

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ลูกตุ้มหัวหก

INVERTED PENDULUM



T117463



นางสาวรังสิณี

เกิดพันธุ์

นายรุ่งตระกูล

ตระกูลวัฒนา

นางสาวศรีสุดา

อภัยพันธ์

นางสาวศิริพันธ์

แจ่มเพชร

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 117463  
วัน,เดือน,ปี..... - 5 ค.ศ. 2554

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตุ๊กตุ้มหัวหก

INVERTED PENDULUM

โดย

นางสาว รังสิณี เกิดพันธุ์ รหัส 50011279

นาย รุ่งตระกูล ตระกูลวัฒนา รหัส 50011307

นางสาว ศรีสุดา อภัยพันธ์ รหัส 50011538

นางสาว ศิรินันท์ แจ่มเพชร รหัส 50011561

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร. ยุทธนา

กิติใจเดียว

ปริญญานิพนธ์นี้สำหรับปริญญาวិทยกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2553

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ลูกตุ้มหัวทก

INVERTED PENDULUM

ผู้จัดทำ

- |                     |             |                       |
|---------------------|-------------|-----------------------|
| 1. นางสาว รังสินี   | เกิดพันธุ์  | รหัสนักศึกษา 50011279 |
| 2. นาย รุ่งตระกูล   | ตระกูลวัฒนา | รหัสนักศึกษา 50011307 |
| 3. นางสาว ศรีสุดา   | อภัยพนันท์  | รหัสนักศึกษา 50011538 |
| 4. นางสาว ศิรินันท์ | แจ่มเพชร    | รหัสนักศึกษา 50011561 |



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. บุธธนา ทิศจิตใจเดียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ลูกตุ้มหัวหก

นางสาว รังสิณี	เกิดพันธุ์	50011279
นาย รุ่งตระกูล	ตระกูลวัฒนา	50011307
นางสาว ศรีสุดา	อภัยพันธ์	50011538
นางสาว ศรินันท์	แจ่มเพ็ชร	50011561
ผศ. ดร. ยุทธนา	กิดใจเดียว	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2553

### บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันการรักษาเสถียรภาพได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ในหุ่นยนต์ เครื่องบิน และยานพาหนะต่างๆ ในที่นี้ได้นำเอาการทำงานของลูกตุ้มหัวหกมาใช้ในการศึกษาการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์สองล้อ ซึ่งได้มีการทดลองหุ่นยนต์ขึ้น 2 ขนาด คือ ขนาดที่ 1 หุ่นยนต์ขนาดจริง ซึ่งออกแบบโดยใช้โปรแกรม Catia และนำไปประกอบโครงสร้างเป็นตัวหุ่นยนต์สองล้อ โดยที่หุ่นยนต์สองล้อนี้สามารถรองรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 100 กิโลกรัม ในส่วนของการขับเคลื่อนใช้ชุดเฟือง, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์, วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้ไอซีเบอร์ HIP4080A, แบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ 20 แอมป์ และใช้เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงเส้นและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมเป็นตัวรับอินพุต ขนาดที่ 2 หุ่นยนต์ขนาดจำลองนำมาทำการรักษาเสถียรภาพ โดยใช้ทฤษฎี PID ในการคำนวณทิศทางและค่า Duty cycle ของมอเตอร์ ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้เป็นตัวรับอินพุต เป็นเซนเซอร์ชนิดเดียวกับที่ใช้ในหุ่นยนต์ขนาดจริง และนำไปประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 เพื่อรักษาเสถียรภาพ และนำไปโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ขนาดจริง

# Inverted Pendulum

Miss Rangsinee	Kerdpun	50011279
Mr. Rungtrakool	Trakoolwuttana	50011307
Miss Srisuda	Aphaipanan	50011538
Miss Sirinan	Champet	50011561
Asst. Prof. Dr. Yuttana	Kitjaidure	Advisor

## Abstract

Nowadays, a self-balancing system becomes widely used such as in a robot, aero space and vehicles etc. The concept of inverted pendulum is a radical approach to the study of a two wheels robot. In this work, we test two sizes of robots. Part 1 is an actual-size designed by Catia program and assembled structure. This two wheels robot is able to carry less than 100 kilograms. The moving part uses gear-boxes on 24 volts 350 watts DC motors controlled by IC HIP4080A with 24 volts battery. The sensors contain accelerometer and gyroscope to receive input signals. Part 2 is a scaled size robot used to balance by PID theory, to compute direction and duty cycle of motor, before bringing to the real machine. We conduct by a stand alone microcontroller dsPIC30F4011 to balance it.

# กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เพราะได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร. ยุทธนา กิติใจเดียว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำรายงาน และโครงการ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รศ. ประภาส อุกคกิมพันธ์ ผศ. มณฑล ใจกุศล และ นายกฤษดา เปี่ยมศรีนวล ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆจนทำให้รายงานฉบับนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ได้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีในรายงานฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



รังสิณี เกิดพันธุ์  
รุ่งตระกูล ตระกูลวัฒนา  
ศรียุตา อภัยพันธ์  
ศรินทร์ แจ่มเพชร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูปภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ .....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีลูกตุ้มหัวทก.....	2
2.1 โครงสร้างของระบบหุ่นยนต์สองล้อ.....	2
2.2 ทฤษฎีลูกตุ้มหัวทก .....	3
2.3 หลักการรักษาสถิตของหุ่นยนต์สองล้อ .....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีการควบคุม.....	6
3.1 ตัวควบคุมและแบบการควบคุม (Controller and Control Action).....	7
3.1.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control action: P-Action).....	7
3.1.2 การควบคุมแบบสะสม (Integral control action: I-Action).....	8
3.1.3 การควบคุมแบบอัตรา (Derivative control action: D-Action) .....	9
3.2 การควบคุมแบบผสม (Mixed – Mode of Control Action).....	10
3.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบสะสม (Proportional – Plus Integral Control Action).....	11

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตรา (Proportional – Plus – Derivative Control Action).....	11
3.2.3 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบสะสมผสมแบบอัตรา (Proportional – Plus – Integral – Plus – Derivative Control Action).....	12
3.3 การปรับ PID .....	13
3.3.1 ผลการตอบสนองที่ดี .....	13
3.3.2 ผลของ PID ต่อเสถียรภาพของระบบ .....	15
3.3.3 คุณภาพของการควบคุม .....	16
3.4 ทฤษฎีการ Tune PID .....	17
3.4.1 ทฤษฎีการปรับจูนด้วยมือ .....	17
3.4.2 Ziegler-Nichols (Z-N) Oscillation Method .....	17
3.4.3 Ziegler-Nichols Reaction Curve Method .....	17
3.4.4 Cohen-Coon Reaction Curve Method .....	18
3.5 Kalman Filter .....	19
บทที่ 4 ทฤษฎีอุปกรณ์.....	20
4.1 ทฤษฎีเซนเซอร์ .....	20
4.1.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer).....	20
4.1.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope).....	21
4.2 ทฤษฎีการเชื่อมต่อพอร์ตด้วย RS232 .....	21
4.2.1 พอร์ตแบบอนุกรม (Serial port).....	21
4.2.2 สายสัญญาณผ่านพอร์ต RS 232.....	22
4.2.3 การสร้างสายเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมกับอุปกรณ์ภายนอก.....	22
4.2.4 จังหวะเวลาของการสื่อสารข้อมูลอนุกรม .....	23
4.2.5 รูปแบบของการสื่อสารข้อมูลอนุกรม .....	23
4.3 ทฤษฎีระบบประมวลผลกลาง.....	24

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง.....	25
4.4.1 มอเตอร์กระแสตรง.....	25
4.4.1.1 หลักการทำงานของคีมอเตอร์.....	26
4.4.1.2 การควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง.....	27
4.4.1.3 วงจรขับมอเตอร์โดยใช้ไอซีขับมอเตอร์.....	28
4.4.1.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์.....	29
4.4.2 ก่อตั้งเฟือง.....	30
4.5 มอสเฟต (MOSFET).....	32
4.5.1 มอสเฟตแบบ Depletion.....	33
4.5.1.1 การทำงานของมอสเฟตแบบ Depletion.....	33
4.5.1.2 คีมอสเฟตแบบแซนแนล p.....	35
4.5.2 มอสเฟตแบบ Enhancement.....	35
4.5.2.1 การทำงานของมอสเฟตแบบ Enhancement.....	36
4.5.2.2 อีมอสเฟตแบบแซนแนล p.....	37
บทที่ 5 การออกแบบ Simulate Inverted Pendulum Model.....	39
5.1 Simulation ด้วยโปรแกรม MATLABและโปรแกรม visual studio C++.....	39
5.2 ผลการทดลอง Simulation ด้วยโปรแกรม MATLAB ในส่วนการควบคุมมุม (Angle) ของหุ่นยนต์สองล้อ.....	40
5.2.1 กรณีที่หุ่นยนต์ไม่มี Sample time (real time).....	40
5.2.2 กรณีที่หุ่นยนต์มี Sample time ความถี่ 10 เฮิรท์.....	41
5.3 ผลการทดลอง Simulation ด้วยโปรแกรม visual studio C++ ในส่วนการควบคุมมุม (Angle) ของหุ่นยนต์สองล้อ.....	42
5.3.1 กรณีที่หุ่นยนต์มี Sample time ความถี่ 10 และ 50 เฮิรท์.....	43
บทที่ 6 การออกแบบหุ่นยนต์ขนาดจำลอง.....	45

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1 บล็อกการทำงานของระบบ (Block Control) .....	45
6.2 ส่วนประกอบของวงจร .....	45
6.2.1 วงจรเรกกูเรเตอร์.....	46
6.2.2 วงจรเซนเซอร์.....	46
6.2.3 วงจรส่วนประมวลผลกลาง.....	47
6.2.4 วงจรขับมอเตอร์.....	48
6.2.5 วงจรการติดต่อพอร์ตแบบอนุกรม RS-232.....	49
6.3 ระบบการทำงาน.....	50
บทที่ 7 ผลการทดลองหุ่นยนต์ขนาดจำลอง .....	52
7.1 วัดการตอบสนองของ Accelerometer .....	52
7.1.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero – Adjust) .....	52
7.1.2 ก่อนและหลัง Kalman Filter.....	52
7.2 วัดการตอบสนองของ Gyroscope .....	53
7.2.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero – Adjust) .....	53
7.2.2 หลังการปรับศูนย์.....	54
7.3 วัดค่ามุมในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพ.....	54
7.4 วัดการตอบสนองของการคำนวณทฤษฎี PID ที่มีต่อระบบในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพ.....	55
7.5 วัดสัญญาณของวงจรขับมอเตอร์.....	56
7.5.1 ที่ Duty cycle 25% .....	56
7.5.2 ที่ Duty cycle 50% .....	57
7.5.3 ที่ Duty cycle 75% .....	58
บทที่ 8 การศึกษาและออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์ขนาดจริง.....	60
8.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ขนาดจริง .....	60

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.1.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....	60
8.2 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์ขนาด 24 Volts 350 Watts.....	64
8.2.1 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	64
8.2.2 มอเตอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ขนาดจริง.....	65
<b>บทที่ 9 ผลการทดลองหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริง.....</b>	<b>66</b>
9.1 ผลทดลองวัดกระแสที่ความถี่ต่างๆ.....	66
9.2 การทดลองวัดความเร็วมอเตอร์ (RPM).....	68
9.3 วัดการตอบสนองของ Accelerometer.....	70
9.3.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero – Adjust).....	70
9.3.2 ก่อนและหลัง Kalman Filter.....	71
9.4 วัดการตอบสนองของ Gyroscope.....	72
9.4.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero – Adjust).....	72
9.5 วัดสัญญาณของวงจรขับมอเตอร์.....	72
9.5.1 ที่ 25% Duty cycle.....	73
9.5.2 ที่ 50% Duty cycle.....	74
9.5.3 ที่ 75% Duty cycle.....	75
<b>บทที่ 10 สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>76</b>
<b>บทที่ 11 สรุปผลการทำงาน.....</b>	<b>78</b>
11.1 สรุปผลการปฏิบัติงาน.....	78
11.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	78
11.3 การแก้ไขปัญหา.....	78
11.4 ประโยชน์และการประยุกต์.....	78
11.5 สิ่งที่ได้รับจากโครงการนี้.....	79

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ตารางปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธี Ziegler-Nichols (Z-N) Oscillation .....	17
3.2 ตารางปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธี Ziegler-Nichols Reaction Curve .....	18
3.3 ตารางปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธี Cohen-Coon Reaction Curve Method.....	18
4.1 ลักษณะการหมุนของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุท .....	29
6.1 ลักษณะการหมุนของมอเตอร์ .....	49
9.1 แสดงค่ากระแสที่ค่าความถี่ต่างๆ ขณะที่มอเตอร์มีการหมุนกลับทิศไปมา .....	67
9.2 แสดงความเร็วรอบมอเตอร์เทียบกับค่า % Duty cycle ต่างๆที่ความถี่ 1.25 กิโลเฮิรต์ .....	69



# สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
2.1	แผนผังแสดงระบบควบคุมหุ่นยนต์สองล้อ ..... 2
2.2	แสดงแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนรถและองค์ประกอบที่จะต้องใช้พิจารณา ..... 3
2.3	รูปแสดงหุ่นยนต์ขณะ Balanced และขณะ Tilted ..... 4
2.4	รูปแสดงการคำนวณค่า Torque ตามลักษณะของหุ่นยนต์..... 5
2.5	รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะเอียงจากตำแหน่งสมดุล ..... 5
3.1	ระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับ ..... 6
3.2	โครงสร้างตัวควบคุม ..... 7
3.3	แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพี ..... 7
3.4	แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบไอ ..... 8
3.5	แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบดี ..... 9
3.6	แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีและไอ..... 11
3.7	แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพีและดี ..... 12
3.8	แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี ..... 13
3.9	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ..... 14
3.10	ผลตอบของระบบควบคุมต่างๆ ..... 14
3.11	Transient and Steady-State Response..... 16
3.12	รูปแสดงการตอบสนองของ plant..... 18
4.1	แสดงเซนเซอร์วัดความเร็วแบบเชิงกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์ ..... 20
4.2	เซนเซอร์วัดความเร็ว ADXL202JE..... 20
4.3	แสดงการใช้แกนทั้งสองแกนในการวัด 360 องศา..... 21
4.4	เซนเซอร์ใจโรสโคปเบอร์ IDG-500 ..... 21
4.5	รูปแสดงพอร์ต RS232 ..... 22
4.6	รูปแสดงการต่อพอร์ตอนุกรม RS232..... 23
4.7	แสดงการส่งข้อมูลแบบอนุกรมด้วยความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที ..... 23
4.8	แสดงการส่งข้อมูลขนาด 8 บิตแบบอนุกรมพร้อมด้วยบิตเริ่มต้น, บิตพาริตี, บิตหยุด ด้วย ความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที..... 24
4.9	แสดงการจัดขาสัญญาณของ dsPIC30F4011 ..... 25

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.10 บล็อกไดโอดเอกรระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐาน .....	26
4.11 วงจรเฮชบริดจ์และลักษณะการทำงาน .....	27
4.12 การนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็นวงจรเฮชบริดจ์.....	28
4.13 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยไอซีขับเคลื่อนมอเตอร์เบอร์ L298 .....	28
4.14 สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PMF.....	30
4.15 สัญญาณควบคุมมอเตอร์แบบ PWM.....	30
4.16 ระบบการขับปลั๊กของเกียร์.....	31
4.17 แสดงวงจรสมมูลของ MOSFET.....	32
4.18 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ Depletion .....	33
4.19 แสดงโครงสร้างของดีมอสเฟตแบบแซนแนล n.....	33
4.20 แสดงการทำงานของมอสเฟตแบบ Depletion.....	34
4.21 กราฟแสดงกระแสของมอสเฟตแบบ Depletion .....	34
4.22 กราฟแสดงกระแสของดีมอสเฟตแบบแซนแนล p .....	35
4.23 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ Enhancement .....	35
4.24 แสดงโครงสร้างของดีมอสเฟตแบบแซนแนล n.....	36
4.25 แสดงการทำงานของมอสเฟต Enhancement .....	37
4.26 กราฟแสดงกระแสของดีมอสเฟตแบบแซนแนล p .....	38
5.1 แผนผังการ Simulate การทำงานของหุ่นยนต์.....	39
5.2 การ Simulation หุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	40
5.3 กราฟแสดงการควบคุมมุม (Angle) กรณีไม่มี sample time .....	40
5.4 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม กรณีไม่มี sample time.....	41
5.5 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 10 เฮิรท์ .....	41
5.6 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร่งเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 10 เฮิรท์.....	42
5.7 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 50 เฮิรท์ .....	42
5.8 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 50 เฮิรท์ .....	43
5.9 กราฟแสดงการควบคุมมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 10 และ 50 เฮิรท์.....	43
6.1 แสดงบล็อกไดโอดเอกรของระบบ .....	45

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
6.2 แสดงบล็อกไคอะแกรมของวงจร .....	46
6.3 แสดงวงจรถูกเรกกูเรเตอร์.....	46
6.4 แสดงวงจรเซนเซอร์.....	47
6.5 แสดงวงจรส่วนประมวลผลกลาง.....	48
6.6 แสดงวงจรถับมอเตอร์ .....	49
6.7 แสดงวงจรถักติดต่อพอร์ตแบบอนุกรม RS-232.....	50
6.8 แสดงแผนผังระบบการทำงาน .....	51
7.1 แสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Accelerometer.....	52
7.2 แสดงการตอบสนองของ Accelerometer ก่อนและหลัง Kalman Filter .....	53
7.3 แสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Gyroscope.....	53
7.4 แสดงการตอบสนองของ Gyroscope.....	54
7.5 แสดงค่ามุมในขณะที่หุ่นยนต์ขนาดจำลองมีการรักษาเสถียรภาพ.....	55
7.6 แสดงการตอบสนองของการคำนวณทฤษฎี PID ที่มีต่อระบบในขณะที่หุ่นยนต์ขนาดจำลองมีการรักษาเสถียรภาพ.....	55
7.7 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุทและเอาต์พุทของ L298 ที่ Duty cycle 25%.....	56
7.8 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุทและเอาต์พุทของ L293D ที่ Duty cycle 50% .....	57
7.9 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุทและเอาต์พุทของ L298 ที่ Duty cycle 25% .....	58
8.1 แสดง Segway รุ่นที่ 3 ของภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ลาดกระบัง .....	60
8.2 แสดงยานพาหนะสองล้อบรรทุกคนรุ่นที่สอง CRV Lab มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....	60
8.3 รูป Segway จาก Internet.....	61
8.4 แสดงการออกแบบหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวหกโดยใช้โปรแกรม Catia .....	61
8.5 รูปแสดงภาพถ่ายของหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวหก .....	62
8.6 แสดงส่วนของฐานของหุ่นยนต์และรูปแสดงส่วนของมอเตอร์ถูกยึดติดกับกล่อง .....	62
8.7 แสดงส่วนฐานของหุ่นยนต์มาประกอบกับกล่องใส่มอเตอร์ .....	62
8.8 รูปแสดงส่วนของล้อและรูปแสดงการประกอบล้อเข้ากับมอเตอร์ .....	63
8.9 รูปแสดงหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวหก.....	63

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
8.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	64
8.11 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ของหุ่นยนต์ขนาดจริง.....	64
8.12 รูปมอเตอร์ที่ใช้ในขนาดจริง .....	65
9.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา.....	68
9.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) กับ % Duty cycle.....	70
9.3 กราฟแสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Acceleromete .....	71
9.4 กราฟแสดงการตอบสนองของ Accelerometer ก่อนและหลัง Kalman filter .....	71
9.5 กราฟแสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Gyroscope.....	72
9.6 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุตและเอาต์พุตของ HIP4080A ที่ 25% Duty cycle .....	73
9.7 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุตและเอาต์พุตของ HIP4080A ที่ 50% Duty cycle .....	74
9.8 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุตและเอาต์พุตของ HIP4080A ที่ 75% Duty cycle .....	75

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับการควบคุมการทรงตัวถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น หุ่นยนต์ เครื่องบินและยานพาหนะต่างๆ เป็นต้น จึงได้ศึกษาการควบคุมการทรงตัวโดยการสร้างหุ่นยนต์สองล้อที่สามารถรักษาสมดุลของตัวเองได้ หลักการควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์นี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการควบคุมการทรงตัวของลูกตุ้มหัวหก ซึ่งเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจในการศึกษาค้นคว้าทางด้านระบบควบคุม ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการทรงตัวนี้จะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทรงตัวการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และแขนกลได้ในอนาคต ในปฏิญานิพนธ์นี้ได้ทดลองทำหุ่นยนต์สองล้อขนาดจำลองซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวตรวจรู้และตัวตรวจจับ (Sensor) เพื่อประมวลสัญญาณย้อนกลับไปยังระบบควบคุม โดยตัวประมวลผลกลางใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPic30F4011 โดยระบบหุ่นยนต์สองล้อที่ควบคุมนี้ต้องการออกแบบให้ระบบมีการตอบสนองที่ดี และสามารถปฏิเสธต่อการสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ จากนั้นจึงได้ออกแบบหุ่นยนต์สองล้อขนาดใช้งานจริงโดยดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากหุ่นยนต์สองล้อขนาดจำลองมาเป็นแนวทางในการออกแบบ โดยมีข้อแตกต่างในส่วนมอเตอร์และวงจรมอเตอร์ซึ่งหุ่นยนต์สองล้อขนาดใช้งานจริงขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการควบคุมหุ่นยนต์ขนาดจำลองและออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

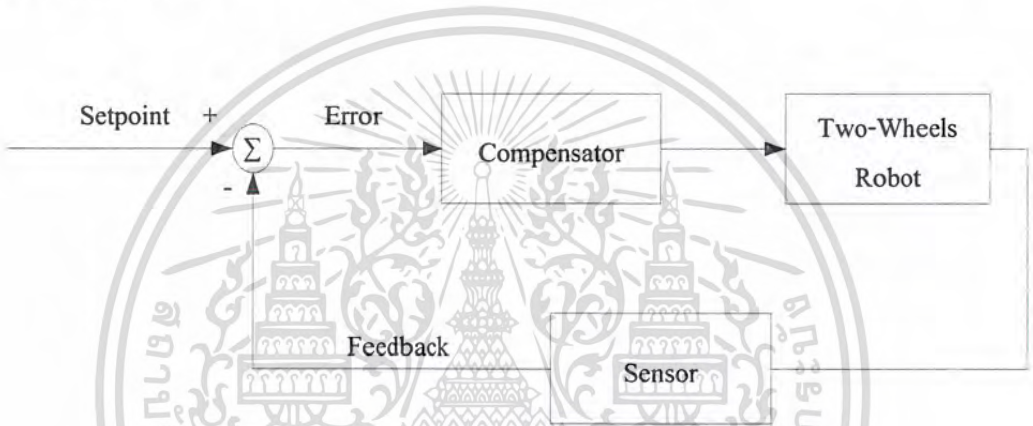
ศึกษาการควบคุมการทดลองหุ่นยนต์ขนาดจำลอง, ศึกษาคุณสมบัติของมอเตอร์และวงจรมอเตอร์ขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์ และศึกษาและออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีลูกตุ้มหัวหก

### 2.1 โครงสร้างของระบบหุ่นยนต์สองล้อ

จากการศึกษาระบบโครงสร้างของหุ่นยนต์สองล้อ จะมีหลักการทำงานดังรูปที่ 2.1 เป็นการควบคุมระบบเพื่อให้มีเสถียรภาพ ระบบการควบคุมนี้ ณ เวลาทางด้านอินพุตมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ผลตอบสนองจะเข้าสู่ศูนย์ ส่วนของตัวควบคุมเลือกใช้ทฤษฎี PID ควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพ



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงระบบควบคุมหุ่นยนต์สองล้อ

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบระบบควบคุมคือระบบควบคุมนั้นจะต้องมีความเสถียร (Stable) ซึ่งหมายความว่า เมื่อมีอินพุตที่มีค่าแน่นอนค่าหนึ่ง เอาท์พุทของระบบจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงที่แน่นอนซึ่งหมายความว่าเอาท์พุทที่ได้จะต้องไม่มีค่าเข้าสู่อนันต์หรือไม่มีขีดจำกัดนั่นเอง

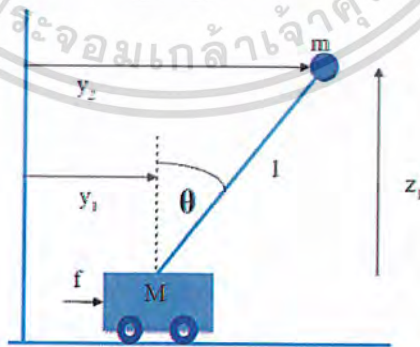
ในตอนนี้จะกล่าวถึงลักษณะและข้อจำกัดของระบบที่จะเป็นระบบเสถียร สำหรับระบบเชิงเส้นความต้องการที่จะให้ระบบเสถียรจะขึ้นอยู่กับโพล (Poles) ของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ควบคุมย้อนกลับ โพล หมายถึง รากของเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอน ในขณะที่ศูนย์ (Zeros) หมายถึง รากของเทอมเศษของฟังก์ชันถ่ายโอน

ระบบจะกล่าวได้ว่าเป็นระบบเสถียร ถ้าหากว่าทุกอินพุตที่มีค่าจำกัด (Bound Input) จะให้เอาท์พุทที่มีค่าจำกัด (Bound Output) ซึ่งในกรณีนี้นิยมเรียกว่า BIBO (Bound Input - Bound Output) ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากให้อินพุตแบบขั้นบันไดกับระบบการตอบสนองหรือเอาท์พุทของระบบจะต้องมีค่าจำกัดค่าหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากมีระบบหนึ่งที่ได้รับฟังก์ชันขั้นบันไดค่าหนึ่งแล้ว

