

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

หุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติ

**BALANCING ROBOT**



T119379

นางสาวเสาวนิตย์

หิมไบ

นางสาวอัจฉริยา

ทับทิมไสย

นางสาวอรทัย

จวงเงิน

นายโอพาร

ลักษณะยั่งยืน

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 119379  
วัน,เดือน,ปี.- 7.S.A. 2554

b. 119379  
i. ....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# BALANCING ROBOT

Saowanit

Heembai

Atchariya

Tubtimsai

Orrathai

Chuangngern

Olan

Laksanayingyong



**THIS THESIS IS SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF**

**BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติ

BALANCING ROBOT

ผู้จัดทำ นางสาวเสาวนิตย์ หีมใบ  
นางสาวอัจฉริยา ทับทิมไสย  
นางสาวอรทัย จวงเงิน  
นายโอฬาร ลักษณะยิ่งยง



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ทัตยา ปุคคละนนท์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# หุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติ

โดย

นางสาวเสาวนิตย์	หิมโบ
นางสาวอัจฉริยา	ทับทิมไสย
นางสาวอรทัย	จวงเงิน
นายโอฬาร	ลักษณะยิ่งยง

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ทัตยา ปุคละนนท์

ปีการศึกษา 2553

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการศึกษาการควบคุมหุ่นยนต์สองล้อให้สมดุลอยู่ได้ด้วยตัวเองนั้น ใช้หลักการของ การควบคุมลูกตุ้มหัวกลับ(Inverted pendulum) ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพในตัวเอง ให้สามารถรักษาเสถียรภาพอยู่ได้ การควบคุมเสถียรภาพนับเป็นพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบควบคุมอื่นๆ ที่ต้องการเสถียรภาพมากขึ้น เช่น ระบบควบคุมหุ่นยนต์ เฮลิคอปเตอร์และเครื่องบิน เป็นต้น การควบคุมหุ่นยนต์สองล้อใช้การควบคุมป้อนกลับ ( Feedback Control) มาทำการควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์และมุมที่ตัวของหุ่นยนต์ที่เบี่ยงเบนไปจากแนวตั้ง โดยทำการป้อนแรงควบคุมผ่านทาง ดีซีมอเตอร์ (DC Motor) พร้อมทั้งทำการวัดค่าตัวแปร แล้วนำไปคูณกับค่าคงที่ป้อนกลับ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อส่งสัญญาณ Pulse width modulation (PWM) ที่เหมาะสมให้กับ ดีซีมอเตอร์เวลาต่าง ซึ่งค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ส่งให้ดีซีมอเตอร์นี้ คือ การควบคุมแรงของ ดีซีมอเตอร์นั่นเอง การทดสอบเพื่อควบคุมหุ่นยนต์นี้ คือ หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลด้วยตัวเองได้เมื่อส่งค่าคงที่ป้อนกลับ แสดงที่เหมาะสม สมรวมถึงสามารถ ควบคุมตำแหน่งของล้อของหุ่นยนต์ได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# BALANCING ROBOT

By

Miss.Saowanit Heembai

Miss.Atchariya Tubtimsai

Miss.Orrathai Chuangngern

Mr.Olan Laksanayingyong

Advisor

Asst.Prof.Dr.Tattaya Pukkalanun

Academic Year 2010

## Abstract

The focus of this dissertation is in the area of controlling balanced two wheels robot by using invert pendulum. The process is control invert pendulum which unstable to be stable, that can be applied to another control system such as control system helicopter aircraft. Control two wheeled robot use feedback systems to control position and the angle of the robot which deviate from the vertical by in put control through dc motor and measure the variable then multiply which constant feedback and using microcontroller to sent PWM to dc motor at difference time the width of the signal that sent to dc motor. Is power control of dc motor result of is study can maintain by itself. When sending appropriate constant state feedback , including controlling position of the robot wheels to make robot can turn in different direction to needed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อ.ทัตยา เป็นอย่างสูง ที่คอยแนะนำให้คำปรึกษาแนะนำวิธีแก้ไขปัญหาต่างๆ ในโครงการทั้งทางทฤษฎี และทางปฏิบัติแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้ผู้จัดทำเข้าใจที่มาของปัญหา และสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างถูกวิธี รวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่นๆ ที่เป็นประโยชน์แก่โครงการ

ขอขอบพระคุณ พระคุณภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการ ทำวิจัย จนผู้จัดทำสามารถทำปริญญานิพนธ์นี้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณ เพื่อนและรุ่นพี่ทุกคนที่ให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้ง คอยตามไล่ความคืบหน้าของโครงการตลอดจนคอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจอยู่เสมอ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ทำให้โครงการนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้

