

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หุ่นยนต์รักษาสมดุลด้วยตนเอง

SELF BALANCING ROBOT



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

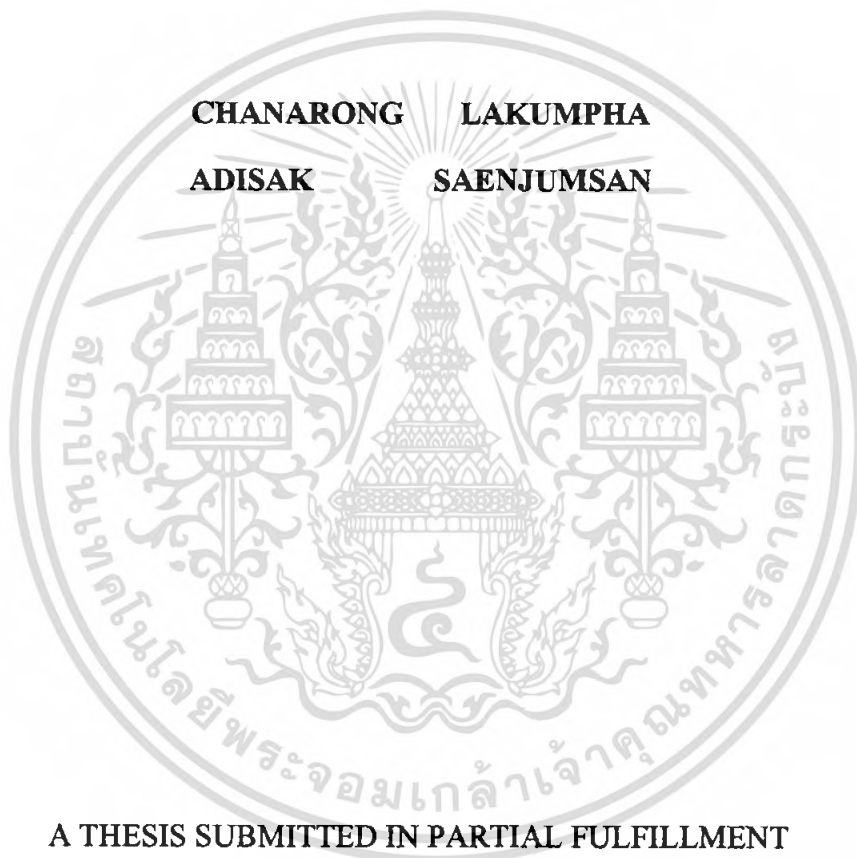
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **SELF BALANCING ROBOT**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING CONTROL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CONTROL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGRUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2549

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ่นยนต์รักษาสมดุลด้วยตนเอง  
SELF BALANCING ROBOT

ผู้จัดทำ นายชาญณรงค์ หล้าคำภา  
นายอดิศักดิ์ แสนจำสาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

หุ่นยนต์รักษาสมดุลง่ายได้ด้วยตนเอง

นักศึกษา

นายชาญณรงค์ หล้าคำภา

นายอดิศักดิ์ แสนจำสาร

รหัสประจำตัว

47015277

47015308

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

วิศวกรรมระบบควบคุม

สาขาวิชา

วิศวกรรมระบบควบคุม

ปีการศึกษา

2549

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

รศ. สุเชียร เกียรติสุนทร

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีเกี่ยวกับการทรงตัวมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น หุ่นยนต์ การทรงตัวของเครื่องบิน เรือและเรือค้ำน้ำ ในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการทรงตัวโดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับจากอุปกรณ์ตรวจจับคืออุปกรณ์วัดความเร่งและความโน้มเอียงเข้ามาใช้ในการควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์รักษาสมดุลง่าย2ล้อให้สามารถทรงตัวอยู่ได้โดยเมื่อถูกแรงมากระทำก็ยังสามารถรักษาสมดุลง่ายอยู่ได้โดยไม่ล้มจากแนวความคิดนี้สามารถนำไปพัฒนาร่วมกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และหุ่นยนต์ช่วยชีวิตให้มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Self Balancing Robot  
**Authors** Mr. Chanarong Lakumpha  
Mr. Adisak Saenjumsan  
**Thesis Advisor** Assoc.Prof. Suthian Kiatsunthorn  
**Year** 2006



## ABSTRACT

Nowadays we have a lot of technology about balancing such as Robot , Airplane balancing , ship and sub-marine. In this thesis we will introduce about balancing system by using principle of feedback control , by measure an angle of robot by accelerometer (ADXL202) to help balancing robot 2-wheeled to be balance even having external force doing to robot it still not falling down. This theory can help to develop robot and rescued-robot movement to be more official

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีได้เพราะได้รับความเมตตาจากท่านรองศาสตราจารย์ สุเชียร เกียรติสุนทร อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาทำให้ผู้วิจัยเกิดความศรัทธาเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้วิจัยมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมถึงให้ความเอาใจใส่ ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอทำให้ผู้วิจัยทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัยจนสามารถทำปริญญาบัตรฉบับนี้จนเสร็จสิ้น

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่รักและเคารพที่สนับสนุนและเป็นกำลังแรงใจในการทำปริญญาบัตร ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอกแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชาณูณรงค์ หล้าคำภา  
อติศักดิ์ แสนจำสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์	1
1.2 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	1
<b>บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์และหลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม</b>	<b>2</b>
2.1 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ขั้นพื้นฐาน	4
2.1.1 การควบคุมความเร็วด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้	4
2.1.2 การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดัน	5
2.1.3 การควบคุมด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้	5
2.1.4 การควบคุมด้วยพัลส์วีกต์โมดูเลชัน(PWM)	6
2.2 การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	9
2.2.1 เอ็นโค้ดเดอร์	9
2.3 หลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม	13
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการควบคุมระบบ</b>	<b>16</b>
3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Control Action)	16
3.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล(Integral Control Action)	18
3.3 การควบคุมแบบคริเวทีฟ(Derivative Control Action)	19
3.4 การควบคุมแบบพีไอ(Proportional and Integral Control Action)	20
3.5 การควบคุมแบบพีดี(Proportional and Derivative Control Action)	21
3.6 การควบคุมแบบพีไอดี(Proportional Integral and Derivative Control Action)	22
3.7 คณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดี	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.1 องค์ประกอบของพี	23
3.7.2 องค์ประกอบของไอ	23
3.7.3 องค์ประกอบของดี	24
3.7.4 องค์ประกอบของพีไอดี	24
<b>บทที่ 4 การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน</b>	<b>25</b>
4.1 คุณสมบัติของซีพียู	25
4.1.1 คุณสมบัติด้านการประมวลผล	25
4.1.2 คุณสมบัติของไมโครฟังก์ชันพิเศษ	26
4.1.3 หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชัน(PWM)	27
4.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	31
4.2.1 คุณสมบัติของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	31
4.2.2 การทำงานของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	32
4.3 เซนเซอร์วัดความโน้มเอียง	33
4.3.1 คุณสมบัติของเซนเซอร์วัดความโน้มเอียง(ADXL202)	33
4.3.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน(APPLICATIONS)	33
4.3.3 การทำงานของเซนเซอร์	34
4.4 การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเซนเซอร์และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	36
4.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของหุ่นยนต์รักษาสมดุลย์	37
4.6 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานหุ่นยนต์รักษาสมดุลย์	38
<b>บทที่ 5 การออกแบบโครงสร้างทางกล</b>	<b>39</b>
5.1 โครงสร้างแบบที่ 1	39
5.2 โครงสร้างแบบที่ 2	41
5.3 โครงสร้างแบบที่ 3	42
<b>บทที่ 6 การทดลอง</b>	<b>44</b>
6.1 การหาจุดอ้างอิง	44
6.2 การทดลองหาอัตราขยายที่เหมาะสม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 7</b> รูปและวิเคราะห์ปัญหา	50
7.1 รูปผลการดำเนินงาน	50
7.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	50
7.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต	51
<b>บรรณานุกรม</b>	52
<b>ภาคผนวก ก</b>	53
<b>ภาคผนวก ข</b>	55
<b>ภาคผนวก ค</b>	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบควบคุมความเร็ว ที่ประกอบด้วยรูปการควบคุมป้อนกลับเพียงรูปเดียว	2
2.2 ระบบควบคุมตำแหน่ง ประกอบด้วยรูปการควบคุมตำแหน่งและรูปควบคุมความเร็ว	3
2.3 วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรมและกราฟแสดงคุณสมบัติ	4
2.4 การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนค่าแรงดัน	5
2.5 การทำงานแบบ Locked Anti - Phase PWM	7
2.6 การทำงานแบบ Sign / Magnitude PWM	8
2.7 โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์	9
2.8 การสร้างพัลส์ของ โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์	10
2.9 ลักษณะพัลส์ของโรตารีแบบ 2 เฟส	10
2.10 การตรวจเช็คสัญญาณพัลส์ของ โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์	11
2.11 ลักษณะพัลส์ของโรตารี เอ็นโค้ดเดอร์ทั้ง 2 เฟส	11
2.12 ความละเอียดของ พัลส์	11
2.13 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม (Invert Pendulum)	13
3.1 แผนผังบล็อกการควบคุมแบบสัดส่วน	16
3.2 ผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน	17
3.3 แผนผังบล็อกของการควบคุมแบบอินทิกรัล	18
3.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดของการควบคุมแบบอินทิกรัล	19
3.5 แผนผังบล็อกของตัวควบคุมแบบครีเวทีฟ	19
3.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นบันไดของกิริยาควบคุมแบบครีเวทีฟ	20
3.7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นบันไดของกิริยาแบบพีไอ	20
3.8 ผลตอบสนองสัญญาณแบบเป็นเชิงเส้น(ramp)ของกิริยาแบบพีดี	21
3.9 ผลตอบสนองของการควบคุมแบบพีไอต่อสัญญาณแบบขั้นบันได	22
4.1 บอร์ดET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 / EXP	26
4.2 แผนผังการทำงานของ ไมครูลำเนิดสัญญาณพัลส์วีกท์โมดูเลชั่น(PWM)	27
4.3 ชุดขับมอเตอร์ DMD2A (DUAL MOTOR DRIVER)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การทำงานของชุดขับมอเตอร์ DMD2A (DUAL MOTOR DRIVER)	32
4.5 เซ็นเซอร์วัดความโน้มเอียง (ADXL202)	33
4.6 ความสัมพันธ์ของค่าคิวดั้ไซเคลิกของสัญญาณพัลส์วิคท์ไมคูเลชั่นกับทิศทางการ โน้มเอียงของ เซนเซอร์	34
4.7 การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเซนเซอร์และชุดขับมอเตอร์	36
4.8 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์รักษาสมดุล	37
4.9 แผนผังของโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุล	38
5.1 โครงสร้างทางกลรูปแบบของนายทาลัน	39
5.2 โครงสร้างหุ่นยนต์แบบที่ 1	40
5.3 รูปด้านบนหุ่นยนต์แบบที่ 1	40
5.4 รูปด้านหน้าหุ่นยนต์แบบที่ 1	40
5.5 ขนาดลือของหุ่นยนต์แบบที่ 1	40
5.6 โครงสร้างหุ่นยนต์แบบที่ 2	41
5.7 รูปด้านบนหุ่นยนต์แบบที่ 2	41
5.8 รูปด้านหน้าหุ่นยนต์แบบที่ 2	41
5.9 ขนาดลือของหุ่นยนต์แบบที่ 2	41
5.10 โครงสร้างหุ่นยนต์แบบที่ 3	41
5.11 รูปด้านบนหุ่นยนต์แบบที่ 3	42
5.12 รูปด้านหน้าหุ่นยนต์แบบที่ 3	43
5.13 ขนาดลือของหุ่นยนต์แบบที่ 3	43
6.1 หุ่นยนต์รักษาสมดุล	44
6.2 การหาจุดอ้างอิงของหุ่นยนต์	44
6.3 การใส่การรบกวนโดยใช้ลูกตุ้มเหวียง	45
6.4 ผลการทดลองเมื่อ $K_p = 8.5$ , $K_i = 0.15$ และ $K_d=1.5$	46
6.5 ผลการทดลองเมื่อ $K_p = 8.5$ , $K_i = 0.15$ และ $K_d=2.0$	46
6.6 ผลการทดลองเมื่อ $K_p = 8.5$ , $K_i = 0.15$ และ $K_d=2.5$	47
6.7 ผลการทดลองเมื่อ $K_p = 8.5$ , $K_i = 0.15$ และ $K_d=3.0$	47
6.8 ผลการทดลองเมื่อ $K_p = 8.5$ , $K_i = 0.15$ และ $K_d=3.5$	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.9 ผลการทดลองเมื่อ $K_p = 8.5$ , $K_i = 0.15$ และ $K_d = 4.0$	48
6.10 หุ่นยนต์ขณะยังไม่จ่ายไฟเลี้ยง	49
6.11 หุ่นยนต์ขณะจ่ายไฟเลี้ยงและมีการเลือกอัตราขยายที่เหมาะสม	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

Segway HT เป็นพาหนะที่รักษาสมดุลด้วยตัวเองได้เพียงชนิดเดียวที่มีขายเป็นทางการทั่วโลกในขณะนี้อ้างอิงจาก How Stuff Works Inc(2005) ซึ่ง Segway HT ถูกคิดค้นจากผู้ประกอบการและวิศวกรชื่อ ดิน คาเมน ซึ่งเขาสามารถสร้างเครื่องจักรที่สามารถรักษาสมดุลของตัวเองได้เป็นครั้งแรกในชื่อ iBOT และในขณะที่กำลังพัฒนา iBOT คาเมน ได้พิจารณาและเล็งเห็นความเป็นไปได้ว่าจะนำหลักการรักษาสมดุลนี้มาใช้เพื่อสร้างยานพาหนะที่สามารถใช้ขับขี่ในชีวิตประจำวันได้ จึงได้พัฒนาเป็น Segway HT ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัทของเขาเอง และในปี 2001 Segway HT ได้ออกปรากฏสู่สายตาคนภายนอกและพร้อมที่จะขายในปี 2002

โครงการนี้ผู้จัดทำได้แนวคิดมาจาก Segway HT ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่สามารถรักษาสมดุลของตัวเองเพื่อใช้เป็นพื้นฐานการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุล 2 ล้อ ให้สามารถทรงตัวได้ด้วยตัวเอง ซึ่งสามารถพัฒนาเพื่อสร้างยานพาหนะที่สามารถใช้ในชีวิตประจำวันได้ต่อไปในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

วัตถุประสงค์ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุล 2 ล้อ โดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับรวมทั้งยังสามารถสร้างชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ด้วยวัสดุที่หาได้ง่าย

### 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการวิจัยและศึกษาหลักการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุล 2 ล้อ โดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อทำให้หุ่นยนต์รักษาสมดุล 2 ล้อสามารถทรงตัวและเมื่อถูกแรงกระทำจากภายนอกก็ยังสามารถทรงตัวอยู่ได้โดยไม่ล้ม โดยมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนเพื่อรักษาสมดุลให้หุ่นยนต์ 2 ล้อ และใช้เซนเซอร์วัดความเร่งและความโน้มเอียง ตรวจสอบความเอียงของหุ่นยนต์เพื่อบอกองศาการเอียงของหุ่นยนต์

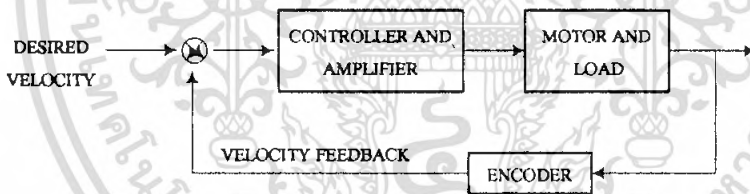
## บทที่ 2

# ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์และหลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม

โครงการนี้จำเป็นต้องใช้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการควบคุม ดี.ซี.มอเตอร์และหลักการของหลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้เริ่มต้นศึกษาการควบคุม ดี.ซี.มอเตอร์และหลักการของหลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม ดังนี้

จากรูปที่ 2.1 คือ บล็อกไดอะแกรมของระบบ ควบคุมความเร็วในระบบกลไกแบบเซอร์โวมอเตอร์ถูกเรียกว่า มอเตอร์แบบเซอร์โวเครื่องจักรรอบในรูปแบบป้อนกลับซึ่งจะวัดความเร็วของมอเตอร์แบบเซอร์โว และ ส่งป้อนกลับมาในรูปของสัญญาณ ไฟฟ้าซึ่งแปรตามความเร็วเพลลาของมอเตอร์ในที่นี้รูปป้อนกลับจะทำให้ความเร็วเอาท์พุทมอเตอร์ มีค่าคงที่มากขึ้น

ระบบแบบวงปิด ถูกใช้รวมอยู่ในระบบเครื่องมือเครื่องจักรหรือส่วนกำลังเพื่อชดเชยความแตกต่างของ โทลคหรือ วัสดุที่ถูกตัดหรือถูกเจาะวัสดุเนื้อแข็ง จะหน่วงความเร็วของสว่านหรือเครื่องมือที่ใช้ในการตัด และ สว่านจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นในวัสดุเนื้ออ่อน



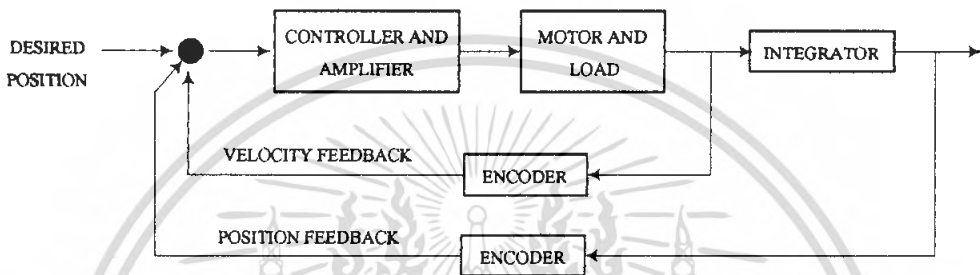
รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมความเร็วที่ประกอบด้วยรูปการควบคุมป้อนกลับเพียงรูปเดียว

ในรูปป้อนกลับความเร็วของมอเตอร์ที่ประกอบด้วยเครื่องวัดความเร็ว ความเร็วของเครื่องมือจะยังคงมีค่าคงที่ เนื่องจากเมื่อเครื่องมือที่ใช้ในการตัดมีความเร็วลดลงสัญญาณป้อนกลับจะควบคุมมอเตอร์ให้เพิ่มความเร็วขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อเครื่องมือตัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุอ่อนรูปป้อนกลับจะป้องกันไม่ให้มอเตอร์เร่งความเร็วเกินขนาด

อย่างไรก็ตามถ้าการประยุกต์ใช้งานมีความต้องการวงจรควบคุมเพิ่มเติมสามารถถูกเพิ่มขึ้นมาเพื่อทำให้มอเตอร์มีความเร็วค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และ ค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งหยุดกราฟของความเร็วเขียนได้ เป็นรูปของสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยส่วนที่ลาดขึ้นและส่วนที่ลาดลงหรืออาจเป็นรูปแทrapezoidal ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนเพิ่มความเร็วขึ้นส่วนความเร็วคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งและส่วนความเร็วลดลง

รูปที่ 2.2 คือบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมตำแหน่งนอกจากเครื่องวัดความเร็วในรูปป้อนกลับความเร็วแล้ว ระบบกลไกแบบเซอร์โวนี้จะมีรูปป้อนกลับการกำหนดตำแหน่ง

ตัวเซนเซอร์ ในการตรวจจับตำแหน่ง และ ความเร็ว จะรู้ว่าเมื่อใดที่เพลลาของ มอเตอร์เซอร์โวอยู่ในตำแหน่งมุม ที่ต้องการ โดยการนับสัญญาณพัลส์ และ เปรียบเทียบพัลส์ กับสัญญาณอินพุทก่อน ที่จะหยุดเพลลาเมื่อนับได้เท่ากัน ซึ่งก็คือ บล็อกที่ชื่อตัวอินทิเกรท(Integrator) โดยทั่วไปจะเป็นวงจรรีเลททรอนิกส์ควบคุมตำแหน่งของเพลลา ตัวเซนเซอร์ความเร็วในรูปป้อนกลับของระบบควบคุมตำแหน่ง ช่วยทำให้ระบบเกิดเสถียรภาพขึ้น



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมตำแหน่ง ประกอบด้วยรูปการควบคุมตำแหน่งและรูปควบคุมความเร็ว

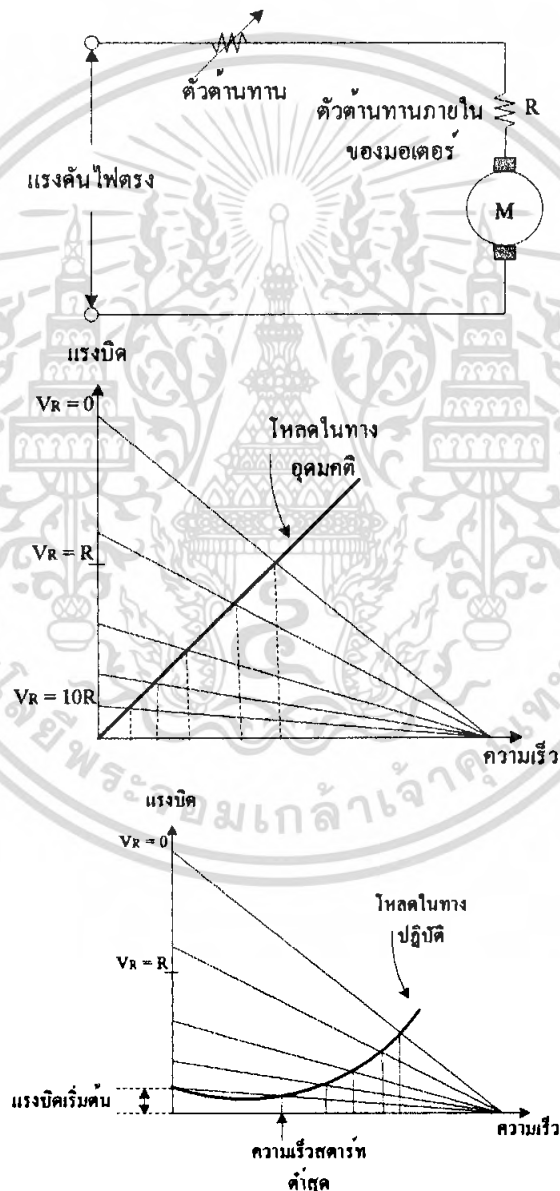
ในระบบควบคุมกำลังบิด(Torque control system) กำลังบิดของมอเตอร์เซอร์โวจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่ เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์แปรตามกระแสของมอเตอร์ดังนั้นกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เพื่อรักษาค่าแรงบิดให้คงที่เอาไว้ วิธีนี้สามารถทำได้ด้วยวงจรที่ทำการเปรียบเทียบกระแสเอาท์พุทของมอเตอร์กับกระแสอินพุทของมอเตอร์ และขยายผลต่างเพื่อใช้เป็นวงจรควบคุมแรงบิดป้อนกลับ (Torque control feedback circuit )

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบเพิ่ม (Incremental motion control system ) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงโหมดควบคุมจากโหมดหนึ่งไปเป็นอีกโหมดหนึ่ง เพื่อให้เกิดสมรรถนะการใช้งานที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การควบคุมความเร็วและตำแหน่งทำหน้าที่ควบคุมให้ได้ความเร็วที่ต้องการแต่สามารถปรับเปลี่ยนเป็นการควบคุมตำแหน่ง เพื่อหยุดเพลลาให้ได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

## 2.1 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ขั้นพื้นฐาน

### 2.1.1 การควบคุมด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้

เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของการควบคุมมอเตอร์คือการใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้อนุกรมกับมอเตอร์ โดยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ การบังคับแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะกำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทานมักนิยมใช้กับมอเตอร์ เล็กๆ การบังคับแบบนี้ให้คุณสมบัติการสตาร์ทดีแต่จะให้ความเร็วสูงมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะที่มีโหลดน้อยๆ ดังนั้นการบังคับแบบนี้มีประโยชน์เฉพาะภาวะที่แรงต้านคงที่ เช่น การบังคับความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เป็นต้น

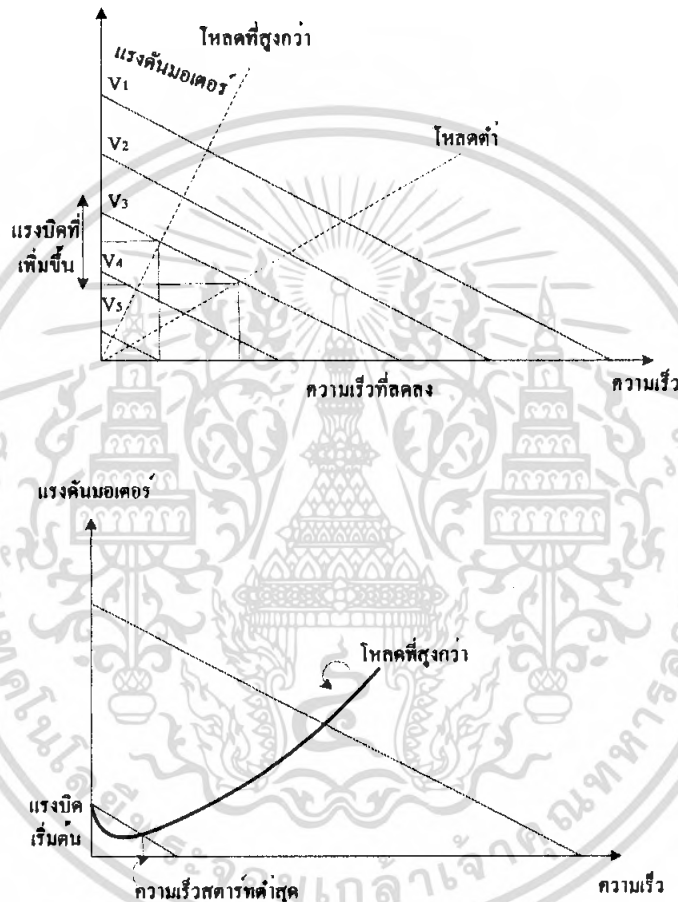


**รูปที่ 2.3** วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรมและกราฟแสดงคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดัน

วิธีการนี้ ดีกว่าวิธีการแรกแต่จะซับซ้อนกว่า ต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อัตราขยายกำลังสูง และมอเตอร์จะถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้จากแหล่งจ่ายที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ข้อดีของการควบคุมวิธีนี้คือถ้าความเร็วลดลงจากผลของแรงบิดแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาระดับความเร็วส่วน ข้อเสียจากการควบคุมวิธีนี้คือเมื่อมอเตอร์มีความเร็ว ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าต่ำเช่นกัน



รูปที่ 2.4 การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนค่าแรงดัน

### 2.1.3 การควบคุมด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้

การควบคุมแบบนี้สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ความเร็ว 10:1 และให้การเรีคูลูทที่ดีกว่า กระแสถูกปล่อยให้ฟัลด์คงที่ ผลของคุณสมบัติความเร็วและแรงบิดได้รับการปรับปรุงดีขึ้นกว่า การ บังคับด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้ และให้การเรีคูลูท ความเร็วคงที่ได้ดีขึ้นตลอดช่วง ความเร็วที่กว้างกว่า

#### 2.1.4 การควบคุมแบบพัลส์วิตท์โมดูเลชัน (PWM)

พัลส์วิตท์โมดูเลชัน(PWM) คือเทคนิคสำหรับควบคุมวงจรทางด้านฮาร์ดแวร์โดยใช้สัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิทัลของไมโครโปรเซสเซอร์ควบคุม

