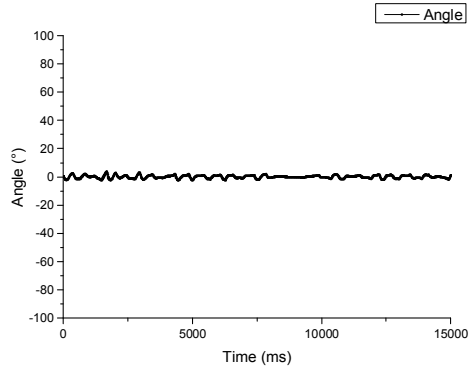
(b) Acceleration



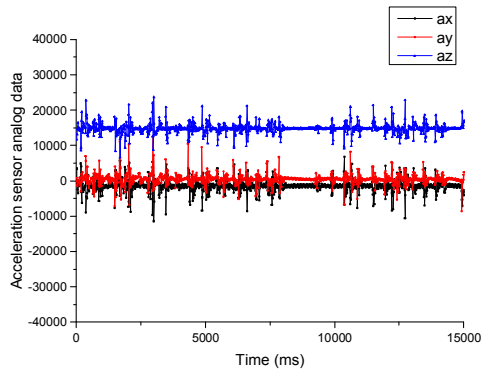
(c) Gyro

Fig. 5-5 Gain:  $P=20$ ,  $I=0.15$ ,  $d=800$

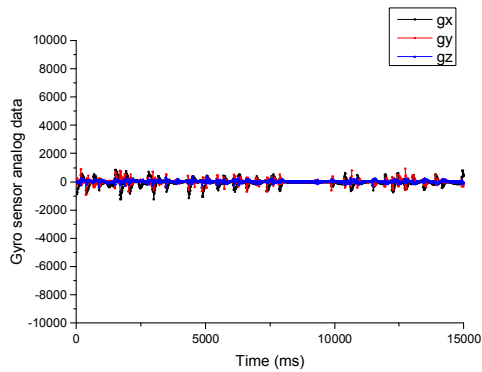
Fig. 5-6은 'I' 계인을 0.2로 하였을 때 각도 편차가 많이 나타났다. 가속도  $y$ 와 가속도  $z$ 의 진폭관계가 유사한 형태를 이루어졌다. Fig. 5-6(a)는 각도값을 측정하였고, Fig. 5-6(b)는 가속도값을 측정으며, Fig. 5-6(c)는 자이로값을 측정하였다.



(a) Angle



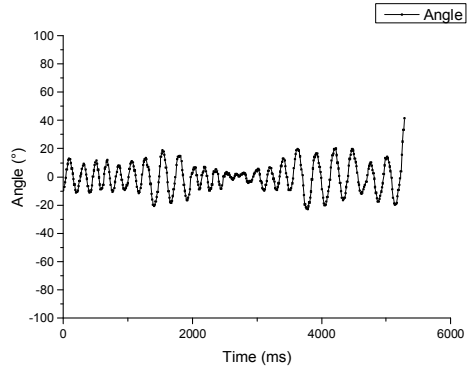
(b) Acceleration



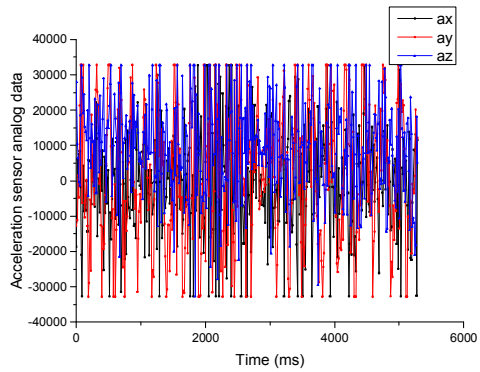
(c) Gyro

Fig. 5-6 Gain:  $P=20$ ,  $I=0.2$ ,  $d=800$

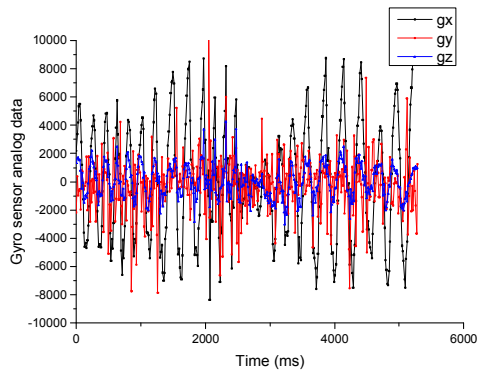
Fig. 5-7은 P값을 80%로 좋은 상태보다 4배이상 설정하고 실험한 결과이다. 흔들림으로 두바퀴 이동수단 역진자 시스템이 빠르게 앞뒤로 흔들리다가 10초 후 넘어지는 현상이 발생하였다. 'D' 시간의 조절 때 보다 자이로값의 변화가 크게 나타났다. Fig. 5-7(a)는 각도값을 측정하였고, Fig. 5-7(b)는 가속도값을 측정으며, Fig. 5-7(c)는 자이로값을 측정하였다.