ปรากฏว่าเอาที่พู่ที่ได้มีค่าแน่นอนค่าหนึ่ง ระบบนี้ไม่จำเป็นจะต้องเป็นระบบที่เสถียร เพราะถ้าระบบจะเป็นระบบที่เสถียรจะต้องให้เอาที่พู่ที่มีค่าจำกัด เทียบต่ออินพุตแบบขั้นบันไดหลายๆ แบบ อีกกรณีหนึ่งระบบสามารถที่จะพิจารณาได้ว่าเสถียร ถ้าหากว่าได้รับอินพุตแบบการคล แล้วเอาที่พู่ที่ได้จะกลับคืนเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปสู่อันต์ ถ้าหากว่าระบบใดเมื่อรับอินพุตแบบการคลการตอบสนองไม่จำกัดหรือเข้าสู่อนันต์เมื่อเวลาผ่านไปสู่อันต์ เราจะเรียกระบบว่าไม่เสถียร (Unstable) อย่างไรก็ตาม ถ้าเอาที่พู่ไม่ได้กลับคืนเข้าสู่ศูนย์ แต่กลับเข้าสู่ค่าอื่น เมื่อเวลาเข้าสู่อนันต์ เราจะเรียกว่าระบบนั้น เสถียรแบบวิกฤติ (Critical Stable หรือ Marginally Stable) ที่เรากล่าวถึงแนวความคิดด้านความเสถียรของระบบนั้นเราอาจกล่าวเพียงว่าระบบนั้นเสถียรหรือไม่เสถียรเท่านั้น การแบ่งระบบว่าเสถียรหรือไม่เสถียรในกรณีนี้เป็นการพิจารณาแบบที่เราเรียกว่า การเสถียรสัมบูรณ์ (Absolute Stability) โดยระบบที่มีความเสถียรสัมบูรณ์แล้วนั้นโดยส่วนใหญ่เราจะเรียกสั้นๆว่าเป็นระบบเสถียร ถ้ากำหนดระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่เสถียรให้ระบบหนึ่ง เราสามารถที่จะจำแนกระบบนั้นเป็นลำดับของความเสถียรได้อีก โดยเราจะใช้คำว่า การเสถียรสัมพัทธ์ (Relative Stability) เพราะในความเป็นจริงแล้ว ยิ่งระบบมีความเสถียรมากเท่าใดระบบก็มีความลำบากในการเปลี่ยนแปลงหรือปรับเปลี่ยนได้ยากขึ้นเท่านั้น

## 2.2 ทฤษฎีลูกตุ้มหัวหก

ทฤษฎีลูกตุ้มหัวหกเป็นกรณีศึกษาของวิธีการทรงตัวที่ไม่เป็นระบบเชิงเส้น อีกทั้งยังมีความเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของระบบ ในระบบดังกล่าวจะประกอบด้วย ก้านถ่วงน้ำหนัก อยู่บนระนาบซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยสะดวกบนแกนระนาบ



รูปที่ 2.2 แสดงแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนรถและองค์ประกอบที่จะต้องพิจารณา

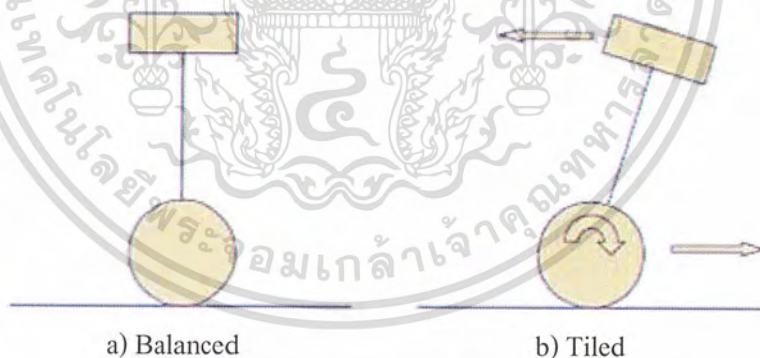
- โดยที่  $g$  คือ แรงโน้มถ่วงโลก  
 $f$  คือ แรงที่กระทำกับรถ  
 $m$  คือ มวลก้านถ่วงน้ำหนัก  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม  
 $\theta$  คือ มุมเอียงของก้านจากจุดสมดุล  
 $M$  คือ มวลของรถ  
 สมการของลูกตุ้มหัวหก

$$\ddot{x}_{\text{cart}}(f, \theta, \omega) = \frac{f - g \sin \theta \cos \theta + l \omega^2 \sin \theta}{\frac{M}{m} + \theta^2} \quad (2.1)$$

$$\ddot{\theta}_{\text{pendulum}} = \frac{-f \cos \theta + (M+m)g \sin \theta - l \omega^2 \sin \theta \cos \theta}{l \left( \frac{M}{m} + \sin^2 \theta \right)} \quad (2.2)$$

### 2.3 หลักการรักษาสสมดุลของหุ่นยนต์สองล้อ

เมื่อหุ่นยนต์เสียสมดุล ล้อจะถูกขับเคลื่อนให้สมดุลดังรูปที่ 2.3 a) ซึ่งถ้าหากเราสร้างหุ่นยนต์ให้มีจุด CG ที่ตำแหน่งต่ำๆ จะง่ายต่อการรักษาสสมดุล



รูปที่ 2.3 รูปแสดงหุ่นยนต์ขณะ Balanced และขณะ Tilted

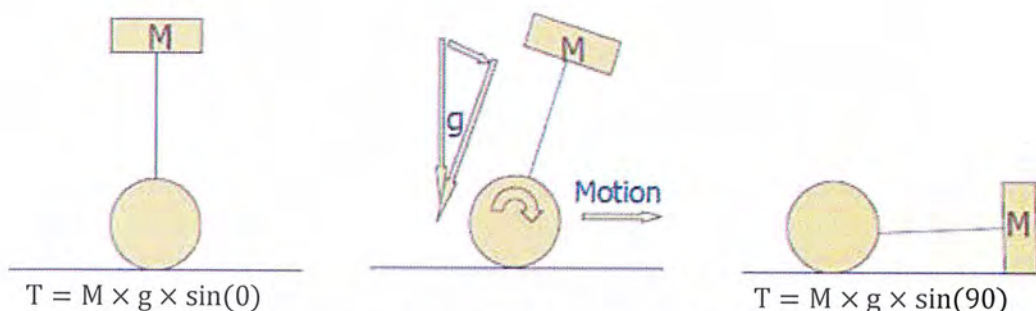
เมื่อหุ่นยนต์เสียสมดุลเราต้องใช้แรงชดเชยให้กับหุ่นยนต์เพื่อรักษาสสมดุล โดยมีแรงชดเชยดังสมการ

$$\text{Restrring Torque} = \omega \times K_{\omega} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\omega$  คือ อัตราเร็วเชิงมุม (องศา/วินาที)

$K_\omega$  คือ ค่า Factor ของมวลหุ่นยนต์และจุดหมุนของแกนลูกตุ้มหัวหก



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการคำนวณค่า Torque ตามลักษณะของหุ่นยนต์

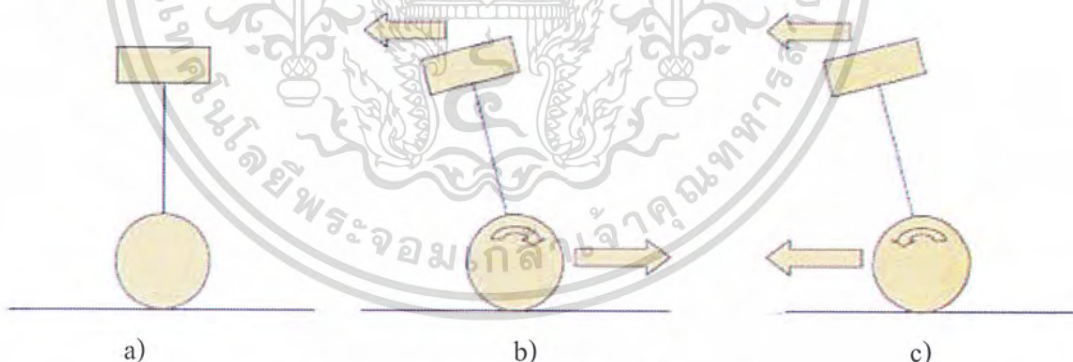
$$\text{Balance} = M \times g \times \sin \theta$$

(2.4)

โดยที่  $M$  คือ จุดหมุนของแกนลูกตุ้มหัวหก

$g$  คือ แรงโน้มถ่วงโลก

$\theta$  คือ มุมเอียงของแกนลูกตุ้มหัวหกจากระนาบสมดุค



รูปที่ 2.5 รูปแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะเอียงจากตำแหน่งสมดุค

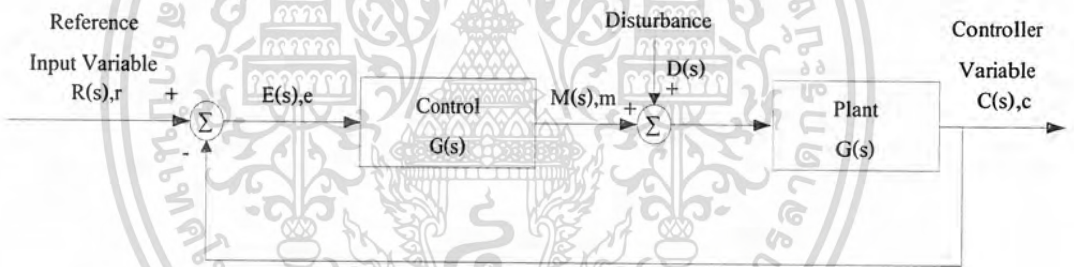
เมื่อแกนลูกตุ้มหัวหกของหุ่นยนต์มีลักษณะเอียงไปจากตำแหน่งสมดุค จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุม ดังนั้นหุ่นยนต์จะต้องพยายามขับเคลื่อนไปในทิศทางเดียวกันกับมุมที่เอียง ดังรูปที่ 2.5 c) แต่ถ้าเกิดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนไปในทิศทางข้ามกับมุมเอียง หุ่นยนต์จะเกิดการล้มลงได้ดังรูปที่ 2.5 b)

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการควบคุม

ข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากแก่การวิเคราะห์ วิจารณ์ระบบควบคุมอัตโนมัติ ได้แก่ ชนิดของการควบคุมและแบบของระบบควบคุมเพราะเป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของระบบโดยทั่วไปที่ทำให้ทำนายคุณสมบัติและการตอบสนองของระบบอย่างประมาณได้ ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นชนิดของตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถใช้งานประยุกต์ต่างๆได้อย่างเหมาะสม สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ได้ขณะปฏิบัติงานและมีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้หลายวิธี ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของตัวควบคุมพีไอดีและพฤติกรรมของตัวควบคุม

การควบคุมแบบ PID control เป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมในระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control Systems, Feedback Control Systems) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

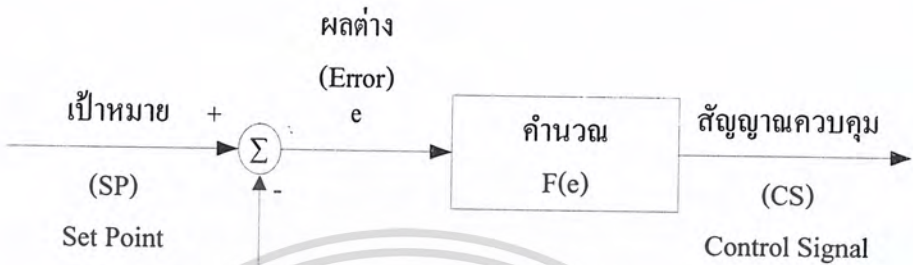


รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับ

ค่าความผิดพลาดหรือตัวแปร  $e$  ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้มาจากการนำเอาสัญญาณป้อนกลับ  $f$  ไปเปรียบเทียบกับอินพุตตัวแปร  $r$  เป็นสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนที่เป็นการควบคุมเบื้องต้น  $G_1(s)$  เพื่อให้การควบคุมเบื้องต้นตอบสนองให้โยกย้ายตัวแปร  $m$  แก่ส่วนที่เป็นต้นกำลังเพื่อแก้ไขให้เอาท์พุท หรือควบคุมตัวแปร  $c$  มีลักษณะเป็นไปในทางที่สอดคล้องกับการเปรียบเทียบกับอินพุตตัวแปร  $r$  มากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าหัวใจของระบบควบคุม คือส่วนที่เป็นการควบคุมเบื้องต้น  $G_1(s)$  เพราะเป็นส่วนทำหน้าที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนระหว่างเอาท์พุท  $c$  กับอินพุท  $r$  ของทั้งระบบกล่าวคือรับเอาความคลาดเคลื่อนคือค่าผิดพลาด  $e$  เข้ามาสู่ตัวมัน แล้วสั่งให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงาน (โดยการโยกย้ายตัวแปร  $m$ )

### 3.1 ตัวควบคุมและแบบการควบคุม (Controller and Control Action)

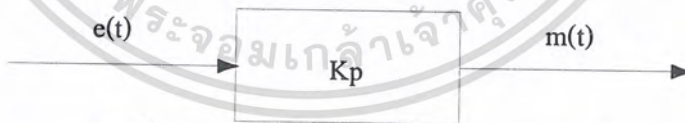
ตัวควบคุมจะรับสัญญาณเข้าจากการวัด เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายหรือ Set point ผลต่างของค่าทั้งสองจะถูกส่งไปให้ภาคคำนวณ เพื่อผลิตสัญญาณควบคุมขาออก ซึ่งจะส่งกลับไปให้กับส่วนขับเคลื่อนอีกทีหนึ่ง โครงสร้างภายในตัวควบคุมมีดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างตัวควบคุม

#### 3.1.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control action: P - Action)

ในกรณีที่ชนิดของการควบคุมเป็นแบบสัดส่วนการทำงานการควบคุมเบื้องต้นหรือตัวควบคุมจะเป็นไปในลักษณะของสัดส่วน คือ การ โยกย้ายตัวแปรจะมีค่ามากน้อยตามความมากน้อยของค่าความผิดพลาด  $e(t)$  กล่าวคือ



รูปที่ 3.3 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพี

$$m(t) = K_p \times e \quad (3.1)$$

- โดยที่  $m(t)$  คือ การเปลี่ยนแปลงของการ โยกย้ายตัวแปร  
 $e(t)$  คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด  
 $K_p$  คือ Proportional gain

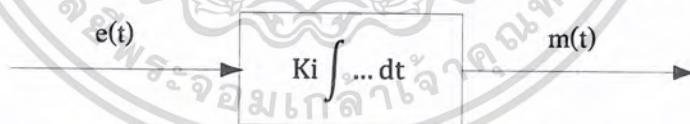
สัญญาณควบคุมก็คือ การขยายผลต่างด้วยอัตราขยาย K นั่นเอง ตามปกติในระบบการควบคุมมักจะไม่นิยมใช้ K แต่จะใช้ Proportional Band (PB) แทน ผลของ Proportional Band (PB) กับการควบคุมกระบวนการ Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (3.2)

$$\text{GAIN} = \frac{100}{\text{PB}} \quad (3.2)$$

สำหรับผลของ Proportional Band ที่ใช้กับการควบคุมแบบ P - Action นั้นค่า Proportional Band จะมีผลกับขนาดของผลตอบสนองรวมไปถึงเรื่องความไว (Sensitivity) และออฟเซต (Offset) หรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady State Error) ผลของ Proportional Band ที่มากเกินไปจะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาด (Error) ในสถานะคงตัวมากขึ้น ในทางกลับกันค่าของ Proportional Band ที่น้อยเกินไปนั้น จะทำให้กระบวนการเกิดการแกว่งขึ้นหรือเข้าใกล้จุดไร้เสถียรภาพ (Unstable) มากขึ้น

### 3.1.2 การควบคุมแบบสะสม (Integral control action: I - Action)

ตัวควบคุมมีลักษณะการทำงานกรีการควบคุมเป็นแบบสะสมหรือตัวควบคุมแบบไอ คือตัวควบคุมที่ให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อน  $m(t)$  ในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับช่วงเวลาได้ขึ้นของค่าความผิดพลาด



รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบไอ

$$m(t) \propto \int e(t) dt$$

หรือ

$$m(t) = K_i \int e(t) dt \quad (3.3)$$

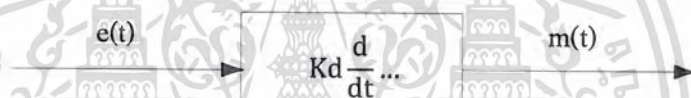
โดยที่  $K_i$  คือ Integral Gain คือตัวคงค่าเรียกว่า อัตราขยาย หรือกำลังขยายของตัวควบคุมแบบไอ สำหรับ I-Action นั้นจะมีผลกับผลตอบสนองของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบสนองในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time ( $T_i = K_p/K_i$ ) จะมีผลทำให้ออฟเซต

หรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเรื่อง I - Action จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบสนอง แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้ กระบวนการนั้นมีความน้อยเกินไป (I-Action มากเกินไป) ก็จะทำให้ผลตอบสนองของกระบวนการเกิดการแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานมากขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวของผลตอบสนองของกระบวนการ ถ้าผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบสนองที่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่งหรือค่าพุ่งเกินของการตอบสนองของกระบวนการ

### 3.1.3 การควบคุมแบบอัตรา (Derivative control action: D - Action)

การควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดิเป็นการควบคุมแบบซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของระบบในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด  $e(t)$  กล่าวคือ



รูปที่ 3.5 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบดิ

$$m(t) \propto \frac{de(t)}{dt}$$

$$m(t) = Kd \frac{de(t)}{dt}$$

(3.4)

หรือ

โดยที่  $Kd$  คือ Derivative Gain คือตัวคงค่าซึ่งเรียกว่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบดิ

ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมเบื้องต้น หรือตัวควบคุมชนิดนี้ จะให้การโยกย้ายตัวแปร  $m(t)$  ทันทีที่ค่าของความผิดพลาด  $e(t)$  มีการเปลี่ยนแปลงผิดกับการควบคุมชนิดอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อนจากปริมาณของความคลาดเคลื่อน  $e(t)$  การควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดินี้จึงมีประโยชน์มาก เพราะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเฝ้าความเคลื่อนไหวของความผิดพลาด โดยจะให้การแก้ไขทันทีที่สภาพของค่าผิดพลาดเปลี่ยนแปลงไป จึงเท่ากับเป็นการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของระบบล่วงหน้าแทนที่จะให้การแก้ไขหลังจากมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นแล้ว เหมือนการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบสะสม ดังที่ได้กล่าวมา โดย D - Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวกับกระบวนการ โดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ D - Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Set Point แต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสียของการควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดีนก็คือถ้าหากค่าความผิดพลาด  $e(t)$  มีค่าคงที่ไม่ว่าจะมากหรือน้อยเท่าใด การควบคุมเบื้องต้นของตัวควบคุมชนิดนี้จะไม่ให้มีการโยกย้ายตัวแปร  $m(t)$  กล่าวคือ

$$m(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} = 0$$

เมื่อ  $e(t)$  คือ ตัวคงค่า

นั่นคือ มันจะไม่ตอบสนองต่อค่าผิดพลาด Error Steady ( $e_{ss}$ ) ใดๆ ในทางปฏิบัติจึงไม่ใช้การควบคุมชนิดนี้เพียงชนิดเดียวในระบบควบคุมอัตโนมัติ แต่จะถูกนำไปใช้ร่วมกับการควบคุมชนิดอื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นการควบคุมแบบผสมเสมอ

### 3.2 การควบคุมแบบผสม (Mixed – Mode of Control Action)

การควบคุมแบบผสม เป็นการควบคุมซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนหรือ ของระบบเป็นแบบผสมคือให้ การ โยกย้ายตัวแปร  $m(t)$  ในลักษณะที่เหมือนกับเอาลักษณะการทำงานของ การควบคุมชนิดต่างๆ มาผสมกัน เช่น การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมหรือตัวควบคุมแบบพีและแบบไอ, การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบพีและดี และการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบพีไอดี

จุดประสงค์ของการนำเอาการควบคุมแบบต่างๆ มาผสมกันเป็นแบบการควบคุมแบบผสมก็เพื่อแก้ไขการตอบสนองของระบบดีขึ้น กล่าวคือเพื่อปรับปรุงความเร็ว ความแม่นยำ และความเสถียรของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยนำเอาข้อดีของการควบคุมแต่ละแบบมารวมกัน เช่น ระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนย่อมมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม เพราะระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วน อาจจะทำให้การตอบสนองที่รวดเร็วได้จริง แต่ไม่ว่าเวลาจะผ่านไปนานเท่าไร (ที่ค่าสูญเสีย) ย่อมมีความคลาดเคลื่อนเสมอ หากระบบถูกรบกวนจากภายนอกซึ่งปัญหานี้จะแก้ไขไปได้หากใช้การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม และในทำนองเดียวกันการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมย่อมให้การตอบสนองของระบบสู่การตอบสนองของระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตราไม่ได้ในแง่ที่ว่าขาดระบบล่วงหน้าไป กล่าวคือ ในบางครั้งระบบจะให้การตอบสนองที่มีความคลาดเคลื่อนหรือเอาที่พุงที่แกว่งไปจากอินพุทอ้างอิง ( $r$ ) มาก เพราะในระบบที่มีการควบคุมแบบพีและไอนั้นจะไม่ทำงานในทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของค่าความผิดพลาด  $e(t)$  หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบที่มีการควบคุมแบบพีและไอ อาจทำงานไม่ทันเพราะค่าของค่าความผิดพลาด  $e(t)$  เปลี่ยนแปลงอยู่แทบตลอดเวลา

**3.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบสะสม (Proportional – Plus Integral Control Action)**

ความสัมพันธ์ของการ โยกย้ายตัวแปร  $m(t)$  กับค่าความผิดพลาด  $e(t)$  ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ  
 ใน T – domain จะได้ :

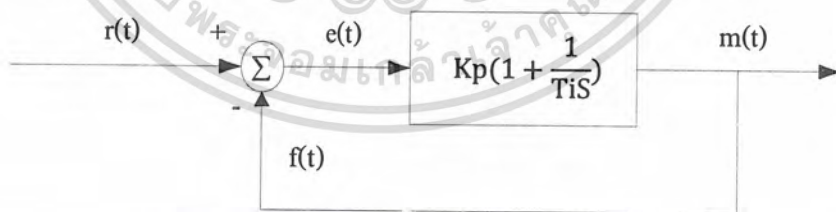
$$m(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \tag{3.5}$$

ใน S – domain จะได้ :

$$m(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) e(s) \tag{3.6}$$

โดยที่  $K_p$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี  
 $K_i$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบไอ  
 $T_i$  คือ ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบไอ =  $\frac{K_p}{K_i}$  = ระยะเวลาที่ตัวควบคุมแบบไอให้การตอบสนองเท่ากับการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี (ส่วนกลับของ  $T_i$  คือ อัตราส่วนเริ่มต้น)

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีและไอ

**3.2.2 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตรา (Proportional – Plus – Derivative Control Action)**

ความสัมพันธ์ของการ โยกย้ายตัวแปร  $m(t)$  กับค่าความผิดพลาด  $e(t)$  ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน T – domain จะได้ :

$$m(t) = K_p \times e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \equiv K_p \times e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

ใน S – domain จะได้ :

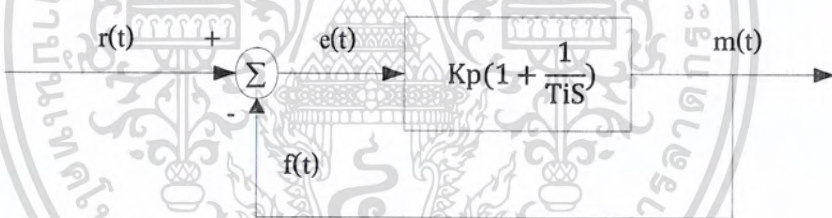
$$m(s) = K_p(1 + T_d s)e(s) \quad (3.8)$$

โดยที่  $K_p$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี

$K_d$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบดี

$T_d$  คือ ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบดี  $= \frac{K_d}{K_p}$  = ระยะเวลาที่ตัวควบคุมแบบดีให้การตอบสนองนำการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพีและดี

### 3.2.3 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบสะสมผสมแบบอินทิกรัล (Proportional – Plus – Integral – Plus – Derivative Control Action)

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร  $m(t)$  กับค่าความผิดพลาด  $e(t)$  ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

ใน T – domain จะได้ :

$$\begin{aligned} m(t) &= K_p \times e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \\ &\equiv K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3.9)$$

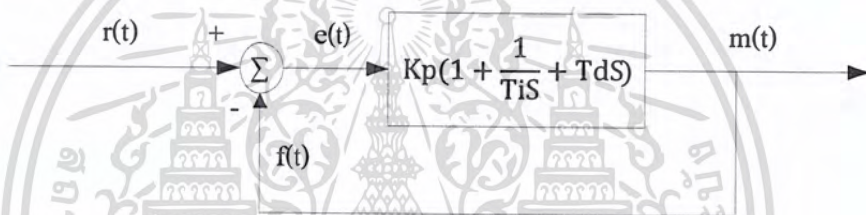
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน S – domain จะได้ :

$$m(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) e(s) \quad (3.10)$$

- โดยที่  $K_p$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี  
 $K_i$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบไอ  
 $K_d$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบดี  
 $T_i$  คือ ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบไอ  
 $T_d$  คือ ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบดี

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8

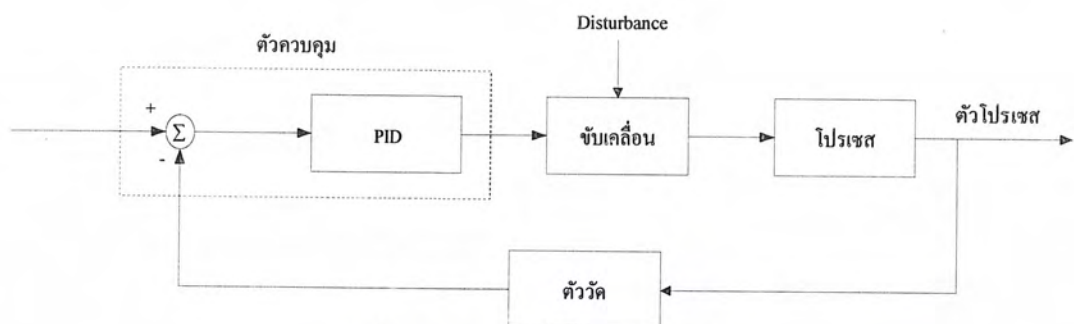


รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี

### 3.3 การปรับ PID

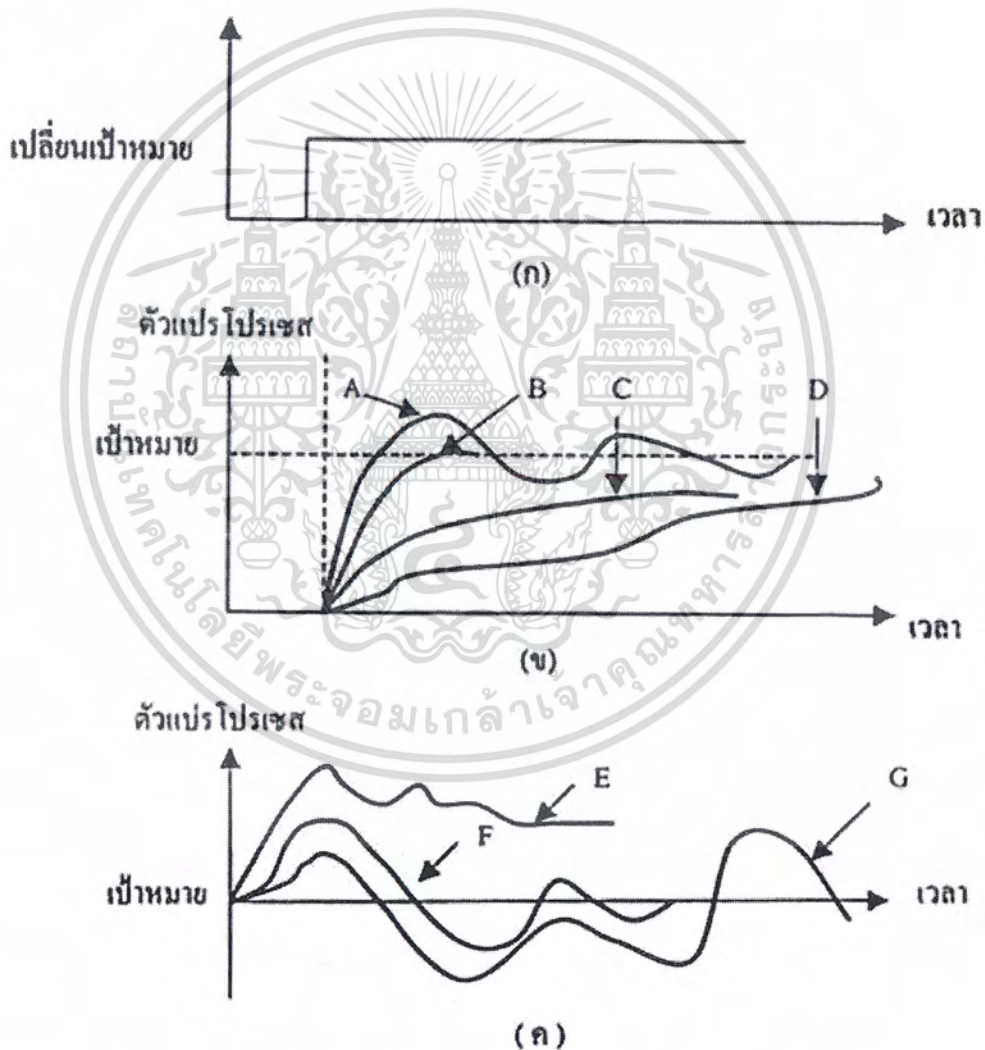
#### 3.3.1 ผลการตอบสนองที่ดี

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ตัวควบคุมจะพยายามรักษาค่าตัวแปร โพรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายอยู่เสมอ ในกรณีที่เกิด Disturbance ในระบบหรือมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจะทำให้ตัวแปร โพรเซส มีค่าต่างจากค่าเป้าหมายไปขณะหนึ่ง ตัวควบคุมจะพยายามควบคุมให้ตัวแปร โพรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายนี้ในที่สุด ลักษณะการนำค่าตัวแปร โพรเซสให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายนี้จะแตกต่างกันตามคุณสมบัติของระบบควบคุม บางระบบควบคุมอาจควบคุมให้ตัวแปร โพรเซสส่งเข้าหาค่าเป้าหมายได้เร็ว แต่บางระบบอาจทำได้ดีกว่า เราสามารถทดสอบความสามารถของระบบควบคุมนี้ โดยดูที่ผลตอบของการควบคุม



รูปที่ 3.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เป้าหมาย



รูปที่ 3.10 ผลตอบของระบบควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- A มี Overshoot และการแกว่ง
- B ตอบรับเร็ว
- C ตัวแปร โพรเซสมีค่าไม่เท่ากับค่าเป้าหมายแม้เวลาผ่านพ้นไปนาน เรียกว่า Offset
- D ตอบรับช้ามาก

เมื่อตัวแปร โพรเซสหยุดนิ่งมีค่าเป้าหมาย ในขณะนั้นเกิดมี Disturbance เข้ามารบกวน โพรเซส (Disturbance) ได้แก่ การเปลี่ยนของโหลด การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เป็นต้น) ผลตอบสนองของโพรเซส จะมีหลายแบบดังแสดงในรูป

- E เกิด Offset ได้ค่าผิดไปจากค่าเป้าหมายเดิม
- F เกิดการแกว่งเล็กน้อย ก่อนกลับเข้าสู่ค่าเป้าหมายเดิม
- G ไม่เกิด Offset

เมื่อพิจารณาผลตอบของการควบคุมชนิดต่างๆเหล่านี้พอสรุปได้ว่า ระบบการควบคุมที่ดีจะมีคุณสมบัติ ดังนี้

- ก) มีเสถียรภาพ ไม่เกิดการแกว่ง (Oscillation) เมื่อถูกกระตุ้น
- ข) ตอบรับการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย หรือ Disturbance ได้รวดเร็ว
- ค) ไม่เกิด Offset

### 3.3.2 ผลของ PID ต่อเสถียรภาพของระบบ

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งใช้การควบคุมแบบ PID นั้นถ้าเราลองแปรค่า PB, Ti และ Td จะมีผลต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมดังนี้

#### ผลของ P – Action

เมื่อลดค่า PB ลงทำให้อัตราขยายสูงขึ้น จะมีผลทำให้

- ก) Offset ลดลง
- ข) Period ของการแกว่งเล็กน้อย
- ค) อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งเพิ่มขึ้น ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น

#### ผลของ I – Action

เมื่อให้ P – Action และ D – Action คงที่แล้ว ลองลด Ti (Reset Time) จะมีผลทำให้

- ก) Offset จะหายไป
- ข) ผลตอบสนองจะเร็วขึ้น (Fast Response)
- ค) อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งเพิ่มขึ้น ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น

#### ผลของ D – Action

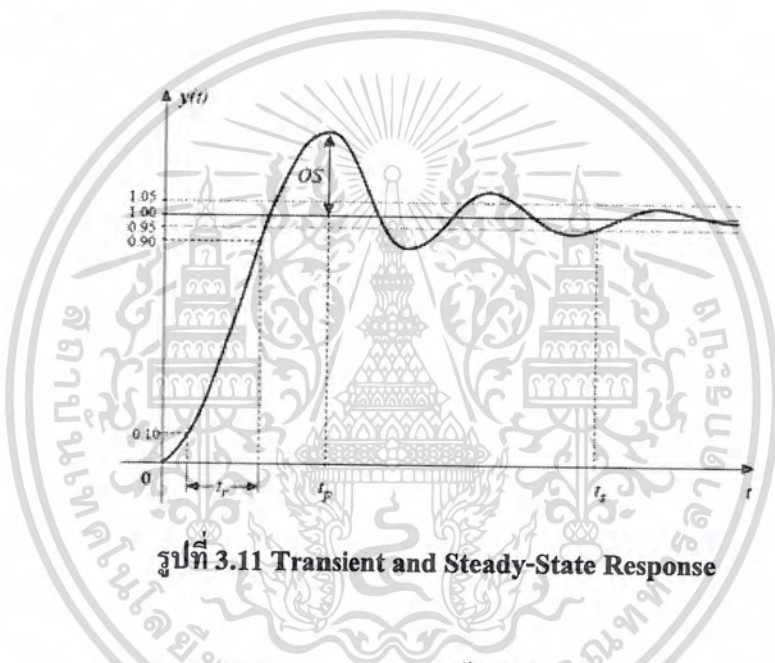
เมื่อให้ P – Action และ I – Action คงที่แล้วเพิ่มเวลา Td (Derivative time) ให้ยาวขึ้นจะทำให้

- ก) อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งลดลง ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น
- ข) Period ของการแกว่งสั้นลง

ตามปกติการใช้ค่าเวลา  $T_d$  ให้มีแนวโน้มที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น แต่ก็ก็มีจุดอ่อนตรงที่ตอบสนองต่อ Noise ได้ง่าย ทำให้ผลตอบของระบบไวเกินไป ผลตอบของการควบคุมแบบต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายและการเกิด Disturbance โดยตั้งค่า  $PB, T_i$  และ  $T_d$

### 3.3.3 คุณภาพของการควบคุม

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ Feedback เราจะใช้สัญญาณอินพุตแบบ Unit Step ใส่เข้าไปในระบบเพื่อใช้วิเคราะห์ transient ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยสามารถตรวจจากลักษณะดังรูปนี้



รูปที่ 3.11 Transient and Steady-State Response

1. Steady State Performance คำนี้นี้จะได้จากการหาค่า steady-state error ของการตอบสนองต่อฟังก์ชันอินพุตพื้นฐานที่กล่าวมาแล้ว
2. Transient Performance คำนี้นี้จะวิเคราะห์โดยการใส่ unit-step function เป็นอินพุตอ้างอิงและจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 3.11 ลักษณะที่สำคัญของผลตอบสนองนี้ได้แก่
  - Overshoot เป็นค่า error ที่มากที่สุดระหว่างอินพุตและเอาต์พุต คำนี้นี้จะใช้ในการประมาณความเสถียรของระบบ ค่า overshoot จะวัดเป็นสัดส่วนเทียบกับค่าสุดท้ายหรือค่าอินพุตอ้างอิงดังนี้  $\text{Percent overshoot} = \frac{\text{Maximum overshoot}}{\text{Final desired value}} \times 100$
  - Time delay ค่า Time delay ( $t_d$ ) เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของระบบตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเอาต์พุตมีค่าเป็น 50 % ของค่าอินพุตอ้างอิง
  - Rise time ค่า Rise time ( $t_r$ ) เป็นช่วงเวลาดังแต่เอาต์พุตมีค่าเป็น 10 % จนถึง 90 % ของค่าอินพุตอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Settling time ค่า settling time ( $t_s$ ) เป็นช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งการแกว่งของเอาต์พุตตกลงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยปกติแล้วขอบเขตนี้จะอยู่ในช่วง 2-5 % ของอินพุตอ้างอิง

### 3.4 ทฤษฎีการ Tune PID

#### 3.4.1 ทฤษฎีการปรับจูนด้วยมือ

ถ้าระบบยังคงทำงานขึ้นแรกให้ตั้งค่า  $K_i$  และ  $K_d$  เป็น 0 เพิ่มค่า  $K_p$  จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (Oscillate) แล้วตั้งค่า  $K_p$  ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับตอบสนองชนิด “quarter amplitude decay” แล้วเพิ่ม  $K_i$  จนกระทั่งออฟเซตถูกต้องในเวลาทีพอเพียงของกระบวนการ แต่ถ้า  $K_i$  มากไปจะทำให้ไม่เสถียร ถ้าเพิ่มค่า  $K_d$  จนกระทั่งระบบสามารถรักษาเสถียรภาพ ปรกติการปรับจูน PID ถ้าเกิดโอเวอร์ชูตเล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ และถ้าค่า  $K_p$  น้อยเกินไปจะทำให้เกิดการแกว่ง

#### 3.4.2 Ziegler-Nichols (Z-N) Oscillation Method

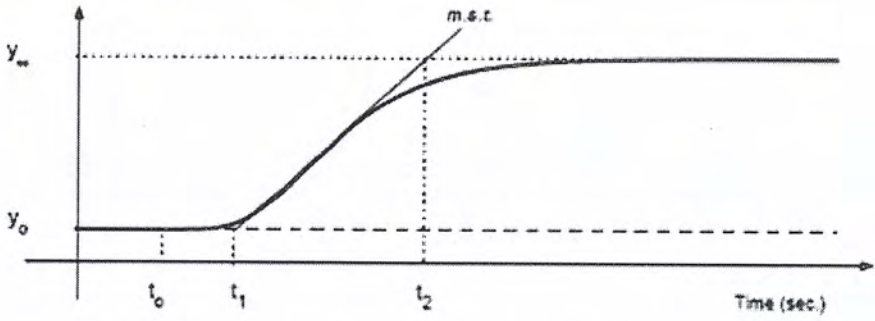
- ปรับค่า  $K_p$  ด้วยค่า gain น้อยๆ
- เพิ่ม gain จนกระทั่งเกิดแกว่งของของสัญญาณเอาต์พุต
- ให้ค่า  $K_p = K_c$  (Critical Gain) และค่าคาบของสัญญาณ Oscillate ที่เอาต์พุตคือ  $P_c$
- จากนั้นปรับค่า พารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธี Ziegler-Nichols (Z-N) Oscillation

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$0.5K_c$		
<b>PI</b>	$0.45K_c$	$P_c/1.2$	
<b>PID</b>	$0.6K_c$	$0.5P_c$	$P_c/8$

#### 3.4.3 Ziegler-Nichols Reaction Curve Method

- ปรับจูนอุปกรณ์ด้วยมือ โดยให้ค่าเอาต์พุต  $y(t) = y_0$  สำหรับค่าคงที่ของอุปกรณ์ ตั้งให้เป็น  $u(t) = u_0$
- ที่ Initial time ( $t_0$ ) ให้  $u(t) = u_0$  เมื่อเวลาผ่านไปเปลี่ยนค่าอินพุตจาก  $u_0 \rightarrow u_{\infty}$
- ค่าตอบสนองของ plant เป็นดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปแสดงการตอบสนองของ plant

คำนวณค่าพารามิเตอร์ Parameter modal ตามสมการดังนี้

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}; T_0 = t_1 - t_0; v_0 = t_2 - t_1 \quad (3.11)$$

จากนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธี Ziegler-Nichols Reaction Curve

	$K_p$	$T_r$	$T_d$
P	$V_0/K_0T_0$		
PI	$0.9V_0/K_0T_0$	$3T_0$	
PID	$1.2V_0/K_0T_0$	$2T_0$	$0.5T_0$

#### 3.4.4 Cohen-Coon Reaction Curve Method

ตารางที่ 3.3 ตารางปรับค่าพารามิเตอร์ของวิธี Cohen-Coon Reaction Curve Method

	$K_p$	$T_r$	$T_d$
P	$(V_0/K_0T_0)(1 + (T_0/3V_0))$		
PI	$(V_0/K_0T_0)(0.9 + (T_0/12V_0))$	$T_0(30V_0 + 3T_0)/(9V_0 + 20T_0)$	
PID	$(V_0/K_0T_0)(4/3 + (T_0/4V_0))$	$T_0(32V_0 + 6T_0)/(13V_0 + 8T_0)$	$4V_0T_0/(11V_0 + 2T_0)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 Kalman Filter

เป็นเครื่องมือสำคัญในการประมาณค่าของสัญญาณเพื่อให้ค่าที่มีความใกล้เคียงกับค่าจริง โดยถูกดำเนินการเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. การทำนาย ดังแสดงในสมการ (3.12) และ (3.13) โดย เวกเตอร์คอสถมัน์  $\hat{x}_k$  คือ ค่าประมาณของตัวแปรสเตรต  $x_k$  ก่อนการวัดค่าจริง และเมตริก  $P_k$  คือการประมาณค่า Error Covariance ดังสมการที่ (3.14)

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (3.12)$$

$$P_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (3.13)$$

$$P_k = \text{cov}(x_k - \hat{x}_k) \quad (3.14)$$

2. การประมาณค่าให้มีความถูกต้อง ดังแสดงในสมการ (3.15), (3.16) และ (3.17) โดย เมตริก  $K_k$  คือ อัตราขยาย Kalman เพื่อใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสเตรตโดยการหาความสมดุลระหว่างค่าที่ถูกทำนายและค่าที่วัดจริง และเมตริก  $P_k$  คือค่า Error Covariance ณ เวลา  $k$  ซึ่งจะถูกใช้ในขั้นตอนการทำนาย Error Covariance ตัวต่อไปในสมการที่ 3.14

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (3.15)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - H\hat{x}_k) \quad (3.16)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k \quad (3.17)$$

ขั้นตอนการคำนวณ Kalman Filter ประกอบด้วยการคำนวณสมการที่ 3.16 และ 3.17 (สมการทำนาย) และสมการที่ 3.15, 3.16 และ 3.17 ใน 1 รอบ สำหรับในรอบเริ่มต้น  $P_k$  สามารถถูกกำหนดค่าให้เป็น  $Q$  หรือ  $I$  ก็ได้ ในทางปฏิบัติมันสามารถเข้าสู่ค่า Steady ได้อย่างรวดเร็วดังนั้นค่านี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นของรอบต่อไปได้

## บทที่ 4

# ทฤษฎีอุปกรณ์

### 4.1 ทฤษฎีเซนเซอร์

#### 4.1.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร่งหรือการสั่นสะเทือน Accelerometer มักถูกใช้เป็นเซนเซอร์ความเร่งในหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ สำหรับการตรวจวัดข้อมูลการเคลื่อนที่ หรือ ใช้วัดความเร่งในระบบควบคุมตัวทำงานแบบเชิงเส้นหรือข้อต่อที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง หรือ ใช้วัดการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรต่างๆ เซนเซอร์วัดความเร่งมี 2 แบบด้วยกันคือ แบบเชิงกล และ แบบอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 4.1



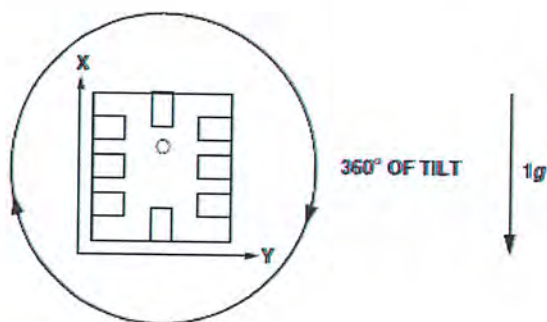
รูปที่ 4.1 แสดงเซนเซอร์วัดความเร่งแบบเชิงกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์

โดย Accelerometer ตอบสนองต่อความเร่งด้วยการส่งสัญญาณไฟฟ้าออกมา ซึ่งแปรผันตามค่าความเร่งที่ตรวจวัดได้ ซึ่งในที่นี้เซนเซอร์วัดความเร่งถูกนำมาประยุกต์ใช้วัดค่ามุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์ โดยในโครงงานนี้เลือกใช้เซนเซอร์เบอร์ ADXL202JE ซึ่งใช้ไฟเลี้ยง 3 โวลต์ ให้เอาต์พุตเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า แล้วนำค่านี้ไปคำนวณหาค่ามุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์ด้วยค่า Sensitivity ซึ่งมีค่าเท่ากับ 167 mV/g ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เซนเซอร์วัดความเร่ง ADXL202JE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการใช้แกนทั้งสองแกนในการวัด 360 องศา

#### 4.1.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วเชิงมุมที่หุ่นยนต์นั้นเคลื่อนที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์ให้เอาที่พุดเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าของ Gyroscope นั้นก็จะ swing ขึ้นลงตามทิศทางของการเอียงของหุ่นยนต์ กล่าวคือ เมื่อหุ่นยนต์มีการเอียงหรือว่ามีการเปลี่ยนแปลงมุมไปมานั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากตัว Gyroscope ก็จะมีการ swing ขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับว่าหุ่นยนต์นั้นเอียงไปในทิศทางใด แต่ว่าจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงค่าของค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อหุ่นยนต์นิ่ง

โดยในโครงงานนี้เลือกใช้เซนเซอร์เบอร์ IDG-500 ซึ่งใช้ไฟเลี้ยง 3 โวลต์ ให้เอาที่พุดเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า แล้วนำค่านี้ไปคำนวณหาค่ามุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์ด้วยค่า Sensitivity ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2\text{ mV}/^{\circ}/\text{s}$  ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เซนเซอร์ไอโรสโคปเบอร์ IDG-500

## 4.2 ทฤษฎีการเชื่อมต่อพอร์ตด้วย RS232

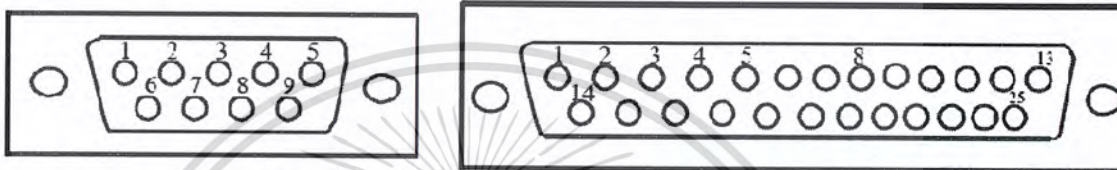
### 4.2.1 พอร์ตแบบอนุกรม (Serial port)

เป็นการสื่อสารแบบอนุกรม โดยรูปแบบการสื่อสารของพอร์ตชนิดนี้จะเป็นการส่งข้อมูลครั้งละบิตแบบต่อเนื่องกันไป โดยส่งบิตต่ำออกไปก่อนแล้วตามด้วยบิตสูง ซึ่งแตกต่างกับเอกสารนี้เป็นต้นตารังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งข้อมูลแบบขนาน ที่ส่งข้อมูลทุกบิตออกไปพร้อมกัน โดย RS-232 คือ มาตรฐานการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมที่กำหนดโดย EIA (Electrical Industries Association) ออกแบบมาเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส 2 ทิศทางเพื่อให้มีการใช้งานในการเชื่อมต่อที่สอดคล้องกันระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ต่างๆ

#### 4.2.2 สายสัญญาณผ่านพอร์ต RS 232

RS232 ฝั่งคอมพิวเตอร์ (DTE) จะเป็นขั้วต่อ DB9 หรือ DB25 ตัวผู้ มีตำแหน่งขาจากรูปที่ 4.5



DB9 มองหลังคอมพิวเตอร์

DB25 มองหลังคอมพิวเตอร์

รูปที่ 4.5 รูปแสดงพอร์ต RS232

RxD : รับข้อมูลอนุกรมเข้าสู่คอมพิวเตอร์

TxD : ส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์

GND : Ground

DTR : แจ้งอุปกรณ์ปลายทางว่าจะติดต่อด้วย

DSR : ต่อกับ DTR ของอุปกรณ์ภายนอก เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อ

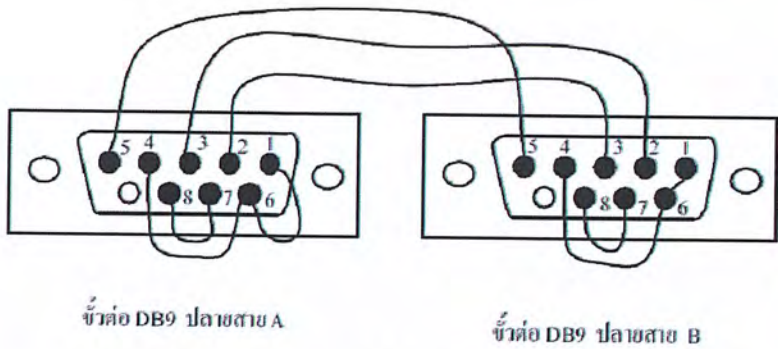
RTS : ขอให้อุปกรณ์ส่งข้อมูลเข้าที่ CTS ของคอมฯ

CTS : เมื่อรับสัญญาณ RTS แล้วจึงส่งข้อมูลจาก TxD ได้

#### 4.2.3 การสร้างสายเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมกับอุปกรณ์ภายนอก

กรณีเชื่อมต่อผ่านพอร์ตอนุกรมโดยไม่ผ่านโมเด็ม (Null Modem) มีลักษณะการต่อ

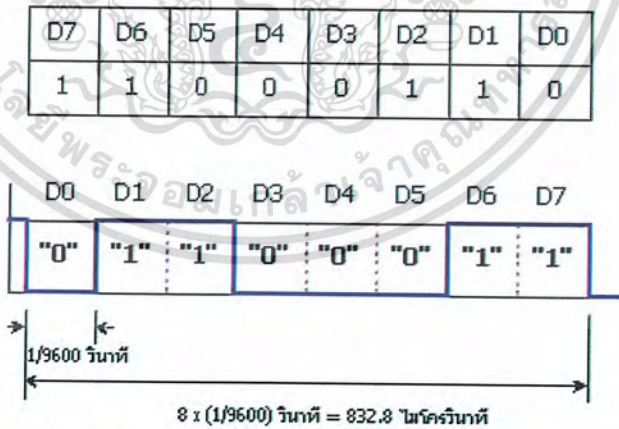
ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปแสดงการต่อพอร์ตอนุกรม RS232

#### 4.2.4 จังหวะเวลาของการสื่อสารข้อมูลอนุกรม

ในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม เพื่อรับหรือส่งข้อมูล จะเป็นลักษณะของกลุ่มข้อมูล ดังนั้นอัตราความเร็วจะต้องมีค่าเท่ากันระหว่างการรับและการส่ง โดยทั่วไปจะระบุความเร็วของจำนวนบิตในการรับและส่งข้อมูล เป็นจำนวนของบิตที่จะส่งใน 1 วินาที โดยเรียกความเร็วในการส่งข้อมูลว่า อัตรา Baud Rate ซึ่งมีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที เช่น 300, 1200, 2400, 4800 และ 9600 บิตต่อวินาที ในรูป 4.7 ถ้าหากมีการส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที จะใช้เวลาในการรับส่งข้อมูลหนึ่งบิตมีค่าเท่ากับ  $1/9600$  หรือ 104.1 ไมโครวินาที และเวลาในการรับส่งข้อมูลทั้ง 8 บิตจะมีค่าเท่ากับ  $8 \times 104.1$  หรือ 832.8 ไมโครวินาที



รูปที่ 4.7 แสดงการส่งข้อมูลแบบอนุกรมด้วยความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที

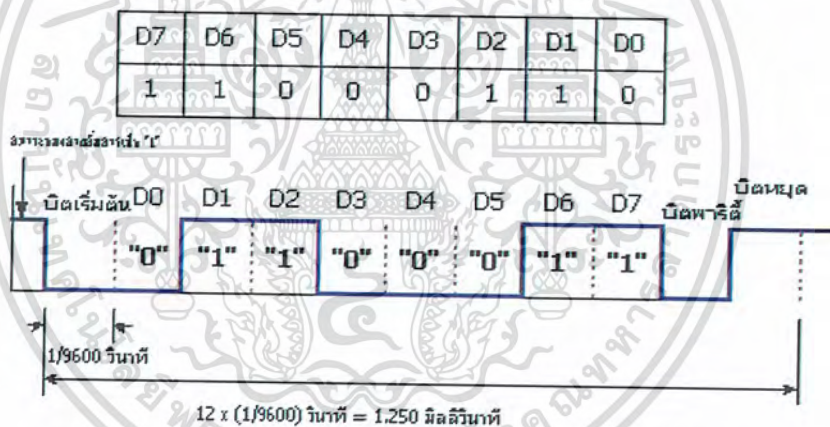
#### 4.2.5 รูปแบบของการสื่อสารข้อมูลอนุกรม

การสื่อสารข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส เป็นวิธีการรับและส่งข้อมูลโดยไม่ต้องอาศัยสัญญาณนาฬิกาส่งร่วมไปด้วย แต่จะใช้อัตราความเร็วของจำนวนข้อมูลต่อวินาที และจะทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มบิตข้อมูลบางอย่างร่วมไปกับการส่งข้อมูลจริง เพื่อจะได้ทำการตรวจสอบข้อมูลได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งประกอบด้วยกัน 4 ส่วนคือ

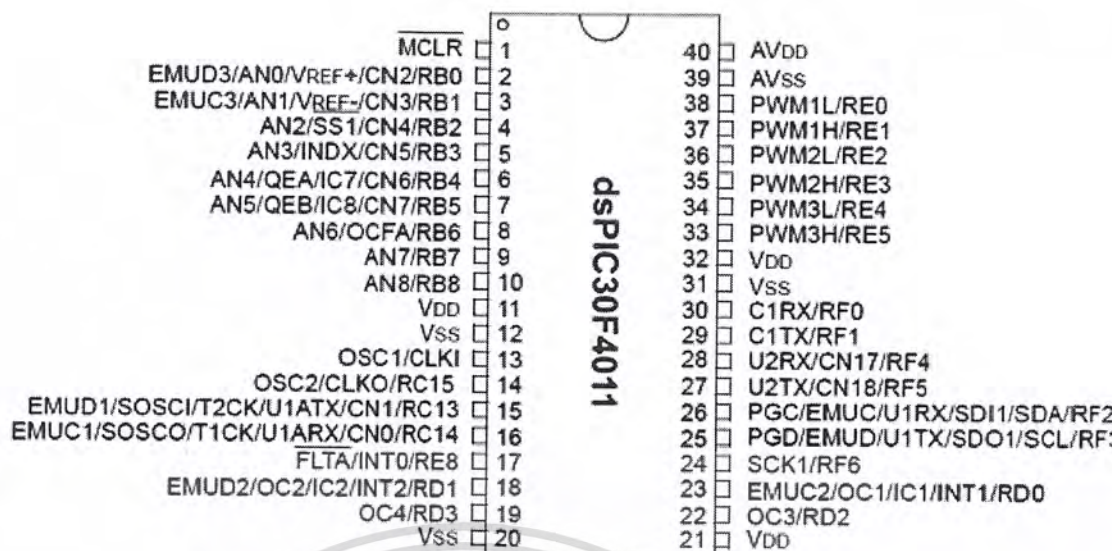
1. บิตเริ่มต้น (Start bit) มีขนาด 1 บิต เป็นระดับลอจิกตรงกันข้ามกับระดับลอจิกของสถานะสายสื่อสาร ขณะที่ยังไม่มีการส่งข้อมูล
2. บิตข้อมูล (Data bit) จะเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดก่อนหรือ บิต LSB ก่อน โดยข้อมูลที่จะส่งอาจจะมีขนาด 5, 6, 7 หรือ 8 บิตก็ได้
3. บิตแสดงภาวะความเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ (Parity Bit) มีหน้าที่เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยทั่วไปมักเรียกว่า บิตพาริตีและจะนำไปแทรกต่อท้ายบิตข้อมูล ค่าของบิตนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนค่าของบิตข้อมูลที่เป็น 1 ซึ่งจะเป็นได้สองลักษณะ คือ พาริตีคู่ (Even Parity) หรือ พาริตีคี่ (Odd Parity)
4. บิตหยุด (Stop bit) เป็นการระบุถึงขอบเขตของการสิ้นสุดข้อมูล ซึ่งอาจมีจำนวนมากกว่าหนึ่งบิตก็ได้ เช่น 1 บิต 1.5 บิต หรือ 2 บิต



รูปที่ 4.8 แสดงการส่งข้อมูลขนาด 8 บิตแบบอนุกรมพร้อมด้วยบิตเริ่มต้น, บิตพาริตี, บิตหยุด ด้วยความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที

### 4.3 ทฤษฎีระบบประมวลผลกลาง

dsPIC30F4011 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 40 ขา แสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งใช้การประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต จากค่าย Microchips ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงการจัดขาสัญญาณของ dsPIC30F4011

โดยคุณสมบัติเด่นๆของ dsPIC30F4011 มีดังนี้

- มีหน่วยความจำ Flash 48 กิโลไบต์
- มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 2 กิโลไบต์
- มีหน่วยความจำ EEPROM ขนาด 1 กิโลไบต์ สำหรับเก็บข้อมูลใช้งาน
- มีพอร์ต I/O ขนาด 29 บิต
- มี 16 บิต Timer/Counter จำนวน 5 ชุด
- มี Input Capture จำนวน 4 ช่อง
- มี Output Compare จำนวน 4 ช่อง
- ADC 10 บิต/500Ksps จำนวน 9 ช่อง
- มี PWM จำนวน 6 ช่อง
- มี UART จำนวน 2 ช่อง
- มีวงจร Watchdog, Power-ON Reset, PWM

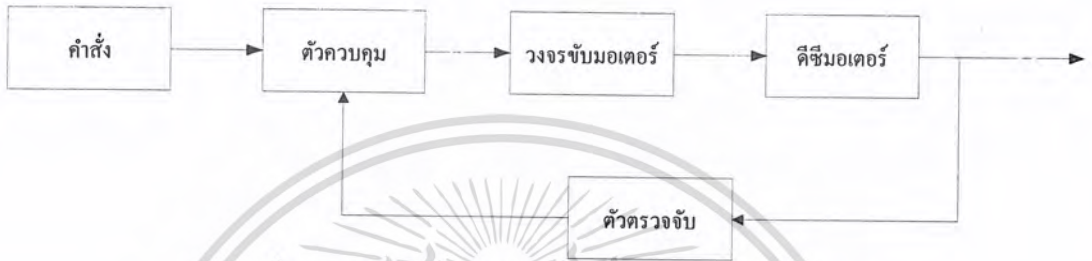
#### 4.4 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

##### 4.4.1 มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เป็นเครื่องกลทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลผ่านทางแกนหมุนหรือเพลลา ในการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงนั้นจะใช้กระแสไฟตรงจ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้า หรือขดลวดผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า (motor armature) ภายใน สำหรับมอเตอร์กระแสตรงที่นิยมใช้งานทั่วไปนั้นจะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร และที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) สนามแม่เหล็กทั้งสองแหล่งกระทำต่อกันจะทำให้เกิดแรงบิดที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนนั่นเอง

สำหรับแรงบิดของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าหากเส้นแรงแม่เหล็กมากจะทำให้มีแรงบิดสูง มอเตอร์กระแสตรงส่วนใหญ่ถ้าหมุนด้วยความเร็วสูงจะมีแรงบิดต่ำ ถ้าหมุนด้วยความเร็วต่ำจะมีแรงบิดสูง ระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐานสามารถแสดงได้ดังไดอะแกรมรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐาน

- คำสั่ง (Command) คือคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- ตัวควบคุม (Controller) คือตัวกำเนิดสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้กับมอเตอร์
- วงจรมอเตอร์ คือวงจรที่ทำให้มอเตอร์ทำงาน โดยรับข้อมูลจากตัวควบคุม
- ตัวตรวจจับ (Encoder) จะประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์เพื่อตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์แล้วป้อนกลับมาให้ตัวควบคุมอีกทีหนึ่ง

#### 4.4.1.1 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ กระแสที่ไหลในขดลวดจะสร้างสนามที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\Phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\Phi I \quad (4.1)$$

โดยที่  $T$  คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร

$\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

$I$  คือ กระแส มีหน่วยเป็นแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลาก็เป็นส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมันเอง แรงดันนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลามอเตอร์และด้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันย้อนกลับนี้กับความเร็วของเพลามอเตอร์คือ

$$E = K\Phi\omega \quad (4.2)$$

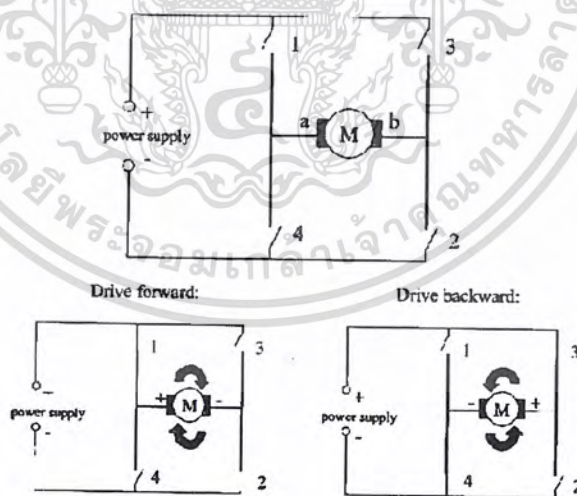
โดยที่ E คือ แรงดันย้อนกลับ Emf มีหน่วยเป็น โวลต์

$\Phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเวเบอร์

$\omega$  คือ ความเร็วของมอเตอร์มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

#### 4.4.1.2 การควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง

การควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการควบคุมทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์มเจอร์อาจทำได้โดยใช้วงจรถอกริดจ์ (H-Bridge) เข้ากับมอเตอร์ ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 4.11

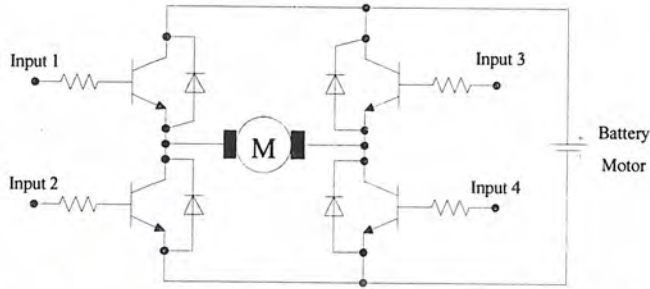


รูปที่ 4.11 วงจรถอกริดจ์และลักษณะการทำงาน

หลักการการทำงานคือ ถ้าสวิตช์หมายเลข 1 (SW1) และสวิตช์หมายเลข 4 (SW4) ทำงานพร้อมกันจะทำให้มอเตอร์หมุน ในทางกลับกันถ้าทำให้สวิตช์หมายเลข 2 (SW2) และสวิตช์หมายเลข 3 (SW3) ทำงานพร้อมกันมอเตอร์จะกลับทางหมุน ถ้าต้องการให้มอเตอร์หยุดหมุน

ก็กดสวิตช์หมายเลข 1 พร้อมกับสวิตช์หมายเลข 3 หรือกดสวิตช์หมายเลข 2 พร้อมกับสวิตช์หมายเลข 1 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 4 หรือ ไม่กดสวิตช์อะไรเลยก็ได้ การนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็นวงจรเอชบริดจ์นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.12

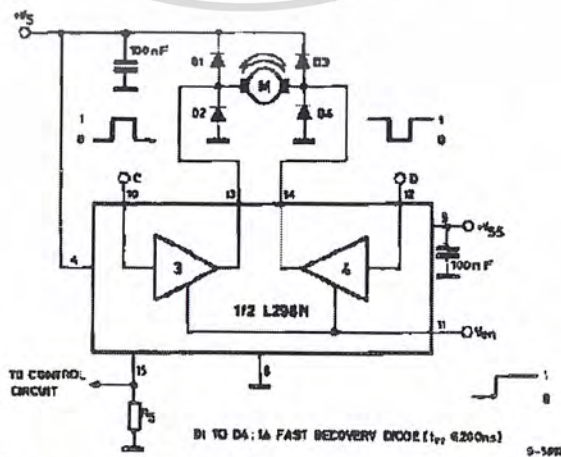


รูปที่ 4.12 การนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็นวงจรเอชบริดจ์

การควบคุมการหมุนของมอเตอร์นั้นก็ใช้หลักการเดียวกัน แต่เราควบคุมการเปิด-ปิดของทรานซิสเตอร์ โดยควบคุมการไหลของกระแส ถ้าให้กระแสไหลเข้าอินพุต 1 (INPUT 1) พร้อมกับอินพุต 4 (INPUT 4) จะทำให้มอเตอร์หมุนและเมื่อต้องการกลับทางหมุนก็ให้หยุดจ่ายกระแสที่อินพุต 1 และอินพุต 4 แล้วจ่ายกระแสเข้าที่อินพุต 2 (INPUT 2) และอินพุต 3 (INPUT 3) แทน

4.4.1.3 วงจรขับมอเตอร์โดยใช้ไอซีขับมอเตอร์

ไอซีขับมอเตอร์ที่นิยมนำมาควบคุมทิศทางหมุนของมอเตอร์คือ ไอซีขับมอเตอร์เบอร์ L298 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถใช้ขับมอเตอร์ได้ 2 ตัวในเวลาเดียวกัน มอเตอร์แต่ละตัวใช้แรงดันไม่เกิน 40 โวลต์ กระแสไม่เกิน 2 แอมแปร์ โดยไอซีขับมอเตอร์เบอร์นี้ใช้หลักการเอชบริดจ์ในการขับมอเตอร์



รูปที่ 4.13 วงจรขับมอเตอร์ด้วยไอซีขับมอเตอร์เบอร์ L298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่ามีการจ่ายแรงดันให้แก่ไอซีขั้วมอเตอร์อยู่ใน 2 ลักษณะ คือ

1. แรงดันที่จ่ายให้กับไอซีเพื่อให้ไอซีนั่นทำงานได้แก่  $V_s$  เป็นแรงดันที่จ่ายเข้ามาเพื่อใช้ในการขั้วมอเตอร์โดยจะมีค่าตั้งแต่ 2.5 ถึง 46 โวลต์และ  $V_{ss}$  เป็นแรงดันที่จ่ายเข้ามาเพื่อเลี้ยงไอซีให้ทำงานโดยมีค่าตั้งแต่ 4.5 ถึง 7 โวลต์
2. แรงดันที่จ่ายให้กับไอซีเพื่อควบคุมการทำงานของไอซี ซึ่งจะมีอยู่ 3 จุด คือ จุดที่ C, D และ Ven เป็นส่วนที่รับสัญญาณลอจิก “0” กับ ลอจิก “1” เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงซึ่งจะได้ผลดังตาราง

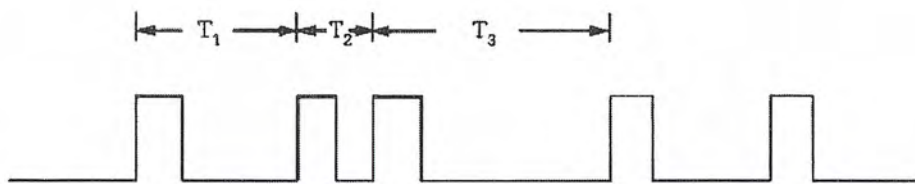
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการหมุนของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุท

อินพุท		การทำงานของมอเตอร์
Ven = 1	C = 1; D = 0	มอเตอร์หมุนขวา
	C = 1; D = 0	มอเตอร์หมุนซ้าย
	C = D	มอเตอร์หยุดหมุนอย่างรวดเร็ว
Ven = 0		มอเตอร์ค่อยๆหยุดหมุน

#### 4.4.1.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้วเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์กระแสตรงจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงสุดที่สามารถหมุนได้ด้วยแรงดันค่านั้น การควบคุมความเร็วจะสามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แต่การทำงานแบบนี้จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและมีความร้อนเกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ให้กับมอเตอร์แทน ถ้าหากช่วงการจ่ายแรงดันและหยุดจ่ายแรงดันแต่ต่างกันไปก็จะทำให้ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ต่างกันไปด้วย การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้มีการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบมอดดูเลชันทางความถี่พัลส์ (Pulse Frequency modulation: PFM) และแบบมอดดูเลชันทางความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation: PWM)

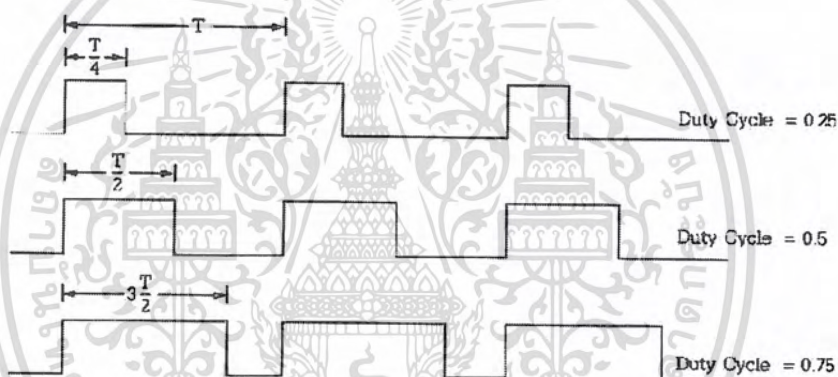
1. แบบมอดดูเลชันทางความถี่พัลส์ การทำงานแบบนี้จะควบคุมการจ่ายแรงดันและหยุดจ่ายแรงดันเพื่อเปิดปิดมอเตอร์เป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 4.14 การทำงานแบบนี้จะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับมีค่าแตกต่างกันไป ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์จะขึ้นกับอัตราการเปิดปิดมอเตอร์นี้



รูปที่ 4.14 สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PMF

## 2. แบบมอดดูเลชันทางความกว้างพัลส์ การควบคุมมอเตอร์ในแบบ PFM

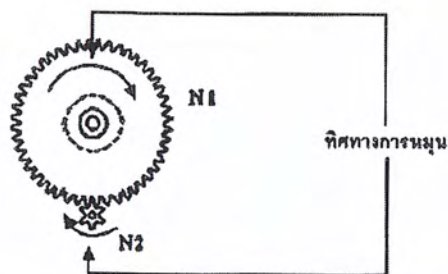
ค่าความถี่ของสัญญาณควบคุมจะไม่แน่นอน แต่การควบคุมแบบ PWM นี้จะใช้ความถี่ในการควบคุมที่คงที่ แต่จะปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยวิธีการปรับค่าดีไซเคิล (Duty cycle) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แต่วิธีนี้จะใช้ความถี่สูงมากๆ ไม่ดี



รูปที่ 4.15 สัญญาณควบคุมมอเตอร์แบบ PWM

### 4.4.2 กล่องเฟือง

กล่องเฟือง (Gearbox) เป็นอุปกรณ์ในการทดรอบการหมุนเพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุน และสามารถเปลี่ยนแรงบิดในการหมุนได้ โดยในกล่องเฟืองจะประกอบด้วยเฟืองจำนวนหลายตัวต่อกันเป็นระบบ



รูปที่ 4.16 ระบบการคัปปลิงของเกียร์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด  $T_1$  และ  $T_2$  การเคลื่อนที่เชิงมุม  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  และ จำนวนซี่ฟัน  $N_1$  และ  $N_2$  ของระบบเกียร์สามารถพิจารณาในทางอุดมคติโดยไม่คิดแรงเฉื่อยแรงเสียดทานได้ ดังหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

1. จำนวนซี่ฟันของเกียร์จะเป็นสัดส่วนกับรัศมี และ ของเกียร์ นั่นคือ

$$r_1 N_2 = r_2 N_1 \quad (4.3)$$

2. ระยะทางการเคลื่อนที่ไปของเกียร์แต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันดังนั้น

$$\theta_1 r_1 = \theta_2 r_2 \quad (4.4)$$

3. แรงงานที่ได้จากเกียร์ตัวหนึ่งจะเท่ากับแรงงานที่ได้จากเกียร์อีกตัวหนึ่ง เนื่องจากสมมติให้ว่าไม่มีการสูญเสียแรงงาน ดังนั้น

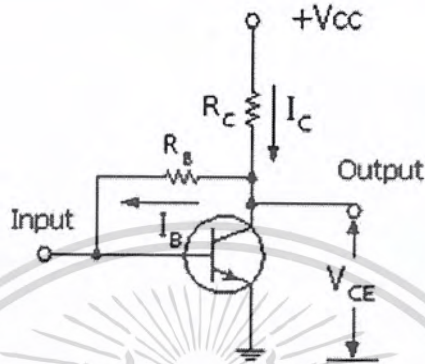
$$T_1 \theta_1 = T_2 \theta_2 \quad (4.5)$$

ถ้าความเร็วเชิงมุมของเกียร์ทั้งสองคือ  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (4.6)$$

## 4.5 มอสเฟต (MOSFET)

มอสเฟตมาจากคำว่า Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor เป็นเฟตที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำซึ่งได้รับ การเคลื่อนที่บางส่วนด้วยโลหะออกไซด์จึง มีค่าความต้านทานอินพุต (หมายถึงค่าความต้านทานที่เกต) สูงมาก



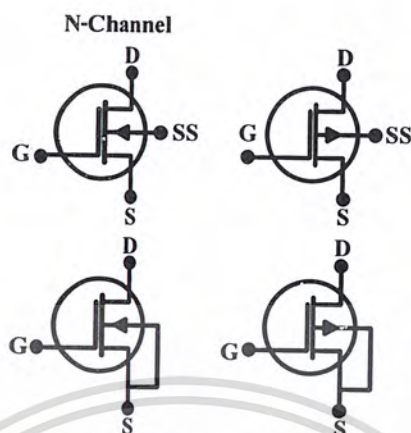
รูปที่ 4.17 แสดงวงจรสมมูลของ MOSFET

มอสเฟตจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดิพลีชัน (Depletion) และ เอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement) แต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแซนแนล n และ แบบแซนแนล p

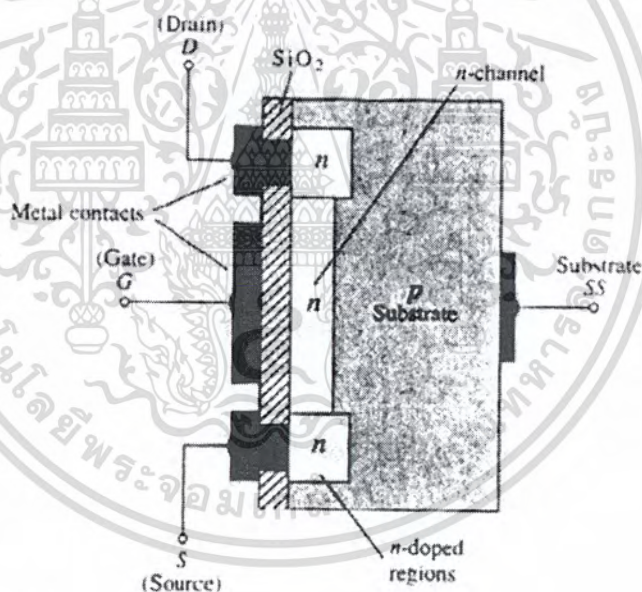
มอสเฟตประเภท ดิพลีชันหรือดีมอสเฟต (D-MOSFET) ทั้ง 2 แบบจะทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมดดิพลีชัน (Depletion Mode) และ โหมดเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement Mode) กล่าวคือ ถ้าจ่ายแรงดันลบให้กับดีมอสเฟตแซนแนล n จะทำงานในโหมดดิพลีชัน แต่ถ้าจ่ายแรงดันบวกจะทำงานในโหมดเอนฮานซ์เมนต์ ส่วนดีมอสเฟตแซนแนล p ก็ทำงานคล้ายกันเมื่อ ได้รับแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับแบบแซนแนล n

มอสเฟตประเภทเอนฮานซ์เมนต์หรืออีมอสเฟต (E-MOSFET) มีโครงสร้างบางอย่างคล้ายกับมอสเฟตแบบดิพลีชัน แต่จะทำงานได้เฉพาะ โหมดเอนฮานซ์เมนต์เท่านั้น

### 4.5.1 มอสเฟตแบบ Depletion



รูปที่ 4.18 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ Depletion

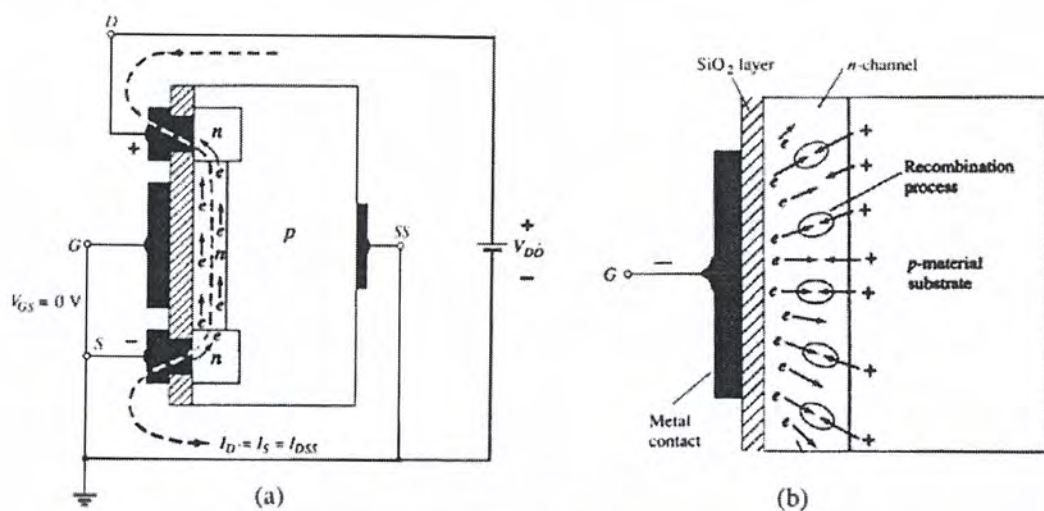


รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างของดีมอสเฟตแบบแชนแนล n

#### 4.5.1.1 การทำงานของมอสเฟตแบบ Depletion

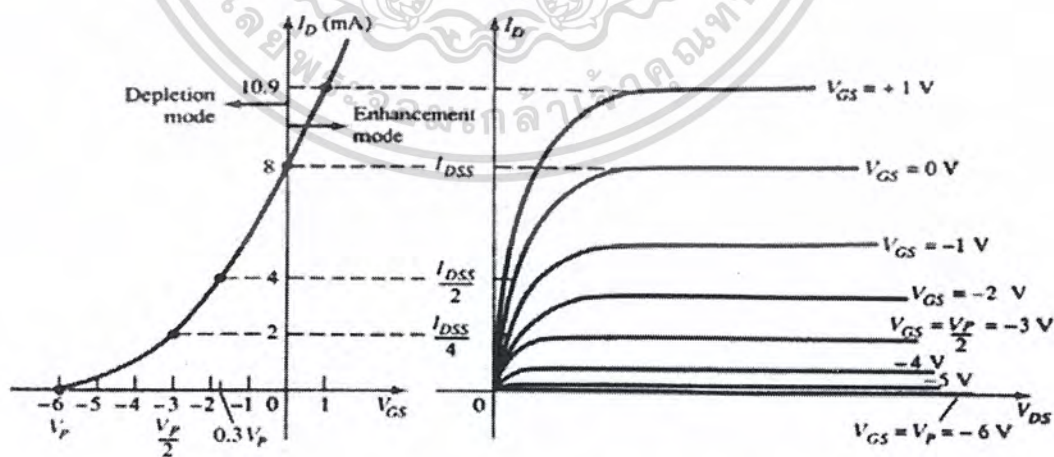
กำหนดให้  $V_{GS}$  ในรูป (a) มีค่าเป็นศูนย์ แล้วจ่าย  $V_D$  ที่ขั้ว D และ S ขั้ว D สามารถดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระ (e) ผ่านแชนแนล n และทำให้กระแส  $I_D = I_S = I_{DSS}$  ไหลผ่านแชนแนล n ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงการทำงานของมอสเฟตแบบ Depletion