จากรูปที่ 2.5 -2.6 เป็นวงจรควบคุมทิศทางของ มอเตอร์โดยการเปิด-ปิด สวิตช์ชุด A1, B2 หรือ B1,A2 เช่น ถ้าเปิด A1,B2 มอเตอร์จะหมุนไปทางหนึ่ง และจะหมุนอีกทางหนึ่งเมื่อปิดสวิตช์ B1,A2 นอกจากนี้เราต้องคุมทิศทางแล้วเรายังต้องคุมความเร็วของมอเตอร์ อีกโดยส่วนมากจะใช้วิธีการพัลส์วิตท์โมดูเลชัน (Pulse Width Modulation) ซึ่งสามารถสร้างแรงดันเฉลี่ย ที่มากกว่าศูนย์ได้ซึ่งก็แสดงถึงว่าเราสามารถทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ได้นั้นเองการนำพัลส์วิตท์โมดูเลชันมาใช้ได้ 2 วิธี

##### 1. Locked Anti - Phase PWM

ใช้สัญญาณพัลส์วิตท์โมดูเลชัน ตัวเดียวควบคุมทั้งกำลัง และทิศทาง สำหรับ LMD 1800 ให้จ่ายไฟที่ pins เป็น high ตลอดและปรับทิศทางจากการปรับ ดิวตี้ไซเคิล กล่าวคือ

ถ้าดิวตี้ไซเคิลเป็น 50 % จะ ได้ช่วง เปิด-ปิด กว้างเท่ากันและให้แรงดันเฉลี่ยที่เกิดจากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟคาบเป็นศูนย์ มอเตอร์จะไม่หมุน

ถ้า ดิวตี้ไซเคิลมากกว่า50 %จะได้ช่วง เปิด มากกว่าช่วงปิดทำให้แรงดันเฉลี่ยมากกว่าศูนย์ มอเตอร์จะหมุนด้านหนึ่ง และจะหมุนเร็วขึ้นเมื่อดิวตี้ไซเคิลมากขึ้น

ถ้า ดิวตี้ไซเคิลน้อยกว่า50 %จะได้ช่วงปิดมากกว่าช่วงเปิดทำให้แรงดันเฉลี่ยน้อยกว่าศูนย์ มอเตอร์จะหมุนด้านหนึ่งและจะหมุนเร็วขึ้นเมื่อดิวตี้ไซเคิลน้อยลง

สรุป การควบคุมทิศทางและกำลังความเร็วของมอเตอร์ขึ้นกับการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล โดยตรง

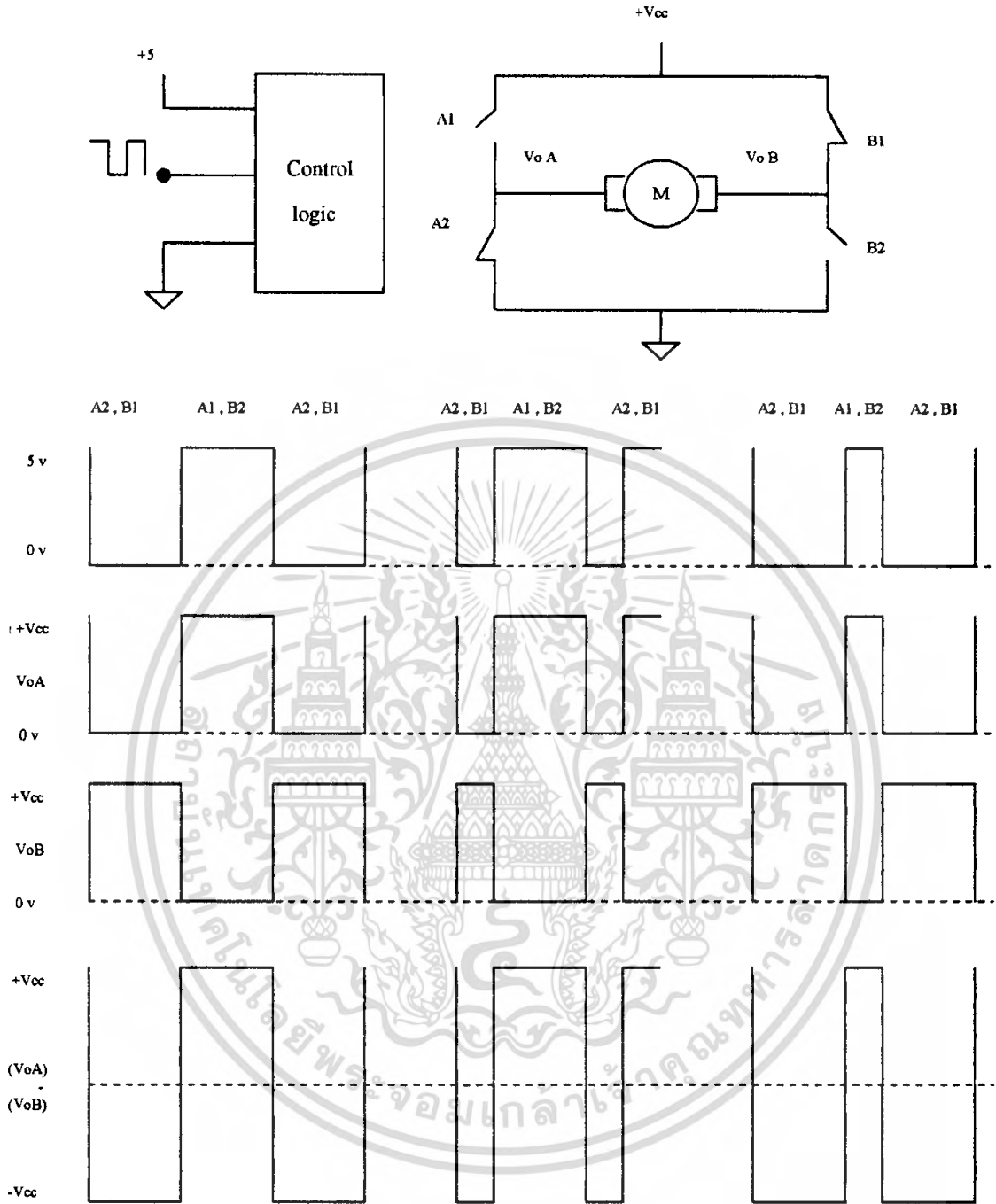
##### 2. Sign / Magnitude PWM

สัญญาณที่ใช้ควบคุมทิศทางและกำลังแยกจากกัน โดยกระแสที่ไหลลดได้รับจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับควมกว้างของ สัญญาณพัลส์วิตท์โมดูเลชันที่ส่งเข้ามา

ถ้าสัญญาณ DIR ที่ เป็น high มอเตอร์จะหมุนทางหนึ่งส่วนกำลังจะขึ้นกับการปรับดิวตี้ไซเคิล ถ้ามากก็จะหมุนเร็ว

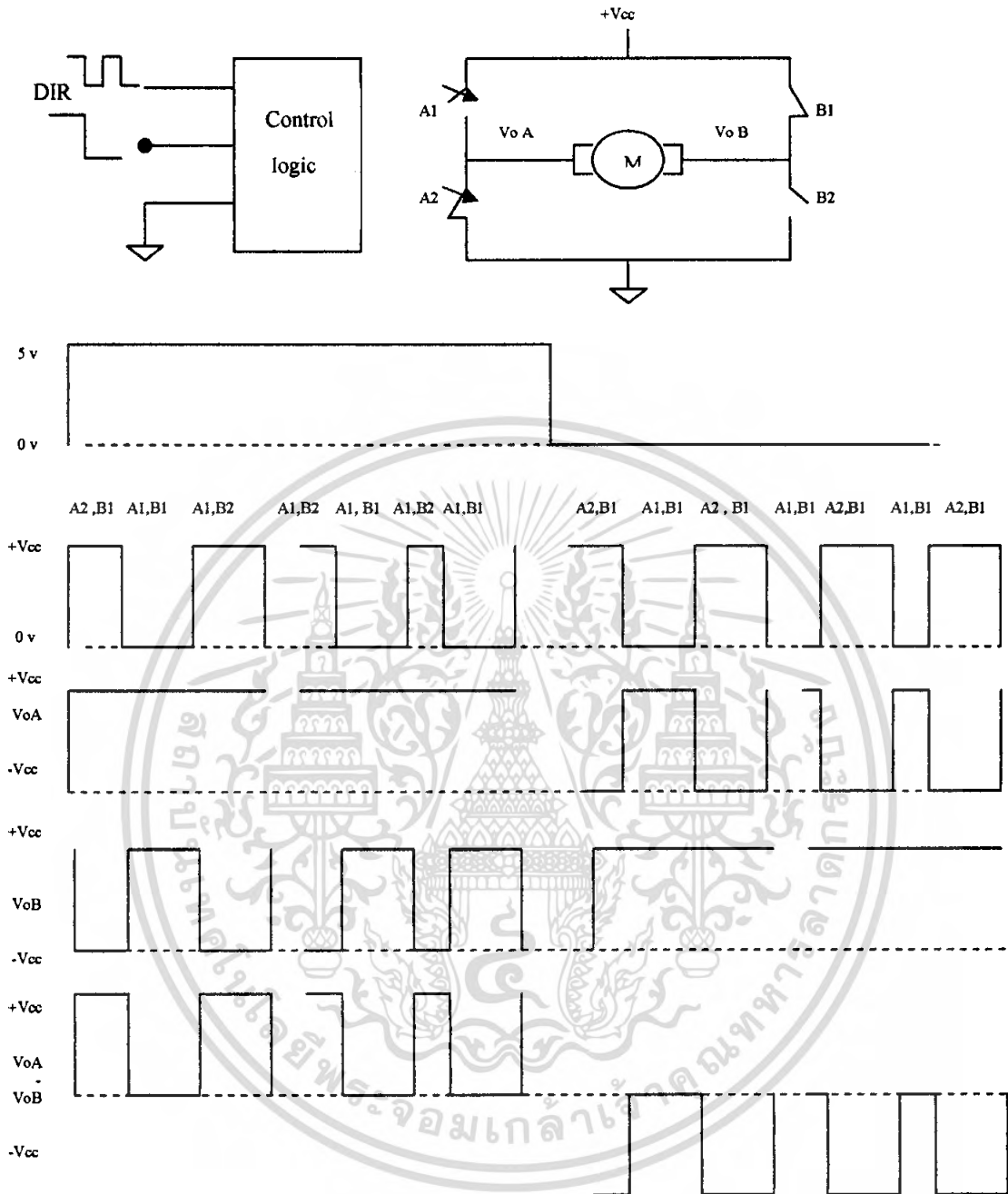
ถ้าสัญญาณ DIR ที่ เป็น low มอเตอร์จะหมุนอีกทางหนึ่ง และเช่นเดียวกันกำลังจะ ขึ้นกับการปรับ ดิวตี้ไซเคิล ถ้ามากก็จะหมุนเร็ว

สรุป การควบคุมทิศทางขึ้นอยู่กับไฟ DIR ว่าจะ เป็น high หรือ low ส่วนความเร็วขึ้นกับการปรับค่า ดิวตี้ไซเคิล



**รูปที่ 2.5** การทำงานแบบ Locked Anti - Phase PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การทำงานแบบ Sign / Magnitude PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทำไมถึงใช้ พัลส์วิตช์โมดูลเลขชั้น ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์

มีหลายเหตุผลว่าทำไมพัลส์วิตช์โมดูลเลขชั้นถึงถูกเลือกใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เช่น :

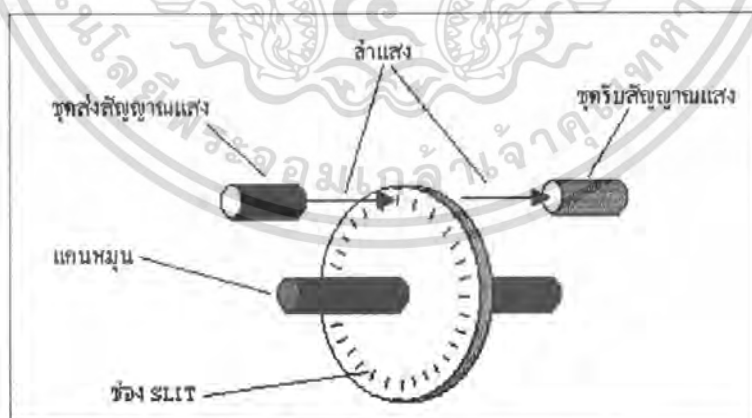
- พัลส์วิตช์ โมดูลเลขชั้นง่ายในการอินเตอร์เฟสกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้เพียงแค่อะไหล่ชุดสัญญาณเดียวในการควบคุมความเร็ว
- พัลส์วิตช์ โมดูลเลขชั้น มีประสิทธิภาพ คือ แหล่งจ่าย (Power Supply) จะจ่ายกำลังได้เต็มที่ทั้งเปิดและปิด
- พัลส์วิตช์ โมดูลเลขชั้นทำให้ได้ค่า ทอร์ค และ ความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ เป็นเพราะ แหล่งจ่าย (Power Supply) จะจ่ายกำลังได้เต็มที่ทั้งเปิดและปิด

## 2.2 การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์

การนำเอาโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์เข้ามาใช้และอ่านค่าออกมาเพื่อตรวจสอบทิศทางแลตำแหน่งของการเคลื่อนที่เพื่อนำมาทำการเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่กับค่าอินพุตโดยหลักการทำงานของ เอ็นโค้ดเดอร์ มีดังนี้

### 2.2.1 เอ็นโค้ดเดอร์

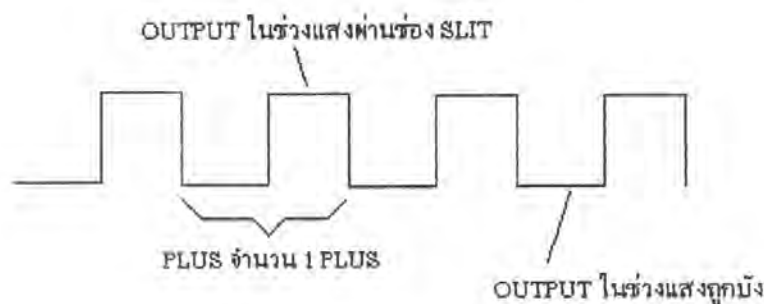
โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นกลมมีแกนอยู่ตรงกลางและที่แผ่นกลมจะมีช่องเล็กที่แสงสามารถส่องผ่านได้ เป็นจำนวนมากเราเรียกช่องนี้ว่าช่องสลิตซึ่งที่ด้านหนึ่งของแผ่นกลมนี้จะมีตัวส่งแสงอินฟราเรดไปยังตัวรับสัญญาณแสงอินฟราเรดซึ่งจะอยู่ในด้านตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์

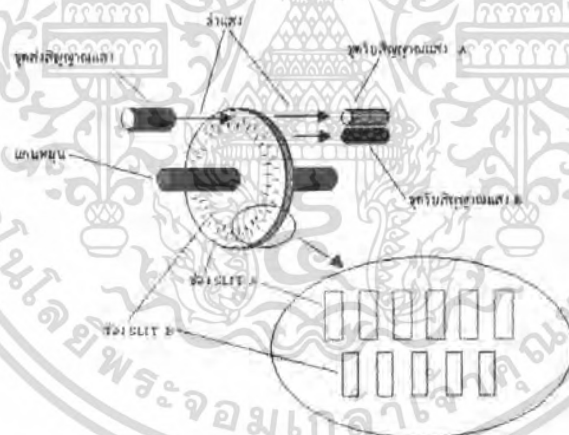
เมื่อหมุนแกนหมุนทำให้แผ่นกลมหมุนไปตัดลำแสงอินฟราเรดดังนั้นตัวรับแสงอินฟราเรดจึงมีแสงมากระทบเป็นช่วงๆ เป็นพัลส์ ตามจังหวะที่แสงผ่านช่องสลิตจึงทำให้สัญญาณเข้าพุทของตัวรับแสงอินฟราเรดมีลักษณะเป็น พัลส์ ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การสร้างพัลส์ของโรตารี เอ็นโค้ดเดอร์

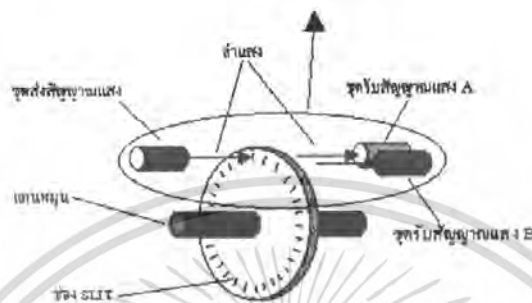
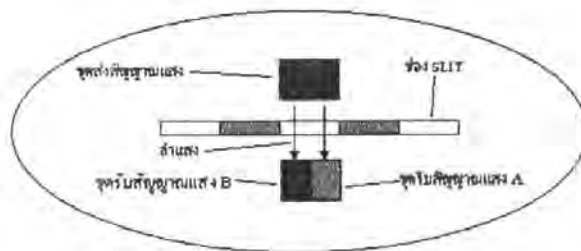
จำนวนพัลส์ที่ได้ออกมาจะเป็นตัวที่ชี้บ่งว่ามอเตอร์หมุนไปกี่องศาหรือกี่รอบซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สูตร จำนวนรอบที่มอเตอร์หมุนไปจำนวนพัลส์ ถ้าความละเอียดของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์โดยที่ ค่าความละเอียดของโรตารี เอ็นโค้ดเดอร์นั้นนิยมใช้หน่วยเป็นพัลส์/ รอบ หรือ ppr เช่น 1000 ppr ก็หมายถึงว่าเมื่อ มอเตอร์หมุนไป 1 รอบจะมี พัลส์ ออกมา 1000 พัลส์ เป็นต้น ส่วนในเรื่องที่ว่าเรา จะทราบ ได้อย่างไรว่า มอเตอร์หมุนไปทิศทางใดนั้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีสร้างช่อง สลิตเป็น 2 ชุดเหลื่อมกัน 90 องศา ดังรูปที่



รูปที่ 2.9 ลักษณะพัลส์ของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์แบบ 2 เฟส

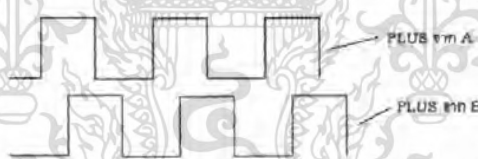
หรืออาจจะใช้ช่องสลิตเพียง 1 ชุดแต่มีการจัดวางชุดรับสัญญาณแสงคั้งรูปข้างล่างแต่ข้อสำคัญคือจะต้องมี เฟส ต่างกัน 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



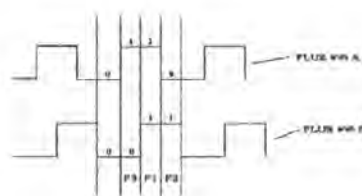
รูปที่ 2.10 การตรวจเช็คสัญญาณพัลส์ของ โรตารีเอ็น โค้ดเดอร์

คั้งนั้นสัญญาณ เข้าพุดจากมอเตอร์ จึงมี 2 ชุด คือ A และ B โดยที่สัญญาณ พัลส์จาก A และ B ก็จะมาเลื่อนกัน 90 องศาด้วย อาจกล่าว ได้ว่าสัญญาณ เอาที่พุดจากมอเตอร์ มีค่าเท่ากับ 2 บิต คือ หนึ่ง บิต มาจาก A และอีกหนึ่ง บิต มาจาก B ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 ลักษณะพัลส์ของ โรตารี เอ็น โค้ดเดอร์ทั้ง 2 เฟส

ถ้าเราให้ พัลส์ในช่วง high มีค่าเป็น 1 และพัลส์ในช่วง low มีค่าเป็น 0 เราสามารถใช้ค่า ดังกล่าวมาคำนวณหาทิศทางที่มอเตอร์ หมุนได้ด้วย ใช้วิธีการทางดิจิทัล คือการนำค่าที่อ่าน ได้ มา ทำการ Exclusive OR (XOR) กัน โดยการนำบิต ทางขวาของค่าเก่ามา XOR กับบิตทางซ้ายของค่า ใหม่ที่อ่าน ได้ตามตัวอย่างข้างล่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.12 ความละเอียดของ พัลส์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติในตอนแรก มอเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P1 เพราะฉะนั้นค่าของตัวเลข ไบนารี ที่อ่านได้จาก เอ็นโค้ดเดอร์จะมีค่าเป็น 11 ถ้า เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่ง P3 จะทำให้ค่าของตัวเลข ไบนารีที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์จะมีค่าเป็น 10 ดังนั้นถ้าเรานำเอาค่าทางขวา จากค่าที่อ่านได้ในครั้งแรก (11) ซึ่งก็คือ 1 มา XOR กับค่าทางซ้ายที่อ่านได้ในครั้งต่อมา (10) ซึ่งก็คือ 1 จะได้ผลลัพธ์เท่ากับศูนย์เพราะฉะนั้นค่า ศูนย์จึงเป็นค่าที่บอกว่า มอเตอร์หมุนไปทางขวาในทางกลับกันถ้าในตอนแรก มอเตอร์อยู่ที่ตำแหน่ง P1 และต่อมามอเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่ง P2 ถ้าเรานำเอา ค่าทางขวา จากค่าที่อ่านได้ในครั้งแรก (11) ซึ่งก็คือ 1 มา XOR กับค่าทางซ้ายที่อ่านได้ในครั้งต่อมา(01) ซึ่งก็คือ ศูนย์จะได้ผลลัพธ์เท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นค่า 1 จึงเป็นค่าที่บอกว่ามอเตอร์หมุนไปทางซ้าย และการ XOR ค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ดัง ตารางด้านล่าง

ตารางที่ 1 แสดงการ XOR ด้วยค่าต่างๆ

A	B	A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

ผลลัพธ์ ที่ได้จาก โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์จะถูกนำไปเชื่อมต่อเข้ากับวงจรนับพัลส์หรือวงจรถานวนเพื่อที่จะตรวจสอบว่า มอเตอร์หมุนไปทิศทางใดและอยู่ที่ตำแหน่งใด ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดย ส่วนมากแล้ว มอเตอร์ที่ใช้ โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์แบบนี้จะมีจำนวนรอบของการหมุนที่ไม่จำกัด โดยจะหมุนไปกี่รอบ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับ ความสามารถของวงจรถานวนพัลส์และวงจรถานวน

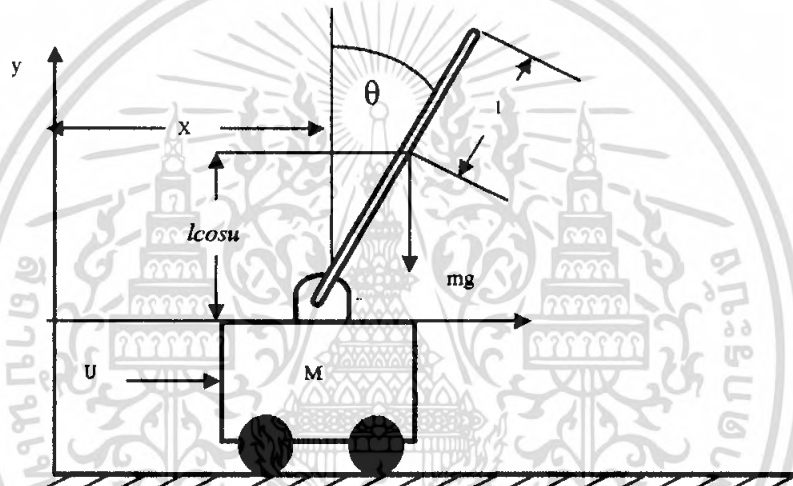
ดังนั้นเราอาจจะกล่าวได้ว่าเอ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นมีอยู่ 2 แบบใหญ่ๆคือเป็นแบบมีค่าเข้าพุทที่ไม่จำกัด (Incremental encoder) และแบบที่มีค่าเข้าพุทที่จำกัด (absolute encoder)

แบบ มีค่าเข้าพุทที่ไม่จำกัด (Incremental encoder) มักจะเป็นเอ็นโค้ดเดอร์แบบ โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ใน ตอนต้นแล้วว่าขนาดของเข้าพุทของ เอ็นโค้ดเดอร์ แบบนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบวงจรถานวนและวงจรถานวน

แบบที่มีค่าเข้าพุทที่จำกัด (Absolute encoder) ที่พบเห็นส่วนใหญ่มักจะเป็นแบบโพเทนชิโอมิเตอร์แต่ในบางครั้งก็อาจเป็นแบบ โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์ก็ได้แต่จะมีการออกแบบลักษณะของช่องสลิตที่ต่างไปจาก โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์ ที่ได้ ไว้ในตอนต้นโดยอาจจะมีค่าของ เข้าพุท ตั้งแต่ 4 บิต ถึง 16 บิต

### 2.3 หลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม

การที่จะเริ่มทำความเข้าใจหุ่นยนต์รักษาสมดุลด้วยตัวเองนั้นจะอย่างไรจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับ หลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม ดังนั้นเสียก่อน ทางคณะผู้จัดทำได้นำหลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ประกอบไปด้วยบรรดาที่มีมวลคงที่และเสาที่มีมวลวางอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง เสานี้จะติดอยู่กับราง โดยจุดหมุนที่อยู่เหนือแกนพร้อมทั้งสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระในระนาบเดียวกันเท่านั้น แรงภายนอกที่มากระทำจะมีเพียงแรงในแนวระนาบที่กระทำกับบรรดาเท่านั้น ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของบรรดาและเสา สมการเคลื่อนที่ของระบบนี้ได้มาจากการพิสูจน์ความสมดุลย์ ของแรงในแนวแกนนอนและความสมดุลย์ของแรงบิด ที่เกิดขึ้นรอบจุดหมุนของเสา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบ อินเวอร์ทเพนดูลัม (Invert Pendulum)

- Cg : จุดศูนย์กลางแกนเพนดูลัม
- x : ระยะจากจุดถึงพิกัด x
- P : จุดหมุน
- l : 1/2 ของความยาวก้านเพนดูลัม
- m : น้ำหนักของก้านเพนดูลัม(kg)
- M : น้ำหนักของรถ (kg)
- U : แรงที่ป้อนให้กับรถ (N)
- V : แรงในแนวตั้งฉากกับก้านเพนดูลัม(N)
- H : แรงในแนวนอนที่ทำกับก้านเพนดูลัม(N)
- Xg : ระยะจากจุดศูนย์กลางก้านเพนดูลัมถึงพิกัดแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Y_g$  : ระยะจากจุดศูนย์กลางก้านเพนดูลัมถึงพิกัดแกน Y  
จากรูปที่ 1 เราสามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$X_g = x + l \sin\theta$$

$$Y_g = l \cos\theta$$

โมเมนต์ของก้านเพนดูลัม

$$I\theta = Vl \sin\theta - Hl \cos\theta \quad (1-1)$$

แรงในแนวนอนที่ทำกับก้านเพนดูลัม

$$m \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin\theta) = H \quad (1-2)$$

แรงในแนวตั้งที่ทำกับก้านเพนดูลัม

$$m \frac{d^2}{dt^2} (l \cos\theta) = V - mg \quad (1-3)$$

$$M \frac{d^2}{dt^2} = U - H \quad (1-4)$$

ให้มุม  $\theta$  มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคั้งนั้น  $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$  จากสมการ (1-1) และ (1-3) เราสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$I\theta = Vl\theta - Hl \quad (1-5)$$

$$m(x + l\theta) = H \quad (1-6)$$

$$V - mg = 0 \quad (1-7)$$

จากสมการ (1-4) และ (1-6) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(M + m)x + ml\theta = U \quad (1-8)$$