(a) Angle



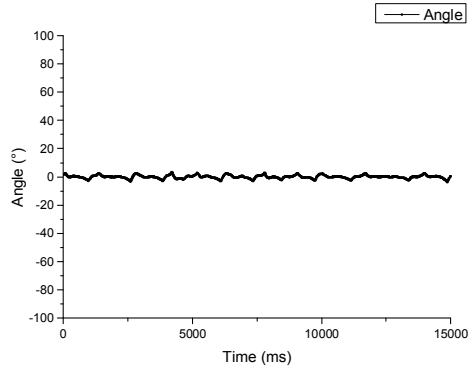
(b) Acceleration



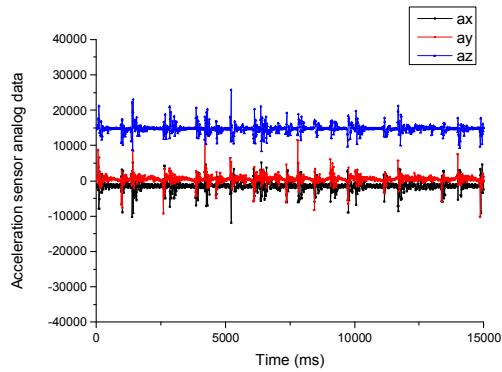
(c) Gyro

Fig. 5-7 Gain:  $P=80$ ,  $I=0.1$ ,  $d=800$

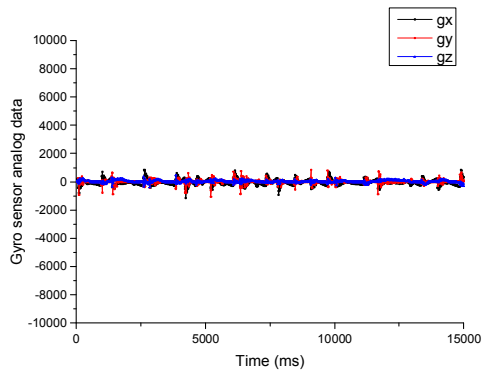
Fig. 5-8는 가장 좋은 PID 게인값으로 각도와 가속도 값의 변화 편차가 완만하며, 부드럽게 무게중심을 찾아가는 현상을 나타냈다. Fig. 5-8(a)는 각도값을 측정하였고, Fig. 5-8(b)는 가속도값을 측정으며, Fig. 5-8(c)는 자이로값을 측정하였다.



(a) Angle



(b) Acceleration



(c) Gyro

Fig. 5-8 Gain:  $P=20$ ,  $I=0.1$ ,  $d=800$



## 제 6 장 결 론

오늘날 에너지 고갈과 환경문제, 교통문제를 줄이기 위해 개인용 이동수단 시스템들이 개발되고 있다. 특히, 모터를 장착한 이동수단은 향후 내연기관을 대체할 수 있어 많은 연구를 통해, 다양한 제품들이 안전하고, 저렴한 이동수단의 역할이 요구되고 있다. 많은 센서를 사용하여 시스템을 구현하면 유리한 조건이 될 수 있으나, 오류가 나거나 고장이 발생하면 유지보수 관계 및 사고발생이 높아질 수 있다.

본 논문은 두바퀴 이동수단 역진자 시스템의 자세제어를 위해 한 개의 6축-가속도/자이로센서를 사용하여 IPSS-FA모델과 PID-close loop제어 알고리즘을 통해 메인 프로그램으로 안정된 제어를 할 수 있게 설계 하였다. PID 제어 게인값을 찾는 과정에서 센서입력에 대한 출력의 응답속도가 빠르게 적응하여 제어할 수 있다. 실험을 통해 제작한 두바퀴 이동수단 역진자 시스템에 가장 좋은 PID 게인값은  $K_p=20\%$ ,  $K_i=0.1\text{sec}$ ,  $K_d=800\text{msec}$ 로 구하였다.