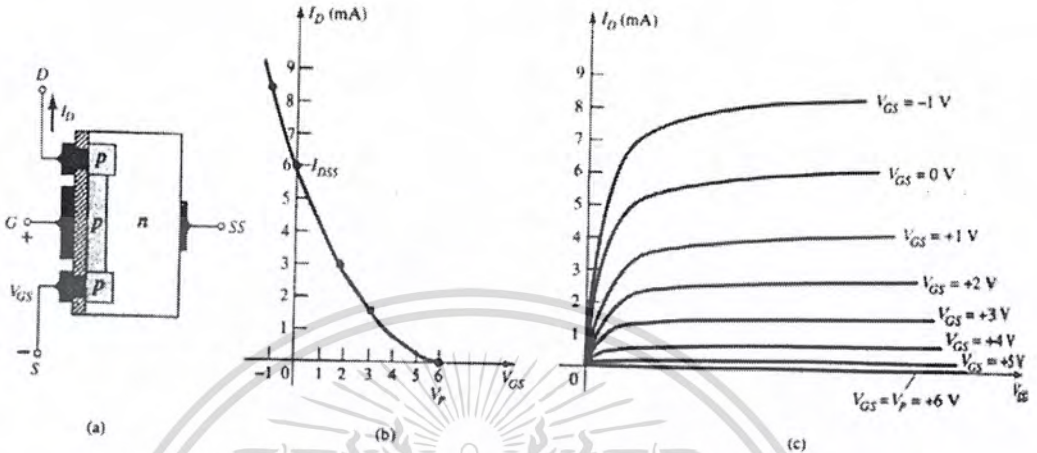
ถ้าจ่าย  $V_{GS}$  ที่มีค่าเป็นลบให้กับขั้วเกต (รูป b) เช่น  $-1$  V ความต่างศักย์ที่ขั้วเกตจะผลักค่านให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนไปยัง แผ่นผลึกฐาน p และดึงคู่อิเล็กตรอนโฮลจากแผ่นผลึกฐาน p ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันใหม่ (Recombination Process) จึงเกิดการลดจำนวน อิเล็กตรอนอิสระในแชนแนล n ที่มีไว้สำหรับการนำกระแส เมื่อมีค่า  $V_{GS}$  เป็นลบมากเท่าใดก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่มากขึ้นเท่านั้นและ อิเล็กตรอนอิสระที่แชนแนล n ก็จะมีจำนวนลดลง จึงกล่าวได้ว่าถ้า  $V_{GS}$  เป็นลบมากขึ้น  $I_D$  จะมีค่าน้อยลง เขียนเป็นกราฟคุณลักษณะได้ ดังรูปต่อไป นี้ การทำงานขณะ  $V_{GS}$  เป็นลบนี้ เราเรียกว่า การทำงานในโหมด Depletion



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงกระแสของมอสเฟตแบบ Depletion

### 4.5.1.2 ดิโอมอสเฟตแบบเซนเนล p

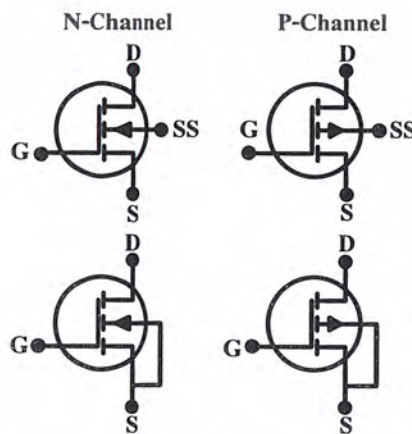
โครงสร้างของดิโอมอสเฟตแบบเซนเนล p มีลักษณะตรงข้ามกับรูปของดิโอมอสเฟตแบบเซนเนล n คือประกอบด้วยแผ่นผลึก ฐาน n และเซนเนล p ดังรูป



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงกระแสของดิโอมอสเฟตแบบเซนเนล p

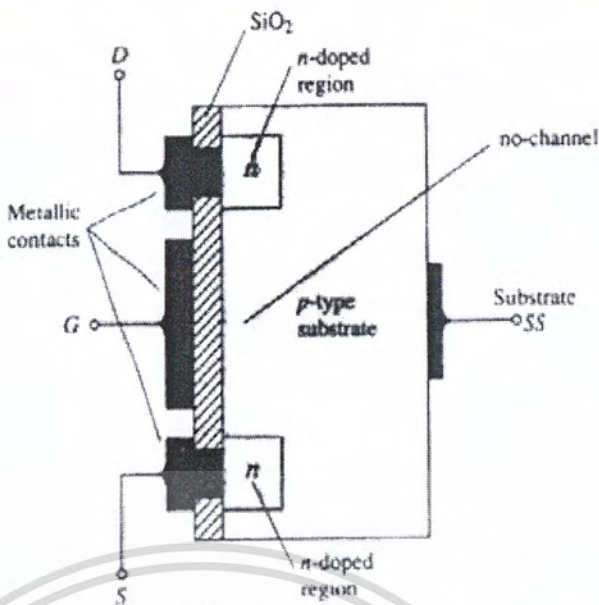
จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะของดิโอมอสเฟตแบบเซนเนล กับดิโอมอสเฟตแบบเซนเนล p (ตามรูป b และ c) เราพบว่า ทิศทางของกระแสขั้วแรงดันต่าง ๆ กลับกันทำให้คุณลักษณะกลับกันด้วย  $I_D$  จะเริ่มเพิ่มขึ้นจากจุด Cutoff ที่  $V_{GS} = V_p$  และขณะที่  $V_{GS}$  มีค่าเป็นบวกลดลง  $I_D$  จะเพิ่มขึ้นจนถึง  $I_{DSS}$  และเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนเลยค่า  $I_{DSS}$  เมื่อ  $V_{GS}$  มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นยังคงใช้สมการของชอกเลย์ ได้แต่ ควรระวังเครื่องหมาย  $V_{GS}$  และ  $V_p$  ในสมการให้ถูกต้อง (คือจะต้องมีเครื่องหมายเป็นบวก)

### 4.5.2 มอสเฟตแบบ Enhancement



รูปที่ 4.23 แสดงสัญลักษณ์ของมอสเฟตแบบ Enhancement

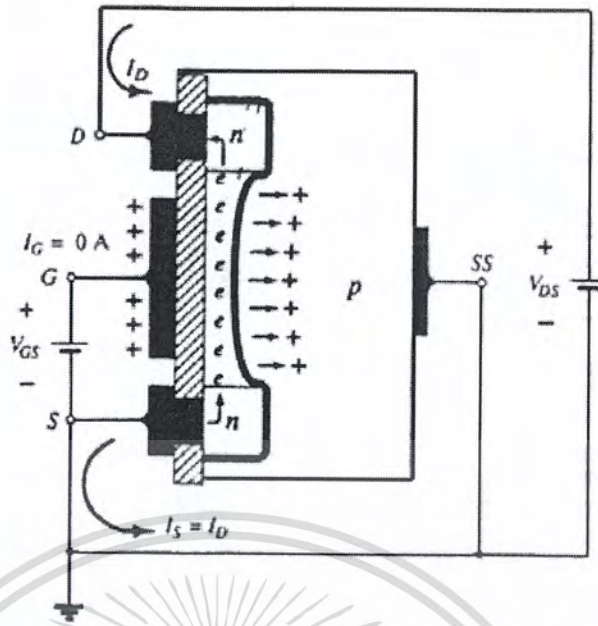
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างของคิมอสเฟตแบบแชนแนล n

4.5.2.1 การทำงานของมอสเฟตแบบEnhancement

กำหนดให้  $V_{GS} = 0V$  และจ่าย  $V_{DS}$  ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้ว S กับขั้ว D โดยขั้ว SS ต่อรวมกับขั้ว S ดังรูป จะเกิดจากไบอัสกลับที่รอยต่อ p-n (บริเวณที่มีการกระตุ้น n กับผลึกฐาน p) [เนื่องจากไม่มีเส้นทางเชื่อม หรือ แชนแนลระหว่างขั้ว D และขั้ว S ทำให้เกิดการต้านการไหลของอิเล็กตรอน] กระแส  $I_D = 0$  แตกต่างจาก คิมอสเฟตซึ่งมี  $I_D = I_{DSS}$



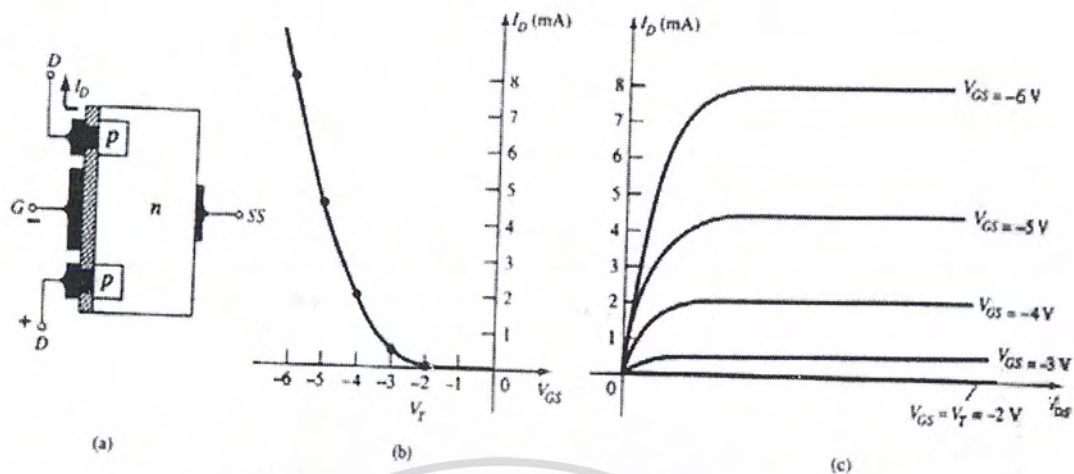
รูปที่ 4.25 แสดงการทำงานของมอสเฟต Enhancement

ถ้าจ่าย  $V_{DS}$  และ  $V_{GS}$  ที่มีค่าเป็นบวกดังรูป ทำให้ขั้ว D และขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวกการที่ขั้ว G มีความต่างศักย์เป็นบวกนี้จะผลักดันให้โมเลกุลในผลึกฐาน p เข้าไปสู่บริเวณภายในผลึกฐาน p และดึงดูดอิเล็กตรอนในผลึกฐาน p (เป็นพาหะข้างน้อยรวมตัวอยู่ในบริเวณใกล้กับผิวของ  $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งมีคุณลักษณะเป็นฉนวนและป้องกันอิเล็กตรอนไม่ให้ดึงดูดไปยังขั้วเกต

ขณะที่  $V_{GS}$  เพิ่มขึ้น การรวมตัวของอิเล็กตรอนใกล้กับชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ก็เพิ่มมากขึ้นตามลำดับขณะเดียวกันบริเวณที่มีการ กระตุ้น n เกิดการเหนี่ยวนำจากแรงดึง  $V_{GS}$  ทำให้มีอิเล็กตรอนหรือ  $I_D$  (มีทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน) ไหลระหว่าง ขั้ว D กับขั้ว S ระดับ  $V_{GS}$  ทำให้  $I_D$  ไหลเราเรียกว่า แรงดันเรตสโฮลด์ (Threshold Voltage,  $V_T$ ) ในสเปคกำหนดให้  $V_T$  เป็น  $V_{GS(th)}$

#### 4.5.2.2 อิมอสเฟตแบบแซนแนล p

โครงสร้างของอิมอสเฟตแบบแซนแนล p มีลักษณะตรงข้ามกับแบบแซนแนล n



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงกระแสของดีมอสเฟตแบบแชนแนล p

กล่าวคือ ขั้ว D และขั้ว S ต่อกับผลึกฐาน n และบริเวณที่มีการกระตุ้น p (p-doped regions) แต่ขั้วของแรงดันและทิศทาง กระแสตรงข้ามกับแบบแชนแนล n นอกจากนี้คุณลักษณะของกราฟถ่ายโอน ก็จะแสดงค่าที่ด้านตรงข้าม

## บทที่ 5

### การออกแบบ Simulate Inverted Pendulum Model

#### 5.1 Simulation ด้วยโปรแกรม MATLABและโปรแกรม visual studio C++

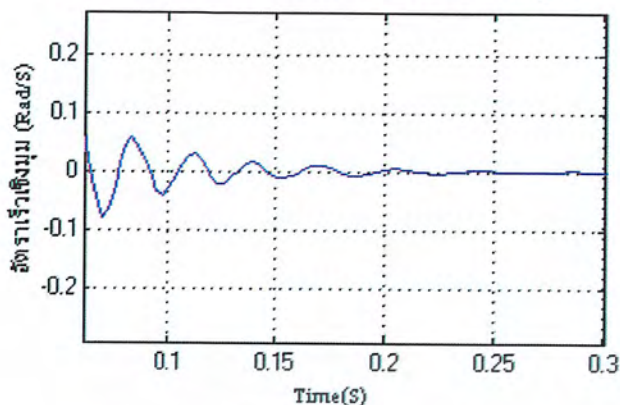


รูปที่ 5.1 แผนผังการ Simulate การทำงานของหุ่นยนต์ ด้วยโปรแกรม MATLAB และ Visual Studio C++

จากแผนผังที่ 5.1 เป็นแผนผังแสดงการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์สองล้อด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม Visual Studio C++ โดยที่หุ่นยนต์สองล้อจะส่งค่าพารามิเตอร์ ไปพักที่ buffer ซึ่งเราจะกำหนดเวลาในการส่งข้อมูลให้กับกระบวนการคำนวณ PID จากนั้นระบบจะส่งค่าที่คำนวณได้ออกไปส่งให้ยังตัวหุ่นยนต์ ทำซ้ำๆจนกระทั่งหุ่นยนต์มีความสมดุล



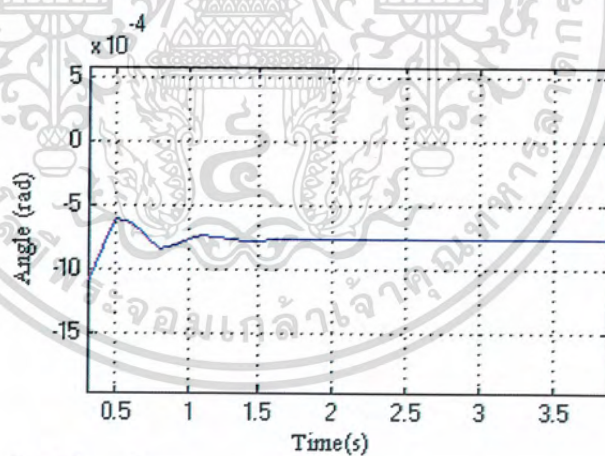
กราฟแสดงความเร็วเชิงมุมที่สัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม กรณีไม่มี sample time

### 5.2.2 กรณีที่หุ้ยนตมี Sample time ความถี่ 10 เฮิร์ต

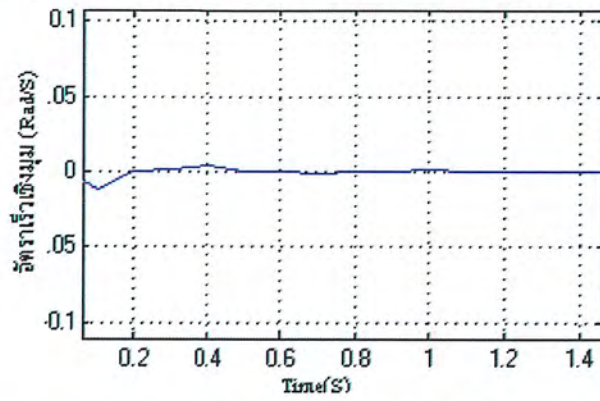
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมของแกน Invert Pendulum



Sampling Time=0.1s

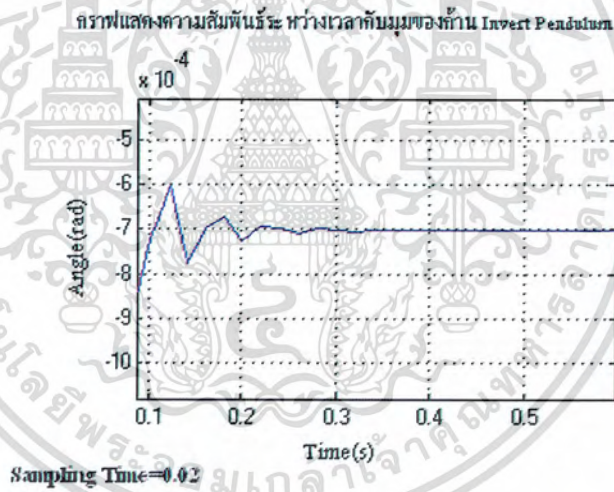
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 10 เฮิร์ต

กราฟแสดงควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ภายใต้อัตราเร็วเชิงมุม



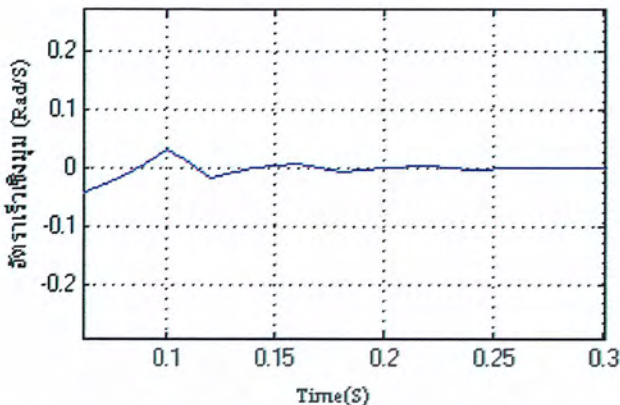
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 10 เฮิรท์

### 5.2.3 กรณีที่หุ่นยนต์มี Sample time ความถี่ 50 เฮิรท์



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 50 เฮิรท์

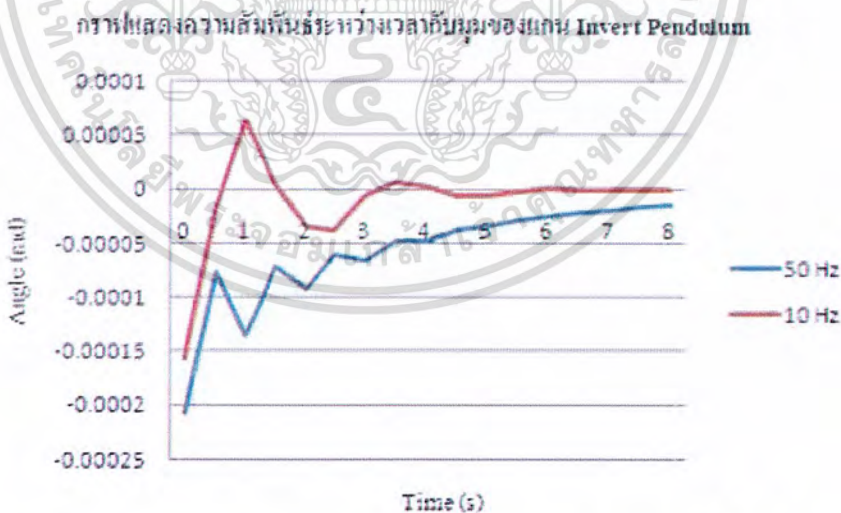
กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงการควบคุมอัตราเร็วเชิงมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 50 เฮิรตซ์

### 5.3 ผลการทดลอง Simulation ด้วยโปรแกรม visual studio C++ ในส่วนการควบคุมมุม (Angle) ของหุ่นยนต์สองล้อ

#### 5.3.1 กรณีที่หุ่นยนต์มี Sample time ความถี่ 10 และ 50 เฮิรตซ์



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการควบคุมมุม (Angle) กรณีมี sample time ความถี่ 10 และ 50 เฮิรตซ์

จากการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์สองล้อด้วยโปรแกรม MATLAB และโปรแกรม Visual Studio C++ เราจะทำการปรับค่า gain ของกระบวนการการคำนวณ PID ให้ควบคุมหุ่นยนต์สองล้อเคลื่อนที่ได้โดยไม่ล้ม (ตัวหุ่นยนต์ตั้งตรง) โดยเราได้ออกแบบการทดลองที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในการรับข้อมูลที่ค่า  $0.02\text{ s}$  และ  $0.1\text{ s}$  จะพบว่าค่า  $\text{gain}$  ที่ใช้จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการรับข้อมูลเพิ่มขึ้น

จากการ Simulate สรุปได้ว่าเราสามารถใช้ทฤษฎี PID ในส่วนของ controller ในระบบของหุ่นยนต์สองล้อได้ ผลจากการ Simulate จึงแนวทางในการออกแบบหุ่นยนต์ขนาดจำลอง



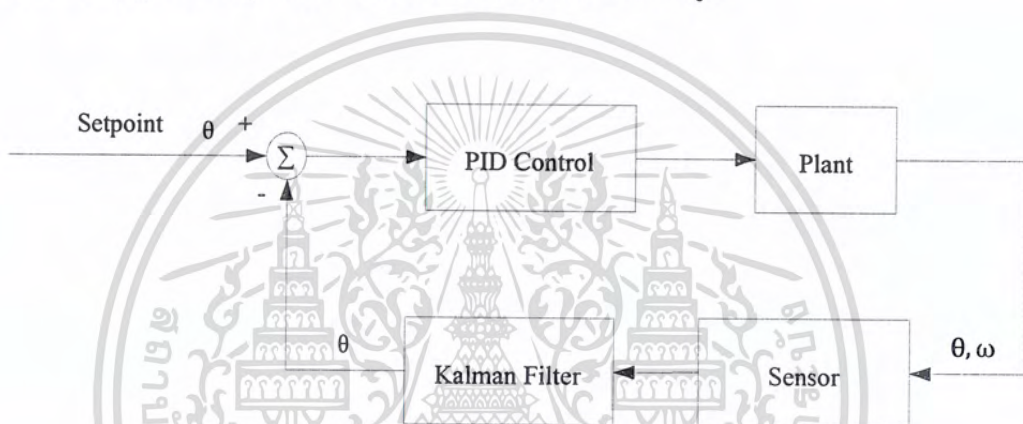
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# การออกแบบหุ่นยนต์ขนาดจำลอง

### 6.1 บล็อกการทำงานของระบบ (Block Control)

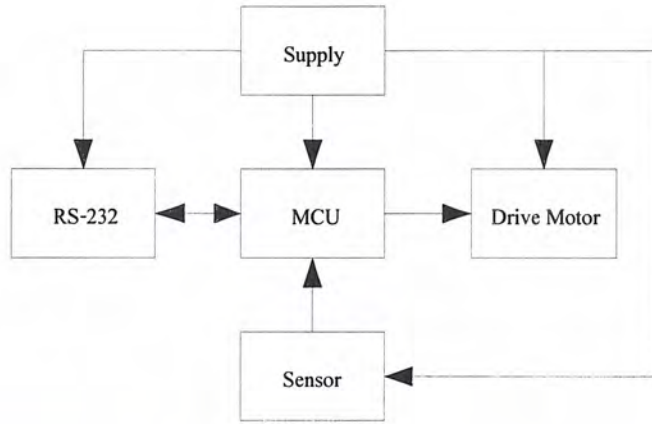
ในการควบคุมทำงานของระบบจะอาศัยการป้อนกลับขนาดมุมที่แกนของลูกตุ้มหัวหกทำกับแกนตั้งฉากกับพื้นโลกและความเร็วเชิงมุม โดยนำข้อมูลที่ได้นี้ไปผ่านส่วนบล็อกควบคุมซึ่งใช้หลักการของ PID Control ในการควบคุมการทำงานในส่วนนี้ โดยภาคควบคุมจะประมวลผลข้อมูลเพื่อสร้างสัญญาณเอาต์พุตในการขับมอเตอร์อีกที ดังแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 6.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ

### 6.2 ส่วนประกอบของวงจร

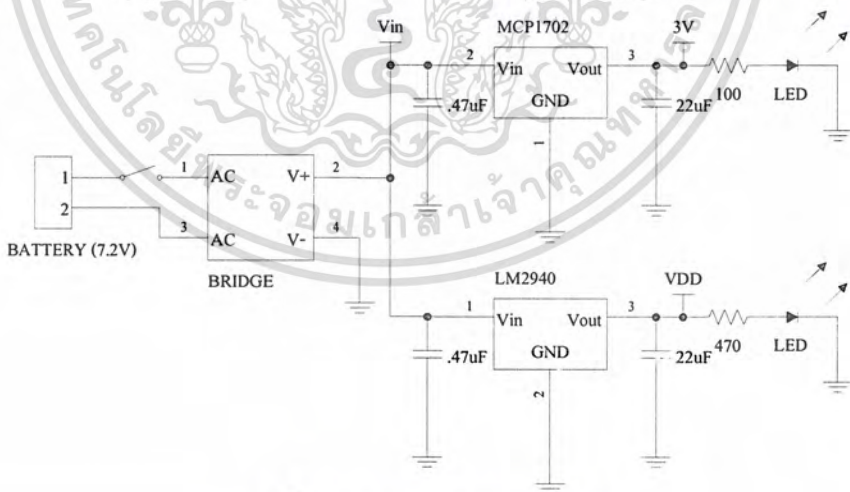
วงจรประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011, วงจรเรกกูเรเตอร์ 3 และ 5 โวลต์, เซนเซอร์ Accelerometer, เซนเซอร์ Gyroscope, วงจร Drive Motor และวงจรติดต่อพอร์ตแบบอนุกรม RS-232