จากสมการ(1-5) , (1-6) และ (1-7) จะ ได้

$$\begin{aligned} I\theta &= mgl\theta - Hl \\ &= mgl\theta - l(mx + ml\theta) \end{aligned}$$

$$\text{หรือ} \quad (I + ml^2)\theta + mlx = mgl\theta \quad (1-9)$$

พิจารณาระบบ อินเวอร์ทเพนดูลัมจากรูปที่ 2.13 จุดศูนย์กลางก้านเพนดูลัมจุดหมุนที่โมเมนต์  $I = 0$  เพื่อให้ก้าน เพนดูลัมสามารถตั้งอยู่ได้

$$(M + m)x + ml\theta = U \quad (1-10)$$

$$ml^2\theta + mlx = mgl\theta \quad (1-11)$$

จากสมการที่ (1-10) และ (1-11) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$ml\theta = (M + m)g\theta - U \quad (1-12)$$

$$Mx = U - mg\theta \quad (1-13)$$

จากสมการ (1-10) , (1-11) , (1-12) , และ (1-13) เขียน Transfer Function ได้

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{Mls^2 - (M + m)g}$$

จากสมการหลักอินเวอร์ทเพนดูลัมก็ คือ การทำให้โมเมนต์ที่ก้านเพนดูลัมเท่ากันศูนย์ ซึ่งการทำให้โมเมนต์ของก้านเพนดูลัม เป็นศูนย์ในสมการก็คือ การให้แรงให้เกิดการเคลื่อนที่ของก้านขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งหุ่นยนต์รักษาสมดุลก็เทียบเท่ากับมวลของรถซึ่งสามารถใส่สมการเดียวกันได้ใน เพนดูลัม ที่มีรูปทรงที่แตกต่างกัน

### บทที่ 3

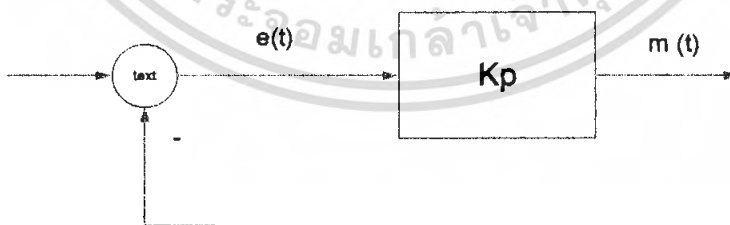
## หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุม

หลักการในการควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุลในโครงการนี้ใช้หลักการในการควบคุมโดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับและใช้ตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมระบบ

ตัวควบคุมหรือตัวควบคุมแบบ พีไอดี พัฒนาจากตัวควบคุมแบบ พีไอ ที่สร้างขึ้นในปี 1939 จากนั้นก็ถูกนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมมากกว่า 50 ปี โดยแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ 3 ชนิด คือ เครื่องควบคุมแบบนิวแมติกส์ที่ทำงานโดยใช้สัญญาณลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยใช้วงจรรีเลย์ (Linear Circuit) การสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิทัลที่ทำงานโดยใช้วงจรตรรก ปัจจุบันตัวควบคุม พีไอดี ได้รับความนิยมทั้งนี้อาจเป็นเพราะรูปแบบของตัวควบคุม พีไอดีเป็นรูปแบบที่สามารถควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพ เมื่อได้ โดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม ตัวควบคุมแบบ พีไอดีประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบพี (Proportional) ตัวควบคุมแบบไอ (Integral) และตัวควบคุมแบบ ดี (Derivative) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer) ดังนี้

### 3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control Action)

เป็นปฏิกิริยาควบคุมซึ่งค่อนข้างจะสม่ำเสมอและเป็นเชิงเส้น ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอินพุตและเอาต์พุต สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของ แผนผังบล็อก ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังบล็อกการควบคุมแบบสัดส่วน

ความสัมพันธ์ของสัญญาณควบคุม (เอาต์พุตของตัวควบคุม)  $m(t)$  กับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน  $e(t)$  คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

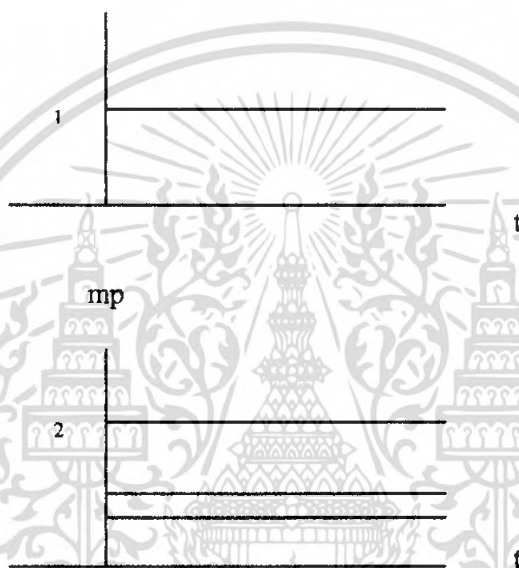
หรือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = Kp \tag{3.2}$$

$$PB = \left( \frac{1}{Kp} \right) \times 100\% \tag{3.3}$$

โดยที่ K p จะอยู่ในเทอมของ Proportional Sensitivity หรือ Gain

Proportional Band (PB) เป็นการเปลี่ยนแปลงของอินพุทเพื่อที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุทมากที่สุดในการควบคุมแบบสัดส่วน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองของการควบคุมแบบสัดส่วน

การเกิด ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นคุณลักษณะของระบบควบคุมแบบ สัดส่วนทั้งนี้ เนื่องจากการทำงานของระบบควบคุมแบบ สัดส่วนนั้น ไม่สามารถควบคุมระบบที่มีโหลดเปลี่ยนแปลงได้ดีเท่าที่ควรและ ในกรณีที่เกิด โหลดคงที่แต่เปลี่ยนค่าของระดับเซตพอยท์ที่ควบคุม ไปก็ เช่นเดียวกันจะเกิดการเกิด ค่าความคลาดเคลื่อนขึ้น โดยที่ ค่าความคลาดเคลื่อนก็คือ ค่าความแตกต่างของอินพุทและเอาต์พุทที่สภาวะคงที่เมื่อเป้าหมายคงที่นั่นเอง

เราสามารถลดค่าการเกิดค่าความคลาดเคลื่อน ได้โดย

1. เพิ่มอัตราขยายแบบสัดส่วน (Kp)
2. เพิ่มค่าสัญญาณจัดการที่สภาวะเริ่มต้น (mo) คือ  $m T = (Kp * e) + mo$
3. เปลี่ยนค่าเป้าหมาย

72886

### 3.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control Action)

เป็นการควบคุมซึ่งค่าเอาต์พุตเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าอินทิกรัลเชิงเวลาอินพุต โดยจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุม  $m(t)$  และค่าความคลาดเคลื่อน  $e(t)$  ดังนี้

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (3.4)$$

หรือ

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.5)$$

โดยที่  $K_i$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถปรับค่าได้

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer-function) ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลคือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{S} \quad (3.6)$$

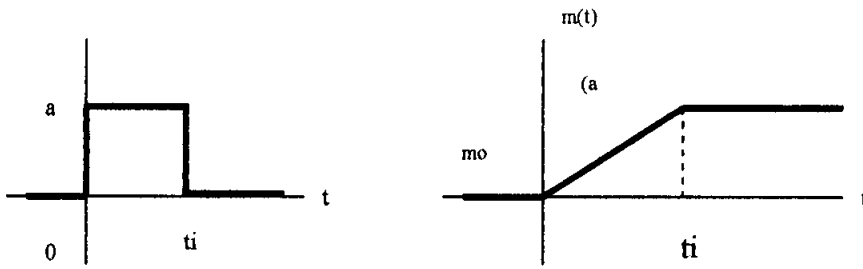
โดยที่สามารถแสดงในรูปของ แผนผังบล็อก ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังบล็อกของการควบคุมแบบอินทิกรัล

ในการควบคุมแบบอินทิกรัลนั้นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม  $m(t)$  จะเปลี่ยนแปลงตามความผิดพลาด  $e(t)$  ดังนั้น ถ้าความผิดพลาดซึ่งได้เกิดขึ้นทำให้ระบบได้ค่าผิดไปจากค่าที่ต้องการแล้ว อุปกรณ์ควบคุมจะจัดการกับค่าความผิดพลาดโดยเร็ว (Final element control) จะยังไม่ทำงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบอยู่ในสภาวะคงที่นั่นเอง

ดังนั้นในการควบคุมแบบอินทิกรัลจะไม่ทำให้เกิดค่า Off set ขึ้นมา ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองการควบคุมแบบอินทิกรัลจากสัญญาณขั้นบันได

### 3.3 การควบคุมแบบครีเวทีฟ (Derivative Control Action)

เป็นการควบคุมที่ค่า เอาท์พุท เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอินพุทสามารถแสดงความสัมพันธ์ ดังนี้

$$m(t) = K_D \times \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

หรือ

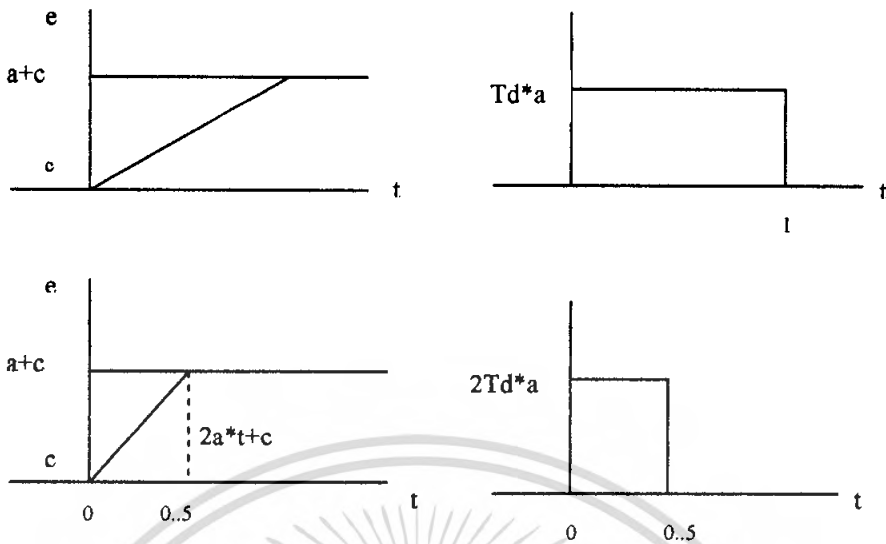
$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_D * S \quad (3.8)$$

โดยที่  $K_D$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถปรับค่าได้  
แผนผังบล็อกของตัวควบคุมแบบครีเวทีฟแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังบล็อกของตัวควบคุมแบบครีเวทีฟ

เมื่อเพิ่มการควบคุมแบบครีเวทีฟ ไปในเครื่องควบคุมจะเป็นการบวกมุนำใน เครื่องควบคุม เพื่อชดเชยมุนตาม ในฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งขบวนการส่วนใหญ่ จะมีค่ามุนเป็นแบบมุนตาม



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันไดของกิริยาควบคุมแบบเดริเวทีฟ

### 3.4 การควบคุมแบบพีไอ (Proportional and Integral Control Action)

เป็นการควบคุมที่ค่าเอาต์พุต เป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้นกับผลรวมของค่าอินพุต และ ค่าอินทิกรัลเชิงเวลาของอินพุต โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

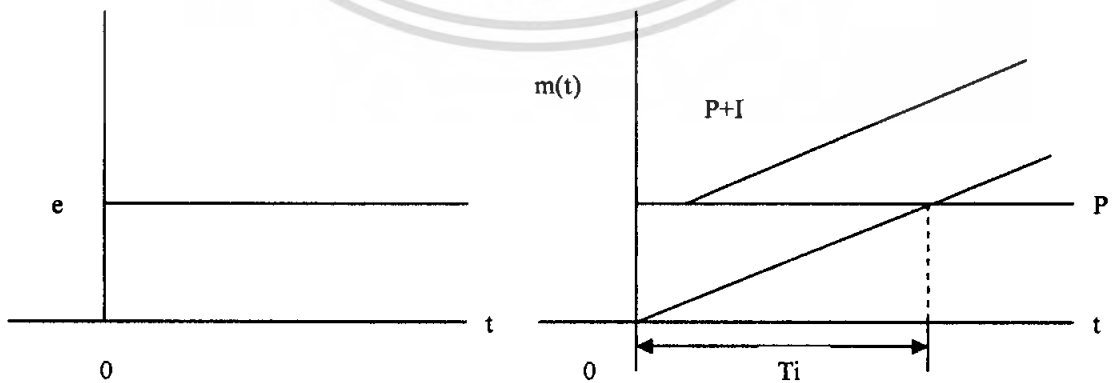
$$m(t) = [K_p e(t)] + \left(\frac{K_p}{T_i}\right) \int_0^t e(t) dt \tag{3.9}$$

หรือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \tag{3.10}$$

โดยที่  $K_p$  เป็นค่า Proportional Sensitivity หรือ Gain

$T_i$  เป็นค่าของ Integral Time



รูปที่ 3.7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นบันไดของการควบคุมแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการควบคุมแบบพีไอคือตัวควบคุมอินทิกรัลจะจำกัดค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ส่วนให้หมดไป

### 3.5 การควบคุมแบบพีดี (Proportional and Derivative Control Action)

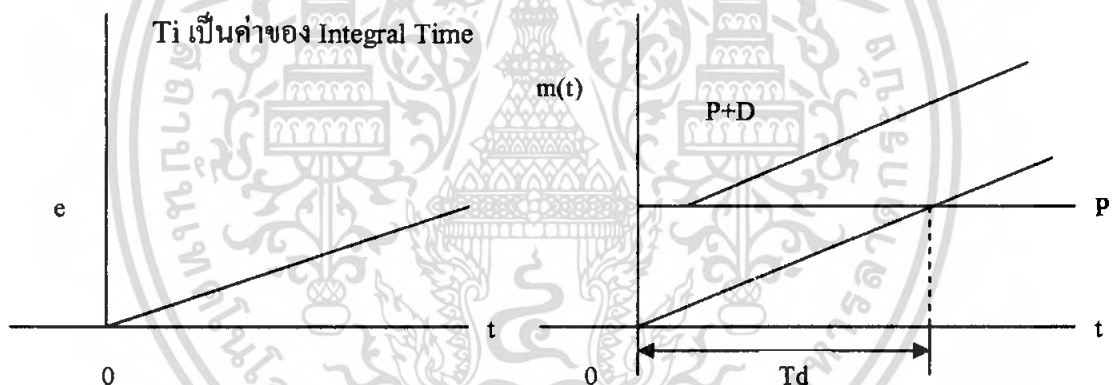
เป็นการควบคุมซึ่งเอาท์พุทเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลรวมของค่าอินพุทกับผลคูณคาบเวลากับอัตราการเปลี่ยนแปลงอินพุท โดยสามารถแสดงด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$m(t) = [K_P e(t)] + \left[ K_P T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.11)$$

หรือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_P (1 + T_D s) \quad (3.12)$$

โดยที่  $K_P$  เป็นค่า Proportional Sensitivity หรือ Gain



รูปที่ 3.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณเข้าเป็นเชิงเส้น (Ramp) ของการควบคุมแบบพีดี

ข้อดีของการควบคุมแบบพีดีคือเมื่อมีสัญญาณเข้าเป็นเชิงเส้น (Ramp) จะมีผลตอบสนองทางเวลาของเวลาได้เปรียบกว่าการควบคุมแบบสัดส่วน

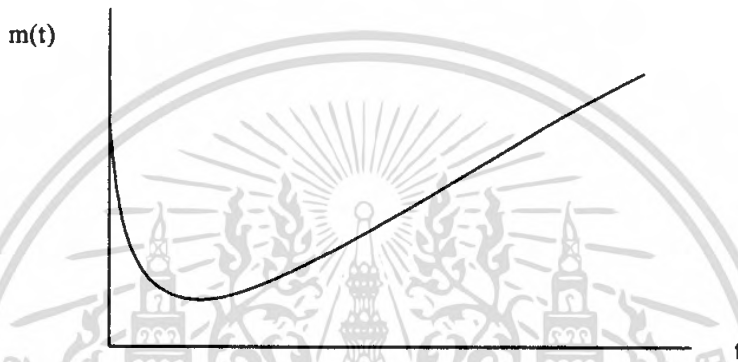
### 3.6 การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral and Derivative Control Action)

เป็นการควบคุมที่เอาท์พุทเป็นสัดส่วน กับค่าอินทิกรัลเชิงเวลาของ อินพุทและค่าผลคูณกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอินพุท โดยสามารถแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$m(t) = [K_p e(t)] + \left[ K_p T_D \frac{de(t)}{dt} \right] + \left( \frac{K_p}{T_I} \right) \int_0^t e(t) dt \quad (3.13)$$

หรือ

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + T_D s + \frac{1}{T_I} \right) \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองของการควบคุมแบบพีไอดีกับสัญญาณแบบขั้นบันได

### 3.7 กลไกศาสตร์ของตัวควบคุม พีไอดี

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการเรียกขานตัวควบคุม พีไอดีว่าตัวควบคุมสามพจน์ทั้งนี้เพราะ(three-term controller) โครงสร้างที่ประกอบจากการปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์สามส่วนด้วยกันดังแสดงในสมการ (3.15) กล่าวคือ มีส่วนของการคูณ (Proportional) ส่วนของการอินทิเกรต (Integration) และส่วนของการทำอนุพันธ์ (Derivation)

$$U(t)_{PID} = U_p(t) + U_I(t) + U_D(t) \quad (3.15)$$

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $e(t)$  = อินพุทของตัวควบคุม

$U(t)$  = เอาท์พุทของตัวควบคุม

$K_p$  = proportional gain

$K_I$  = Integral gain

$K_D$  = derivative gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.1 องค์ประกอบของพี

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบ พี (P-element) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.17) เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) สมการที่ (3.17) จะได้เป็นสมการที่ (3.18) จากนั้นแปลง (Z transform) และแปลงเป็นสมการ ผลต่างองค์ประกอบพีจะได้เป็นสมการที่ (3.19) และ (3.20) ตามลำดับ

$$U_p(t) = K_p e(t) \quad (3.17)$$

$$U_p(s) = K_p E(s) \quad (3.18)$$

$$U_p(z) = K_p E(z) \quad (3.19)$$

$$U_p(i) = K_p E(i) \quad (3.20)$$

### 3.7.2 องค์ประกอบของไอ

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบ ไอ (I-element) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.21) เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) สมการที่ (3.21) จะได้เป็นสมการที่ (3.22) จากนั้นแปลง (Z-transform) โดยใช้การประมาณของทustin (Tustin approximation) ดังสมการที่ (3.23) ทั้งนี้เพราะให้การแปลงที่ถูกต้องที่สุดและแปลงเป็นสมการผลต่างขององค์ประกอบไอ จะได้เป็นสมการที่ (3.24) และ (3.25) ตามลำดับดังนี้

$$U(t) = K_I \int e(t) dt \quad (3.21)$$

$$U_I(s) = \frac{K_I}{S} E(s) \quad (3.22)$$

$$S = \frac{2(1-Z^{-1})}{T(1+Z^{-1})} \quad (3.23)$$

$$(1-Z^{-1})U_I(Z) = \frac{K_I T}{2} (1+Z^{-1})E(Z) \quad (3.24)$$

$$U_I(i) = U_I(i-1) + \frac{K_I T}{2} [e(i) + e(i-1)] \quad (3.25)$$

T = ช่วงเวลาการสุ่มสัญญาณ (Sampling interval)

แนวทางปฏิบัติโดยทั่วไป T ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1/4 - 1/10 เท่าของเวลาขึ้น (rise time) ของผลตอบสนองในโดเมนเวลาของระบบเมื่อรับอินพุตแบบขั้นหนึ่งหน่วย (unit - step input)

### 3.7.3 องค์ประกอบของดี

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบ ดี (D-element) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.26) เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) สมการที่ (3.26) จะได้เป็นสมการที่ (3.27) จากนั้นแปลง (Z-transform) โดยใช้การแปลงแบบเบ็คเวิร์ดดิฟเฟอเรนซ์ (backward difference) ดังสมการที่ (3.28) และแปลงเป็นสมการผลต่าง องค์ประกอบดี จะได้เป็นดังสมการที่ (3.29) และ (3.30)

$$U_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.26)$$

$$U_D = K_D sE(s) \quad (3.27)$$

$$S = \frac{(1 - Z^{-1})}{T} \quad (3.28)$$

$$U_D = \frac{K_D}{T} (1 - Z^{-1})E(s) \quad (3.29)$$

$$U_D = \frac{K_D}{T} [e(i) - e(i-1)] \quad (3.30)$$

### 3.7.4 องค์ประกอบของพีไอดี

จากองค์ประกอบของ พี, ไอ และ ดี สามารถเขียนสมการรวมกันเป็นสมการพีไอดีได้ดังนี้

$$U_P(i) = K_P E(i) \quad (3.31)$$

$$U_I(i) = U_I(i-1) + \frac{K_I}{2} T [e(i) + e(i-1)] \quad (3.32)$$

$$U_D(i) = \frac{K_D}{T} [e(i) + e(i-1)] \quad (3.33)$$

$$U(i) = U_P(i) + U_I(i) + U_D(i) \quad (3.34)$$

$$U(i) = K_P E(i) + U(i-1) + \frac{K_I}{2} T [e(i) + e(i-1)] + \frac{K_D}{T} [e(i) + e(i-1)] \quad (3.35)$$

## บทที่ 4

### การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน

เนื่องจากโครงการนี้เป็นโครงการที่ต้องใช้ความละเอียดและความเร็วในการประมวลผลสูง เป็นเพราะการทำงานเกี่ยวกับสถานะต่างๆ ในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้นคณะผู้จัดทำจึงเลือกใช้คอนโทรลเลอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงดังนั้นจึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F2010 ของบริษัทไมโครชิพเป็นหน่วยประมวลผล หลักของโครงการ เพราะมีความสามารถในการประมวลผลเร็วสูงและยังประกอบด้วยฟังก์ชันการคำนวณที่แม่นยำด้วย ซึ่งมีรายละเอียดและคุณสมบัติ ดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติของชิพียู

dsPIC30F2010 เป็น เอ็มซียู ซึ่งใช้การประมวลผลข้อมูลแบบ 16 บิต จากบริษัท ไมโครชิพ ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของความสามารถในการประมวลผลข้อมูลสัญญาณแบบดิจิทัลและยังนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมโดยโครงสร้างภายใน การผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) และวงจร เอ็มซียู ( Digital Signal Processing ) รวมเข้าไว้ด้วยกัน หรืออาจเรียก เอ็มซียู ตระกูล dsPIC ว่าเป็น เอ็มซียู หรือ ดิจิตอล ซิกแนลคอนโทรลเลอร์ (Digital Signal Controller) ก็ได้

##### 4.1.1 คุณสมบัติด้านการประมวลผล

- ใช้สถาปัตยกรรมแบบ RISC โดยมี 84 คำสั่งมาตรฐานรองรับการอ้างตำแหน่งแอดเดรสแบบต่างๆ ได้โดยอิสระ โดยรูปแบบโครงสร้างการจัดผังหน่วยความจำจะดัดแปลงมากจากสถาปัตยกรรมของ “ Harvard Architecture ”
- ชุดคำสั่ง ใช้การอ้างแอดเดรสแบบ 24 บิต และการอ้างถึงข้อมูลขนาด 16 บิต
- มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ขนาด 12KByte (4KWord) สามารถทำการลบและโปรแกรมซ้ำใหม่ได้กว่า 100,000 ครั้ง พร้อมระบบป้องกันการอ่าน
- มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 512Byte
- มีหน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 1KByte สามารถลบและเขียนซ้ำได้กว่า 1,000,000 ครั้ง และสามารถเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้แม้ไม่ได้จ่ายไฟเลี้ยงให้ MCU
- มีรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ให้ใช้งานจำนวน 16 ชุด
- สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 30 MIPS ( 30 ล้านคำสั่งต่อวินาที )
- รองรับสัญญาณนาฬิกาจากแหล่งกำเนิดภายนอก 0-40 MHz
- รองรับการใช้งานกับแหล่งกำเนิดความถี่แบบ XTAL ค่า 4-10 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีวงจรควบคุมความถี่ภายในแบบ เฟส-ล็อก-ลูป โดยสามารถกำหนดค่าอัตราการควบคุมความถี่ได้ 3 ระดับ คือ 4 เท่า , 8 เท่า และ 16 เท่า

#### 4.1.2 คุณสมบัติของโมดูลฟังก์ชันพิเศษ

- ขาสัญญาณ I/O สามารถจ่ายกระแส (Source) และรับกระแส (Sink) ได้มากถึง 25 mA
- มี Timer ขนาด 16 บิต จำนวน 3 ชุด และสามารถโปรแกรมใช้งานเป็น Timer แบบ 32 บิตได้โดยใช้ Timer 16 บิต 2 ช่องรวมกัน
- มี Input Capture ขนาด 16 บิต จำนวน 4 ช่อง
- มี Output Compare/PWM ขนาด 16 บิต จำนวน 2 ช่อง
- มีจำนวนสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ I2C จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบ UART จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจร DCPWM สำหรับใช้ควบคุมมอเตอร์ 3 ช่อง
- มีวงจรถอดรหัสแบบ QEIM ขนาด 16 บิต จำนวน 1 ช่อง
- มีวงจร A/D ขนาด 10 บิต จำนวน 6 ช่อง

และเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวิจัยและพัฒนาโครงการนี้ ผู้จัดทำจึงเลือกใช้บอร์ดสำเร็จ ET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 / EXP เป็นชุดทดลอง "dsPIC" ขนาดเล็กโดยตัวบอร์ดได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับการศึกษาเรียนรู้ เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมภายในของไมโครโทรลเลอร์ตระกูล dsPIC จากค่ายไมโครชิพในขั้นพื้นฐานได้อย่างครบถ้วนภายใต้งบประมาณที่เรียกว่าประหยัดและคุ้มค่าที่สุด และมีส่วนเชื่อมต่อที่จำเป็นเพียงพอต่อการใช้งาน

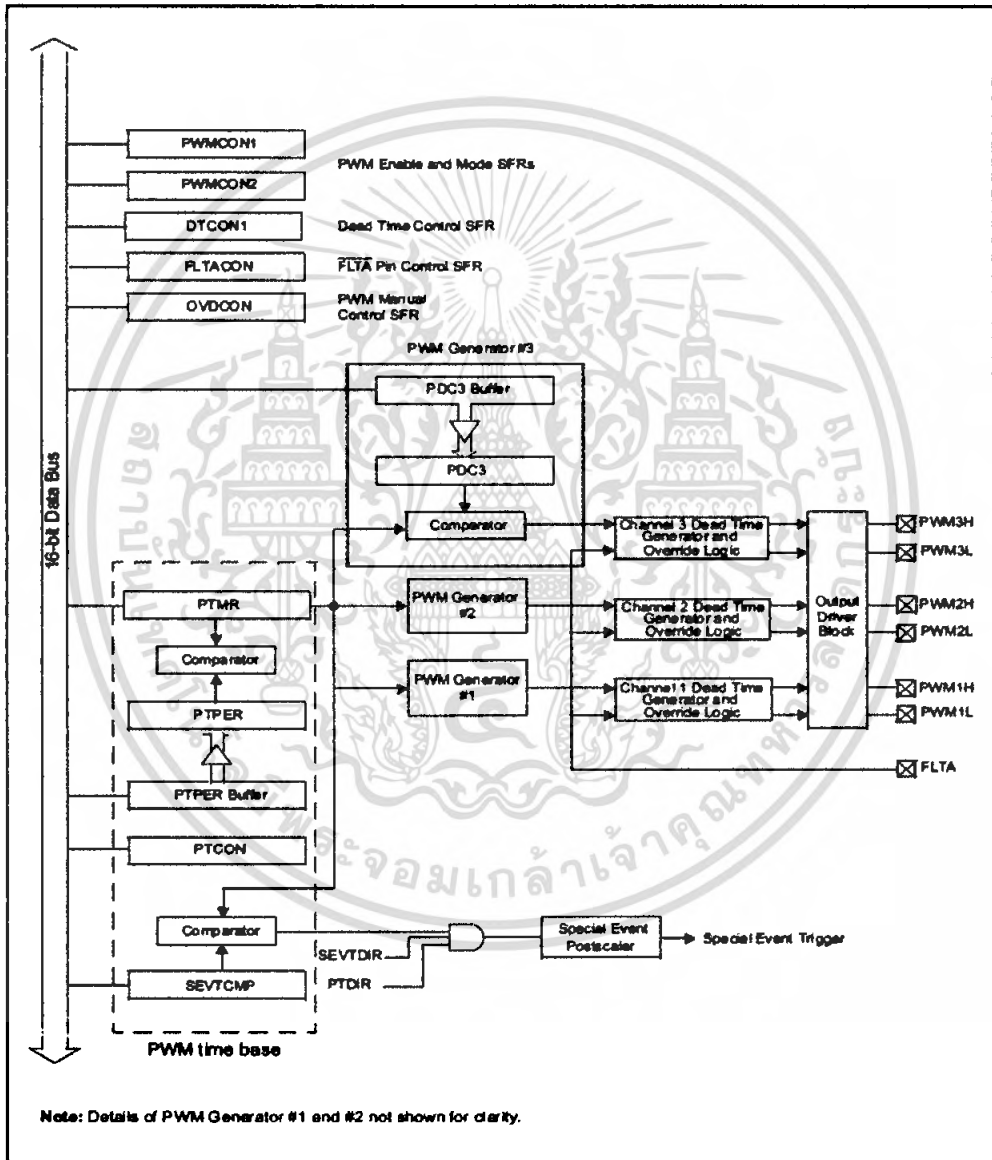


รูปที่ 4.1 บอร์ด ET-dsPIC30F2010 TRAINING KIT V1.0 / EXP

ในส่วนต่อไป จะกล่าวรายละเอียดในการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เกี่ยวกับ โมดูลหลักที่ใช้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในวงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่  
 ในโครงการนี้ในหัวข้อ 4.1.3 จะกล่าวถึงรายละเอียดของ โมดูลกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์ โมดูลเซ็น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชัน(PWM)