가속도/자이로센서 신호의 오차를 최소화 하기 위해 1msec 마다 6축의 데이터를 오류확인을 하고 누적하는 과정으로 하여 마이크로컨트롤러의 정확한 시간 인터럽트와 PWM의 모터제어 출력값으로 안정된 수직자세 유지를 위한 프로그램을 설계하였다.

기구부를 구성하는 모터 드라이버, 6축-가속도/자이로센서(MPU6050), 블루투스 모듈, LCD 디스플레이 드라이버는 각각의 제조회사에서 제공한 라이브러리에서 헤더파일 또는 부함수로 선언하였다. 마이크로컨트롤러의 메인 프로그램에서 각 드라이버들 필요에 따라 호출하는 방식으로 구성하여서 프로그램 전체 스텝시간이 짧아 더욱 안정된 자세유지 시스템을 구현할 수 있다.

두바퀴 이동수단 역진자 시스템이 전/후진과 함께 좌/우회전을 위해 블루투스 무선 통신 리모콘형으로 조이스틱으로 전/후/좌/우 제어를 할 수 있도록 하여, 다양한 목적의 이동수단 시스템, 드론, 선박, 로봇 등의 시스템에 응용할 수 있다.

향후 연구과제로는 외부환경에 따라 PID 게인값을 찾아 주고 외부에서 튜닝이 가능하게 하여 더 안정적인 자세유지형 이동수단 시스템을 설계하는 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Leavitt, J., Sideris, A. and Bobrow, J. E., 2006, "High Bandwidth Tilt Measurement Using Low-cost Sensors, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics", Vol. 11, No. 3, pp. 320~327.
2. Hadri, A. E. and Benallegue, A., 2009, "Sliding Mode Observer to Estimate Both the Attitude and the Gyro-bias by Using Low-cost Sensors", The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2867~2872.
3. Luinge, H. J., and Veltink, P. H., , 2005, "Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscope and accelerometers", Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 43, pp. 273-282.
4. Lee, S. H., Park, J. G., , 2006, "Simulation for Implementing Attitude Controller of Wheeled Inverted Pendulum", KSPE state conference, pp.191-196.
5. Segway korea, <http://www.segway-korea.com>.
6. 홍선학, 송선미, 2007, "C언어로 즐기는 LEGO MINDSTORMS NXT", 이지테크.
7. Lee, H. J. and Jung, S., 2011, "Balancing Control of a Two Wheeled Mobile Robot System", J. of Electrical Engineering, Vol. 48, No. 6, pp. 468~474.
8. Jo, s. c., 2013, "Implementation of Segway Using Pressure Sensors." Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea Vol. 50, NO. 1, pp. 285-290.
9. Ogata, K., 2003, "Modern control engineering", Vol.4, Pearson Education.
10. 권욱현외, , 2003 "자동제어공학", 청문각, pp. 352-375.
11. 김동화, , 1998 "(인공지능)자동화 공정 제어", 기다리, pp. 298.
12. 권욱현, , 2004 "고전 및 현대제어설계", 청문각, pp. 248-249.
13. Yun, H. C., 2011, "A study on dynamic analysis of two wheel mobile balancing robot", Chosun Univ. Mechanical Engineering ME-Theses\_Master.
14. KISTI, 2004, "Japan, Initiating segway demonstration experiment on state park".
15. No-cut News, 2009, "Appeared a two-seater segway".
16. Ha, H. k., Lee, J. M., 2010, "Control of mobile inverted pendulum using single