รูปที่ 6.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร

### 6.2.1 วงจรเรกกูเรเตอร์

มีการสร้างไฟเลี้ยงเป็น 2 ส่วน คือ วงจรเรกกูเรเตอร์ 5 โวลต์ เลือกใช้เบอร์ LM2940 ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้ 1 แอมแปร์ และวงจรเรกกูเรเตอร์ 3 โวลต์ เลือกใช้เบอร์ MCP1702 ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้ 250 มิลลิแอมแปร์ โดยอุปกรณ์ทั้งสองนี้รับแรงดันขนาด 7.2 โวลต์มาจากแบตเตอรี่และก่อนที่จะเข้าตัวอุปกรณ์มี Bridge เพื่อป้องกันความเสียหายจากการจ่ายไฟกลับขั้วและถ้ามีการจ่ายไฟกลับขั้ววงจรก็ยังสามารถทำงานได้



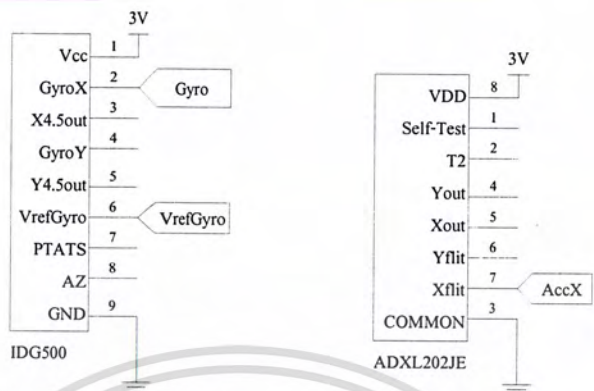
รูปที่ 6.3 แสดงวงจรเรกกูเรเตอร์

### 6.2.2 วงจรเซนเซอร์

เซนเซอร์ที่ใช้ในระบบมี 2 ชนิด คือ เซนเซอร์ Accelerometer ซึ่งเลือกใช้เบอร์

ADXL202JE เพื่อวัดขนาดมุมที่แกนของลูกตุ้มหัวหกทำกับแกนตั้งฉากกับพื้นโลก และเซนเซอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

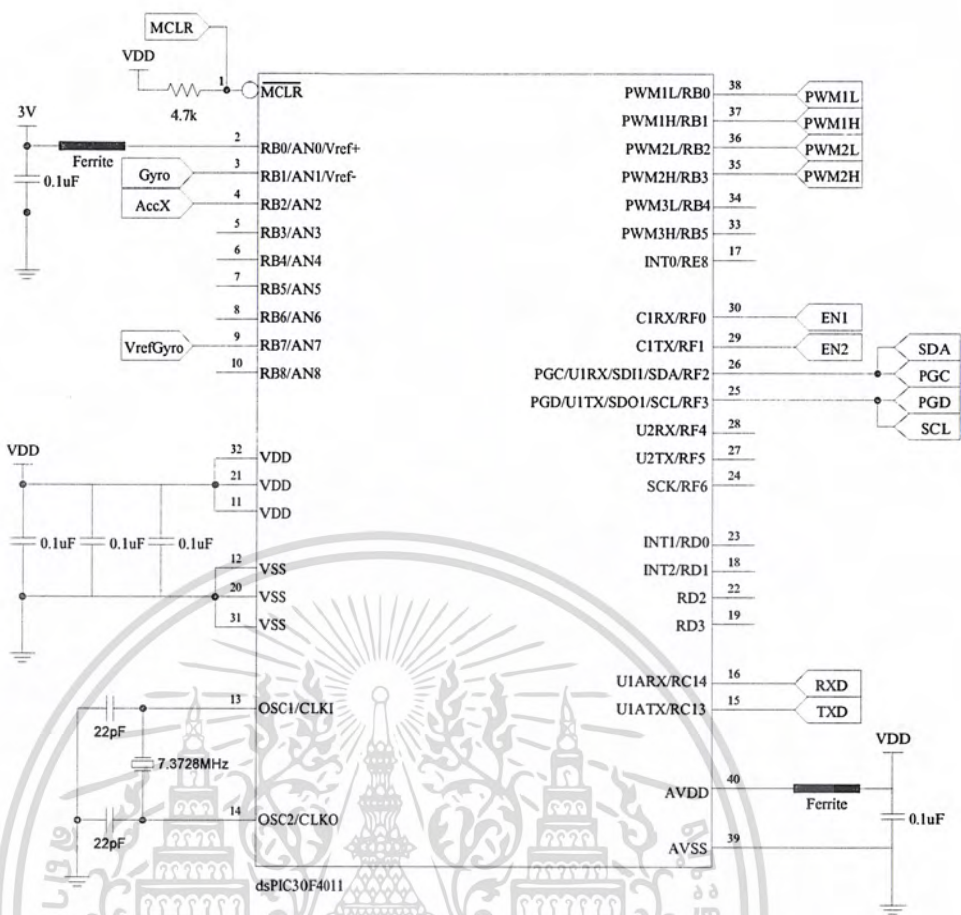
Gyroscope ซึ่งเลือกใช้เบอร์ IDG500 เพื่อวัดความเร็วมอเตอร์ โดยเซนเซอร์ทั้งสองใช้ไฟเลี้ยง 3 โวลต์และเอาต์พุตที่ออกมาเป็นสัญญาณอนาล็อก



รูปที่ 6.4 แสดงวงจรเซนเซอร์

6.2.3 วงจรส่วนประมวลผลกลาง

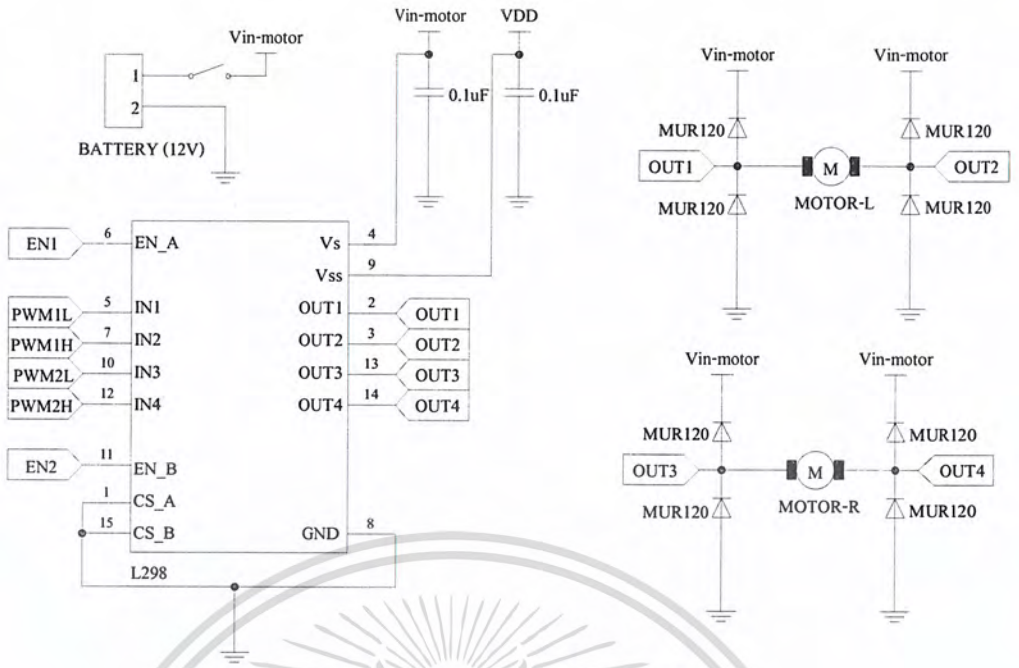
เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 ซึ่งใช้ไฟเลี้ยงขนาด 5 โวลต์ เพื่อเป็นส่วนประมวลผลของระบบซึ่งใช้ในการรับค่าจากเซนเซอร์ทั้งสอง, รับส่งสัญญาณการติดต่อพอร์ตแบบอนุกรม, กำหนดค่า Duty cycle ของมอเตอร์ และส่งสัญญาณ PWM และ Enable เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์ ซึ่งมีความเร็วในการประมวลผล 117.9648 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 6.5 แสดงวงจรส่วนประมวลผลกลาง

### 6.2.4 วงจรขับมอเตอร์

เลือกใช้ L298 ในการขับมอเตอร์ เพราะสามารถขับมอเตอร์ได้ 2 ตัว โดยรับสัญญาณ PWM และ Enable มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์



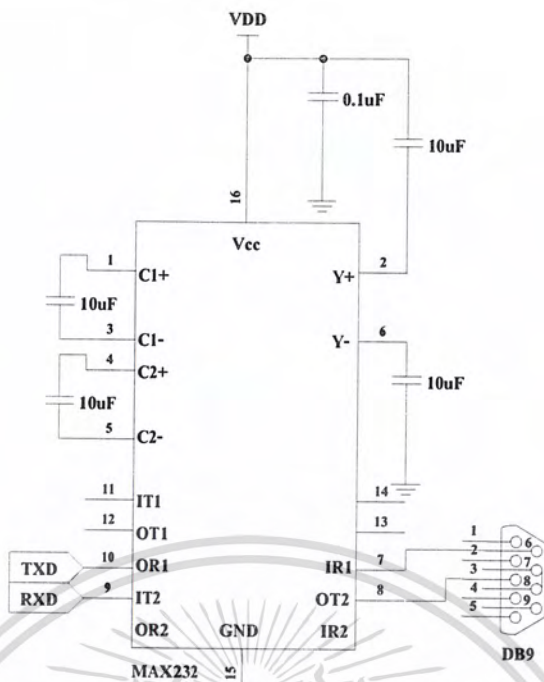
รูปที่ 6.6 แสดงวงจรขับมอเตอร์

ตารางที่ 6.1 ลักษณะการหมุนของมอเตอร์

IN1	IN2	การทำงานของมอเตอร์
Low	Low	หยุด
Low	High	หมุนตามเข็มนาฬิกา
High	Low	หมุนทวนเข็มนาฬิกา
High	High	หยุด

6.2.5 วงจรการติดต่อพอร์ตแบบอนุกรม RS-232

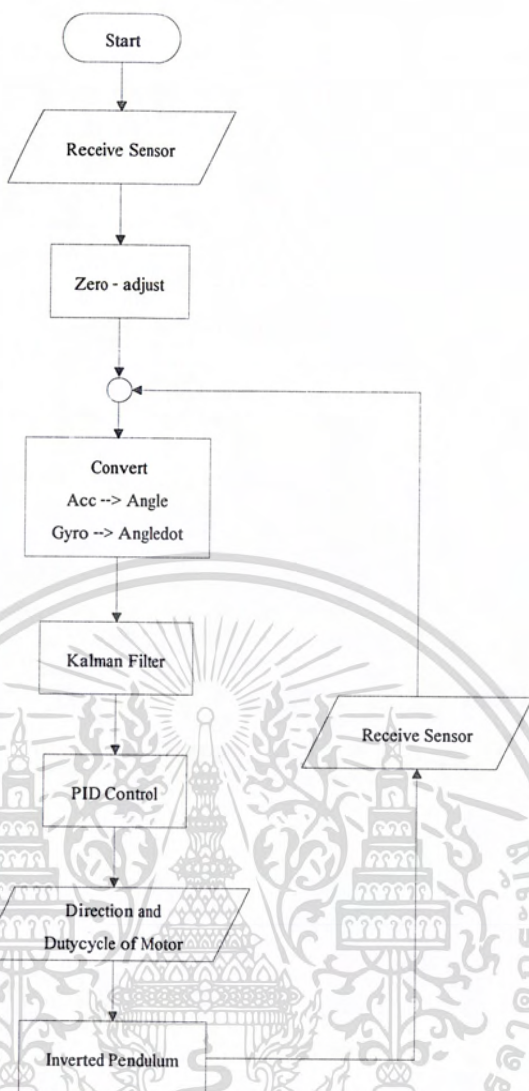
เลือกใช้ MAX232 จากบริษัท MAXIM เพื่อใช้ในการแปลงระดับสัญญาณจากระดับ TTL (0 ถึง +5 โวลต์) ไปเป็นระดับของ RS-232 (-15 ถึง +15 โวลต์) และในทำนองเดียวกันก็รับระดับสัญญาณจาก RS-232 เพื่อแปลงเป็นระดับสัญญาณจากระดับ TTL ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้



รูปที่ 6.7 แสดงวงจรการติดต่อพอร์ตแบบอนุกรม RS-232

### 6.3 ระบบการทำงาน

การประมวลผลทั้งหมดประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F4011 เริ่มจากรับค่าเซนเซอร์ Accelerometer และเซนเซอร์ Gyroscope มาทำการปรับศูนย์แล้วนำไปแปลงค่าเป็นขนาดมุมที่แกนของลูกตุ้มหัวหกทำกับแกนตั้งฉากกับพื้นโลกและความเร็วเชิงมุม จากนั้นนำค่าความเร็วเชิงมุมไปใช้ในการคำนวณหาค่าที่ถูกต้องของมุม โดย Kalman Filter แล้วนำค่ามุมที่ได้ไปคำนวณด้วยทฤษฎี PID เพื่อหาทิศทางและค่า Duty cycle ของมอเตอร์ไปชดเชยระบบในการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์



รูปที่ 6.8 แสดงแผนผังระบบการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

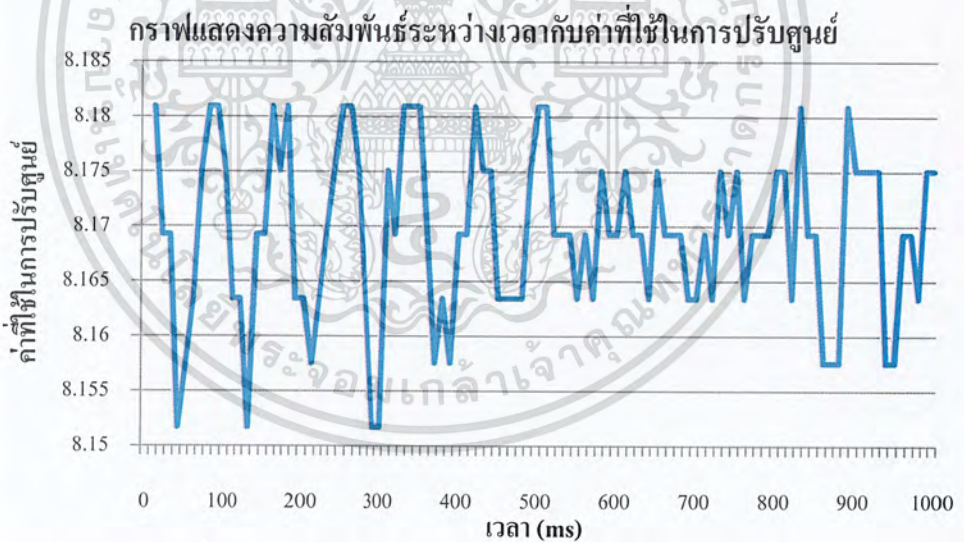
# ผลการทดลองหุ่นยนต์ขนาดจำลอง

เป็นการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ขนาดจำลองในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 7.1 วัดการตอบสนองของ Accelerometer

#### 7.1.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero – Adjust)

เป็นการวัดการตอบสนองของ Accelerometer เพื่อหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ให้กับ Accelerometer กล่าวคือ เมื่อหุ่นยนต์ขนาดจำลองอยู่ในตำแหน่งสมดุลและหยุดนิ่งอยู่กับที่ Accelerometer ควรอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ (ณ ตำแหน่งสมดุลควรอ่านค่า Accelerometer ได้เท่ากับศูนย์) แต่ในความจริงอ่านค่าไม่ได้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงค่าในกราฟที่ 7.1 จึงต้องมีการปรับศูนย์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

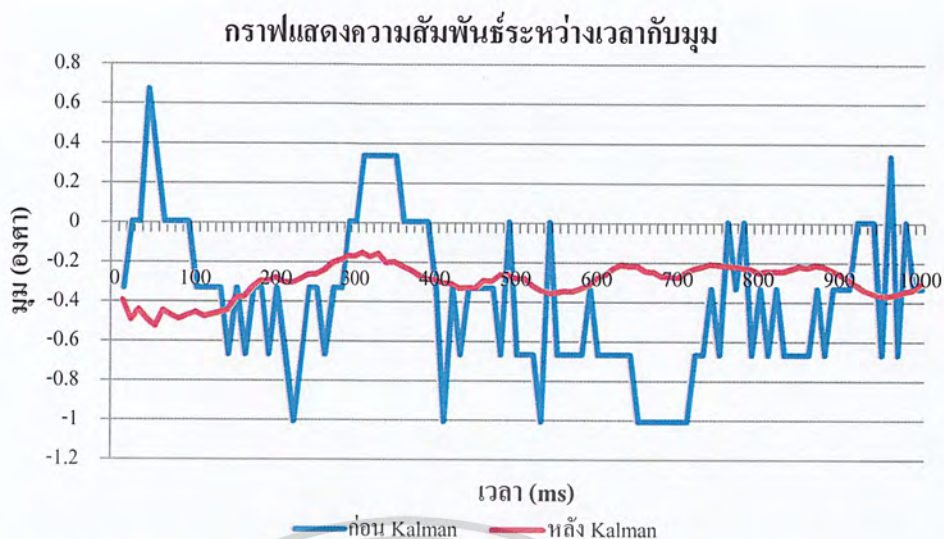


รูปที่ 7.1 แสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Accelerometer

#### 7.1.2 ก่อนและหลัง Kalman Filter

เป็นการวัดการตอบสนองของ Accelerometer หลังการปรับศูนย์ทั้งก่อนและหลัง Kalman filter โดยแปลงเป็นค่ามม ดังแสดงในกราฟที่ 7.2 โดยการทดลองนี้ทำโดยให้หุ่นยนต์ขนาดจำลองอยู่ในตำแหน่งสมดุลและหยุดนิ่งอยู่กับที่ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



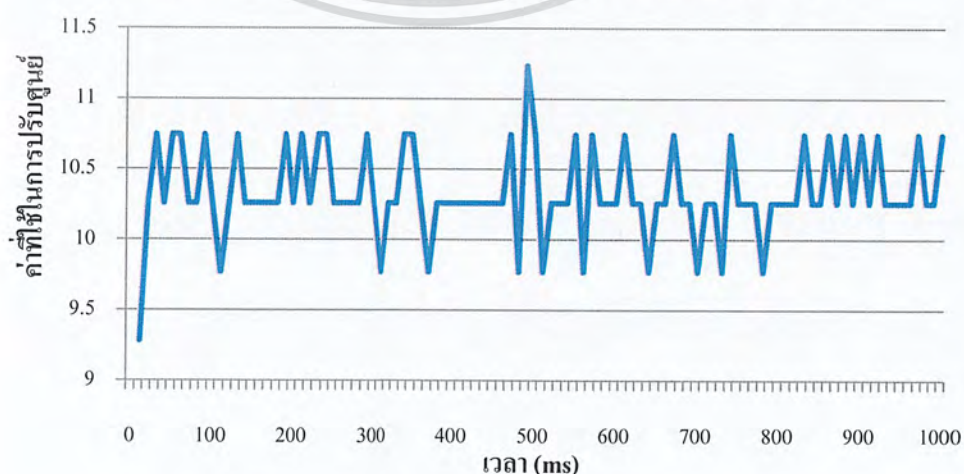
รูปที่ 7.2 แสดงการตอบสนองของ Accelerometer ก่อนและหลัง Kalman Filter

## 7.2 วัดการตอบสนองของ Gyroscope

### 7.2.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero - Adjust)

เป็นการวัดการตอบสนองของ Gyroscope เพื่อหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ให้กับ Gyroscope กล่าวคือ เมื่อหุ่นยนต์ขนาดจำลองหยุดนิ่งอยู่กับที่ Gyroscope ควรอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ (เมื่อหุ่นยนต์หยุดนิ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่ควรอ่านค่า Gyroscope ได้เท่ากับศูนย์) แต่ในความจริงอ่านค่าไม่ได้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงค่าในกราฟที่ 7.3 จึงต้องมีการปรับศูนย์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์

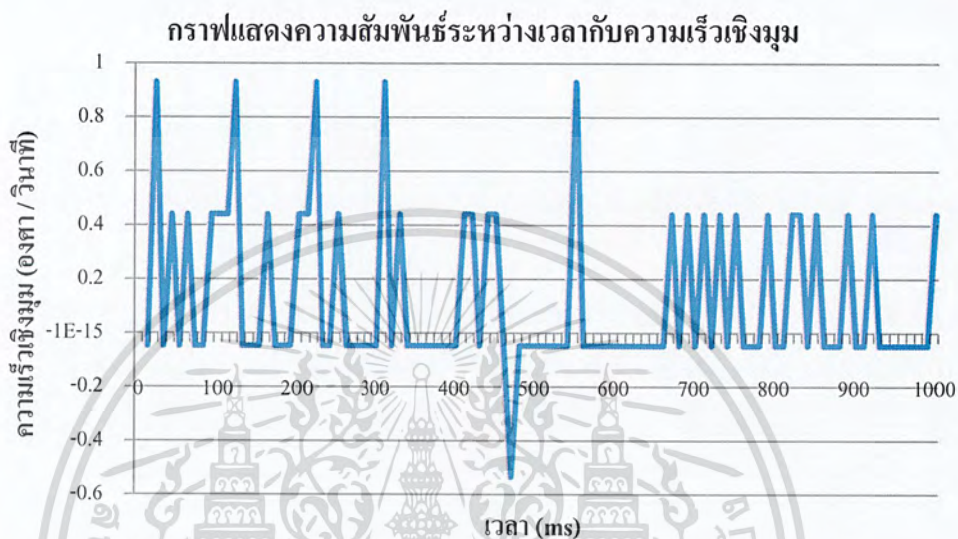


รูปที่ 7.3 แสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Gyroscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

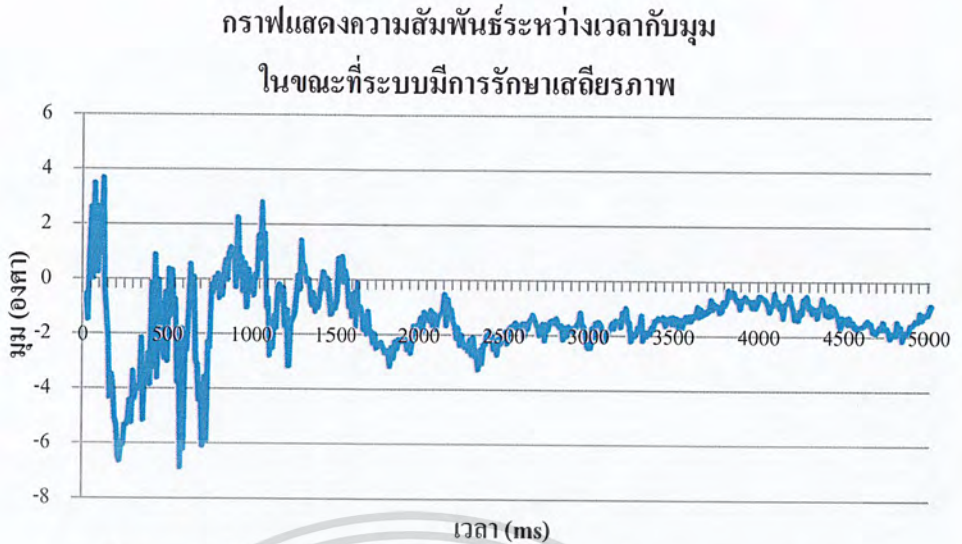
## 7.2.2 หลังการปรับศูนย์

เป็นการวัดการตอบสนองของ Gyroscope หลังการปรับศูนย์ เมื่อหุ่นยนต์ขนาดจำลองหยุดนิ่งอยู่กับที่ ดังแสดงในกราฟที่ 7.4 โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



## 7.3 วัดค่ามุมในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพ

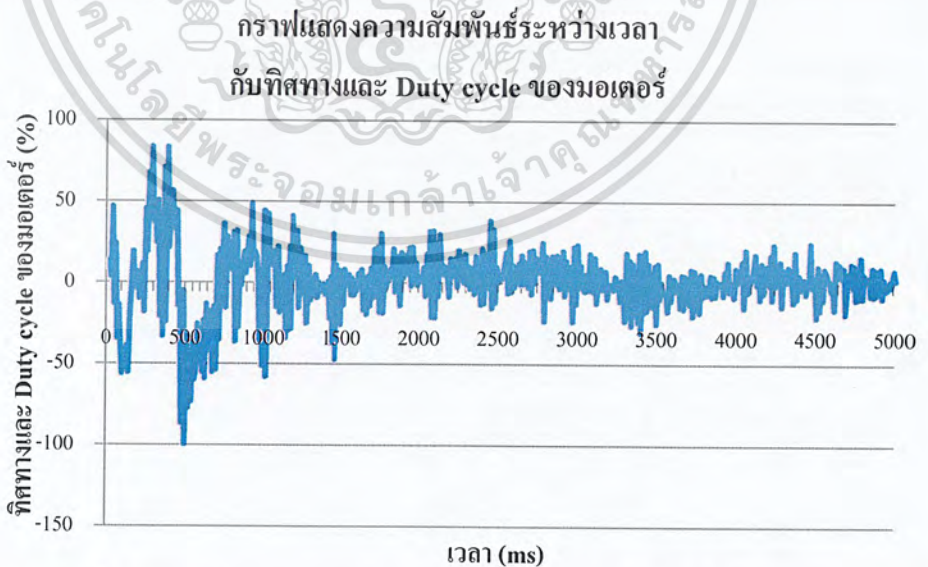
เป็นการวัดค่ามุมซึ่งเป็นการป้อนกลับของระบบในขณะที่หุ่นยนต์ขนาดจำลองมีการรักษาเสถียรภาพ ดังแสดงในกราฟที่ 7.5 โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 7.5 แสดงค่ามุมในขณะที่หุ่นยนต์ขนาดจำลองมีการรักษาเสถียรภาพ