โมดูลฟังก์ชันที่ใช้ในโครงการนี้ก็คือ โมดูลสร้างสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ซึ่งใน dsPIC มีโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชัน (PWM) เพื่อควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเรียกว่า โมดูล MCPWM ( Motor Control PWM ) สำหรับ dsPIC30F2010 ช่องใช้งาน 6 ช่อง จึงสามารถขับมอเตอร์แบบเฟสเดียวได้ 3 ตัว ซึ่งในโครงการนี้ต้องถือได้ว่าโมดูลนี้มีความสำคัญมากซึ่งแผนผังการทำงานแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของโมดูลกำเนิดสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชัน(PWM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนประกอบหลักของโมดูลนี้คือส่วน โมดูลกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชัน(PWM) ซึ่งได้ค่าฐานเวลามาจากรีจิสเตอร์ PTMR และPTPERในโมดูล MPCWM นี้สามารถกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ในส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชันแต่ละส่วนที่เป็นอิสระต่อกัน นอกจากนั้นยังสามารถกำหนดการทำงานของขอพอร์ตเอาต์พุทของโมดูล MCPWM โดยตรงผ่านทางรีจิสเตอร์ OVDCON

สัญญาณที่ออกจากโมดูล MCPWM จะมีขาพอร์ต 2 ขาคู่ของมันคือ ขาเอาต์พุทด้านแรงดันสูง PWMxH และขาเอาต์พุทด้านแรงต่ำ PWMxL หรือเรียกว่า คู่เอาต์พุท

ฐานเวลา โมดูลกำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชัน(PWM)ใน โมดูล MCPWM สามารถกำหนดให้ทำงานได้ 4 โหมด คือ

- โหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระ
- โหมดทำงานครั้งเดียว
- โหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่อง
- โหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่องพร้อมการอินเตอร์รัปต์เพื่อปรับปรุงค่า

การเลือกโหมดทำได้โดยการกำหนดค่าที่บิต PTMOD1และPTMOD0 ซึ่งเป็นบิต 1 และ 0 ในรีจิสเตอร์ PTCON ซึ่งในโครงการนี้จะเลือกใช้โหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระในโหมดนี้ค่าฐานเวลาจะเพิ่มค่าขึ้นจนกระทั่งตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ PTER จากนั้นรีจิสเตอร์ PTMR จะรีเซ็ตและทำการนับค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ไปอีกคราพบเท่าที่บิต PTEN ยังคงเซตเป็น '1' อยู่

การเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่กำเนิดสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชัน(PWM)ของโมดูลMCPWM กำหนดได้จากรีจิสเตอร์ PDC1-DPC4 ซึ่งต่างก็มีบัพเฟอร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเมื่อมีการปรับปรุงค่าของสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชัน โดยวัฏจักรหน้าที่ของสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชันจะถูกปรับปรุงค่าตามข้อมูลที่เขียนลงในรีจิสเตอร์ PDCx จากนั้นค่าจากรีจิสเตอร์ PDCx จะถูกส่งไปยังบัพเฟอร์เพื่อทำการเปรียบเทียบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในรีจิสเตอร์ PDCx เรียบร้อย ข้อมูลนั้นจึงถูกส่งไปยังบัพเฟอร์ข้อมูลนั้นจึงถูกส่งไปยังบัพเฟอร์เพื่อทำงานต่อไป ทำให้ไม่เกิดการติดขัดหรือเกิดความผิดพลาดในขณะที่เปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ เมื่อฐานเวลา พัลส์วิดท์โมดูเลชัน ทำงานในโหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระหรือโหมดทำงานครั้งเดียว ค่าวัฏจักรหน้าที่ของสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชันจะถูกปรับปรุงเมื่อค่าของรีจิสเตอร์ PTMR เท่ากับ PTPER และเมื่อรีจิสเตอร์ PTMR เกิดการรีเซ็ตเป็นศูนย์

นอกจากนั้นในโมดูล MCPWM ยังมีความสามารถพิเศษอีกประการหนึ่งคือ การป้องกันการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ทำได้โดยเซตบิต USID ซึ่งเป็นบิต 2 ของรีจิสเตอร์ PWMCON 2

ต่อไปจะเป็นตัวอย่างการเขียน โปรแกรมเพื่อกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมมีวัฏจักรหน้าที่ 50%

ตัวอย่างการตั้งค่าการใช้งานเพื่อกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 50%

```

#include <p30f2010.h>
#include <pwm.h>
void _ISR_PWMInterrupt(void)
{
    IFS2bits.PWMIF = 0;
}
void _ISR_FLTAInterrupt(void)
{
    IFS2bits.FLTAIF = 0;
}
void pwm_init()
{
    unsigned int config;
    unsigned int period;
    unsigned int sptime;
    unsigned int config1;
    unsigned int config2;
    unsigned int config3;
    unsigned int dutycyclereg;
    unsigned int dutycycle;
    unsigned char updatedisable;

    config = (PWM_INT_EN & PWM_FLTA_DIS_INT & PWM_INT_PRI&
             PWM_FLTB_DIS_INT & PWM_INT_PRO
    ConfigIntMCPWM(Config);
    dutycyclereg = 1;
    dutycycle = 0x3FFF;

```

ตัวอย่างการตั้งค่าการใช้งานเพื่อกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่าวัฏจักรหน้าที่ 50% (ต่อ)

```

updatedisable = 0;
SetDCMCPWM(dutycyclereg,dutycycle,updatedisable);
period = 0x7FFF;
sptime = 0x0;
config1 = (PWM_EN &PWM_PTSIDL&
           PWM_OP_SCALE16&
           PWM_IPCLK_SCALE16 &
           PWM_MOD_UPDN);
config2 = (PWM_MOD1_COMP &
           PWM_PEN1H &
           PWM_PDIS2H &
           PWM_PDIS3H &
           PWM_PDIS1L &
           PWM_PDIS2L &
           PWM_PDIS3L);
config3 = (PWM_SEVOPS1 &
           PWM_OSYNC_PWM&
           PWM_UEN);
OpenMCPWM(period,sptime,config1,config2,config3);
}
int main()
{
pwm_init(); while(1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ชุดขับมอเตอร์

โครงการนี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ บอร์ดขับมอเตอร์ DMD2A (DUAL MOTOR DRIVER) เป็นบอร์ดขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีช่องเอาต์พุตสำหรับมอเตอร์ 2 ช่องและสามารถขับกระแสได้ 2 แอมแปร์ต่อช่องและเพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน สามารถเลือกรับสัญญาณควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็นสัญญาณมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) หรือควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณแอนะล็อกแรงดัน 0-5 โวลต์และ 0-10 โวลต์จากภายนอกหรือต่อโวลทุ่มสำหรับปรับความเร็ว



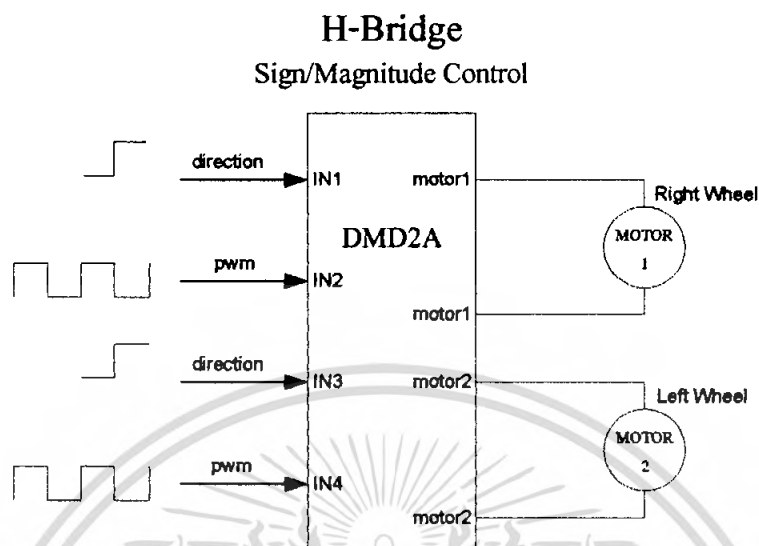
รูปที่ 4.3 ชุดขับมอเตอร์ DMD2A (DUAL MOTOR DRIVER)

### 4.2.1 คุณสมบัติพิเศษของชุดขับมอเตอร์

- แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 12 โวลต์ ดีซี (ต่ำสุด 9 โวลต์ สูงสุด 24 โวลต์)
- เอาต์พุต 2 ช่อง กระแสเอาต์พุต 2 แอมแปร์ / ช่อง
- ป้องกันกระแสเกินพิกัด Auto Shutdown
- สามารถเลือกสัญญาณควบคุมความเร็วมอเตอร์เป็นสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชัน (PWM) สัญญาณแอนะล็อกแรงดัน 0-5 V และ 0-10 V
- ความถี่สัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชันสูงสุด 25 kHz
- Isolated Digital Input and Non-isolated Analog Input
- แหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์บนบอร์ด Non-isolate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.2 การทำงานของชุดขับมอเตอร์



รูปที่ 4.4 การทำงานของชุดขับมอเตอร์ DMD2A (DUAL MOTOR DRIVER)

การทำงานของชุดขับมอเตอร์อธิบายได้ดังนี้

สัญญาณที่ใช้ควบคุมกำลังและทิศทางแยกจากกัน โดยกระแสที่ไหลคได้รับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความกว้างของ พัลส์ สัญญาณพัลส์วืดท์โมดูเลชั่นที่ส่งออก

ถ้าสัญญาณ direction ที่ขา IN1 และ IN2 เป็น High ,Motor1 และ Motor2 จะหมุนทางหนึ่ง ส่วนกำลังจะขึ้นกับการปรับ คิวตี้ไซเคิล ถ้า คิวตี้ไซเคิล มากก็หมุนเร็วถ้า คิวตี้ไซเคิล น้อยก็หมุนช้า

ถ้าสัญญาณ direction ที่ขา IN1และIN2เป็น Low ,Motor1 และ Motor2 จะหมุนอีกทางหนึ่ง ส่วนกำลังจะขึ้นกับการปรับ คิวตี้ไซเคิล ถ้า คิวตี้ไซเคิล มากก็หมุนเร็วถ้า คิวตี้ไซเคิล น้อยก็หมุนช้าเช่นเดียวกัน

สรุปได้ว่า การควบคุมทิศทางขึ้นกับสัญญาณที่ส่งให้กับ direction ว่าเป็น High หรือ Low ส่วนความเร็วของ มอเตอร์ขึ้นกับการปรับค่า คิวตี้ไซเคิล

### 4.3 เซ็นเซอร์วัดความโน้มเอียง

โครงการนี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ เซ็นเซอร์วัดความโน้มเอียง (ADXL202) ของบริษัท อานาลอกติไวท์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.5 เซ็นเซอร์วัดความโน้มเอียง (ADXL202)

#### 4.3.1 คุณสมบัติของเซ็นเซอร์ วัดความโน้มเอียง(ADXL202)

- เป็นเซ็นเซอร์วัดค่าความเร่งแบบ 2 แกน คือ แกน X และแกน Y
- วัดค่าได้ทั้งค่าความเร่ง ( dynamic Accleration ) และวัดค่าความโน้มถ่วง ( static acceleration )
- สามารถกำหนดค่าความกว้างพัลส์ (Period) ได้
- กินกำลังงานค่าน้อยกว่า 0.6 mA
- มีความไวในการตอบสนองสูงกว่าเซ็นเซอร์ประเภทอื่น ๆ เช่น Electrolyic , Mercury หรือ Thermal Tilt Sensors
- ทำงานที่แรงดัน +3V จนถึง 5.25 V
- สามารถทนทานต่อการสั่นสะเทือนสูงถึง 1,000 g

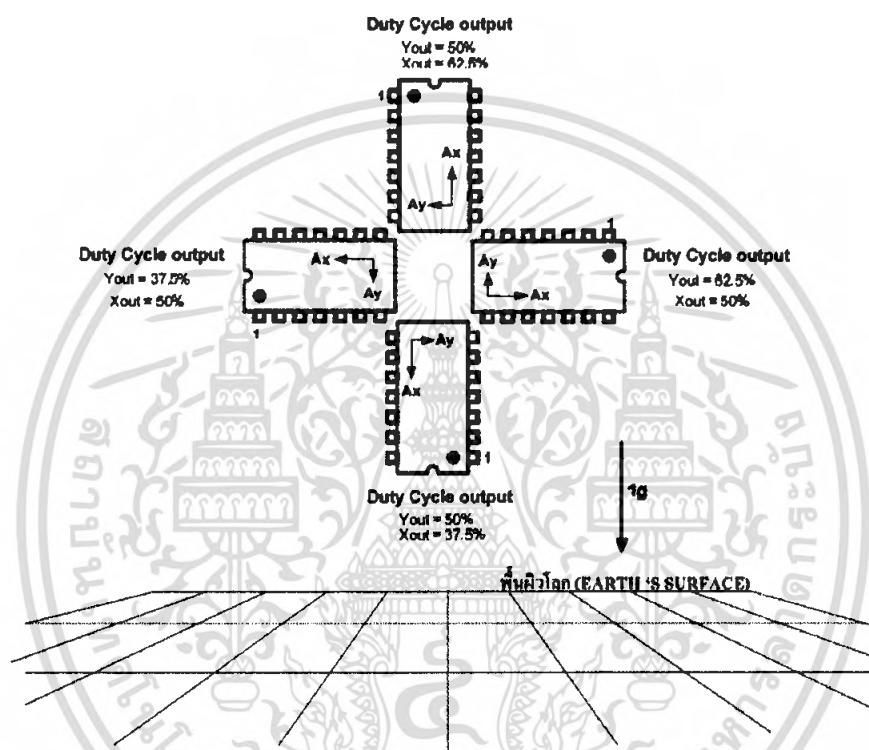
#### 4.3.2 การนำไปประยุกต์ใช้งาน ( APPLICATIONS )

- ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความโน้มเอียง 2 แกน ( 2-Axis Tilt Sensing )
- อุปกรณ์ช่วยนำทาง ( Inertial Navigation )
- อุปกรณ์ตรวจจัดแผ่นดินไหว ( Seismic Monitoring)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การทำงานของเซนเซอร์

เซนเซอร์จะให้สัญญาณเอาต์พุตแบบสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชั่นจำนวน 2 ช่อง คือ สัญญาณเอาต์พุตสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชั่นของแกน X ( $X_{out}$ ) และสัญญาณเอาต์พุตสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชั่นของแกน Y ( $Y_{out}$ ) ซึ่งค่า คิวตี้ไซเคิล ของแต่ละช่องก็จะเปลี่ยนแปลงตามการโน้มเอียงของตัวไอซี หรือ เกิดจากความเร็วในการเคลื่อนที่ขอ ไอซีไปตามแนวนอนต่างๆ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่าคิวตี้ไซเคิลของสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชั่นกับทิศทางการโน้มเอียงของเซนเซอร์

ต่อไปเป็นตัวอย่างการเขียนโปรแกรมการอ่านค่าอ่านค่าสัญญาณพัลส์วีกต์โมดูเลชั่นจากเซนเซอร์เป็นเลขคิติดอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมการอ่านค่าสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชั่นจากเซนเซอร์เป็นเลขคิติดอก

```
#include <p30f2010.h>

enum(X,Y)

unsigned int adxl_202(char axis);

int main ()

{while(1){ax= adxl_202(X) ;ay= adxl_202(Y); }}

unsigned int adxl_202(char axis)

{

ADPCFGbits.PCFG4 = 1;

ADPCFGbits.PCFG5 = 1;

TRISBbits.TRISB4 = 1;

TRISBbits.TRISB5 = 1;

unsigned char j; float a1,a2,a3;unsigned int Pv;

for (j=0;j<2;j++)

{ if(axis==X)

while(PORTBbits.RB4==1);

else if(axis==Y)

while(PORTBbits.RB5==1);

timer1_count();

if(axis==X)

while(PORTBbits.RB4==0);

else if(axis==Y)

while(PORTBbits.RB5==0);

CloseTimer1();

Pv = ReadTimer1();

WriteTimer1(0);

a1 = Pv*0.0002712;

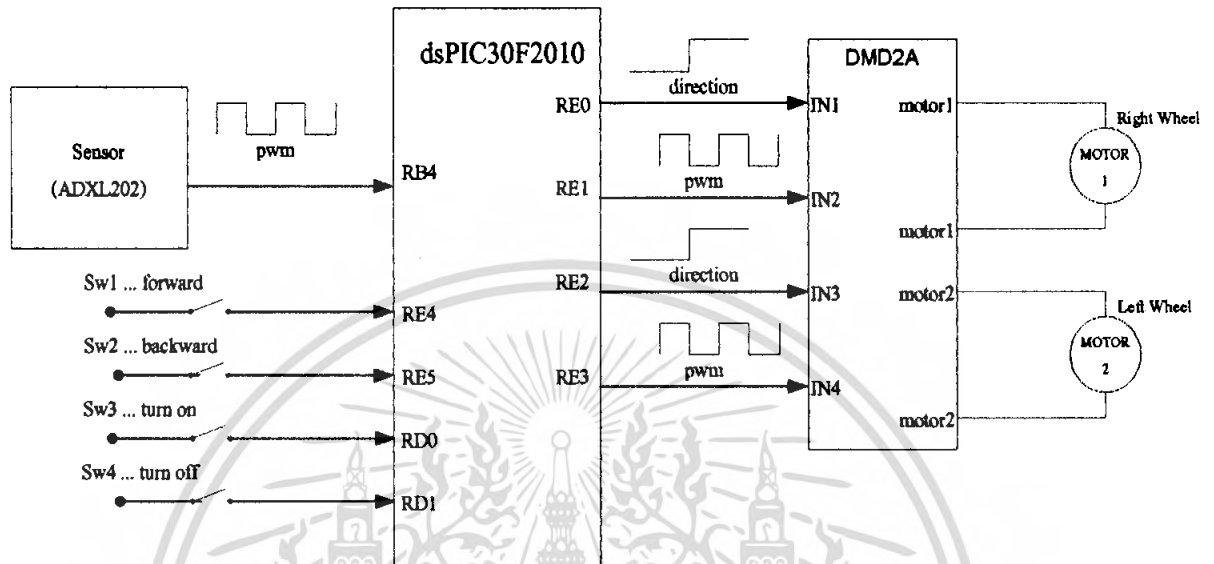
a2 = ((a1/7.4)-0.5)/0.125;

a3 = (((a2*1000)+2000))/5; }

return(a3);}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

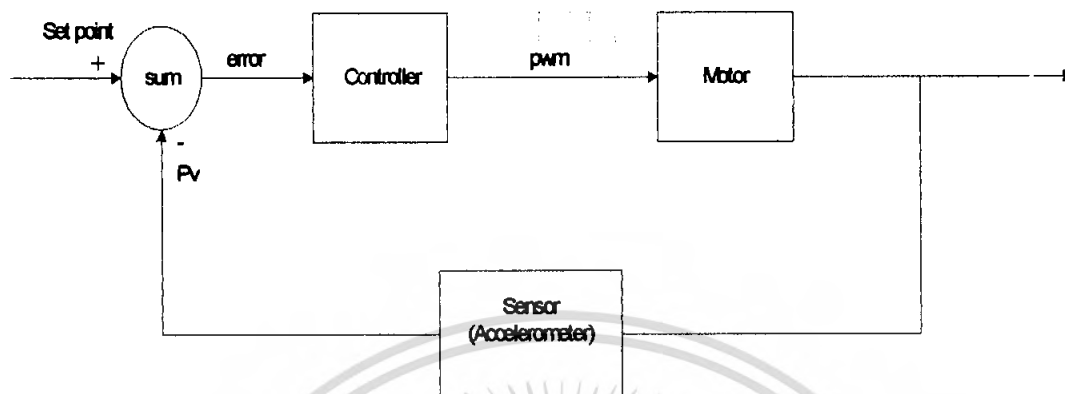
#### 4.4 การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเซนเซอร์และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 4.7 การเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเซนเซอร์และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์



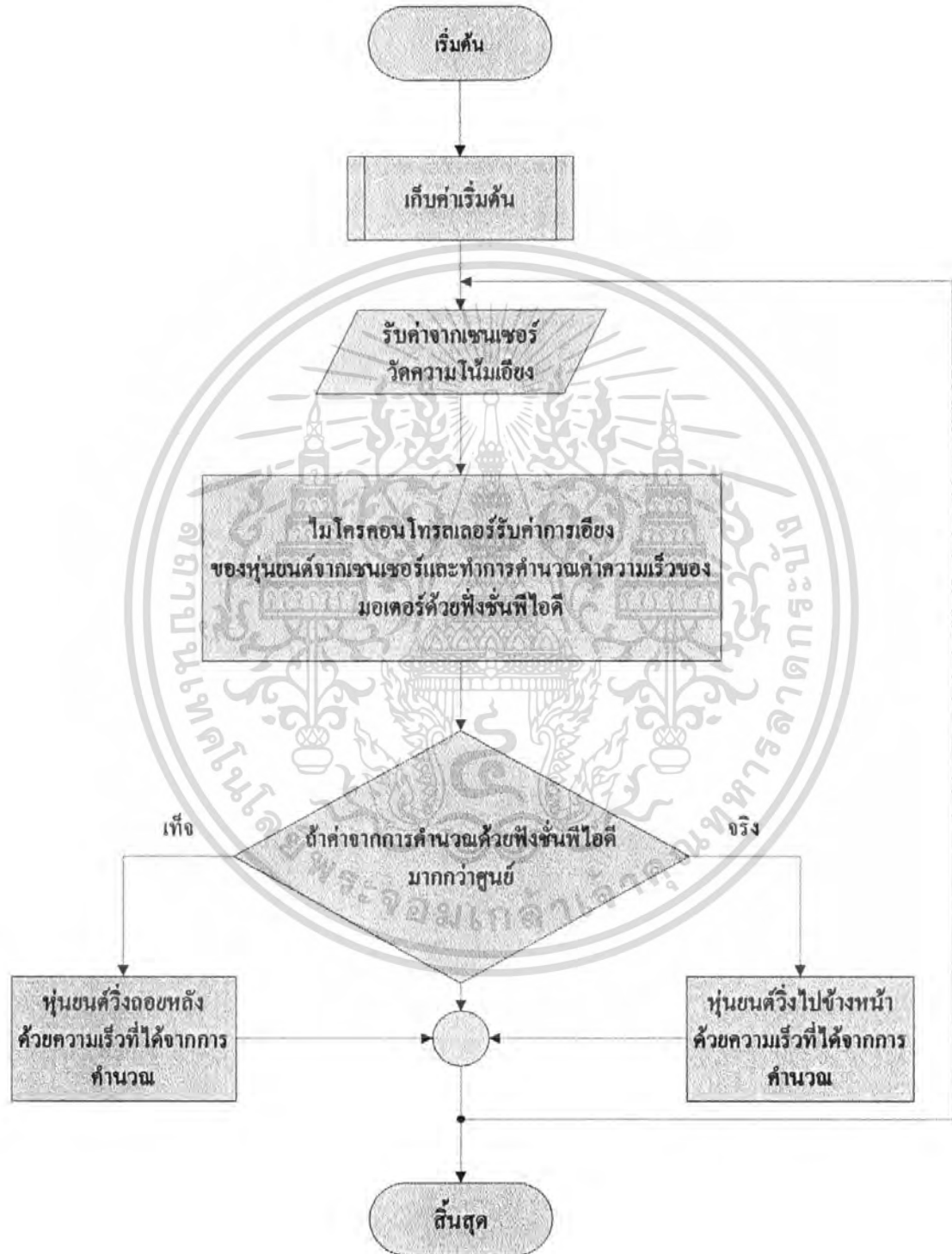
รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์รักษาสมดุล

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

- เริ่มจากเซนเซอร์ (Accelerometer) ทำหน้าที่ตรวจจับความโน้มเอียงของหุ่นยนต์ว่า หุ่นยนต์เอียงไปเท่าใด โดยส่งสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชันออกมาตามความโน้มเอียงของตัวหุ่นซึ่งอ่านค่าเป็นตัวเลขดิจิทัลจากไทมเมอร์ ซึ่งมีอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่แล้วนำค่าที่อ่านได้ นั้น มาเปรียบเทียบกับค่าเซตพอยต์ (จุดอ้างอิงเมื่อหุ่นยนต์อยู่ตำแหน่งตั้งตรงและตั้งฉากกับพื้นโลกค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบก็คือค่าเออร์เรอร์ (error) เมื่อเกิดค่าเออร์เรอร์ (error) ตัวคอนโทรลเลอร์จะนำค่า เออร์เรอร์ (error) มาทำการคำนวณค่าและส่งสัญญาณพัลส์วิดท์โมดูเลชัน (PWM) ออกไปขับมอเตอร์ตามทิศทางและกำลังที่ได้จากการคำนวณเพื่อควบคุมทิศทางและแรงบิดให้หุ่นยนต์สามารถเลี้ยงตัวเองเพื่อรักษาสมดุลได้

- เมื่อต้องการให้หุ่นยนต์วิ่งไปข้างหน้าหรือวิ่งไปถอยหลัง ก็ทำได้โดยการเปลี่ยนค่า เซตพอยต์ (จุดอ้างอิงเมื่อหุ่นยนต์อยู่ตำแหน่งตั้งตรงและตั้งฉากกับพื้นโลก) โดยการกดสวิทช์เดินหน้าหรือถอยหลังซึ่งการเปลี่ยนค่า เซตพอยต์ นั้นหุ่นยนต์จะพยายามรักษาสมดุลโดยการวิ่งไปข้างหน้าหรือวิ่งไปถอยหลังตามค่า เซตพอยต์ ที่เปลี่ยนไปดังนั้นหุ่นยนต์จึงสามารถวิ่งไปข้างหน้าหรือวิ่งไปถอยหลังได้

#### 4.6 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์รักษาสมดุลย์



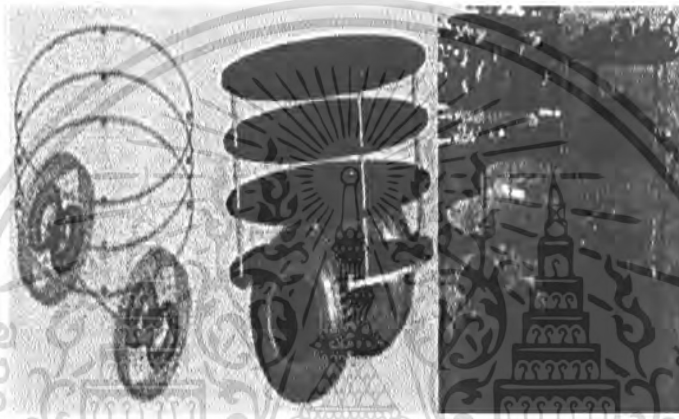
รูปที่ 4.9 แผนผังของโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การออกแบบโครงสร้างทางกล