- acceleromete", Journal of institute of control, robotics and systems, vol.16, no.5,pp. 440-445.
17. Ha, G. H. and Lee, J. M., 2010, "A Control of mobile inverted pendulum using single accelerometer", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 16, no.5, pp. 440-445.
  18. Gillespie, T. D., 1992, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE International.
  19. Shiroma, N., Matsumoto,O., Kajita, S., Tani, K. 1996, "Cooperative behavior of a wheeled inverted pendulum for object transportation", Intelligent Robots and Systems '96, Vol. 2, pp. 396-401.
  20. Choi, D. I., 2007, "Development of a 2-wheel self-balanced mobile platform and the robust control by disturbance observer", KAIST Mechanical Engineering ME-Theses\_Master.
  21. 김수환, 장순호, 2008, "LEGO MINDSTORM을 이용한 로봇 구현", 순천향대학교 정보기술공학부 학사학위논문.
  22. Eom, K. H., Lee, K. Y., Lee, H. K., Kim, J. W., , 2008, "Fuzzy PD+I Control Method for Two-wheel Balancing Mobile Robot", The Journal of Electronics Engineers of Korea - System and Control", Vol. 45 SC, No. 1, pp. 1-8.
  23. Yun, J. M., Lee, J. K., Lee, J. M., 2007, "An efficient horizontal maintenance technique for the mobile inverted pendulum", Journal of control and automation and systems Engineering, Vol.13, No7, pp. 656-663.
  24. Kim, Y., Kim, S. H., and Kwak, Y.K., 2005, "Improving driving ability for a two-wheeled inverted-pendulum-type autonomous vehicle", Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 220, No. 2, pp. 165-175.
  25. Yun, J. M. Lee, J. -K. and Lee, J. M. , 2007, "An efficient horizontal maintenance technigue for the mobile inverted pendulum", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 13, no. 7, pp. 656-663.
  26. Grasser, F., D'rriago, A., Colmbi, S. and Rufer, A. C., 2002, "JOE: a Mobile, Inverted

- Pendulum", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp. 107~114.
27. Jeong, S., 2013, "Control system analysis and Matlab & using Simulink", Vol 2. 358pp.
  28. Shin, Y.H., 2004, "A study on the control of a 2-wheeled inverted pendulum using inertial sensors", Ulsan university Electrical and Electronics Information Systems Management Engineering ME-Theses\_Master.
  29. Lee, A. L. and Kim, J. H., 2008, "Development of 3-dimensional Pose Estimation Algorithm Using Inertial Sensors for Humanoid Robot", J. of Institute of Control, Robotics, and Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 1~8.
  30. Ha, H. U. and Lee, J. M., 2010, "A Control of Mobile Inverted Pendulum Using Single Accelerometer, J. of Institute of Control", Robotics, and Systems, Vol. 16, No. 5, pp. 440~445.
  31. Imaumra, R., Takei, T. and Yuta, S., 2008, Sensor Drift Compensation and Control of a Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, Advanced Motion Control, IEEE International Workshop on Motion Control, pp. 137~142.
  32. Grewal, M. S., Andrews, A. P., 2008, "Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab", 3rd Ed., John Wiley & Sons Inc. New York.
  33. Lee, J. H., Kim, H. J., Park, J. W., Jang, Y. J., 2009, "Selection of optimal measurement location using Kalman filtering", AIK Conference, Vol 29, pp. 193-196.
  34. Lei, W., Shanmao, G., Yun, S., Jinghuan, F., 2010, "Research on Novel High Frequency Signal Extraction Method Based on Extended Kalman Filter Theory", Proc. of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 2419~2423.
  35. Nakashima, T., Jang, M. J., Hong, S. K., "Design of performance evaluation of a complementary filter for inverted pendulum control with inertial sensors, A-Ju university Electrical Engineering ME-Theses\_Master.
  36. Min, H. K., Yun. J. H., Kim. J. H., Kwon. S. H., Jeong. U. T., "Design of complementary filter using least square method", 2011, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol 17, No 2, pp. 125-130.

37. Chul, W. K., Young M. Y., Chan G. P., 2008, "Performance Improvement of Attitude Estimation Using Modified Euler Angle Based Kalman Filter", Journal of Institute of Control, Robotics and systems, Vol 14, pp. 881-885.
38. Kim, D.W., Jeong, K., 2003, "Micro-controller B0C196 hardware implemented PI, PID, Fuzzy, VSS algorithm", Dongilbook.
39. Hanbit media, [http://www.hanbit.co.kr/network/view.html?bi\\_id=1087](http://www.hanbit.co.kr/network/view.html?bi_id=1087)

## Appendix

### A. PID gain predict of matlab code

```

close all
clear all
clc
L=10; 10%
m=1;
x1=[0:-0.01:-20];
z=sqrt((log(L/100)^2)/(pi^2+(log(L/100))^2));
th=acos(z);
wn=4/(m*z);
y1=tan(th)*x1;
y2=-tan(th)*x1;
x2=-z*wn;
y3=[-30:0.01:30];
y_1=tan(th)*x2;
y_2=-tan(th)*x2;
y_3=tan(th)*-3;
y_4=-tan(th)*-3;
figure(1)
hold on
plot(x1,y1,x1,y2);
plot(x2,y3,'r');
plot(-3,1,'ob');
axis([-9 0 -4 11])
grid on
num=[0.02725];
den=[0.0102125 0 -0.26732125];
sys1=tf(num,den);
npid=conv([1 3-1i],[1 3+1i]);
dpid=[1 0];
nt=kd*conv(num,npid);
dt=conv(den,dpid);
rlocus(nt,dt);
grid on
hold off
figure(2)
[nk,dk]=cloop(nt,dt,-1);
sys=tf(nk,dk);
t=[0:0.001:2];
ystep=step(sys,t);
plot(t,ystep);
grid on