#### 7.4 วิศวกรรมการตอบสนองของการคำนวณทฤษฎี PID ที่มีต่อระบบในขณะที่มีการรักษาเสถียรภาพ

เป็นการวิศวกรรมการตอบสนองของการคำนวณทฤษฎี PID ที่มีต่อระบบ ในขณะที่หุ่นยนต์ขนาดจำลองมีการรักษาเสถียรภาพ ดังแสดงในกราฟที่ 7.6 โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



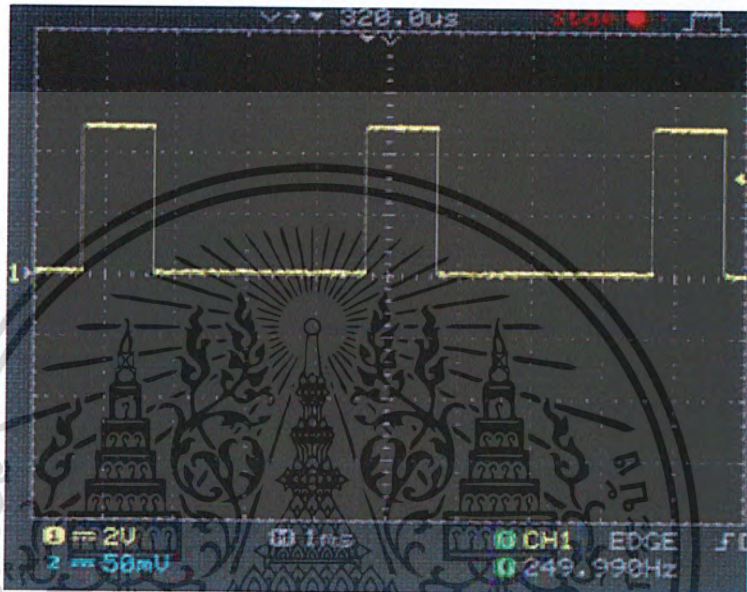
รูปที่ 7.6 แสดงการตอบสนองของการคำนวณทฤษฎี PID ที่มีต่อระบบ  
ในขณะที่หุ่นยนต์ขนาดจำลองมีการรักษาเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

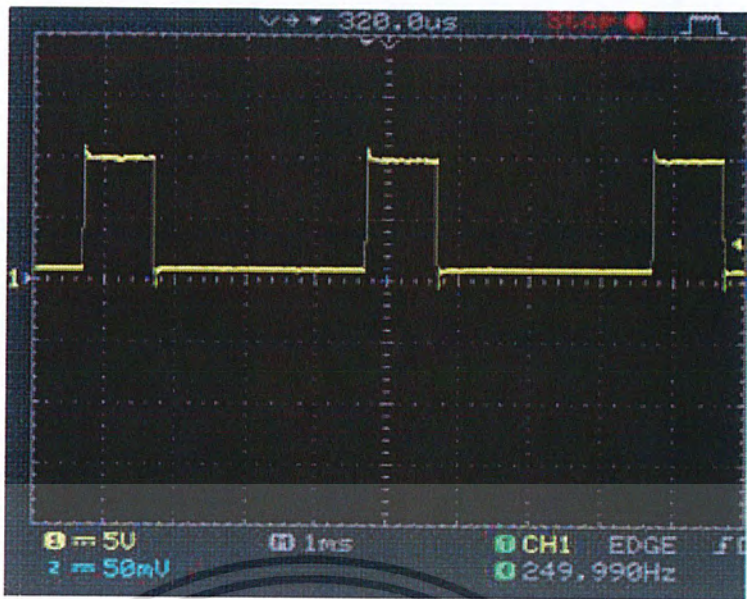
## 7.5 วัดสัญญาณของวงจรขับมอเตอร์

เป็นการวัดสัญญาณของวงจรขับมอเตอร์ ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของ L298 ที่ค่า Duty cycle ต่างๆ โดยทางด้านอินพุตของ L298 รับค่า PWM และค่า Enable มาจาก dsPIC30F4011 และทางด้านเอาต์พุตของ L298 ต่อกับขั้วมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 7.1

### 7.5.1 ที่ Duty cycle 25%



a) อินพุตของ L298



b) เอาท์พุทของ L298

รูปที่ 7.7 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุทและเอาท์พุทของ L298 ที่ Duty cycle 25%

a) อินพุทของ L298

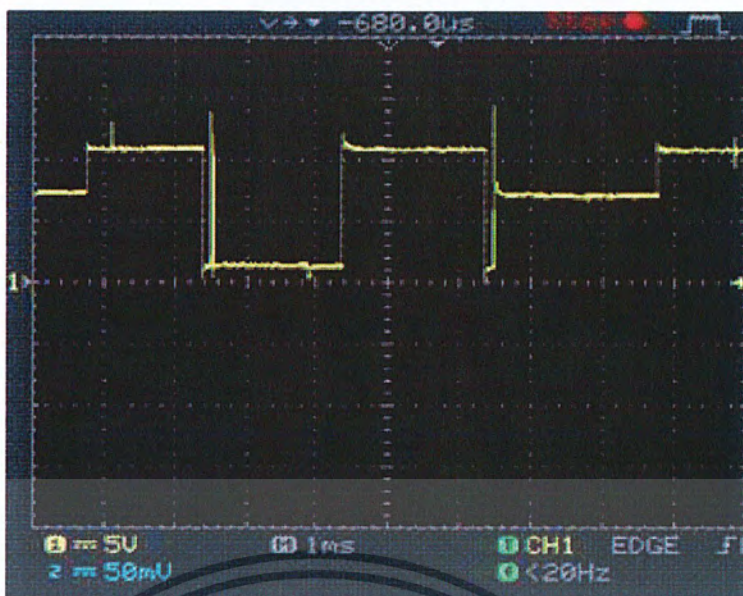
b) เอาท์พุทของ L298

7.5.2 ที่ Duty cycle 50%



a) อินพุทของ L298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



b) เอาท์พุทของ L298

รูปที่ 7.8 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุทและเอาท์พุทของ L293D ที่ Duty cycle 50%

โดยที่ a) อินพุทของ L298 และ b) เอาท์พุทของ L298

7.5.3 ที่ Duty cycle 75%



a) อินพุทของ L298

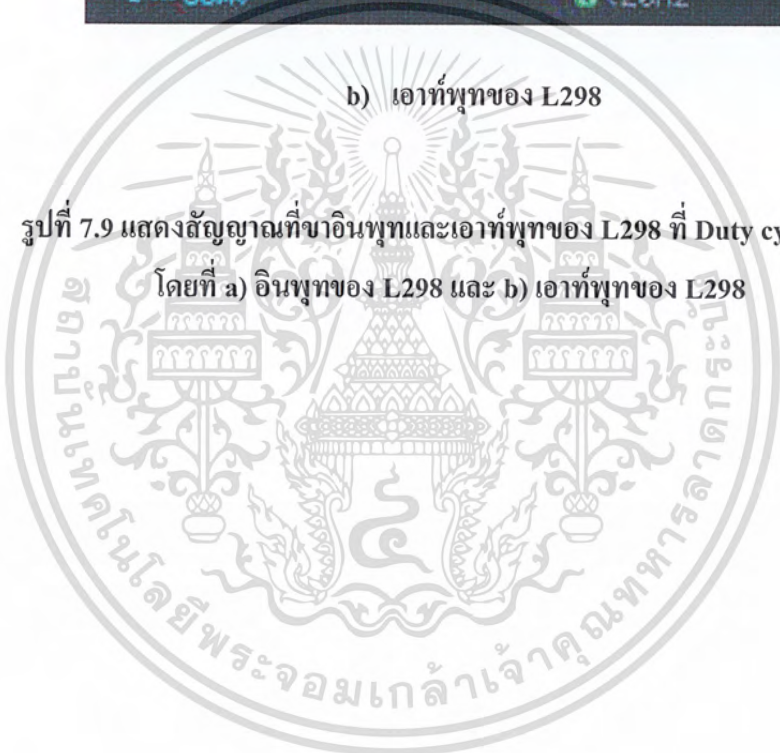
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



b) เอาท์พุทของ L298

รูปที่ 7.9 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุทและเอาท์พุทของ L298 ที่ Duty cycle 25%

โดยที่ a) อินพุทของ L298 และ b) เอาท์พุทของ L298



## บทที่ 8

# การศึกษาและออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ขนาดจริง

### 8.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ขนาดจริง

#### 8.1.1 ขั้นตอนการออกแบบ

1. ศึกษาโครงสร้างของหุ่นยนต์ลูกค่อมหัวหกในที่นี่ได้ศึกษาโครงสร้างจาก Internet และ ศึกษาจากลูกค่อมหัวหกของจริง



รูปที่ 8.1 แสดง Segway รุ่นที่ 3 ของภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 8.2 แสดงยานพาหนะสองล้อบรรทุกนรุ่นที่สอง CRV Lab มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาติเดินทางไปไซประเยชนดานการคา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

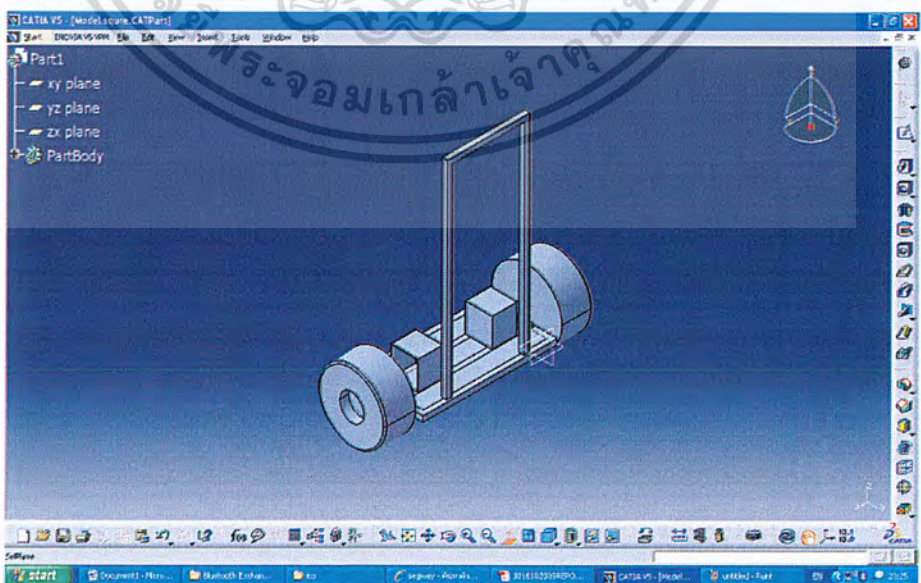


Segway XT with Explorer Package

### รูปที่ 8.3 รูป Segway จาก Internet

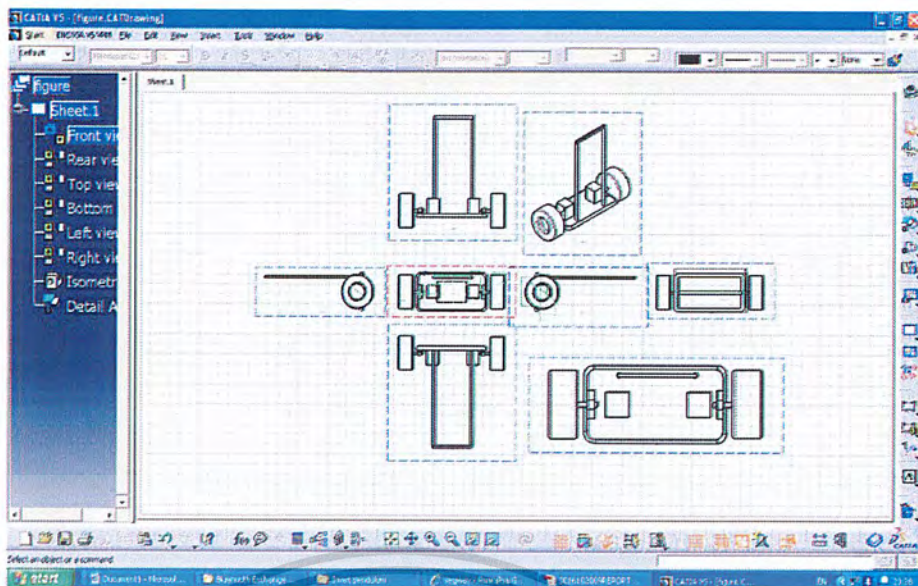
จากการศึกษาพบข้อสังเกตว่าจุดศูนย์ถ่วงน้ำหนักของหุ่นยนต์อยู่ใต้แกนเพลาล้อ ทำให้การควบคุมสามารถทำได้ง่ายกว่าจุดศูนย์ถ่วงของน้ำหนักที่อยู่เหนือแกนเพลาล้อ (หลักการเหมือนตุ๊กตาส้มลูก)

2. การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวทก  
การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์จะใช้โปรแกรม Catia ออกแบบโครงสร้างเป็น 3D โดยอาศัยหลักการที่ได้จากการศึกษาข้างต้น



รูปที่ 8.4 แสดงการออกแบบหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวทกโดยใช้โปรแกรม Catia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.5 รูปแสดงภาพฉายของหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวหก

### 3. การสร้างและประกอบหุ่นยนต์



รูปที่ 8.6 แสดงส่วนของฐานของหุ่นยนต์และรูปแสดงส่วนของมอเตอร์ถูกยึดติดกับกล่อง

- นำส่วนฐานของหุ่นยนต์มาประกอบกับกล่องใส่มอเตอร์



รูปที่ 8.7 แสดงส่วนฐานของหุ่นยนต์มาประกอบกับกล่องใส่มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำส่วนของล้อรถมาประกอบกับส่วนฐานของหุ่นยนต์

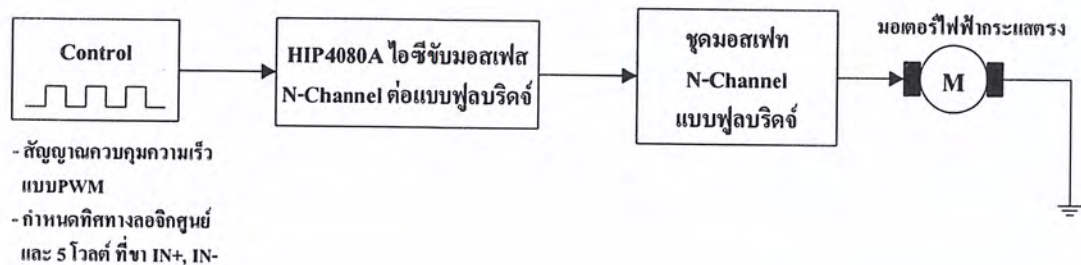


รูปที่ 8.8 รูปแสดงส่วนของล้อและรูปแสดงการประกอบล้อเข้ากับมอเตอร์



รูปที่ 8.9 รูปแสดงหุ่นยนต์ลูกตุ้มหัวทก

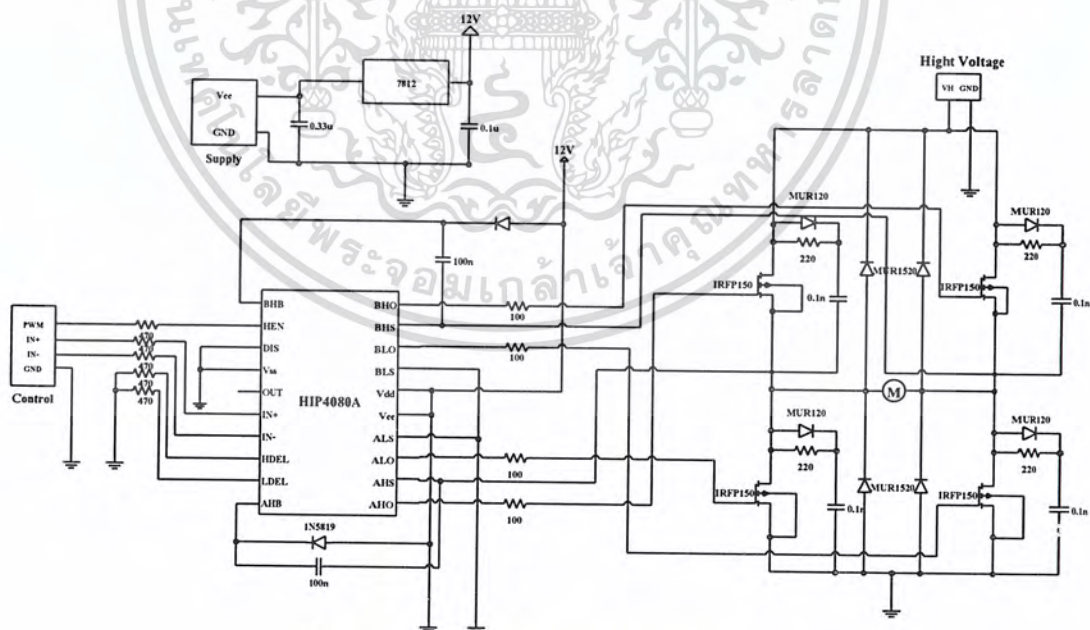
## 8.2 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์ขนาด 24 Volts 350 Watts



รูปที่ 8.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 8.10 เป็นการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยสร้างสัญญาณควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบ PWM ซึ่งใช้บอร์ดคอนโทรล dsPIC30F2010 เป็นตัวควบคุมในการปรับเปลี่ยนความกว้างพัลส์ (Duty cycle) ที่ความถี่ที่ และส่งสัญญาณ PWM ให้กับวงจรขับมอเตอร์ โดยใช้ไอซี HIP4080A ควบคุมมอเตอร์ผ่านชุดมอสเฟต และเอาท์พุทที่ได้ ออกทางมอเตอร์

### 8.2.1 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

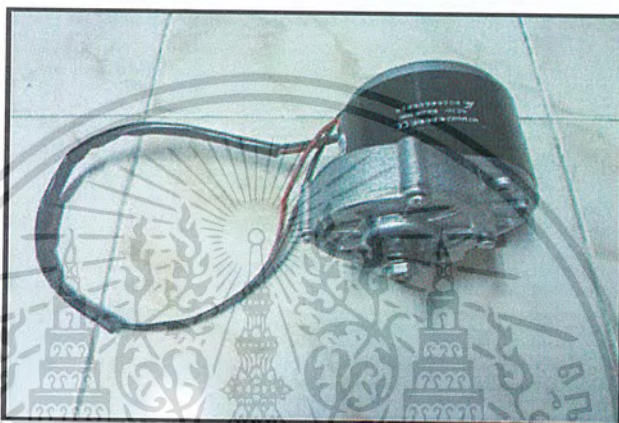


รูปที่ 8.11 วงจรขับมอเตอร์ของหุ่นยนต์ขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.2.2 มอเตอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ขนาดจริง

ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ใช้หลักการเช่นเดียวกับมอเตอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ขนาดจำลอง ส่วนในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ขนาดจริงจะใช้การขับมอเตอร์ด้วยไอซีเบอร์ HIA4080A ซึ่งสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ประกอบด้วยสองส่วน คือ สัญญาณลอจิกควบคุมทิศทาง และสัญญาณพัลส์วัดมอดูเลชันความถี่ 1.25 กิโลเฮิร์ตในการควบคุมความเร็ว มอเตอร์ที่ใช้ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ โดยที่ตัวมอเตอร์มีกล่องเฟืองเพื่อช่วยเพิ่มทอร์กในการหมุน โดยกล่องเฟืองที่ใช้มีอัตราทด 1:9



รูปที่ 8.12 รูปมอเตอร์ที่ใช้ในขนาดจริง

## บทที่ 9

### ผลการทดลองหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริง

เป็นการทดลองการทำงานของมอเตอร์ ขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์ และการทำงานของหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริงในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 9.1 ผลทดลองวัดกระแสที่ความถี่ต่างๆ

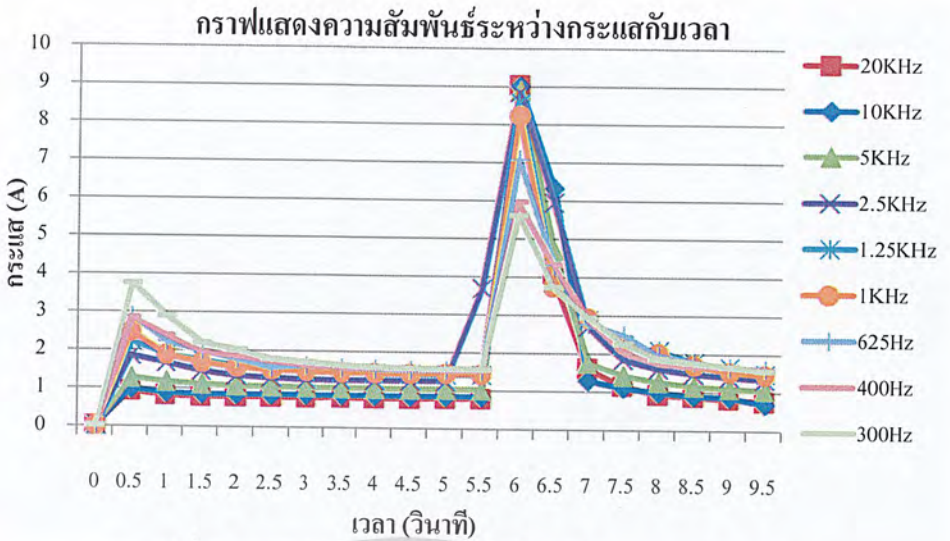
การวัดค่ากระแสขณะที่มอเตอร์มีการหมุนกลับทิศไปมา โดยนำค่าความต้านทาน 0.6 โอห์ม มาต่อเป็นโหลดให้กับวงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แล้ววัดแรงดันตกคร่อมความต้านทานเพื่อนำมาหาค่ากระแส ซึ่งทำการกำหนดค่า Duty cycle ให้มีค่าเท่ากับ 50% ณ ทุกๆความถี่ที่เปลี่ยนแปลง (ความถี่ที่ทำการทดลอง) และโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมให้วงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีการหมุนไปข้างหน้า 6 วินาที และให้มีการหมุนกลับหลัง 6 วินาที ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 9.1



ตารางที่ 9.1 แสดงค่ากระแสที่ค่าความถี่ต่างๆ ขณะที่มอเตอร์มีการหมุนกลับทิศไปมา

Time (s)	I (A)								
	Frequency (Hz)								
	20K	10K	5K	2.5K	1.25K	1K	625	400	300
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.92	0.967	1.255	1.841	2.206	2.458	2.853	2.836	3.738
1	0.81	0.861	1.148	1.653	1.855	1.858	2.203	2.375	2.878
1.5	0.778	0.835	1.091	1.44	1.723	1.66	1.98	1.946	2.178
2	0.775	0.83	1.056	1.321	1.586	1.546	1.76	1.843	2.01
2.5	0.776	0.823	1.036	1.276	1.508	1.485	1.535	1.716	1.775
3	0.77	0.825	1.028	1.245	1.46	1.451	1.598	1.601	1.695
3.5	0.776	0.82	1.016	1.233	1.431	1.418	1.55	1.558	1.618
4	0.768	0.823	1.01	1.226	1.415	1.416	1.525	1.551	1.58
4.5	0.77	0.818	1.006	1.223	1.403	1.41	1.505	1.536	1.565
5	0.773	0.821	1.003	1.22	1.393	1.416	1.501	1.513	1.546
5.5	0.776	0.821	1.003	3.67	1.396	1.41	1.496	1.506	1.541
6	9.03	9.003	8.881	8.833	8.556	8.22	7.06	5.958	5.595
6.5	3.99	6.306	4.688	5.936	3.84	3.725	4.288	4.311	3.72
7	1.6	1.275	1.735	2.688	2.868	2.913	2.748	2.871	2.928
7.5	1.145	1.091	1.406	1.833	2.211	2.238	2.471	2.016	2.245
8	0.925	0.975	1.248	1.598	2.073	2	1.943	1.73	1.86
8.5	0.88	0.886	1.141	1.471	1.77	1.691	1.771	1.653	1.753
9	0.818	0.861	1.09	1.393	1.641	1.518	1.645	1.648	1.661
9.5	0.755	0.681	1.05	1.33	1.48	1.453	1.603	1.59	1.553
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่สูง จะมีพื้นที่ใต้กราฟน้อยกว่าที่ความถี่ต่ำ แสดงให้เห็นว่า โดยรวมแล้วที่ความถี่สูงใช้กระแสในการขับเคลื่อนมอเตอร์ต่ำกว่าที่ค่าความถี่สูง แต่ขณะที่มอเตอร์มีการหมุนกลับทิศทางที่ความถี่สูงจะมีกระแสกระชากสูงมากกว่าและลงสู่ค่ากระแสลงที่เร็วกว่าค่าความถี่ค่าต่ำๆ จากผลการทดลองเราจึงเลือกใช้ความถี่เท่ากับ 1.25 กิโลเฮิร์ต

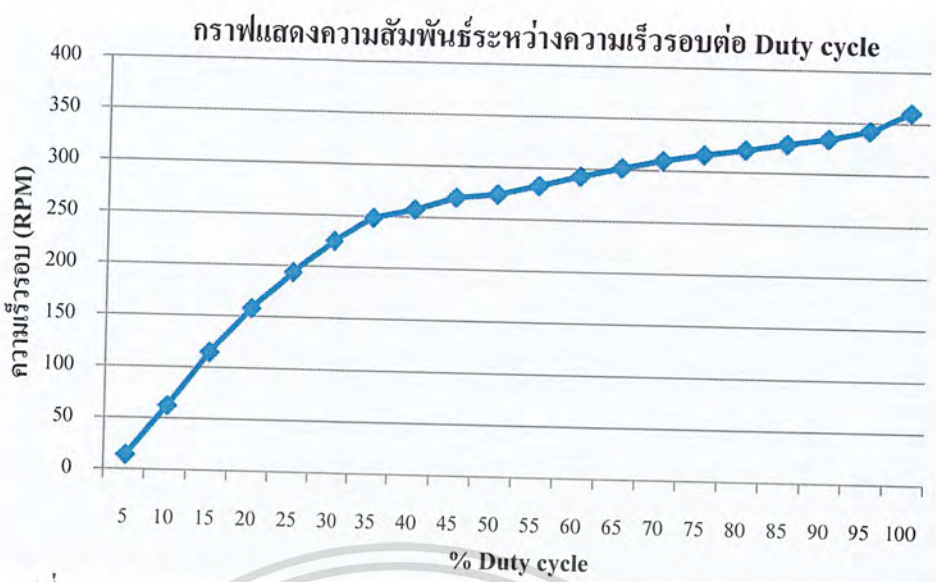
## 9.2 การทดลองวัดความเร็วมอเตอร์ (RPM)