การออกแบบโครงสร้างในโครงการนี้เป็นการออกแบบ โดยการศึกษาข้อมูล โครงสร้างทางกลในรูปแบบต่างๆ ที่มีผู้ที่ทำมาก่อนหน้าแล้วนำมาประยุกต์ใช้กับ โครงงานนี้ซึ่งจากการหาข้อมูลพบว่ารูปแบบ โครงสร้างทางกลของนายลาตันเป็นรูปแบบที่สามารถทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อนดังรูปที่ 5.1 ดังนั้นผู้จัดทำจึง ได้นำต้นแบบ โครงสร้างทางกลของนายลาตันมาประยุกต์ใช้กับ โครงงานนี้



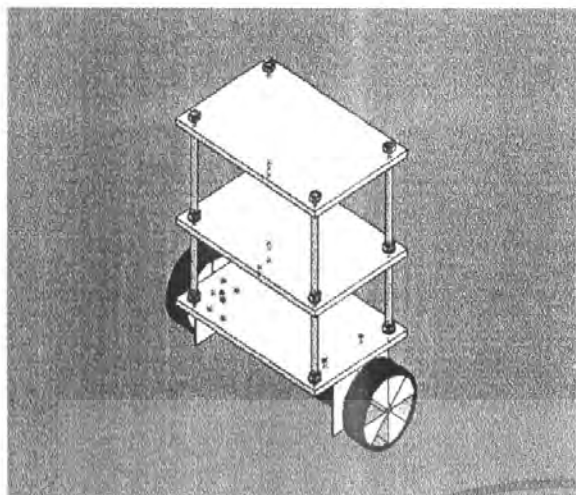
รูปที่ 5.1 โครงสร้างทางกลรูปแบบของนายลาตัน

จากภาพแสดงที่ 1 แสดง โครงสร้างทางกลของนายลาตันซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นซึ่งมีทั้งหมด 4 ชั้น แต่ละชั้นมีลักษณะเป็นวงกลมทางด้านคณะผู้จัดทำจึง ได้นำ โครงสร้างดังกล่าวมาดัดแปลงและทำการออกแบบและปรับปรุง โครงสร้างของหุ่นยนต์รักษาสมดุล ให้เหมาะสม ดังนั้นคณะผู้จัดทำ ได้ออกแบบ โครงสร้างทั้งหมด 3 รูปแบบเพื่อทำการทดลองให้ได้ แบบ โครงสร้างทางกล ที่เหมาะสมกับการควบคุมที่ดีที่สุด

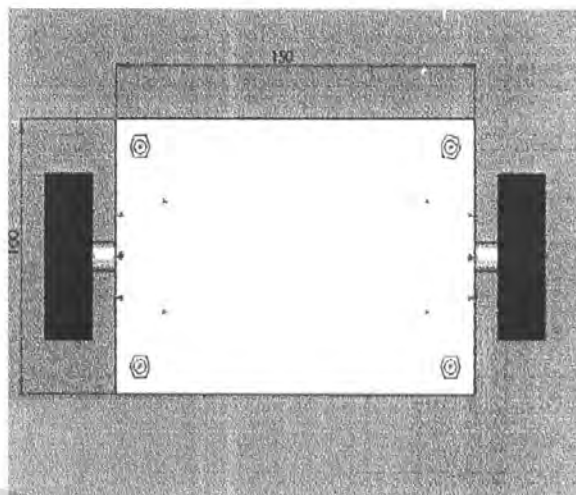
#### 5.1 โครงสร้างแบบที่ 1

รูปแบบที่ 1 นี้เป็นแบบแรกที่ทางคณะผู้จัดทำได้สร้างขึ้น โดยมีระบบขับเคลื่อนแยกกันที่ 2 ล้อโดยใช้ ดี.ซี.มอเตอร์ เป็นตัวขับเคลื่อนล้อทางด้านผู้จัดทำได้ใช้ล้อ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร และ โครงสร้างมีลักษณะเป็นชั้นทั้งหมด 3 ชั้น แต่ละชั้นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ทำมาจากแผ่นอะคริลิกรูปที่ 5.2-5.5 แสดงรูปของหุ่นยนต์รูปแบบที่ 1

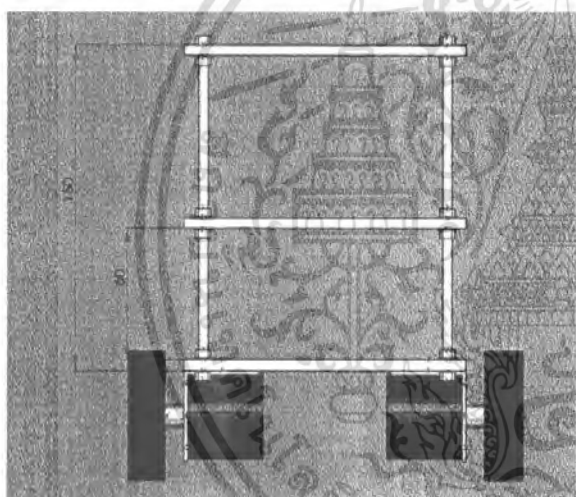
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



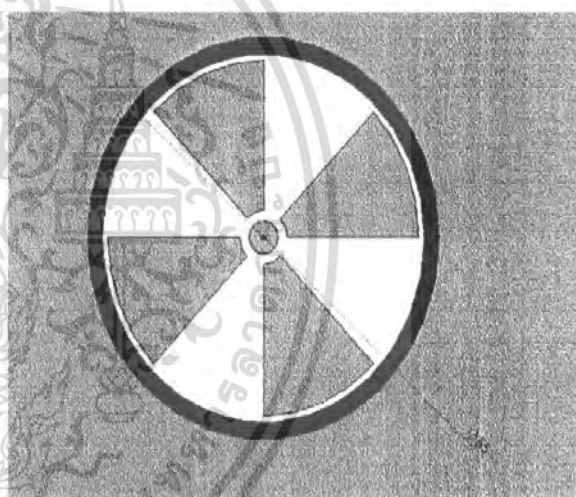
รูปที่ 5.2 โครงสร้างหุ่นยนต์แบบที่ 1



รูปที่ 5.3 รูปด้านบนหุ่นยนต์แบบที่ 1



รูปที่ 5.4 รูปด้านหน้าหุ่นยนต์แบบที่ 1



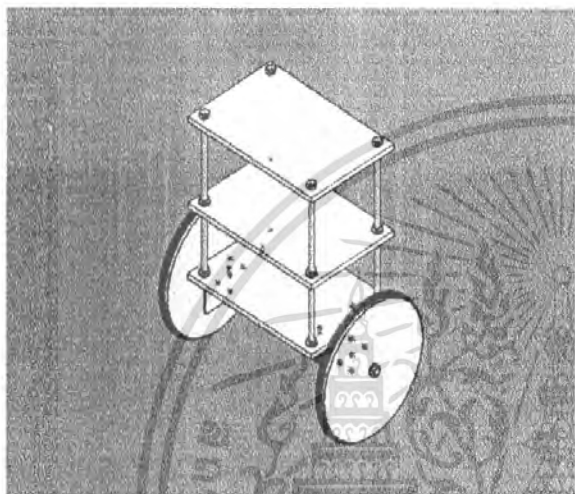
รูปที่ 5.5 ขนาดล้อหุ่นยนต์แบบที่ 1

ปัญหาที่พบของรูปแบบนี้ ก็คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของล้อมีขนาดความกว้างน้อยเกินไป และอีกปัญหาที่พบก็ คือ ดี.ซี. มอเตอร์ ที่มีความเร็วรอบและแรงบิดต่ำจึงทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถรักษาสมดุลยได้ดังนั้นทำให้ทางด้านคณะผู้จัดทำต้องมีการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาโครงสร้างของหุ่นยนต์ต่อไป

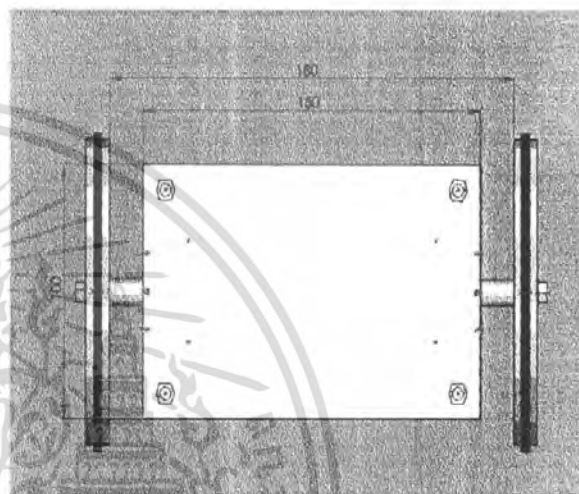
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 โครงสร้างแบบที่ 2

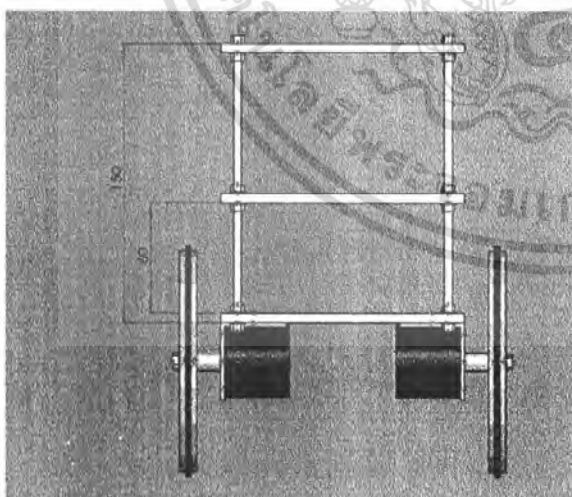
ในรูปแบบนี้ได้ปรับปรุงโครงสร้างโดยเปลี่ยนแปลงล้อให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นและมีน้ำหนักเบาขึ้น โดยทำมาจากแผ่นอะคริลิกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร เพราะที่นี้เพื่อจะช่วยให้ลดแรงเสียดทานของดี.ซี.มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบและแรงบิดค่ารูปที่ 5.6-5.9 แสดงรูปหุ่นยนต์ในรูปแบบที่ 2



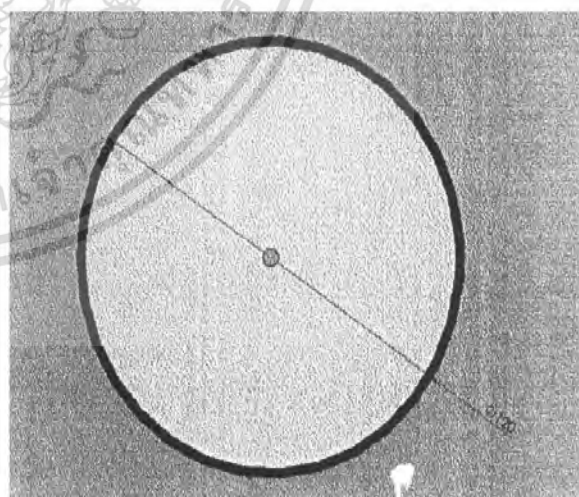
รูปที่ 5.6 โครงสร้างหุ่นยนต์แบบที่ 2



รูปที่ 5.7 รูปด้านบนหุ่นยนต์แบบที่ 2



รูปที่ 5.8 รูปด้านหน้าหุ่นยนต์แบบที่ 2



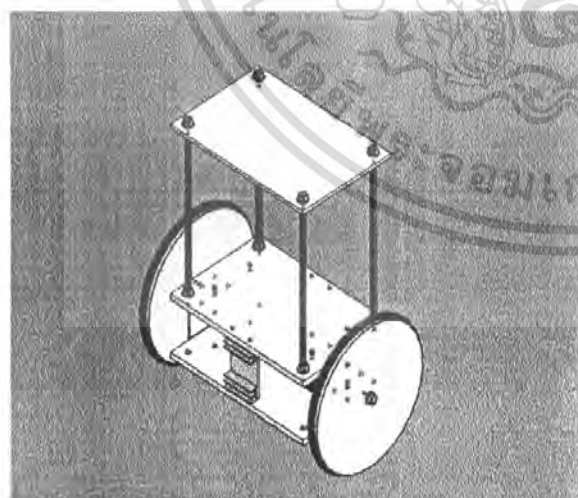
รูปที่ 5.9 ขนาดล้อหุ่นยนต์แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

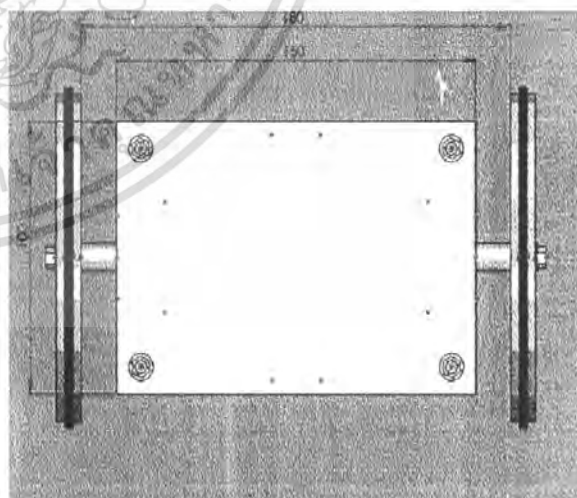
ปัญหาที่พบของรูปแบบที่ 2 นี้ก็คงอยู่ที่มอเตอร์เช่นเดิมในรูปแบบที่ 1 ที่ทำการทดลองพบว่ามอเตอร์มีความเร็วรอบ และแรงบิดต่ำทำให้ไม่สามารถรักษาความสมดุลได้แต่ในรูปแบบนี้เราได้ปรับปรุงเพิ่มขนาดของล้อให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางล้อใหญ่ขึ้นเพื่อชดเชยปัญหาดังกล่าวจากการทดลองในรูปแบบที่ 2 ทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่ดีพอเมื่อมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถรักษาสมดุลได้ เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์ไม่มากพอที่จะรับน้ำหนักด้านบนของตัวหุ่นยนต์ได้ข้อเสียดังกล่าวทำให้ต้องมีการปรับปรุงต่อไป

### 5.3 โครงสร้างแบบที่ 3

จากปัญหาที่พบในรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 โครงสร้างโดยรวมของหุ่นยนต์ค่อนข้างมีน้ำหนักมากและปัญหาที่มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบและแรงบิดต่ำทำให้โครงสร้างของหุ่นยนต์และมอเตอร์ในการขับเคลื่อนไม่สมมาตรกัน จากปัญหาดังกล่าวในรูปแบบที่ 2 ทางคณะผู้จัดทำได้มีการแก้ไข โดยการเพิ่มขนาดของล้อให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางล้อใหญ่ขึ้นแต่หุ่นยนต์ยังคงรักษาความสมดุลไม่ดีพอดังนั้นในรูปแบบที่ 3 จึงได้มีการปรับเปลี่ยนลักษณะ โครงสร้างหุ่นยนต์รักษาสมดุลโดยทำการลดโครงสร้างด้านบนลงให้เหลือ 2 ชั้น โดยเอาชั้นกลางออกมาไว้ที่ฐานล่างของตัวหุ่น เพื่อให้โครงสร้างด้านบนมีน้ำหนักเบาลงทั้งนี้ เพื่อให้การควบคุมการรักษาสมดุลได้ดีขึ้น รูปที่ 5.10-5.13 แสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์ในรูปแบบที่ 3

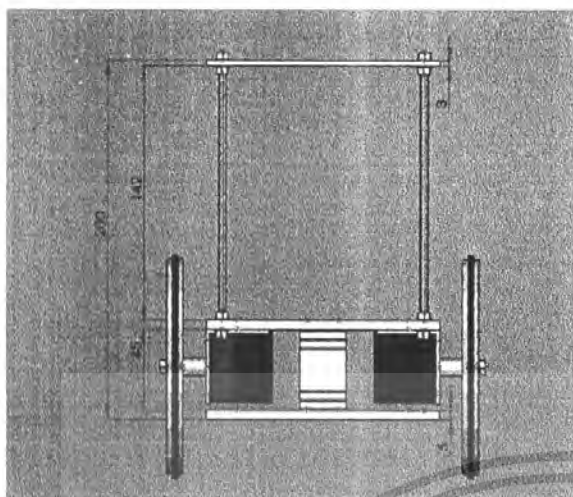


รูปที่ 5.10 โครงสร้างหุ่นยนต์แบบที่ 3

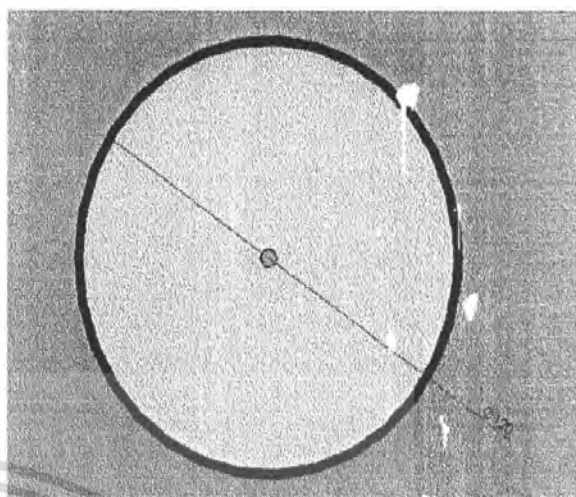


รูปที่ 5.11 รูปด้านบนหุ่นยนต์แบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 รูปด้านหน้าหุ่นยนต์แบบที่ 3

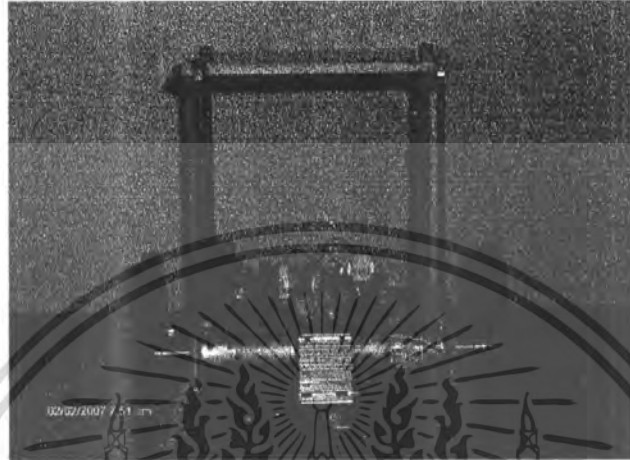


รูปที่ 5.13 ขนาดล้อหุ่นยนต์แบบที่ 3

ในรูปแบบที่ 3 นี้เป็นรูปแบบโครงสร้างทางกลที่ดีที่สุดเพราะเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการทำหุ่นยนต์รักษาสมดุลจากการทดสอบพบว่าในรูปแบบที่ 3 นี้เป็นรูปแบบที่ดีที่สุดสามารถตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนภายนอกได้ดี อีกทั้งมีลักษณะทางกลที่ไม่ยุ่งยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6 การทดลอง



รูปที่ 6.1 หุ่นยนต์รักษาสมดุล

### 6.1 การหาจุดอ้างอิง

การหาจุดอ้างอิงของหุ่นยนต์หรือการหาจุดสมดุลของหุ่นยนต์ทำได้โดยการผูกเชือกที่จุดกึ่งกลางด้านบนของหุ่นยนต์แล้วปล่อยให้ให้น้ำหนักของหุ่นยนต์ทิ้งลงด้านล่างของตัวหุ่นยนต์ หลังจากนั้นก็ทำการอ่านค่าจากเซนเซอร์แล้วนำไปเป็นค่าเซตพอยท์(set point)(จุดอ้างอิง) ดังรูป 6.2



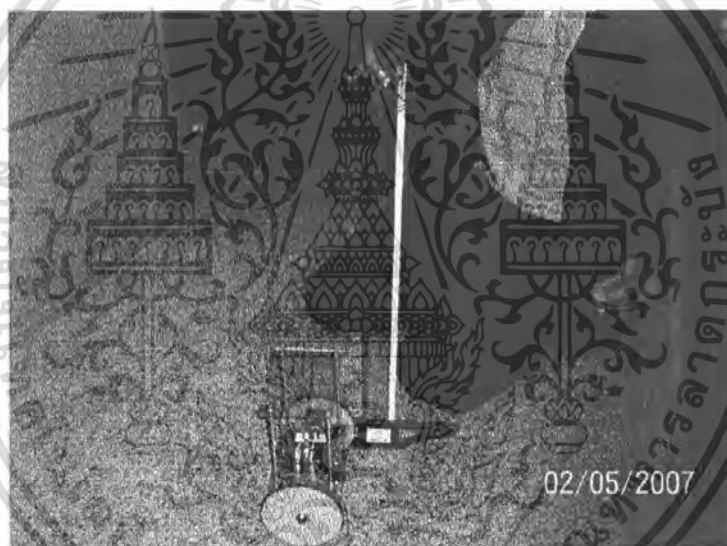
รูปที่ 6.2 การหาจุดอ้างอิงของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 การทดลองหาอัตราขยายที่เหมาะสม

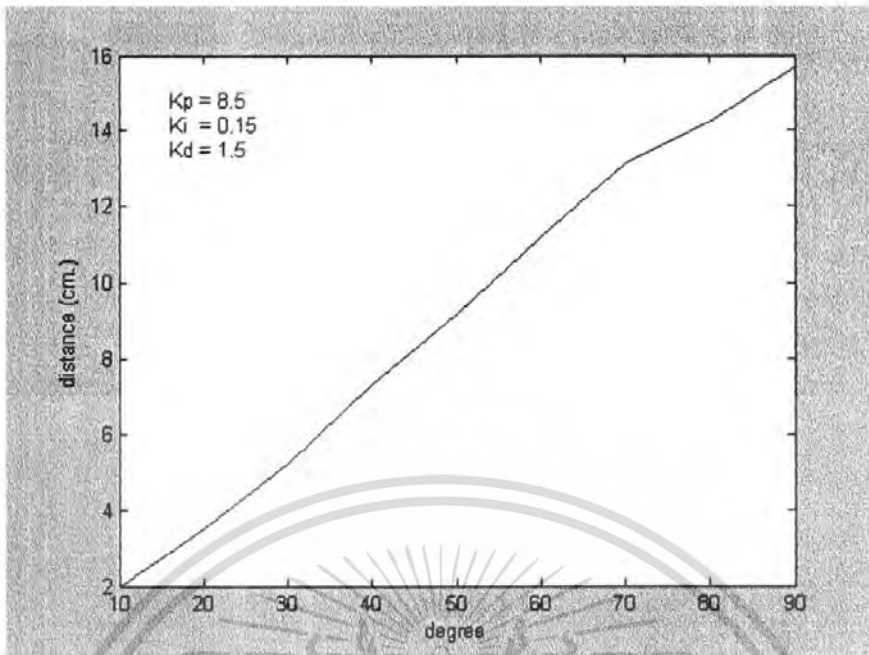
เนื่องจากโครงการนี้ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีจึงต้องทำการหาอัตราขยายที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งโครงการนี้จะใช้วิธีการหาอัตราขยายโดยการสุ่มเลือกอัตราขยายไปเรื่อยๆ จนได้ค่าอัตราขยายที่สามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้ ซึ่งค่าอัตราขยายที่สามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้คือ  $K_p = 8.5$  ,  $K_d = 3.5$  และ  $K_i = 0.15$

เมื่อเรารู้ค่าอัตราขยายที่สามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้แล้ว ต่อไปจะเป็นการหาอัตราขยายที่เหมาะสมและทำให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้ดีที่สุด โดยการทดลองใส่การรบกวน โดยการใช้ลูกตุ้มเหวี่ยงที่องศาต่างๆ ดังรูปที่ 6.3 และบันทึกค่าอัตราขยายกับองศาที่เหวี่ยงลูกตุ้ม และระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อถูกการรบกวน ดังแสดงในกราฟรูปที่ 6.4 - 6.9

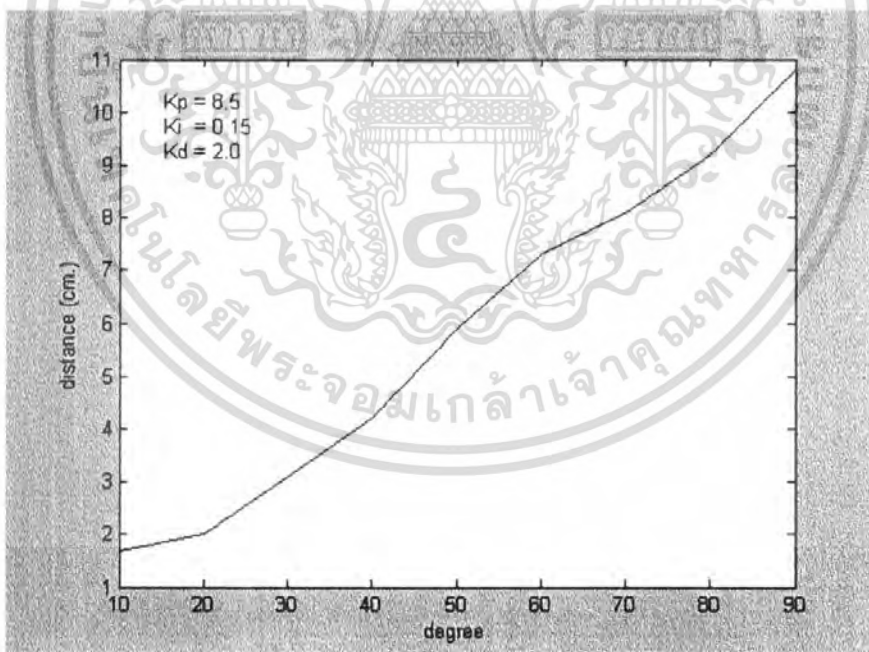


รูปที่ 6.3 การใส่การรบกวนโดยใช้ลูกตุ้มเหวี่ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

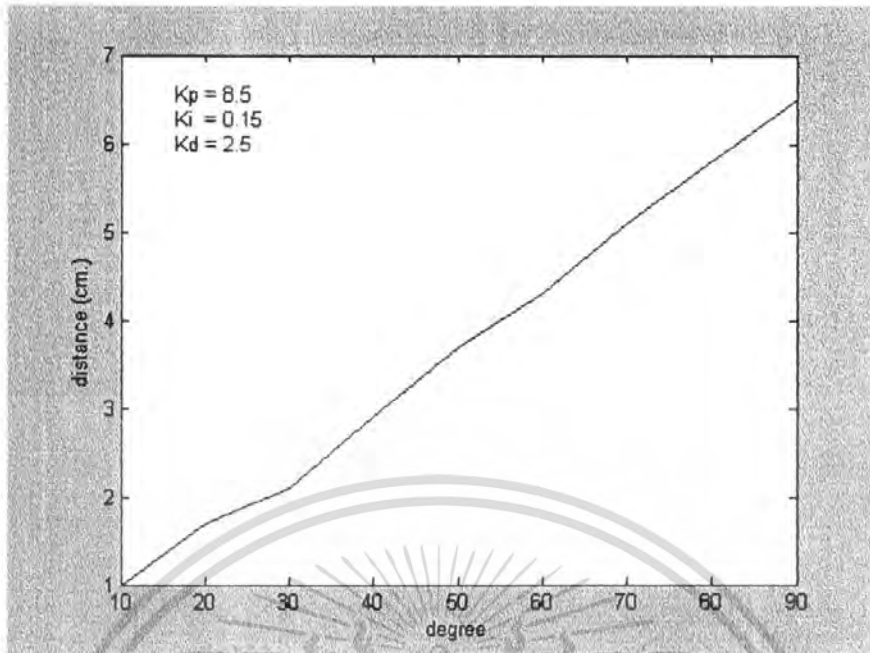


รูปที่ 6.4 ผลการทดลองเมื่อ  $K_p = 8.5, K_i = 0.15$  และ  $K_d = 1.5$

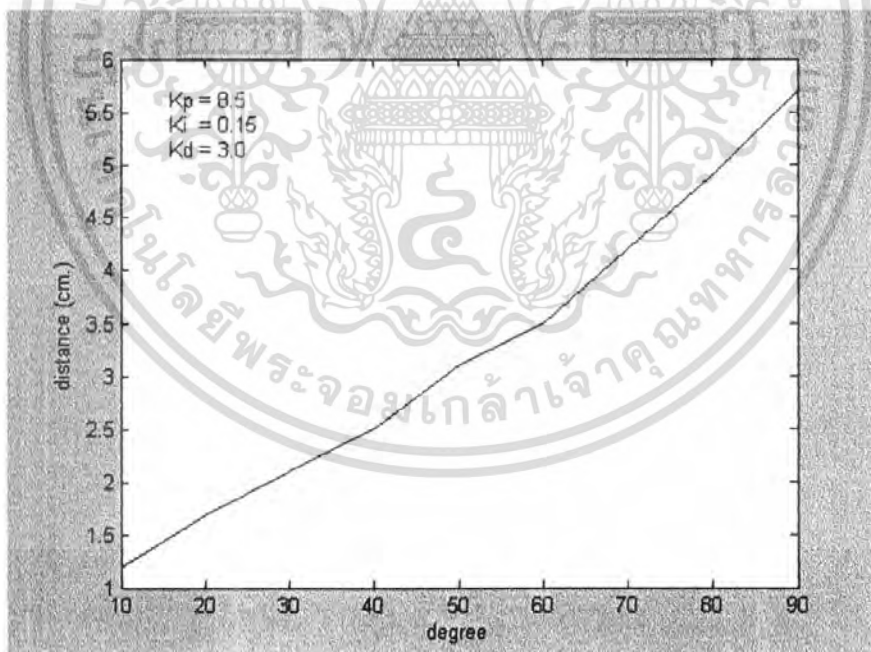


รูปที่ 6.5 ผลการทดลองเมื่อ  $K_p = 8.5, K_i = 0.15$  และ  $K_d = 2.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