```

## B. Transmission-Joy stick program

```
void loop(){
  unsigned long time = millis();
  axis_x.axis_1 = analogRead(A0);
  axis_x.axis_2 = analogRead(A1);
  Mirf.setTADDR((byte *)"serv1");
  Mirf.send((byte *)&axis_x);
  while(Mirf.isSending()){
  }
```

## C. Receive-body program

```

void Receive()
{
  if(!Mirf.isSending() && Mirf.dataReady()){
    if(axis_x.axis_1 >= 520) // Y axis datas from joystick_1
    {
      Turn_Speed = map(axis_x.axis_1, 520, 1023, 0, 30); // 30 is the
max
    }
    else if(axis_x.axis_1 <= 480)
    {
      Turn_Speed = map(axis_x.axis_1, 480 ,0, 0, -30); // 30 is the
max turning
    }
    else
    {
      Turn_Speed = 0;
    }
    if(axis_x.axis_2 >= 520) // X axis datas from joystick_1
    {
      Run_Speed_K = map(axis_x.axis_2, 520, 1023, 0, 50); // 50 is the
max
      Run_Speed += Run_Speed_K;
    }
    else if(axis_x.axis_2 <= 480)
    {
      Run_Speed_K = map(axis_x.axis_2, 480, 0, 0, -50); // 50 is the
max
      Run_Speed += Run_Speed_K;
    }
    else
    {
      Run_Speed_K = 0;
    }
  }
  else
  {
    axis_x.axis_1 = axis_x.axis_2 = 500;
  }
}

```



## D. IPSS-FA signal program

```
void Filter()
{ // Raw datas from MPU6050
  accelgyro.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
  Angle_Raw = (atan2(ay, az) * 180 / pi + Angle_offset);
  omega = gx / Gyr_Gain + Gry_offset;
  unsigned long now = millis();
  float dt = (now - preTime) / 1000.00;
  preTime = now;
  float K = 0.8;
  float A = K / (K + dt);
  Angle_Filtered = A * (Angle_Filtered + omega * dt) + (1 - A) *
Angle_Raw;
  data.omega = omega;
  data.angle = Angle_Filtered;
}
```

## E. PWM control program

```

void PWMControl()
{
  if(LOutput > 0)
  {
    digitalWrite(TN1, HIGH);    digitalWrite(TN2, LOW);
  }
  else if(LOutput < 0)
  {
    digitalWrite(TN1, LOW);    digitalWrite(TN2, HIGH);
  }
  else
  {
    digitalWrite(ENA, 0);
  }
  if(ROutput > 0)
  {
    digitalWrite(TN3, HIGH);    digitalWrite(TN4, LOW);
  }
  else if(ROutput < 0)
  {
    digitalWrite(TN3, LOW);    digitalWrite(TN4, HIGH);
  }
  else
  {
    digitalWrite(ENB, 0);
  }
  analogWrite(ENA, min(255, (abs(LOutput) + LMotor_offset)));
  analogWrite(ENB, min(255, (abs(ROutput) + RMotor_offset)));
}

```

## F. Main program loop control

```

void loop()
{
  Filter();
  Serial.print(" Angle = "); Serial.print(Angle_Filtered);
  if (abs(Angle_Filtered) < 45)
  {
    Recive();
    PID();
    PWMControl();
  }
  else
  {
    analogWrite(ENA, 0);  analogWrite(ENB, 0); // motor stop

    for(int i = 0; i < 100; i++) // Keep after falling down
    {
      Filter();
    }
    if(abs(Angle_Filtered) < 45) // restart  automaticly
    {
      for(int i = 0; i <= 500; i++) // Reset and delay 2 seconds
      {
        omega = Angle_Raw = Angle_Filtered = 0;
        Filter();
        Output = error = errSum = dErr = Run_Speed = Turn_Speed = 0;
        PID();
      }
    }
  }
  Serial.println();
}

```