การวัดความเร็วมอเตอร์ที่ค่า % Duty cycle ต่างๆ โดยใช้ความถี่ PWM 1.25 กิโลเฮิร์ต ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 9.2 และกราฟที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 แสดงความเร็วรอบมอเตอร์เทียบกับค่า % Duty cycle ต่างๆที่ความถี่ 1.25 กิโลเฮิรต์

% duty cycle	RPM			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
5	13.5	13.2	13	13.23333
10	61.1	60.9	61.3	61.1
15	113.7	113.4	113.6	113.5667
20	156.7	156.9	157.7	157.1
25	193	192.6	193.3	192.9667
30	224.3	224.7	224.4	224.4667
35	247.8	247.5	247.9	247.7333
40	255.8	256.8	256.9	256.5
45	269	268.8	269.1	268.9667
50	273.2	273	273.1	273.1
55	282	282.1	282.8	282.3
60	292	292.4	292.4	292.2667
65	301.3	300.8	301.3	301.1333
70	309	309.1	309.2	309.1
75	315.6	315.4	315.9	315.6333
80	320.9	321.1	320.9	320.9667
85	327.4	327.2	327.6	327.4
90	333.2	333.1	333.3	333.2
95	341.3	341.8	342	341.7
100	359.5	359.8	360	359.7667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



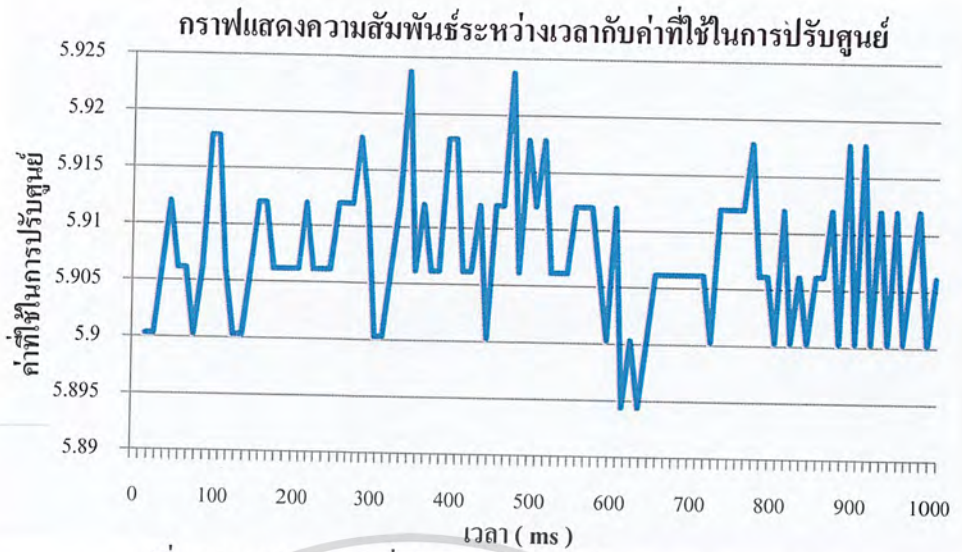
รูปที่ 9.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) กับ % Duty cycle

การวัดความเร็วมอเตอร์ที่ค่า % Duty cycle ต่างๆโดยใช้ความถี่ PWM 1.250 กิโลเฮิรต์ ได้ผลการทดลองดังกราฟ จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ความเร็วมอเตอร์มีค่ามากขึ้นเมื่อค่า Duty cycle มีค่าสูงขึ้น

### 9.3 วัดการตอบสนองของ Accelerometer

#### 9.3.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero - Adjust)

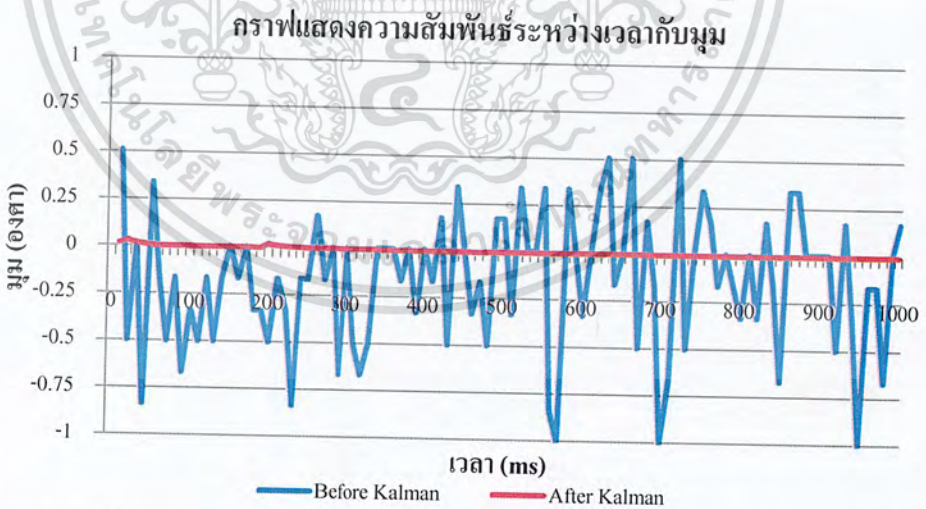
เป็นการวัดการตอบสนองของ Accelerometer เพื่อหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ให้กับ Accelerometer กล่าวคือ เมื่อหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริงอยู่ในตำแหน่งสมดุลและหยุดนิ่งอยู่กับที่ Accelerometer ควรอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ (ณ ตำแหน่งสมดุลควรอ่านค่า Accelerometer ได้เท่ากับศูนย์) แต่ในความจริงอ่านค่าไม่ได้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงค่าในกราฟที่ 9.3 จึงต้องมีการปรับศูนย์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 9.3 กราฟแสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Accelerometer

### 9.3.2 ก่อนและหลัง Kalman Filter

เป็นการวัดการตอบสนองของ Accelerometer หลังการปรับศูนย์ทั้งก่อนและหลัง Kalman filter ดังแสดงในกราฟที่ 9.4 โดยการทดลองนี้ทำโดยให้หุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริงอยู่ในตำแหน่งสมดุลและหยุดนิ่งอยู่กับที่ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



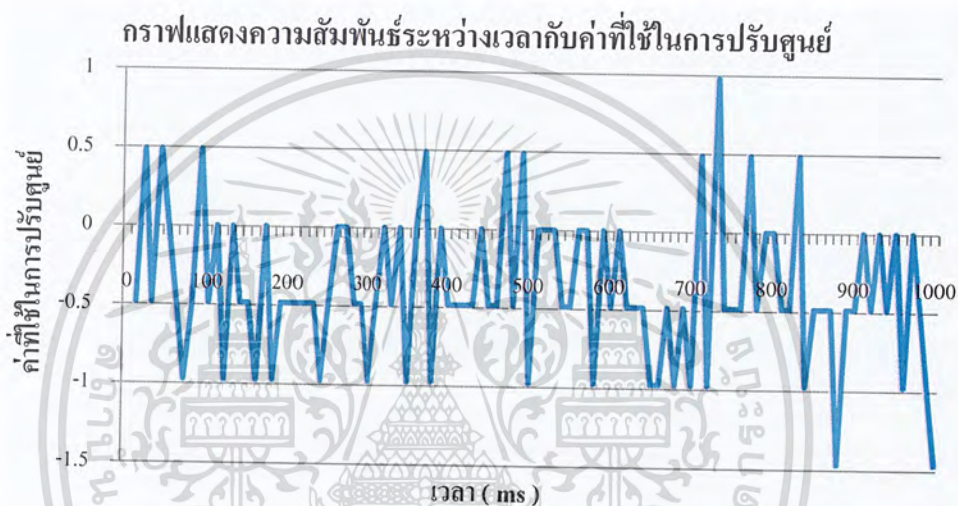
รูปที่ 9.4 กราฟแสดงการตอบสนองของ Accelerometer ขณะก่อนและหลัง Kalman filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9.4 วัดการตอบสนองของ Gyroscope

### 9.4.1 การหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ (Zero – Adjust)

เป็นการวัดการตอบสนองของ Gyroscope เพื่อหาค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ให้กับ Gyroscope กล่าวคือ เมื่อหุ่นยนต์หุ่นยนต์สองล้อขนาดขนาดใช้งานจริงหยุดนิ่งอยู่กับที่ Gyroscope ควรอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ (เมื่อหุ่นยนต์หยุดนิ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่ควรอ่านค่า Gyroscope ได้เท่ากับศูนย์) แต่ในความจริงอ่านค่าไม่ได้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงค่าในกราฟที่ 9.5 จึงต้องมีการปรับศูนย์ โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

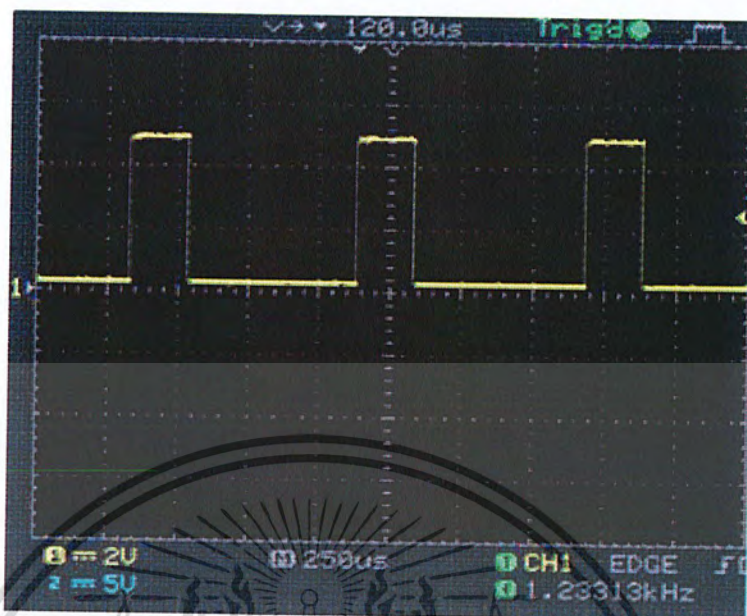


รูปที่ 9.5 กราฟแสดงค่าที่ใช้ในการปรับศูนย์ของ Gyroscope

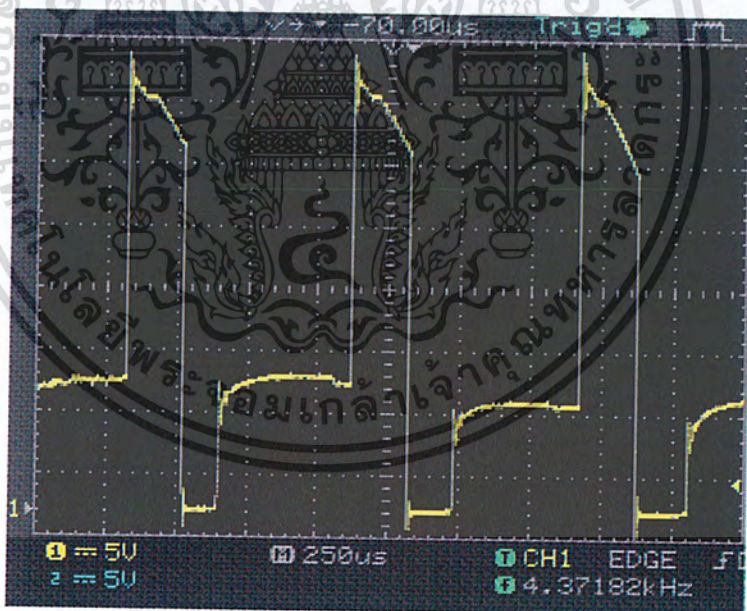
## 9.5 วัดสัญญาณของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

เป็นการวัดสัญญาณของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของไอซี HIP4080A ที่ค่า Duty cycle ต่างๆ โดยทางด้านอินพุตของ HIP4080A รับค่า PWM, IN+ และ IN- มาจาก dsPIC30F4011 และทางด้านเอาต์พุตของ HIP4080A ขณะมีโหลดที่ซึ่งต่อกับขาเกทของมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ปิด-เปิดการทำงานในส่วนของการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์หมุน ดังแสดงในรูปที่ 8.11

## 9.5.1 ที่ 25% Duty cycle



a) อินพุตของ HIP4080A



b) เอาท์พุทของ HIP4080A

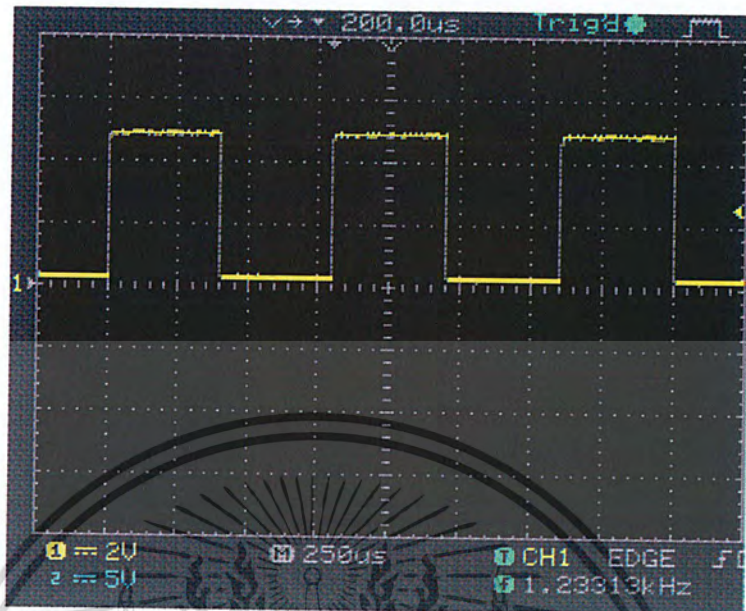
รูปที่ 9.6 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุตและเอาท์พุทของ HIP4080A ที่ 25% Duty cycle

a) อินพุตของ HIP4080A

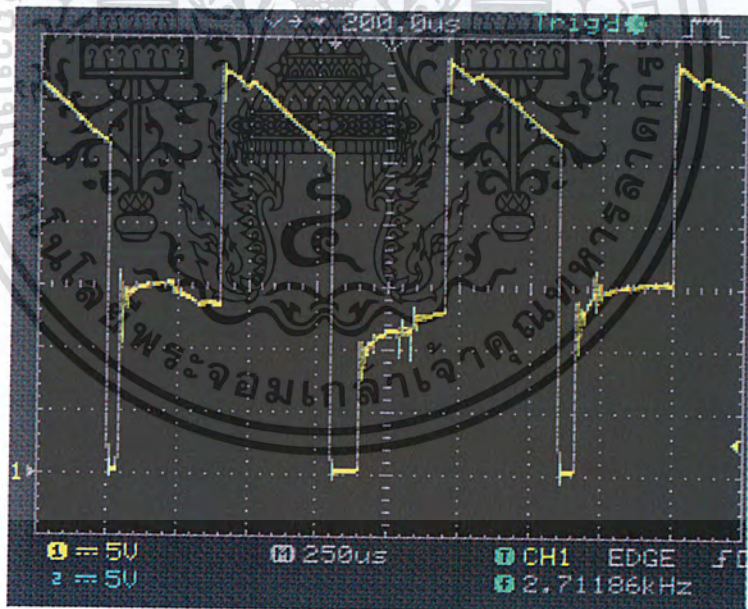
b) เอาท์พุทของ HIP4080A ขณะมีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 9.5.2 ที่ 50% Duty cycle



a) อินพุตของ HIP4080A



b) เอาท์พุทของ HIP4080A

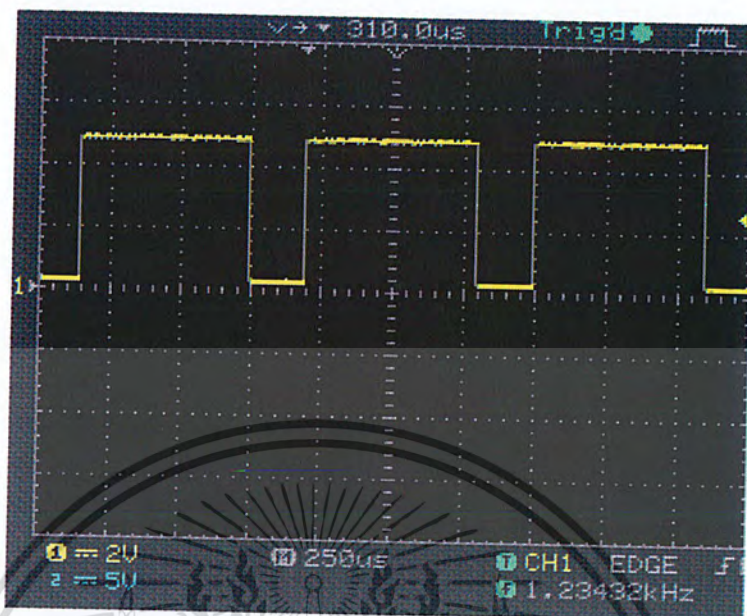
รูปที่ 9.7 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุตและเอาท์พุทของ HIP4080A ที่ 50% Duty cycle

a) อินพุตของ HIP4080A

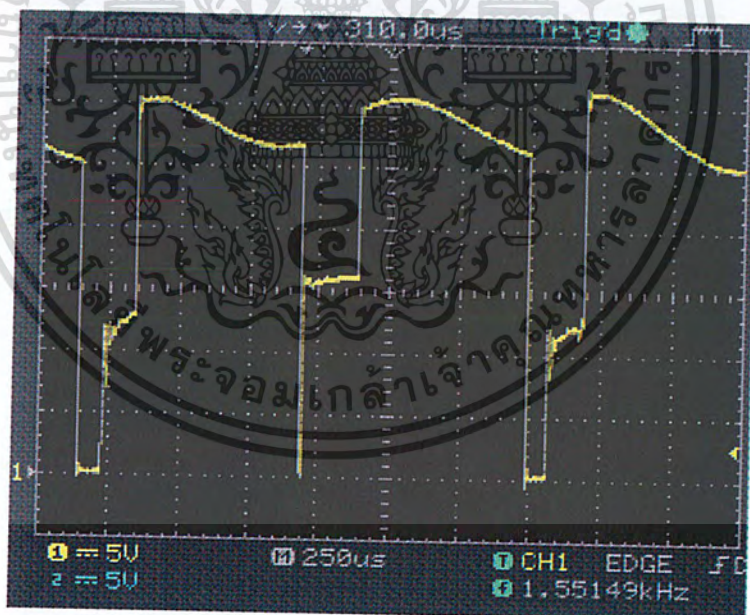
b) เอาท์พุทของ HIP4080A ขณะมีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9.5.3 ที่ 75% Duty cycle



a) อินพุตของ HIP4080A



b) เอาท์พุทของ HIP4080A

รูปที่ 9.8 แสดงสัญญาณที่ขาอินพุตและเอาท์พุทของ HIP4080A ที่ 75% Duty cycle

a) อินพุตของ HIP4080A

b) เอาท์พุทของ HIP4080A ขณะมีโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการทำงานเพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุม PID จะได้ว่า การออกแบบตัวควบคุม PID ผู้ออกแบบจำเป็นต้องสังเกตและศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบที่ต้องการควบคุมและนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม โดยตัวควบคุมยังไม่มีความสามารถที่จะเรียนรู้ระบบด้วยตัวเองได้ ทำให้ต้องคอยมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการควบคุมและตัวควบคุมที่ได้ก็ยังคงมีความสามารถจำกัด กล่าวคือ ถ้าระบบมีการสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไป เช่น เปลี่ยนโครงสร้างหุ่นยนต์สองล้อ ระบบจะไม่สามารถทำงานได้ดังเช่นเคย ทำให้ขอบเขตในการทำงานค่อนข้างแคบ

ในส่วนของชิ้นงานที่ได้จากการนำตัวควบคุมที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้นั้น จะมีความสามารถในการทรงตัวระดับหนึ่ง กล่าวคือ ที่สภาวะเริ่มต้นตัวหุ่นขนาดจำลองจะต้องอยู่ในตำแหน่งสมดุลหรือตั้งฉากกับพื้นโลก และเมื่อจ่ายไฟให้กับตัวหุ่น ตัวหุ่นจะมีการรักษาเสถียรภาพโดยมอเตอร์จะมีการชดเชยแรงและเคลื่อนที่กลับทิศทางไปมาเพื่อให้ตัวหุ่นอยู่ในตำแหน่งที่สมดุลจากการรักษาเสถียรภาพของตัวหุ่น แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวหุ่น ดังนี้

1. การตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ ในขณะที่หุ่นยนต์ทำงานจำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่กลับทิศทางไปมาตลอดเวลา ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการที่มอเตอร์ประกอบขึ้นจากขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหน่วงกระแสและไม่สามารถกลับทิศทันทีทันใดได้ที่ความถี่สูงสุดในการกลับทิศของมอเตอร์จึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมมาก
2. ความสามารถในการจ่ายกระแสของแหล่งจ่ายไฟของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์จะมีการกินกระแสสูงในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เมื่อแหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสในการขับเคลื่อนได้ตามที่ต้องการ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแยกลง

สำหรับการศึกษาหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริงซึ่งเป็นการนำผลการศึกษารุ่นขนาดจำลองมาพัฒนา เราได้ทำการศึกษา ส่วนของ โครงสร้างหุ่นยนต์ที่จะมาทำเป็นหุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นลูกตุ้มหัวทก ส่วนของวงจรถับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สำหรับหุ่นยนต์สองล้อ และส่วนสุดท้ายคือส่วนของการควบคุมเราได้นำการควบคุมจากหุ่นยนต์ขนาดจำลองมาใช้ควบคุมหุ่นยนต์สองล้อขนาดใช้งานจริง

ส่วนของโครงสร้างหุ่นยนต์สองล้อขนาดจริง มีการศึกษาว่าถ้าเราต้องการที่จะทำเป็นหุ่นยนต์สองล้อที่มีลักษณะเป็นลูกตุ้มหัวทกจะต้องมีจุดศูนย์กลางต่ำที่สุดเท่าที่จะสามารถออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ และการออกแบบที่จับซึ่งความยาวของที่จับมีผลต่อการตอบสนองความถี่และควรออกแบบให้  
ผู้ใช้งานสามารถจับได้สะดวกด้วย

ส่วนของวงจรขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ต้องเป็นวงจรที่สามารถตอบสนองต่อการไป-  
กลับ ของมอเตอร์ ได้ ซึ่งวงจรขั้วมอเตอร์ควรมีลักษณะการป้องกันกระแสย้อนกลับที่เกิดจากลวดที่  
เป็นตัวเหนี่ยวนำ ความถี่ที่ใช้ในการขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงควรมีค่าสูงเพื่อสามารถตอบสนอง  
การไป-กลับได้ทัน แต่ในขณะเดียวกันความถี่ที่ใช้ในการขั้วเคลื่อนมอเตอร์ก็ควรมีค่าต่ำเพื่อทำให้  
หุ่นยนต์ขนาดจริงได้แรงบิดเพียงพอที่จะขั้วเคลื่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 11

# สรุปผลการทำงาน

### 11.1 สรุปผลการปฏิบัติงาน

การปฏิบัติงานเริ่มด้วยการศึกษาจาก โครงการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับ Inverted pendulum รวมทั้ง ศึกษาทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุม Inverted pendulum เพื่อนำมาทำการสร้างหุ่นยนต์สองล้อ

จากการศึกษาและทำการทดลองสรุปได้ว่าเราสามารถใช้อัลกอริทึมที่ศึกษาข้างต้นควบคุมขนาด จำลอง ได้จริงและจะนำการทดลองนี้ไปพัฒนาต่อไปพัฒนาต่อในหุ่นยนต์ขนาดใช้งานจริง

### 11.2 ปัญหาและอุปสรรค

- กำลังภาคจ่ายไฟของแบตเตอรี่
- กำลังของมอเตอร์ไม่เพียงพอที่จะชดเชยเมื่อบวมของลูกตุ้มหัวหกเกิน 15 องศา เทียบกับ จุดสมดุล
- จุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์อยู่สูงทำให้มีการรักษาเสถียรภาพยาก
- ตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์
- อุปกรณ์ทาง Power Electronics

### 11.3 การแก้ไขปัญหา

- เปลี่ยนแปลงแบตเตอรี่ให้มีกำลังเพิ่มขึ้น
- ปรับจุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์ให้อยู่ต่ำลง
- ทดลองหาตำแหน่งในการติดตั้งเซนเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ
- ปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของมอเตอร์ให้เพียงพอเพื่อให้อุปกรณ์มอเตอร์ทำงานได้

### 11.4 ประโยชน์และการประยุกต์

สามารถนำไปพัฒนาเป็นยานพาหนะ สำหรับบุคคลทั่วไป หรือ บุคคลพิการให้สามารถ เคลื่อนที่ได้สะดวกมากขึ้น

## 11.5 สิ่งที่ได้รับจากโครงการนี้

1. เรียนรู้การเขียนโปรแกรม และการนำความรู้จากทฤษฎีไปปฏิบัติจริง
  2. รู้จักคิดและวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน
- นอกจากนี้ยังได้ประสบการณ์การทำงานจริง ความรู้และเทคนิคต่างๆจากอาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดเวลาที่ทำโครงการชิ้นนี้ ขอขอบคุณครับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

Greg Welch. (2001). **An Introduction to the Kalman Filter 2 .nd ed**

**North Carolina: ACM**

Shiroma, N., Matsumoto, O., Kajita, S. & Tani, K, 1996 **'Cooperative Behaviour of a Wheeled Inverted Pendulum for Object Transportation'**

Dorf, Richard & Robert H. Bishop. 2001 **'Modern Control Systems'**, Prentice-Hall, United States of America.

Norman S. Nise. **'Control Systems Engineer'**, 5<sup>th</sup> Edition, California State Polytechnic University, Pomona.

Robert D. Strum & Donald E. Kirk, **'CONTEMPORARY LINEAR Systems using MATLAB'**, Library of Congress Cataloging in Publication Data, United States of America.

Katsuhiko Ogata, **'Modern Control Engineering'**, Fifth Edition, Prentice-Hall, United States of America.

ประจัน พลังสันติกุล. 2551. **'การเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F ด้วยคอมไพเลอร์ MPLAB C'**. กรุงเทพฯ: แอพซอพต์แวร์