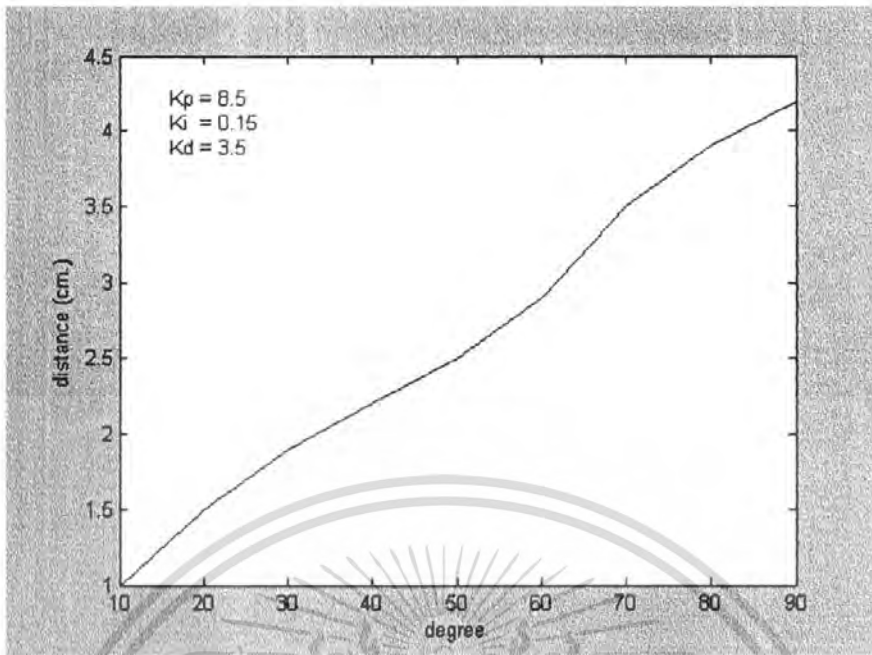


รูปที่ 6.6 ผลการทดลองเมื่อ  $K_p = 8.5, K_i = 0.15$  และ  $K_d = 2.5$

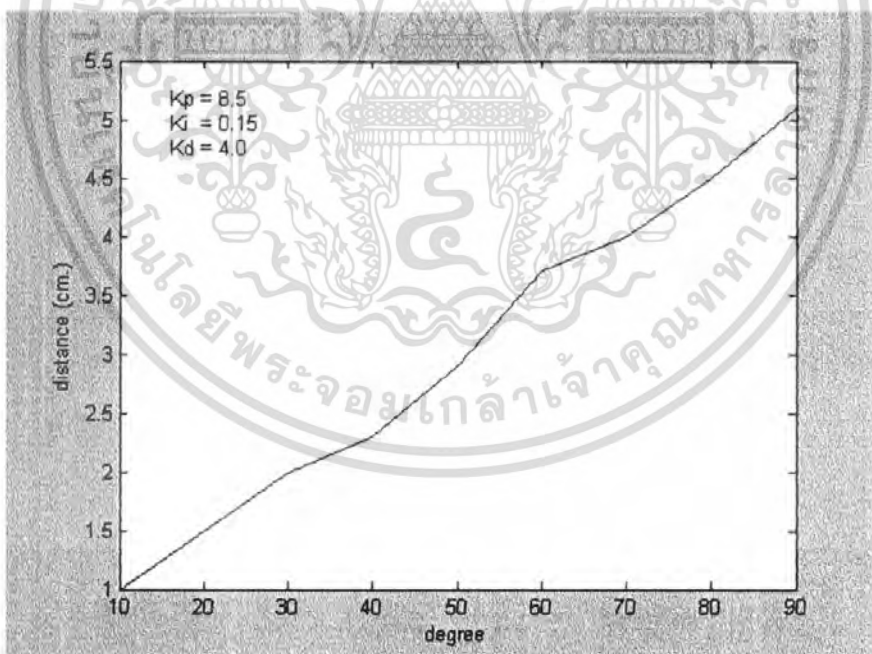


รูปที่ 6.7 ผลการทดลองเมื่อ  $K_p = 8.5, K_i = 0.15$  และ  $K_d = 3.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



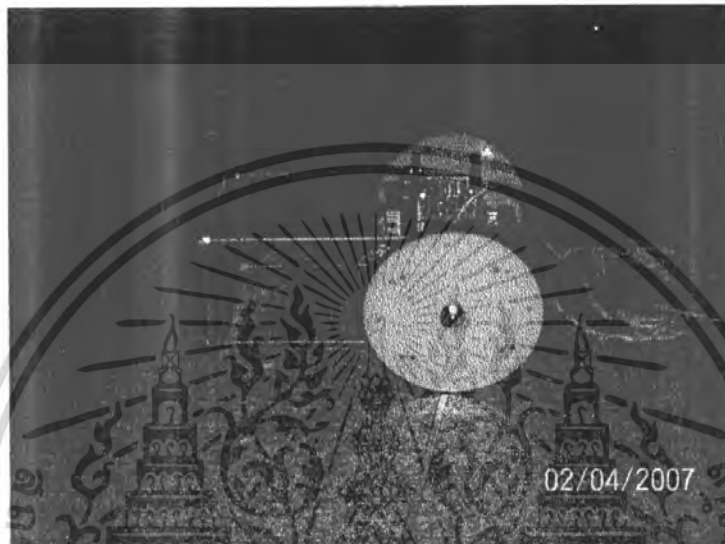
รูปที่ 6.8 ผลการทดลองเมื่อ  $K_p = 8.5, K_i = 0.15$  และ  $K_d = 3.5$



รูปที่ 6.9 ผลการทดลองเมื่อ  $K_p = 8.5, K_i = 0.15$  และ  $K_d = 4.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราขยายที่ดีที่สุดที่ทำให้หุ่นยนต์ สามารถรักษาสมดุลเมื่อ ใ้ใส่การรบกวนโดยการเหวี่ยงลูกตุ้มที่องศาต่าง ๆ พบว่า ค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุด คือ  $K_f = 8.5$  ,  $K_i = 0.15$  และ  $K_d = 3.5$  ซึ่งเป็นอัตราขยายที่หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลได้ เมื่อถูกการรบกวนที่ องศาสูงสุดคือ 90 และหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้ระยะทางที่น้อยที่สุดก่อนจะหยุดนิ่งเพื่อรักษาสมดุล



รูปที่ 6.10 หุ่นยนต์ขณะยังไม่จ่ายไฟเลี้ยง



รูปที่ 6.11 หุ่นยนต์ขณะจ่ายไฟเลี้ยงและมีการเลือกอัตราขยายที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# สรุปและวิเคราะห์ปัญหา

### 7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญาโทฉบับนี้ได้นำเสนอหุ่นยนต์รักษาสมดุลด้วยตนเองให้สามารถรักษาสมดุลได้แม้เมื่อมีการรบกวนจากแรงภายนอก โดยมีหลักการทำงานแบบป้อนกลับ โดยใช้เซนเซอร์วัดความโน้มเอียง (ADXL202) ในการวัดมุมที่หุ่นยนต์ทำมุมอยู่กับระนาบพื้นในขณะนั้น โดยสัญญาณพัลส์วិทยุโมดูลชัน ที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกนำไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและทำการคำนวณค่าเพื่อที่จะส่งสัญญาณออกไปควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ในโครงการนี้ได้มาจากการศึกษารายงานและบทความของ โครงการต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับการรักษาสมดุล เช่น ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม และหุ่นยนต์รักษาสมดุลที่มีผู้เคยทดลองมาก่อนหน้านี้ จึงได้ข้อสรุปว่าหุ่นยนต์ควรมีความสูงและน้ำหนักที่เหมาะสมและมอเตอร์ที่ใช้ควรมีแรงบิดสูงพอที่จะรับน้ำหนักของหุ่นยนต์ได้และต้องมีความเร็วเหมาะสม เพื่อที่จะสามารถให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมควรมีความเร็วในการประมวลผลสูงเพื่อให้เพียงพอต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ไม่เช่นนั้นแล้วจะไม่สามารถตอบสนองได้ทันความเป็นไปของระบบ ณ เวลานั้น ๆ

เนื่องจากต้องการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์โดยใช้ระบบควบคุมแบบพีดี และแบบพีไอดี จึงทำการทดลองหาค่าอัตราขยายของระบบแบบพีดี และพีไอดี โดยวิธีการลองผิดลองถูกจนได้ค่าอัตราขยายที่ทำให้เกิดเสถียรภาพในขอบเขตที่ยอมรับได้ แล้วจึงทำการทดลองเพื่อหาอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุด โดยการทดลองใส่แรงที่ได้จากการแกว่งลูกตุ้มที่มีองศาเริ่มต้นที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแปรผันตรงกับแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้ได้ค่าอัตราขยายที่สามารถทำให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพที่ดีที่สุด

### 7.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

เนื่องจากไม่ได้มีการ ศึกษาการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตั้งนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหุ่นยนต์ อัตราการขยายต่างๆ ในระบบย่อมมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ต้องมีการหาค่าอัตราการขยายต่างๆ ใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างเพราะฉะนั้นแนวทางการแก้ไขเราควรทำการศึกษารายงานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะนำไปออกแบบระบบควบคุมก่อนที่จะทำการออกแบบสร้างหุ่นยนต์ขึ้นจริง

### 7.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

- 1.) ทำการศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้การคอนโทรลระบบแนวใหม่ (Modern System Analysis) เพื่อทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด
- 2.) เพิ่มการตรวจจับ โดยการใส่ ใจโรสโคปร่วมกับเซ็นเซอร์วัดความเร่งและเซ็นเซอร์วัดระยะทาง
- 3.) เปลี่ยนมอเตอร์ให้มีกำลังสูงขึ้นเพื่อให้สามารถในการรักษาสมดุลดีขึ้นและยังเป็นก...  
ทำให้มุมในการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

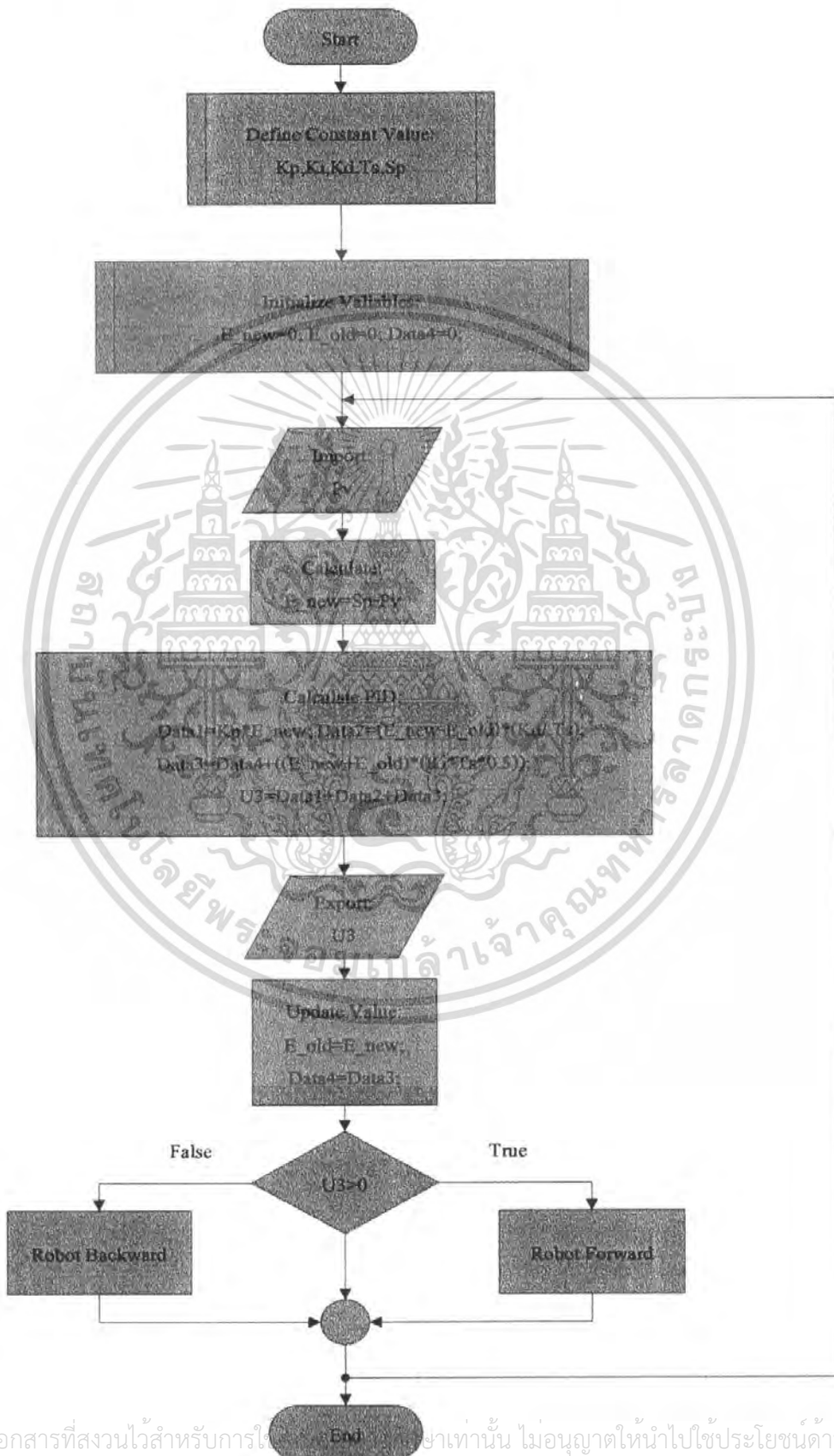
- กฤษณะ ศรีสุนทรภรณ์ , วัชรินทร์ ชฎาธร , เอราวัติ ชาติ , ปริญญาณีพนธ์เรื่อง “การประยุกต์ใช้อินเวิร์ทเพนดูลัมในหุ่นยนต์ 2 ล้อ” ปีการศึกษา 2547 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ทรงกรด ชिरาชัย , ทศยา ปุคคละนันท์ , นภคฉ จันทรคุณภาส ปริญญาณีพนธ์เรื่อง “รถอินเวิร์ทเพนดูลัม” ปีการศึกษา 2541 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
- ชวัน อุทัยเจริญพงษ์ , จุฬนธร แคว้วโยธา ปริญญาณีพนธ์เรื่อง “หุ่นยนต์รักษาสมดุลด้วยตนเอง” ปีการศึกษา 2548 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. “การควบคุมระบบพลศาสตร์” โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2538
- สุมาลี อุณหวนิชย์. “ระบบควบคุม Control System” กรุงเทพฯ : ว.เพ็ชรสฤต , 2545
- KATSUHIK, OGATA. “MODERGN CONTROL ENGINEERING” Fourth Edition. (n.p) Prentice Hall, 2002
- Anderson, David P “nBot Balancing Robot” (<http://geology.heroy.smu.edu/~dpa-www/rob/nbot>) 19 May 2003
- Larson, T. (2005), Balancing Robot Project “Bender” , 2005. URL : <http://www.tedlarson.com/robots/balancingbot.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์รักษาสมดุลย์



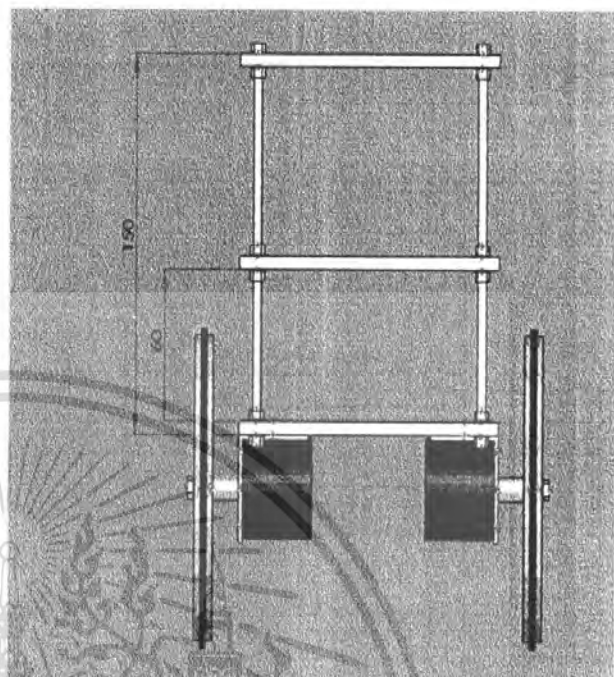
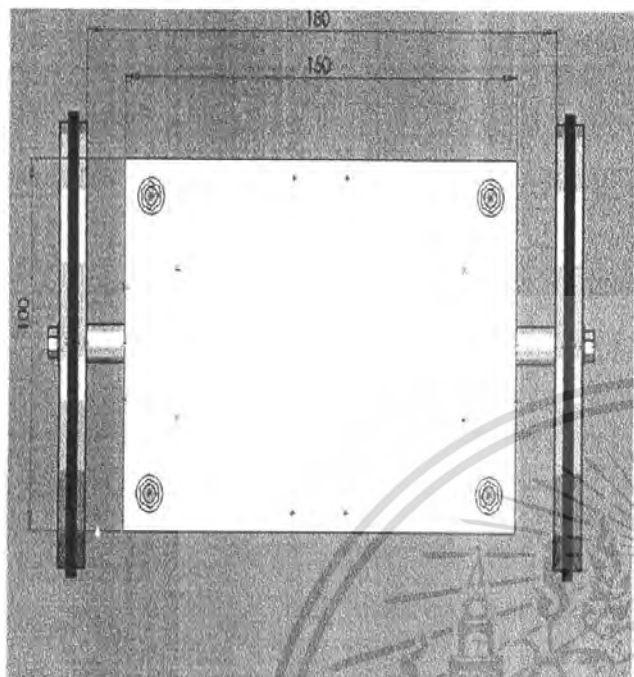
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ข โครงสร้างทางกล

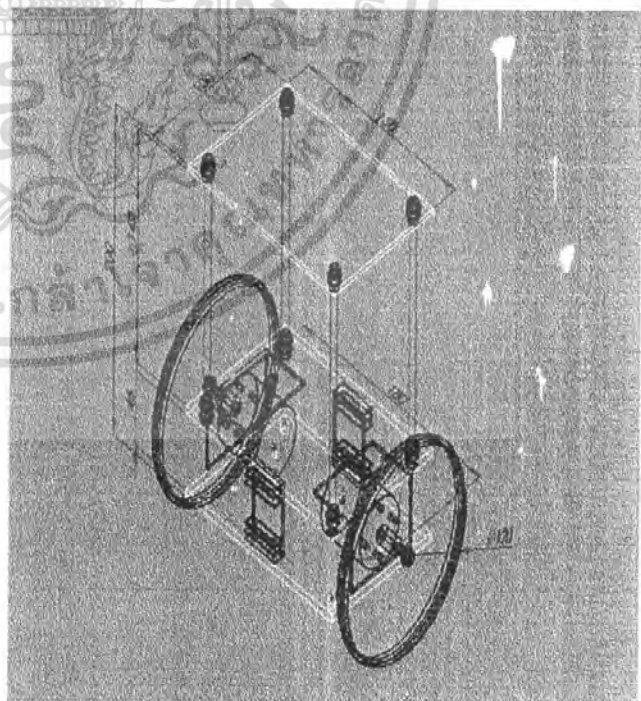
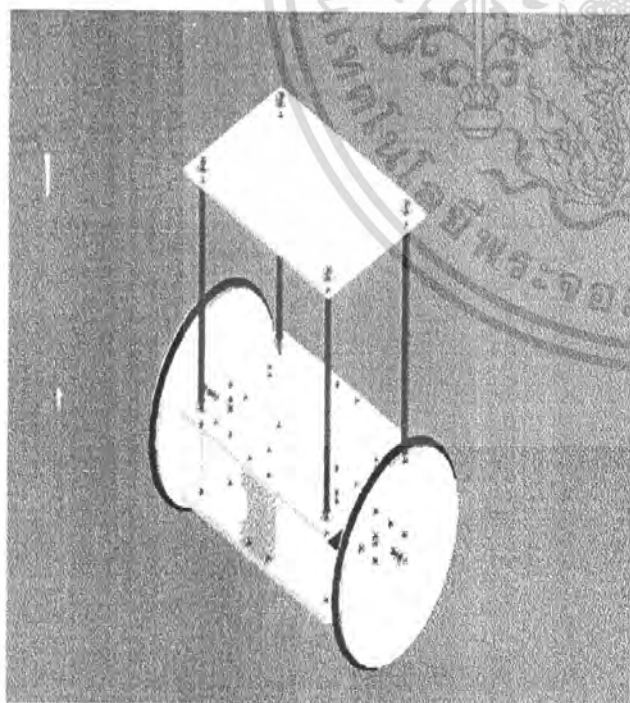
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์



ด้านบน

ด้านหน้า



### Isometric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**MICROCHIP**

# dsPIC30F2010

## 28-pin dsPIC30F2010 Enhanced Flash 16-bit Digital Signal Controller

**Note:** This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

### High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 84 base instructions with flexible addressing modes
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 12 Kbytes on-chip Flash program space
- 512 bytes on-chip data RAM
- 1 Kbyte non-volatile data EEPROM
- 16 x 16-bit working register array
- Up to 30 MIPS operation:
  - DC to 40 MHz external clock input
  - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 27 interrupt sources
- Three external interrupt sources
- 8 user selectable priority levels for each interrupt
- 4 processor exceptions and software traps

### DSP Engine Features:

- Modulo and Bit-Reversed modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- Single cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation
- 40-stage Barrel Shifter
- Dual data fetch

### Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules
- Four 16-bit Capture input functions
- Two 16-bit Compare/PWM output functions
  - Dual Compare mode available
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I<sup>2</sup>C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- Addressable UART modules with FIFO buffers

### Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
  - Complementary or Independent Output modes
  - Edge and Center Aligned modes
- 4 duty cycle generators
- Dedicated time base with 4 modes
- Programmable output polarity
- Dead time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for synchronized A/D conversions

### Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

### Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with:
  - 500 Ksps (for 10-bit A/D) conversion rate
  - Six input channels
  - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Brown-out Detection and Reset generation

# dsPIC30F2010

## Special Microcontroller Features:

- Enhanced Flash program memory:
  - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
  - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation

- Detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
  - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

## CMOS Technology:

- Low power, high speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

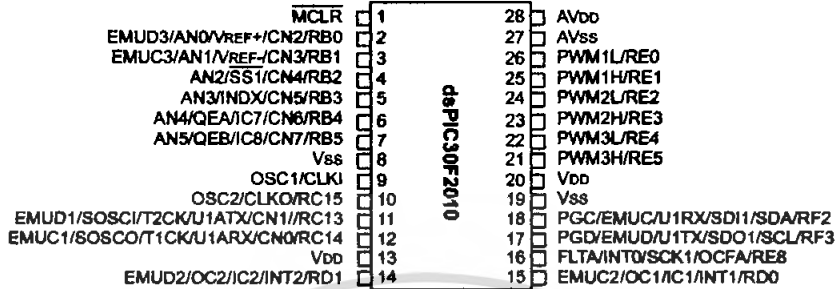
## dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family\*

Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	A/D 10-bit 500 Kcps	Quad Enc	UART	SPI™	I <sup>2</sup> C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	8 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	8 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	8 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	8 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	8 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F8010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

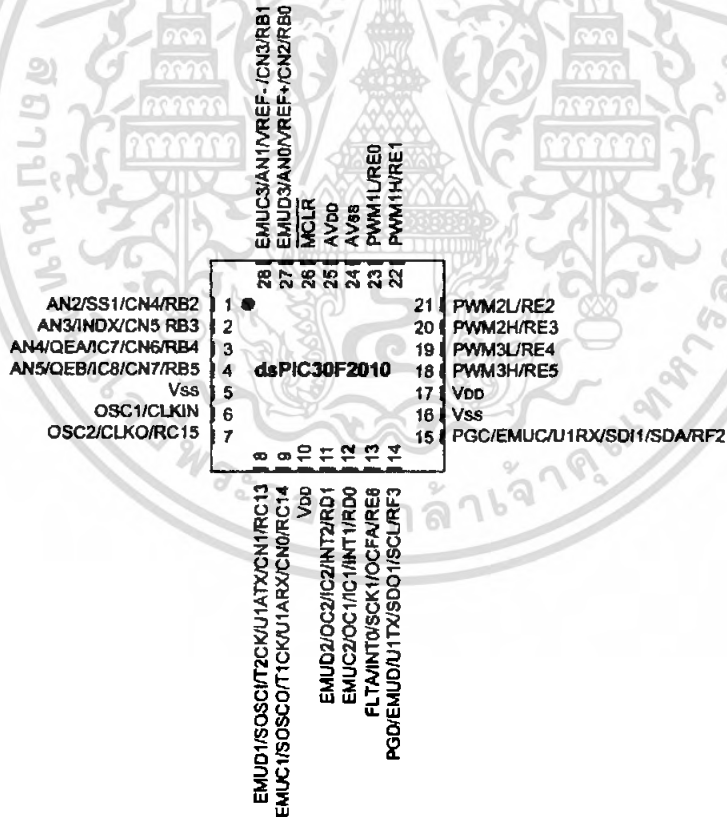
\* This table provides a summary of the dsPIC30F2010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

## Pin Diagrams

### 28-Pin SDIP and SOIC



### 28-Pin QFN



# dsPIC30F2010

FIGURE 1-1: dsPIC30F2010 BLOCK DIAGRAM

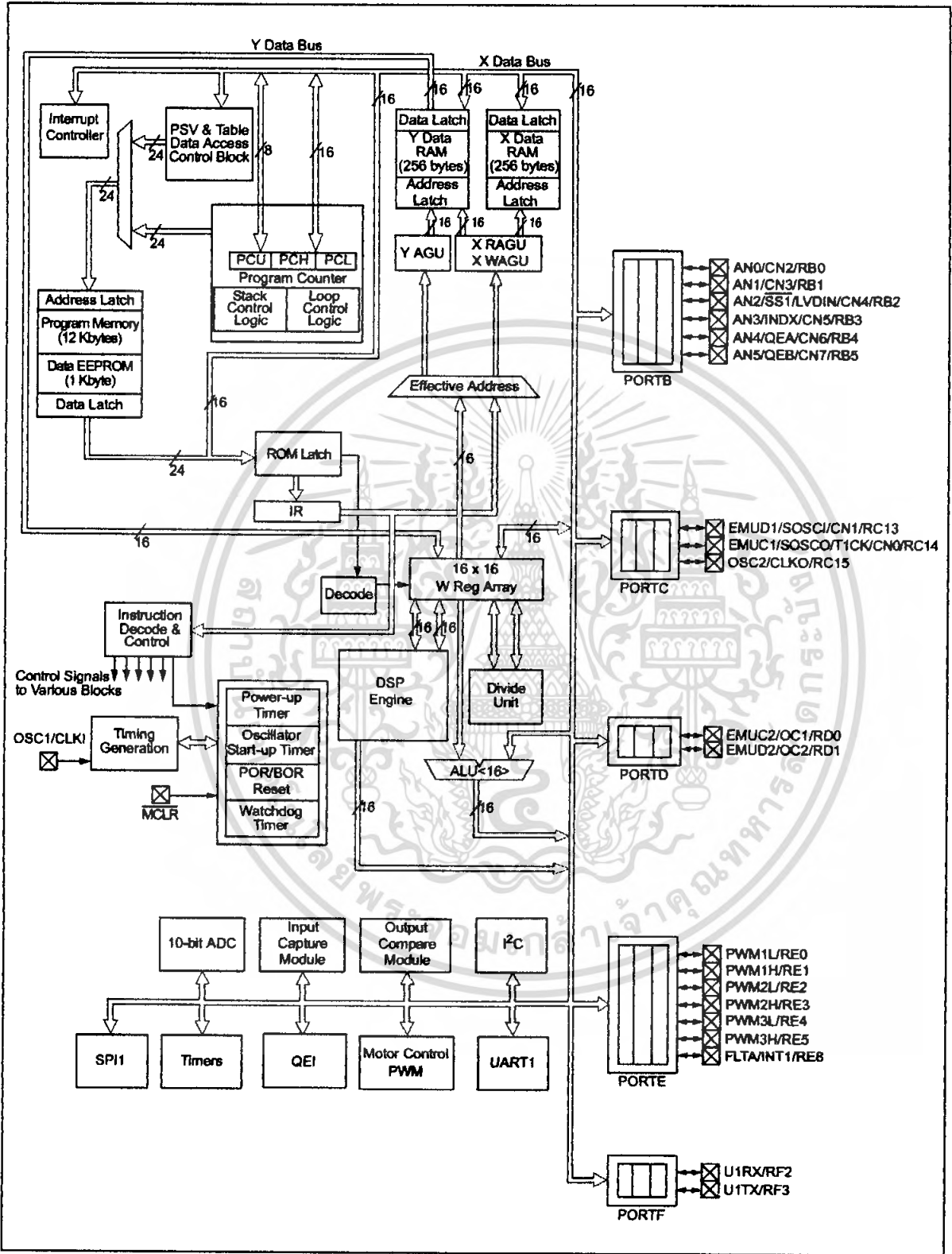


Table 1-1 provides a brief description of device I/O pinouts and the functions that may be multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

**TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS**

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN5	I	Analog	Analog input channels.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI	I	ST/CMOS	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function.
CLKO	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN7	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
EMUD	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin.
EMUC	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel data input/output pin.
EMUC1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin.
EMUC2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin.
EMUC3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1, IC2, IC7, IC8	I	ST	Capture inputs. The dsPIC30F2010 has 4 capture inputs. The inputs are numbered for consistency with the inputs on larger device variants.
INDX	I	ST	Quadrature Encoder Index Pulse input.
QEA	I	ST	Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode.
QEB	I	ST	Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode.
INT0	I	ST	External interrupt 0
INT1	I	ST	External interrupt 1
INT2	I	ST	External interrupt 2
FLTA	I	ST	PWM Fault A input
PWM1L	O	—	PWM 1 Low output
PWM1H	O	—	PWM 1 High output
PWM2L	O	—	PWM 2 Low output
PWM2H	O	—	PWM 2 High output
PWM3L	O	—	PWM 3 Low output
PWM3H	O	—	PWM 3 High output
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low Reset to the device.
OCFA	I	ST	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4).
OC1-OC2	O	—	Compare outputs.
OSC1	I	ST/CMOS	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
OSC2	I/O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog= Analog input  
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O= Output  
 I = Input P = Power

# dsPIC30F2010

**TABLE 1-1: PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)**

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RB0-RB5	I/O	ST	PORTB is a bidirectional I/O port.
RC13-RC14	I/O	ST	PORTC is a bidirectional I/O port.
RD0-RD1	I/O	ST	PORTD is a bidirectional I/O port.
RE0-RE5, RE8	I/O	ST	PORTE is a bidirectional I/O port.
RF2, RF3	I/O	ST	PORTF is a bidirectional I/O port.
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI™ #1.
SD11	I	ST	SPI #1 Data In.
SDO1	O	—	SPI #1 Data Out.
SS1	I	ST	SPI #1 Slave Synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I <sup>2</sup> C.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I <sup>2</sup> C.
SOSCO	O	—	32 kHz low power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 Receive.
U1TX	O	—	UART1 Transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 Alternate Receive.
U1ATX	O	—	UART1 Alternate Transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
VREF-	I	Analog	Analog Voltage Reference (Low) input.

Legend: CMOS =CMOS compatible input or output Analog= Analog input  
 ST =Schmitt Trigger input with CMOS levels O= Output  
 I =Input P = Power



# Low Cost $\pm 2 g/\pm 10 g$ Dual Axis $\mu$ MEMS<sup>®</sup> Accelerometers with Digital Output

## ADXL202/ADXL210

### FEATURES

- 2-Axis Acceleration Sensor on a Single IC Chip
- Measures Static Acceleration as Well as Dynamic Acceleration
- Duty Cycle Output with User Adjustable Period
- Low Power <0.6 mA
- Faster Response than Electrolytic, Mercury or Thermal Tilt Sensors
- Bandwidth Adjustment with a Single Capacitor Per Axis
- 5 mg Resolution at 60 Hz Bandwidth
- +3 V to +5.25 V Single Supply Operation
- 1000 g Shock Survival

### APPLICATIONS

- 2-Axis Tilt Sensing
- Computer Peripherals
- Inertial Navigation
- Seismic Monitoring
- Vehicle Security Systems
- Battery Powered Motion Sensing

### GENERAL DESCRIPTION

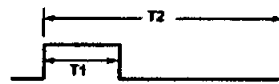
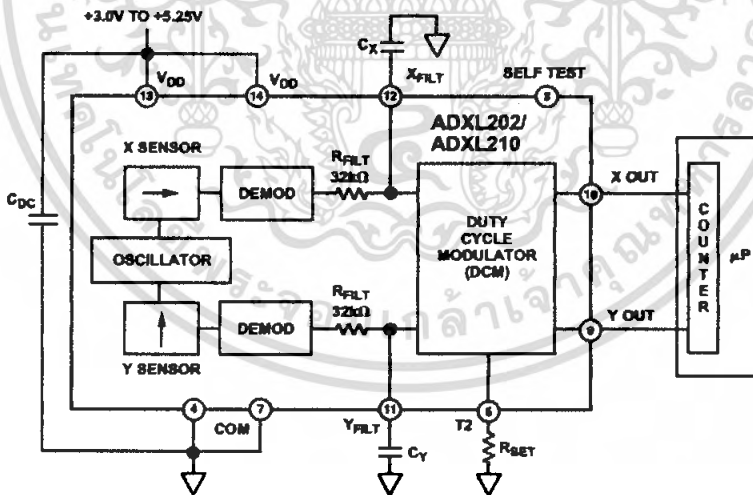
The ADXL202/ADXL210 are low cost, low power, complete 2-axis accelerometers with a measurement range of either  $\pm 2 g/\pm 10 g$ . The ADXL202/ADXL210 can measure both dynamic acceleration (e.g., vibration) and static acceleration (e.g., gravity).

The outputs are digital signals whose duty cycles (ratio of pulse-width to period) are proportional to the acceleration in each of the 2 sensitive axes. These outputs may be measured directly with a microprocessor counter, requiring no A/D converter or glue logic. The output period is adjustable from 0.5 ms to 10 ms via a single resistor ( $R_{SET}$ ). If a voltage output is desired, a voltage output proportional to acceleration is available from the  $X_{FILT}$  and  $Y_{FILT}$  pins, or may be reconstructed by filtering the duty cycle outputs.

The bandwidth of the ADXL202/ADXL210 may be set from 0.01 Hz to 5 kHz via capacitors  $C_X$  and  $C_Y$ . The typical noise floor is  $500 \mu g/\sqrt{Hz}$  allowing signals below 5 mg to be resolved for bandwidths below 60 Hz.

The ADXL202/ADXL210 is available in a hermetic 14-lead Surface Mount CERPAK, specified over the  $0^\circ C$  to  $+70^\circ C$  commercial or  $-40^\circ C$  to  $+85^\circ C$  industrial temperature range.

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



$$A(g) = (T1/T2 - 0.5) \times 12.5g$$

$$0g = 50\% \text{ DUTY CYCLE}$$

$$T2 = R_{SET} / 125m\Omega$$

$\mu$ MEMS is a registered trademark of Analog Devices, Inc.

### REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ADXL202/ADXL210—SPECIFICATIONS ( $T_A = T_{MIN}$ to $T_{MAX}$ , $T_A = +25^\circ\text{C}$ for I Grade only, $V_{DD} = +5\text{ V}$ , $R_{SET} = 125\text{ k}\Omega$ , Acceleration = $0\text{ g}$ , unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	ADXL202/JQC/AQC			ADXL210/JQC/AQC			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>SENSOR INPUT</b>	Each Axis							
Measurement Range <sup>1</sup>		±1.5	±2		±8	±10		g
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.2			0.2		% of FS
Alignment Error <sup>2</sup>			±1			±1		Degrees
Alignment Error	X Sensor to Y Sensor		±0.01			±0.01		Degrees
Transverse Sensitivity <sup>3</sup>			±2			±2		%
<b>SENSITIVITY</b>	Each Axis							
Duty Cycle per g	T1/T2 @ +25°C	10	12.5	15	3.2	4.0	4.8	%/g
Sensitivity, Analog Output	At Pins X <sub>FILT</sub> , Y <sub>FILT</sub>		312			100		mV/g
Temperature Drift <sup>4</sup>	Δ from +25°C		±0.5			±0.5		% Rdg
<b>ZERO g BIAS LEVEL</b>	Each Axis							
0 g Duty Cycle	T1/T2	25	50	75	42	50	58	%
Initial Offset			±2			±2		g
0 g Duty Cycle vs. Supply			1.0	4.0		1.0	4.0	%/V
0 g Offset vs. Temperature <sup>4</sup>	Δ from +25°C		2.0			2.0		mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>								
Noise Density <sup>5</sup>	@ +25°C		500	1000		500	1000	μg/√Hz
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>								
3 dB Bandwidth	Duty Cycle Output		500			500		Hz
3 dB Bandwidth	At Pins X <sub>FILT</sub> , Y <sub>FILT</sub>		5			5		kHz
Sensor Resonant Frequency			10			14		kHz
<b>FILTER</b>								
R <sub>FILT</sub> Tolerance	32 kΩ Nominal		±15			±15		%
Minimum Capacitance	At X <sub>FILT</sub> , Y <sub>FILT</sub>	1000			1000			pF
<b>SELF TEST</b>								
Duty Cycle Change	Self-Test "0" to "1"		10			10		%
<b>DUTY CYCLE OUTPUT STAGE</b>								
F <sub>SET</sub>			125 MΩ/R <sub>SET</sub>			125 MΩ/R <sub>SET</sub>		
F <sub>SET</sub> Tolerance	R <sub>SET</sub> = 125 kΩ	0.7		1.3	0.7		1.3	kHz
Output High Voltage	I = 25 μA		V <sub>S</sub> - 200 mV			V <sub>S</sub> - 200 mV		mV
Output Low Voltage	I = 25 μA			200			200	mV
T2 Drift vs. Temperature			35			35		ppm/°C
Rise/Fall Time			200			200		ns
<b>POWER SUPPLY</b>								
Operating Voltage Range		3.0		5.25	2.7		5.25	V
Specified Performance		4.75		5.25	4.75		5.25	V
Quiescent Supply Current			0.6	1.0		0.6	1.0	mA
Turn-On Time <sup>6</sup>	To 99%		160 C <sub>FILT</sub> + 0.3			160 C <sub>FILT</sub> + 0.3		ms
<b>TEMPERATURE RANGE</b>								
Operating Range	IQC	0		+70	0		+70	°C
Specified Performance	AQC	-40		+85	-40		+85	°C

## NOTES

<sup>1</sup>For all combinations of offset and sensitivity variation.

<sup>2</sup>Alignment error is specified as the angle between the true and indicated axis of sensitivity.

<sup>3</sup>Transverse sensitivity is the algebraic sum of the alignment and the inherent sensitivity errors.

<sup>4</sup>Specification refers to the maximum change in parameter from its initial at +25°C to its worst case value at T<sub>MIN</sub> to T<sub>MAX</sub>.

<sup>5</sup>Noise density (μg/√Hz) is the average noise at any frequency in the bandwidth of the part.

<sup>6</sup>C<sub>FILT</sub> in μF. Addition of filter capacitor will increase turn on time. Please see the Application section on power cycling.

All min and max specifications are guaranteed. Typical specifications are not tested or guaranteed.

Specifications subject to change without notice.

# ADXL202/ADXL210

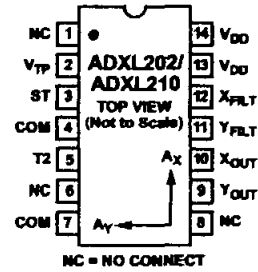
## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS\*

Acceleration (Any Axis, Unpowered for 0.5 ms)	.....	1000 g
Acceleration (Any Axis, Powered for 0.5 ms)	.....	500 g
+V <sub>S</sub>	.....	-0.3 V to +7.0 V
Output Short Circuit Duration (Any Pin to Common)	.....	Indefinite
Operating Temperature	.....	-55°C to +125°C
Storage Temperature	.....	-65°C to +150°C

\*Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; the functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Drops onto hard surfaces can cause shocks of greater than 1000 g and exceed the absolute maximum rating of the device. Care should be exercised in handling to avoid damage.

## PIN CONFIGURATION



## PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

Pin	Name	Description
1	NC	No Connect
2	V <sub>TP</sub>	Test Point, Do Not Connect
3	ST	Self Test
4	COM	Common
5	T2	Connect R <sub>SET</sub> to Set T2 Period
6	NC	No Connect
7	COM	Common
8	NC	No Connect
9	Y <sub>OUT</sub>	Y Axis Duty Cycle Output
10	X <sub>OUT</sub>	X Axis Duty Cycle Output
11	Y <sub>FILT</sub>	Connect Capacitor for Y Filter
12	X <sub>FILT</sub>	Connect Capacitor for X Filter
13	V <sub>DD</sub>	+3 V to +5.25 V, Connect to 14
14	V <sub>DD</sub>	+3 V to +5.25 V, Connect to 13

## PACKAGE CHARACTERISTICS

Package	θ <sub>JA</sub>	θ <sub>JC</sub>	Device Weight
14-Lead CERPAK	110°C/W	30°C/W	5 Grams

Figure 1 shows the response of the ADXL202 to the Earth's gravitational field. The output values shown are nominal. They are presented to show the user what type of response to expect from each of the output pins due to changes in orientation with respect to the Earth. The ADXL210 reacts similarly with output changes appropriate to its scale.

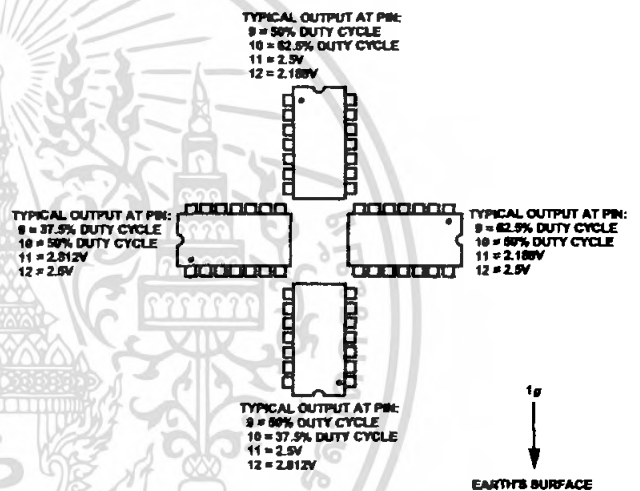


Figure 1. ADXL202/ADXL210 Nominal Response Due to Gravity

## ORDERING GUIDE

Model	g Range	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL202JQC	±2	0°C to +70°C	14-Lead CERPAK	QC-14
ADXL202AQC	±2	-40°C to +85°C	14-Lead CERPAK	QC-14
ADXL210JQC	±10	0°C to +70°C	14-Lead CERPAK	QC-14
ADXL210AQC	±10	-40°C to +85°C	14-Lead CERPAK	QC-14

## CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the ADXL202/ADXL210 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



# ADXL202/ADXL210

## DEFINITIONS

- T1 Length of the "on" portion of the cycle.
- T2 Length of the total cycle.
- Duty Cycle Ratio of the "on" time (T1) of the cycle to the total cycle (T2). Defined as T1/T2 for the ADXL202/ADXL210.
- Pulsewidth Time period of the "on" pulse. Defined as T1 for the ADXL202/ADXL210.

## THEORY OF OPERATION

The ADXL202/ADXL210 are complete dual axis acceleration measurement systems on a single monolithic IC. They contain a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open loop acceleration measurement architecture. For each axis, an output circuit converts the analog signal to a duty cycle modulated (DCM) digital signal that can be decoded with a counter/timer port on a microprocessor. The ADXL202/ADXL210 are capable of measuring both positive and negative accelerations to a maximum level of  $\pm 2 g$  or  $\pm 10 g$ . The accelerometer measures static acceleration forces such as gravity, allowing it to be used as a tilt sensor.

The sensor is a surface micromachined polysilicon structure built on top of the silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and central plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by  $180^\circ$  out of phase square waves. An acceleration will deflect the beam and unbalance the differential capacitor, resulting in an output square wave whose amplitude is proportional to acceleration. Phase sensitive demodulation techniques are then used to rectify the signal and determine the direction of the acceleration.

The output of the demodulator drives a duty cycle modulator (DCM) stage through a  $32 k\Omega$  resistor. At this point a pin is available on each channel to allow the user to set the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

After being low-pass filtered, the analog signal is converted to a duty cycle modulated signal by the DCM stage. A single resistor sets the period for a complete cycle (T2), which can be set between 0.5 ms and 10 ms (see Figure 12). A 0 g acceleration produces a nominally 50% duty cycle. The acceleration signal can be determined by measuring the length of the T1 and T2 pulses with a counter/timer or with a polling loop using a low cost microcontroller.

An analog output voltage can be obtained either by buffering the signal from the X<sub>FILT</sub> and Y<sub>FILT</sub> pin, or by passing the duty cycle signal through an RC filter to reconstruct the dc value.

The ADXL202/ADXL210 will operate with supply voltages as low as 3.0 V or as high as 5.25 V.

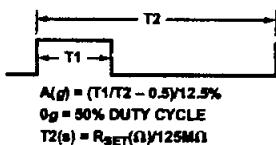


Figure 12. Typical Output Duty Cycle

## APPLICATIONS

### POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications a single 0.1  $\mu F$  capacitor, C<sub>DC</sub>, will adequately decouple the accelerometer from signal and noise on the power supply. However, in some cases, especially where digital devices such as microcontrollers share the same power supply, digital noise on the supply may cause interference on the ADXL202/ADXL210 output. This is often observed as a slowly undulating fluctuation of voltage at X<sub>FILT</sub> and Y<sub>FILT</sub>. If additional decoupling is needed, a 100  $\Omega$  (or smaller) resistor or ferrite beads, may be inserted in the ADXL202/ADXL210's supply line.

### DESIGN PROCEDURE FOR THE ADXL202/ADXL210

The design procedure for using the ADXL202/ADXL210 with a duty cycle output involves selecting a duty cycle period and a filter capacitor. A proper design will take into account the application requirements for bandwidth, signal resolution and acquisition time, as discussed in the following sections.

#### V<sub>DD</sub>

The ADXL202/ADXL210 have two power supply (V<sub>DD</sub>) Pins: 13 and 14. These two pins should be connected directly together.

#### COM

The ADXL202/ADXL210 have two commons, Pins 4 and 7. These two pins should be connected directly together and Pin 7 grounded.

#### V<sub>TP</sub>

This pin is to be left open; make no connections of any kind to this pin.

#### Decoupling Capacitor C<sub>DC</sub>

A 0.1  $\mu F$  capacitor is recommended from V<sub>DD</sub> to COM for power supply decoupling.

#### ST

The ST pin controls the self-test feature. When this pin is set to V<sub>DD</sub>, an electrostatic force is exerted on the beam of the accelerometer. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output will be 10% at the duty cycle outputs (corresponding to 800 mg). This pin may be left open circuit or connected to common in normal use.

#### Duty Cycle Decoding

The ADXL202/ADXL210's digital output is a duty cycle modulator. Acceleration is proportional to the ratio T1/T2. The nominal output of the ADXL202 is:

$$0 g = 50\% \text{ Duty Cycle}$$

Scale factor is 12.5% Duty Cycle Change per g

The nominal output of the ADXL210 is:

$$0 g = 50\% \text{ Duty Cycle}$$

Scale factor is 4% Duty Cycle Change per g

These nominal values are affected by the initial tolerance of the device including zero g offset error and sensitivity error.

T2 does not have to be measured for every measurement cycle. It need only be updated to account for changes due to temperature, (a relatively slow process). Since the T2 time period is shared by both X and Y channels, it is necessary only to measure it on one channel of the ADXL202/ADXL210. Decoding algorithms for various microcontrollers have been developed. Consult the appropriate Application Note.

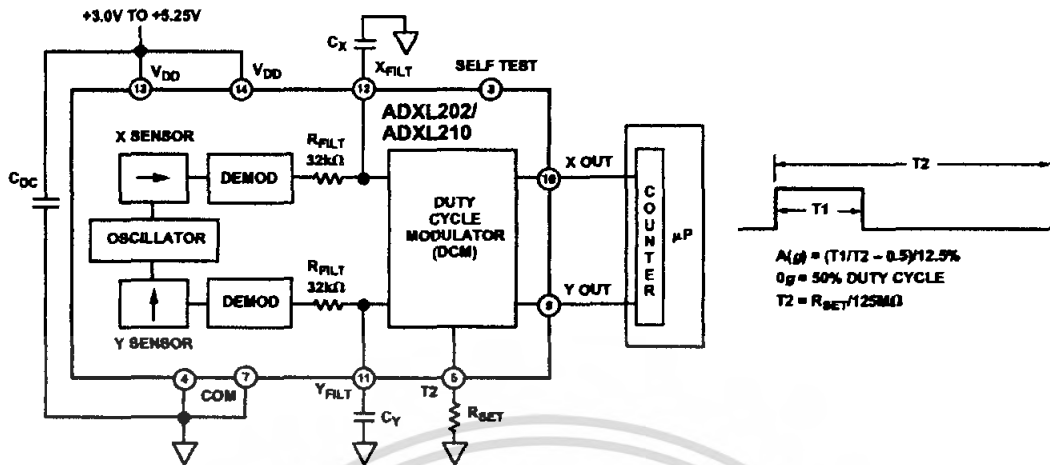


Figure 13. Block Diagram

### Setting the Bandwidth Using $C_x$ and $C_y$

The ADXL202/ADXL210 have provisions for bandlimiting the  $X_{FILT}$  and  $Y_{FILT}$  pins. Capacitors must be added at these pins to implement low-pass filtering for antialiasing and noise reduction. The equation for the 3 dB bandwidth is:

$$F_{-3dB} = \frac{1}{(2\pi(32k\Omega) \times C(x,y))}$$

or, more simply,  $F_{-3dB} = \frac{5\mu F}{C(x,y)}$

The tolerance of the internal resistor ( $R_{FILT}$ ), can vary as much as  $\pm 25\%$  of its nominal value of 32 k $\Omega$ ; so the bandwidth will vary accordingly. A minimum capacitance of 1000 pF for  $C(x,y)$  is required in all cases.

Table I. Filter Capacitor Selection,  $C_x$  and  $C_y$

Bandwidth	Capacitor Value
10 Hz	0.47 $\mu F$
50 Hz	0.10 $\mu F$
100 Hz	0.05 $\mu F$
200 Hz	0.027 $\mu F$
500 Hz	0.01 $\mu F$
5 kHz	0.001 $\mu F$

### Setting the DCM Period with $R_{SET}$

The period of the DCM output is set for both channels by a single resistor from  $R_{SET}$  to ground. The equation for the period is:

$$T2 = \frac{R_{SET} (\Omega)}{125 M\Omega}$$

A 125 k $\Omega$  resistor will set the duty cycle repetition rate to approximately 1 kHz, or 1 ms. The device is designed to operate at duty cycle periods between 0.5 ms and 10 ms.

Table II. Resistor Values to Set  $T2$

$T2$	$R_{SET}$
1 ms	125 k $\Omega$
2 ms	250 k $\Omega$
5 ms	625 k $\Omega$
10 ms	1.25 M $\Omega$

Note that the  $R_{SET}$  should always be included, even if only an analog output is desired. Use an  $R_{SET}$  value between 500 k $\Omega$  and 2 M $\Omega$  when taking the output from  $X_{FILT}$  or  $Y_{FILT}$ . The  $R_{SET}$  resistor should be placed close to the  $T2$  Pin to minimize parasitic capacitance at this node.

### Selecting the Right Accelerometer

For most tilt sensing applications the ADXL202 is the most appropriate accelerometer. Its higher sensitivity (12.5%/g allows the user to use a lower speed counter for PWM decoding while maintaining high resolution. The ADXL210 should be used in applications where accelerations of greater than  $\pm 2g$  are expected.

### MICROCOMPUTER INTERFACES

The ADXL202/ADXL210 were specifically designed to work with low cost microcontrollers. Specific code sets, reference designs, and application notes are available from the factory. This section will outline a general design procedure and discuss the various trade-offs that need to be considered.

The designer should have some idea of the required performance of the system in terms of:

**Resolution:** the smallest signal change that needs to be detected.

**Bandwidth:** the highest frequency that needs to be detected.

**Acquisition Time:** the time that will be available to acquire the signal on each axis.

These requirements will help to determine the accelerometer bandwidth, the speed of the microcontroller clock and the length of the  $T2$  period.

When selecting a microcontroller it is helpful to have a counter timer port available. The microcontroller should have provisions for software calibration. While the ADXL202/ADXL210 are highly accurate accelerometers, they have a wide tolerance for



# Low Cost $\pm 2 g/\pm 10 g$ Dual Axis $\mu$ MEMS<sup>®</sup> Accelerometers with Digital Output

## ADXL202/ADXL210

### FEATURES

- 2-Axis Acceleration Sensor on a Single IC Chip
- Measures Static Acceleration as Well as Dynamic Acceleration
- Duty Cycle Output with User Adjustable Period
- Low Power <0.6 mA
- Faster Response than Electrolytic, Mercury or Thermal Tilt Sensors
- Bandwidth Adjustment with a Single Capacitor Per Axis
- 5 mg Resolution at 60 Hz Bandwidth
- +3 V to +5.25 V Single Supply Operation
- 1000 g Shock Survival

### APPLICATIONS

- 2-Axis Tilt Sensing
- Computer Peripherals
- Inertial Navigation
- Seismic Monitoring
- Vehicle Security Systems
- Battery Powered Motion Sensing

### GENERAL DESCRIPTION

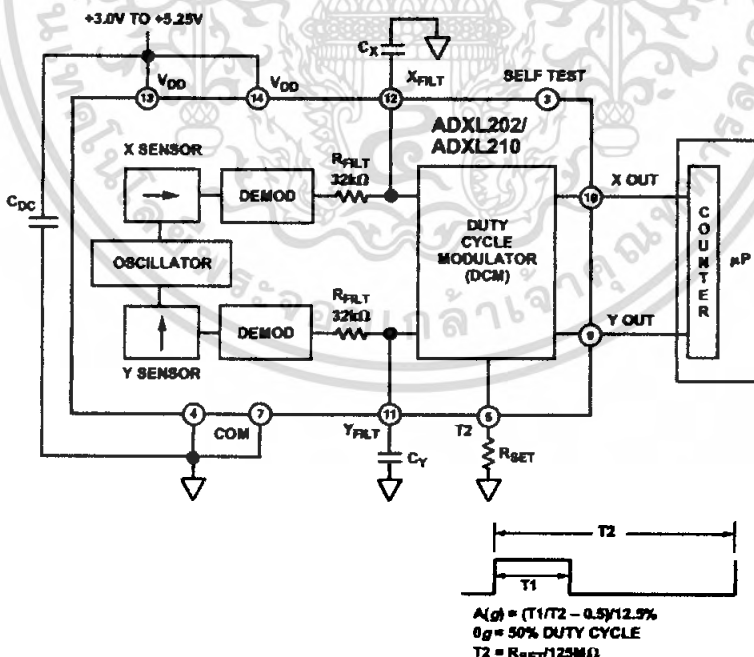
The ADXL202/ADXL210 are low cost, low power, complete 2-axis accelerometers with a measurement range of either  $\pm 2 g/\pm 10 g$ . The ADXL202/ADXL210 can measure both dynamic acceleration (e.g., vibration) and static acceleration (e.g., gravity).

The outputs are digital signals whose duty cycles (ratio of pulse-width to period) are proportional to the acceleration in each of the 2 sensitive axes. These outputs may be measured directly with a microprocessor counter, requiring no A/D converter or glue logic. The output period is adjustable from 0.5 ms to 10 ms via a single resistor ( $R_{SET}$ ). If a voltage output is desired, a voltage output proportional to acceleration is available from the  $X_{FILT}$  and  $Y_{FILT}$  pins, or may be reconstructed by filtering the duty cycle outputs.

The bandwidth of the ADXL202/ADXL210 may be set from 0.01 Hz to 5 kHz via capacitors  $C_X$  and  $C_Y$ . The typical noise floor is  $500 \mu g/\sqrt{Hz}$  allowing signals below 5 mg to be resolved for bandwidths below 60 Hz.

The ADXL202/ADXL210 is available in a hermetic 14-lead Surface Mount CERPAK, specified over the  $0^\circ C$  to  $+70^\circ C$  commercial or  $-40^\circ C$  to  $+85^\circ C$  industrial temperature range.

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



$\mu$ MEMS is a registered trademark of Analog Devices, Inc.

### REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

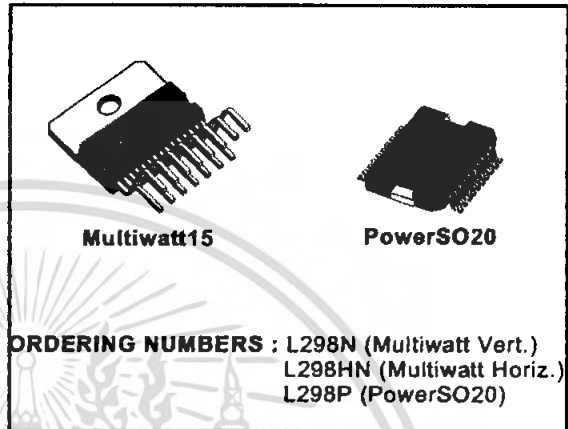
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

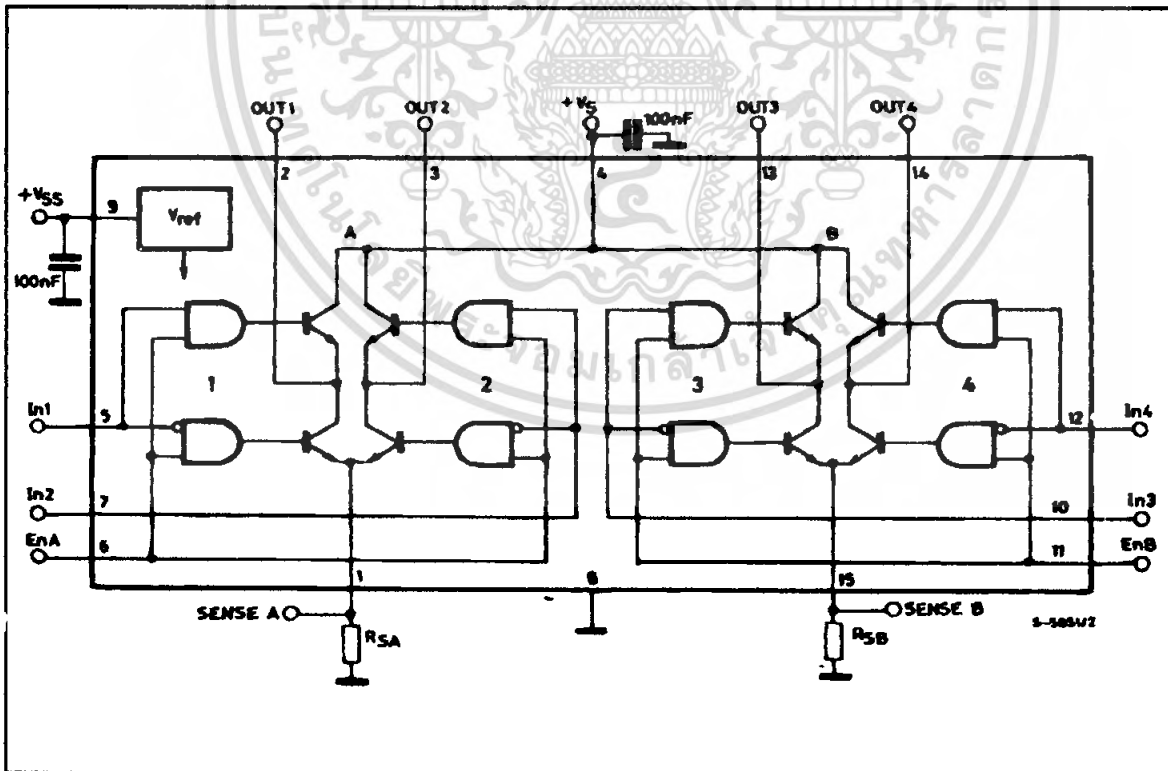
### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

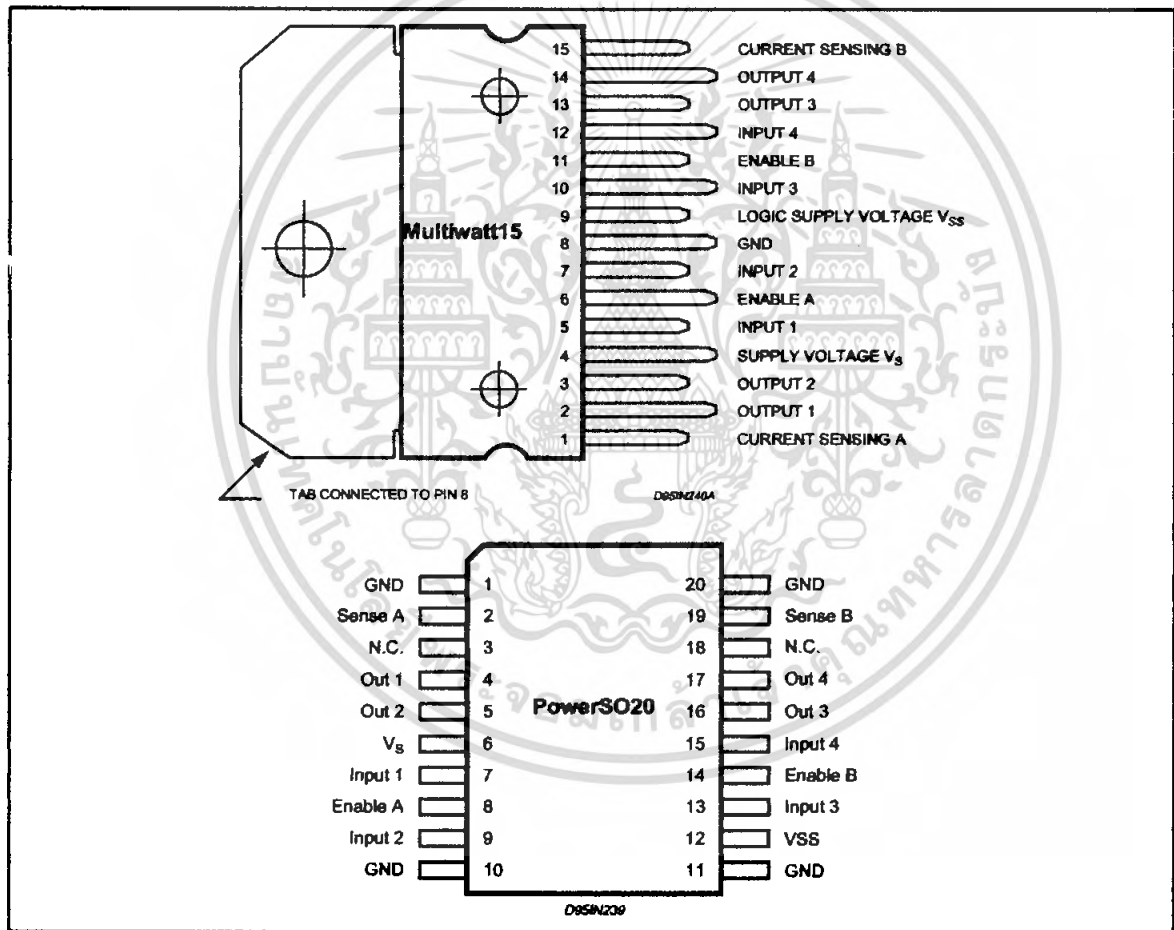
### BLOCK DIAGRAM



## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_I, V_{en}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel)		
	– Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ )	3	A
	– Repetitive (80% on –20% off; $t_{on} = 10ms$ )	2.5	A
	–DC Operation	2	A
$V_{sens}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
$T_{stg}, T_j$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

## PIN CONNECTIONS (top view)



## THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th j-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	–	3	$^\circ C/W$
$R_{th j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^\circ C/W$

(\*) Mounted on aluminum substrate

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V <sub>SS</sub>	Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>S</sub> = 42V; V<sub>SS</sub> = 5V, T<sub>j</sub> = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>S</sub>	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V <sub>HI</sub> +2.5		46	V
V <sub>SS</sub>	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I <sub>S</sub>	Quiescent Supply Current (pin 4)	V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0	V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H	13 50	22 70	mA mA
		V <sub>en</sub> = L	V <sub>I</sub> = X		4	mA
I <sub>SS</sub>	Quiescent Current from V <sub>SS</sub> (pin 9)	V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0	V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H	24 7	36 12	mA mA
		V <sub>en</sub> = L	V <sub>I</sub> = X		6	mA
V <sub>IL</sub>	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V <sub>HI</sub>	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>L</sub>	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = L			-10	μA
I <sub>HI</sub>	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>en</sub> = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V <sub>en</sub> = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>en</sub> = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = L			-10	μA
I <sub>en</sub> = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>CEsat</sub> (H)	Source Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A I <sub>L</sub> = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V <sub>CEsat</sub> (L)	Sink Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V <sub>CEsat</sub>	Total Drop	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V <sub>sens</sub>	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
T <sub>1</sub> (V <sub>I</sub> )	Source Current Turn-off Delay	0.5 V <sub>I</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)		1.5		μs
T <sub>2</sub> (V <sub>I</sub> )	Source Current Fall Time	0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)		0.2		μs
T <sub>3</sub> (V <sub>I</sub> )	Source Current Turn-on Delay	0.5 V <sub>I</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)		2		μs
T <sub>4</sub> (V <sub>I</sub> )	Source Current Rise Time	0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)		0.7		μs
T <sub>5</sub> (V <sub>I</sub> )	Sink Current Turn-off Delay	0.5 V <sub>I</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)		0.7		μs
T <sub>6</sub> (V <sub>I</sub> )	Sink Current Fall Time	0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (3); (4)		0.25		μs
T <sub>7</sub> (V <sub>I</sub> )	Sink Current Turn-on Delay	0.5 V <sub>I</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)		1.6		μs
T <sub>8</sub> (V <sub>I</sub> )	Sink Current Rise Time	0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)		0.2		μs
f <sub>c</sub> (V <sub>I</sub> )	Commutation Frequency	I <sub>L</sub> = 2A		25	40	KHz
T <sub>1</sub> (V <sub>en</sub> )	Source Current Turn-off Delay	0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)		3		μs
T <sub>2</sub> (V <sub>en</sub> )	Source Current Fall Time	0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)		1		μs
T <sub>3</sub> (V <sub>en</sub> )	Source Current Turn-on Delay	0.5 V <sub>en</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (2); (4)		0.3		μs
T <sub>4</sub> (V <sub>en</sub> )	Source Current Rise Time	0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (2); (4)		0.4		μs
T <sub>5</sub> (V <sub>en</sub> )	Sink Current Turn-off Delay	0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)		2.2		μs
T <sub>6</sub> (V <sub>en</sub> )	Sink Current Fall Time	0.9 I <sub>L</sub> to 0.1 I <sub>L</sub> (3); (4)		0.35		μs
T <sub>7</sub> (V <sub>en</sub> )	Sink Current Turn-on Delay	0.5 V <sub>en</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)		0.25		μs
T <sub>8</sub> (V <sub>en</sub> )	Sink Current Rise Time	0.1 I <sub>L</sub> to 0.9 I <sub>L</sub> (3); (4)		0.1		μs

- 1) Sensing voltage can be -1 V for t ≤ 50 μsec; in steady state V<sub>sens</sub> min ≥ -0.5 V.
- 2) See fig. 2.
- 3) See fig. 4.
- 4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

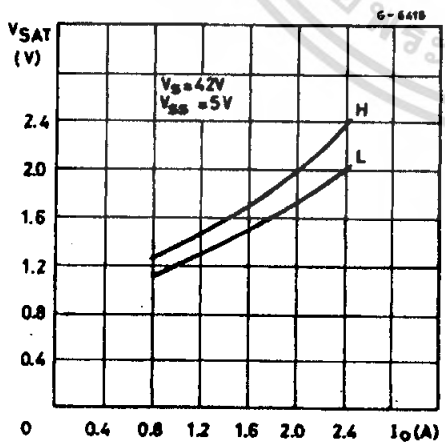
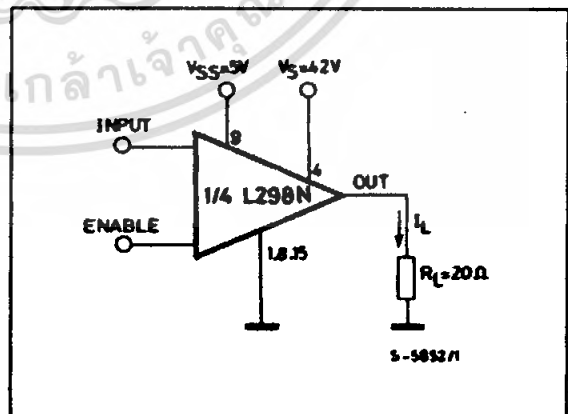


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H  
For ENABLE Switching, set IN = H



Figure 3 : Source Current Delay Times vs. Input or Enable Switching.

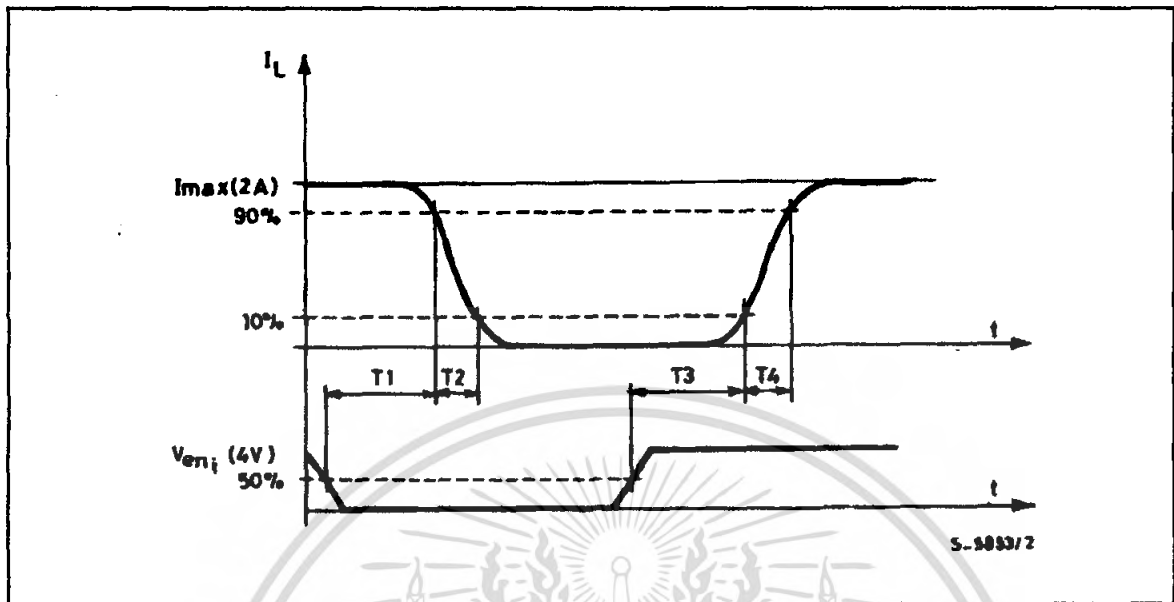
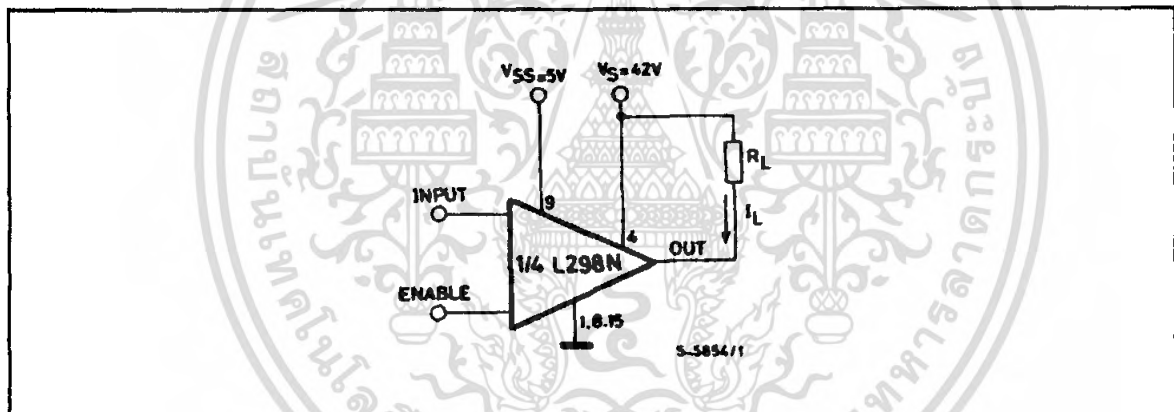


Figure 4 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H  
For ENABLE Switching, set IN = L

Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.

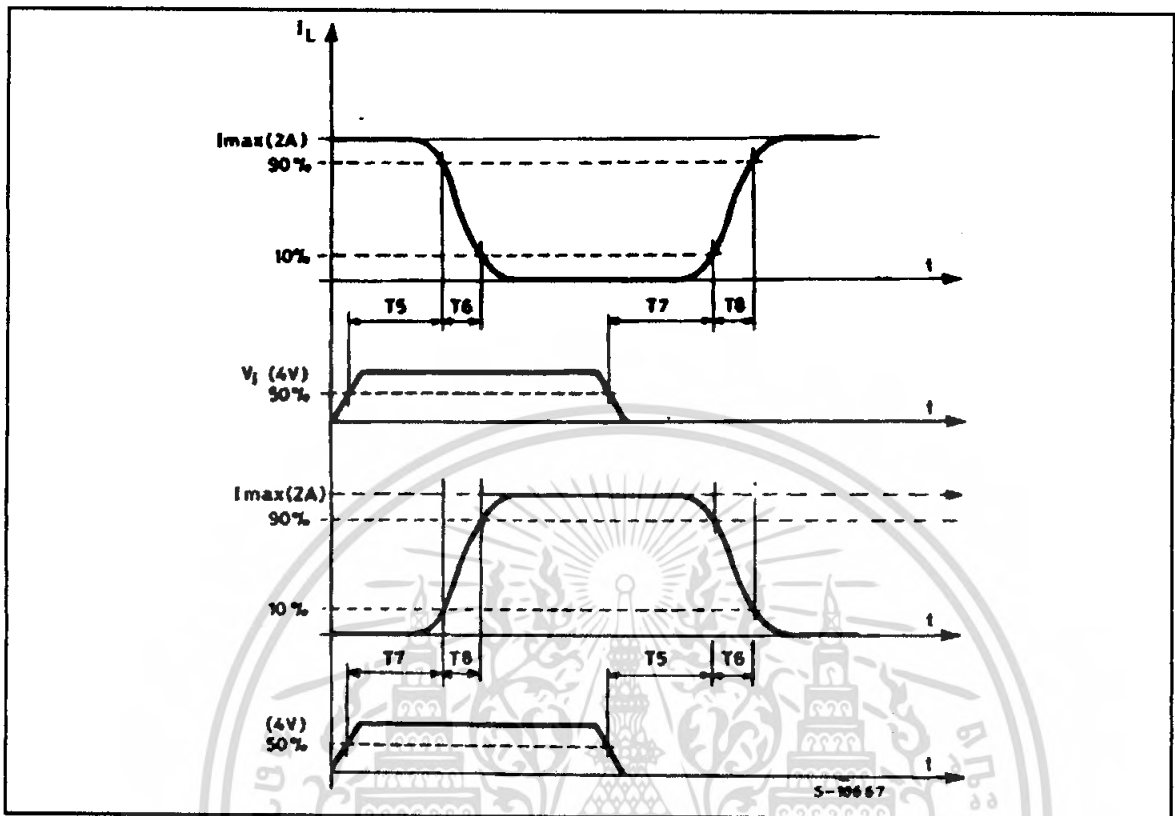


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.

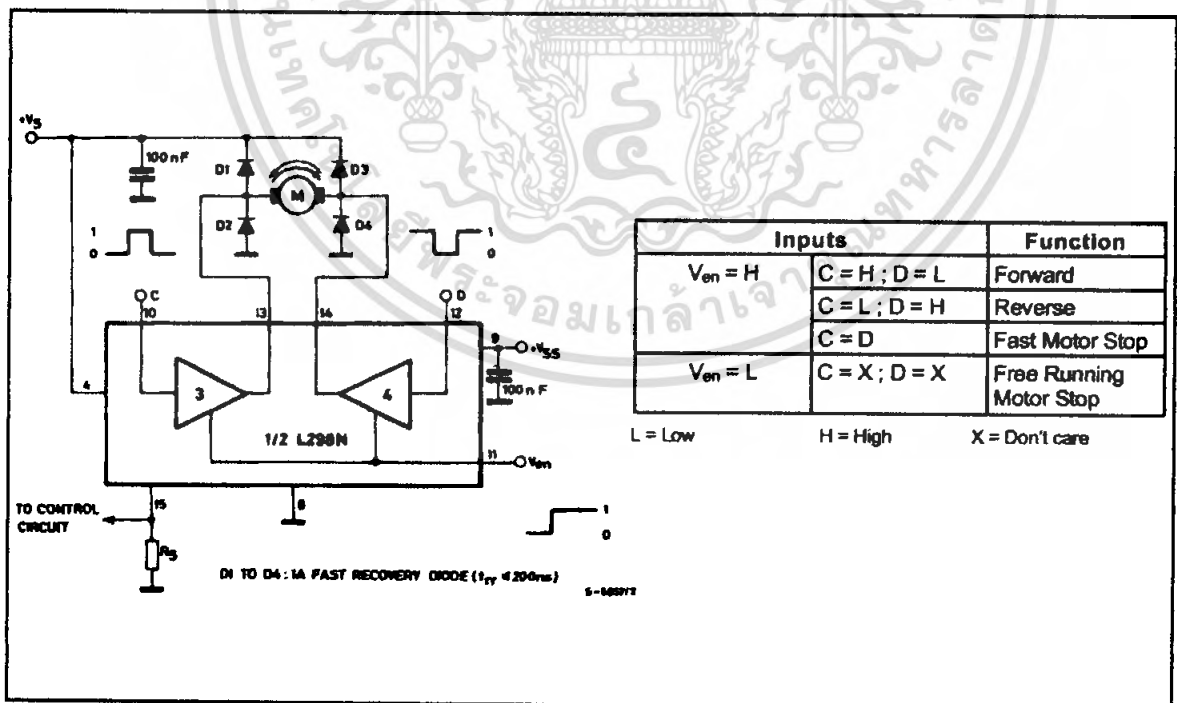
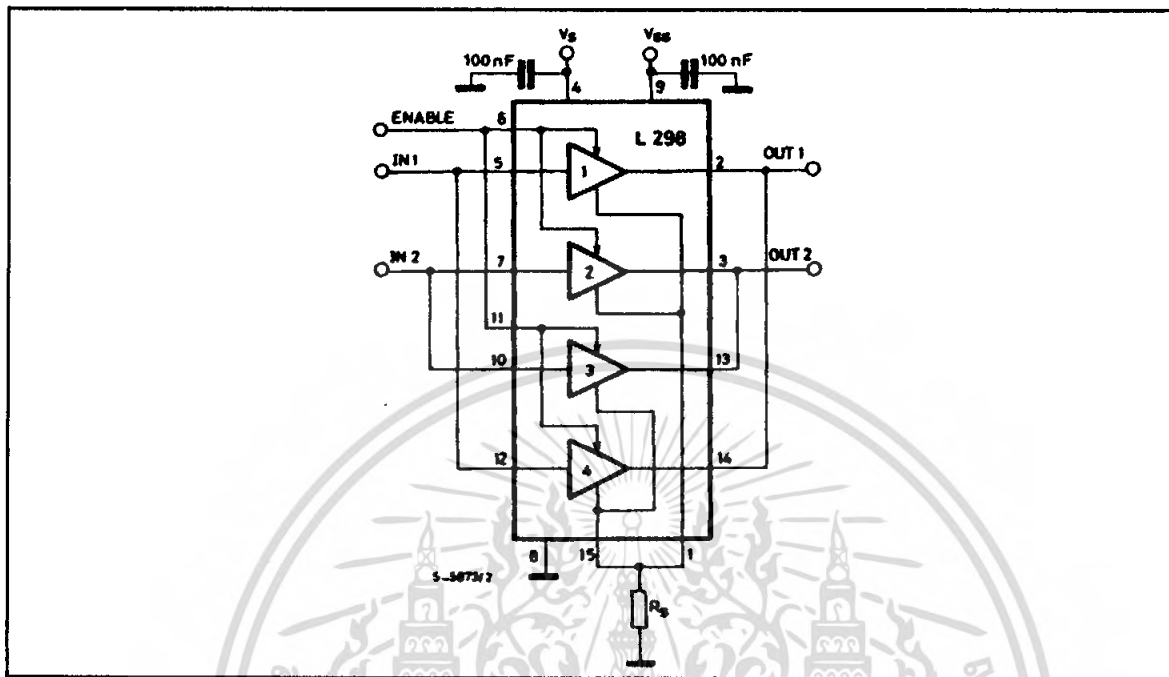


Figure 7 : For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



## APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

### 1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A ; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output : an external resistor ( $R_{SA}$  ;  $R_{SB}$ .) allows to detect the intensity of this current.

### 1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are In1 ; In2 ; EnA and In3 ; In4 ; EnB. The In inputs set the bridge state when The En input is high ; a low state of the En input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

## 2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both  $V_s$  and  $V_{ss}$ , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of  $V_s$  that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off : Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

## 3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ( $t_{rr} \leq 200$  nsec) that must be chosen of a VF as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped ; Schottky diodes would be preferred.