### คณะผู้จัดทำ

นางสาวเสาวนิตย์ หีมใบ

นางสาวอัจฉริยา ทับทิมไสย

นางสาวอรทัย จวงเงิน

นายโอฬาร ลักษณะยิ่งยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริิญญานิพนธ์	2
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ	2
1.4 รายละเอียดของปริิญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน	4
2.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์	4
2.1.1 เซนเซอร์ ใจ โดส โคป	4
2.1.2 เซนเซอร์ Accelerometer	5
2.2 Microcontroller	6
2.2.1 Dspic30F4011	6
2.2.2 หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วืทมอดูเลชัน	9
2.3 คาร์เมนฟิลเตอร์	11
2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ DC Motor	13
2.5 การควบคุมการหมุนของ DC Motor	14
2.6 ระบบควบคุม	16
2.7 ระบบควบคุมป้อนกลับ(Feedback Control System)	18
2.8 การเลือกและปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุม	20
2.9 การแปลงสัญญาณอนาล็อก – ดิจิตอล (Analog to Digital Converter)	22
2.10 Pulse Width Modulation	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง</b>	<b>26</b>
3.1 การออกแบบวงจร	26
3.2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	27
3.2.1 การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์	27
3.3 วงจรเซนเซอร์	29
3.3.1 ไจโรสโคป	29
3.3.2 วงจรเซนเซอร์วัดความเร็ว	29
3.4 วงจรลดแรงดัน 3.3 โวลต์	30
3.5 วงจรลดแรงดัน 5 โวลต์	30
3.6 วงจรขับมอเตอร์	31
3.6.1 การทำงานของวงจรถับมอเตอร์	32
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>33</b>
4.1 การทดลองการทำงานของไจโรสโคป	33
4.2 การทดลองการทำงานของ Accelerometer	34
4.3 การทดลองการรวมสัญญาณของไจโรสโคปและ Accelerometer ด้วยคาร์มันพีวเตอร์	35
4.4 การทดสอบหาค่าระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์	36
<b>บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ปัญหา</b>	<b>41</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	41
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	41
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ	42
<b>ภาคผนวก</b>	
โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ ภาษาซี	44
โปรแกรมออกแบบคาร์แมนพีวเตอร์	48
เอกสารคู่มือการใช้งาน LISY300AL	51
เอกสารคู่มือการใช้งาน MMA7260Q	64
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>72</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เซนเซอร์ไจโรสโคป LISY300AL	5
2.2 เซนเซอร์ Accelerometer MMA726Q	6
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ DSPIC30F4011	6
2.4 แผนภาพของไมโครคอนโทรลเลอร์ DSPIC30F4011	8
2.5 แผนภาพของโมดูล MC PWM	10
2.6 แสดง DC Motor แบ่งตามลักษณะของการกระตุ้น	13
2.7 Motor Equivalent Circuit	13
2.8 แสดงวงจร H-Bridge Swiching Transistor	14
2.9 แสดงวงจร H-Bridge Swiching Transistor เมื่อ $Q_1$ และ $Q_3$ ทำงาน	15
2.10 แสดงวงจร H-Bridge Swiching Transistor เมื่อ $Q_2$ และ $Q_4$ ทำงาน	16
2.11 การควบคุม	17
2.12 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	19
2.13 ระบบควบคุมหลายตัวแปร	19
2.14 การทำงาน Analog To Digital Converter	23
2.14 แสดงลักษณะความกว้างของสัญญาณพัลส์จาก PWM หลักการของ Pulse Width Modulation	24
2.15 แสดงการควบคุมลักษณะ Pulse Width Modulation	25
3.1 การเชื่อมต่อวงจร	26
3.2 วงจรบอร์ดคู่มือ ET-BASE dsPIC30F4011	27
3.3 โฟรเวิร์ตการทำงานโปรแกรม	28
3.4 วงจรเซนเซอร์ไจโรสโคป	29
3.5 วงจรเซนเซอร์วัดความเร็ว	29
3.6 วงจรลดแรงดัน 3.3 โวลต์	30
3.7 วงจรจ่ายแรงดัน 5 โวลต์	30
3.8 อุปกรณ์ในบอร์ด zx motor 298	31
4.1 ผลการทดสอบ Gyroscope อยู่ที่	33
4.2 ผลการทดสอบ Gyroscope ขณะเคลื่อนที่ไปมา	34
4.3 ผลการทดสอบ Accelerometer (ก)ขณะเซนเซอร์เอียง(ข)ขณะเซนเซอร์ตั้งฉากกับพื้นโลก	34
4.4 ทดลองการรวมสัญญาณของ Gyrometer และ Accelerometer ด้วยค่ามันพีวเตอร์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
4.5 การเบิร์น	40
4.6 หุ่นยนต์รักษาสมดุล	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่าง ๆ	21
4.1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์	37
4.2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

หุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติมีความน่าสนใจในการควบคุมเนื่องจากเป็นระบบแบบไม่เสถียรภาพ (Unstable system) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์ต่างๆที่น่าสนใจ เช่น รถ Segway ซึ่งเป็นยานพาหนะที่สามารถให้คนขึ้นไปยืนและเคลื่อนที่ได้โดยที่มีความคล่องตัวสูงและใช้พื้นที่ในการเคลื่อนที่น้อยกว่ายานพาหนะที่มีลักษณะมากกว่าสองล้อขึ้นไปทางผู้จัดทำโครงการจึงได้พัฒนาหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ รถ Segway ขึ้นมาคือ หุ่นยนต์รักษาการทรงตัวอัตโนมัติ ซึ่งโดยทั่วไปหุ่นยนต์ในลักษณะเช่นนี้มักถูกเรียกว่า Two Wheel Balancing Robot ซึ่งใช้หลักการออกแบบและการควบคุมที่คล้ายกันกับระบบ Inverted pendulum ซึ่งเป็นระบบหนึ่งที่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีข้อดีหลายอย่าง เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของคุณลักษณะของระบบ เป็นกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพ ออกแบบขึ้นมาในรูปแบบการรักษาสมดุลของของก้านเพนดูลัม และในรูปแบบของการทรงตัวบนล้อสองล้อ ควบคุมการทรงตัวโดยใช้ Gyroscope และ Accelerometer ในการวัดค่ามุมของแกนหุ่นยนต์และใช้เอนโคเดอร์ในการวัดตำแหน่งของเพลามอเตอร์

ดังนั้นดังนั้นในโครงการนี้จึงเป็นการพัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถรักษาสมดุลด้วยตัวเองได้อัตโนมัติโดยใช้ผลการ Simulation ของระบบควบคุมเพื่อดูแนวโน้มของตัวหุ่นยนต์ที่สร้างนั้นว่าสามารถรักษาสมดุลด้วยตัวเองได้และสามารถควบคุมตำแหน่งของล้อทั้งสองข้างให้เป็นอิสระต่อกัน เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งควบคุมด้วย PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงพอสมควร ใช้ Gyroscope เบอร์ LIS300AL ทำหน้าที่ในการวัดความเร็วเชิงมุม และใช้ accelerometer เบอร์ MMA7260Q ในการวัดความเร่ง นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ Kalman Filter ในการรวมสัญญาณของ Gyroscope และ Accelerometer .ในส่วนของโปรแกรมการทำงานของหุ่นยนต์จะจำลองการทำงานใน MATLAB ก่อนที่จะทำการเขียนโปรแกรมจริงด้วยภาษา C ในโปรแกรม MPLAB เพื่อโปรแกรมการทำงานให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าและรวมค่าของเซนเซอร์ทั้งสองตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบควบคุมหุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติโดยใช้หลักการอินเวอร์ทเพนดูลัมให้หุ่นรักษาสมดุลอยู่ได้โดยไม่ล้ม
2. ออกแบบตัวควบคุมและนำไปควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมได้ตามวัตถุประสงค์
3. ศึกษาหลักการพื้นฐานของหุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติ
4. ศึกษาเพื่อพัฒนารักษาสมดุลและเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วของหุ่นยนต์โดยไม่ต้องใช้ล้อ

## 1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ

1. ศึกษาระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัม และอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการจัดทำโครงการ เช่น เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เซนเซอร์วัดความเร่ง เป็นต้น
2. ศึกษารูปแบบและวงจรที่ใช้ในโครงการ
3. ศึกษาเทคนิคใหม่ๆ ที่เข้ามาช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เช่น คาร์แมนฟิวเตอร์ เป็นต้น
4. สร้างรูปแบบการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
5. ออกแบบโครงสร้างและการเลือกใช้อุปกรณ์
6. ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยเป็นการออกแบบวงจรในส่วนของวงจรเซ็นเซอร์ซึ่งออกแบบโดยอ้างอิงจาก data sheet ที่ทางผู้ผลิตให้มา
7. ออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่ออกมาจาก Gyroscope ให้มีขนาดเหมาะสมกับอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์
8. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์
9. แปลงสัญญาณอนาล็อกที่อ่านได้จากเซนเซอร์ Gyroscope เป็นดิจิทัล เพื่อที่จะได้นำค่าไปใช้ในการคำนวณต่อไป
10. ประยุกต์ใช้แคลคูลัสพีดีในการรวมสัญญาณของ Gyroscope และ Accelerometer
11. ควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้ PWM
12. บันทึกผลการทดสอบการทำงานของ Gyroscope Accelerometer และการรวมสัญญาณด้วยแคลคูลัสพีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 รายละเอียดของปฏิญานิพนธ์

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งครอบคลุมเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการศึกษา และการจัดทำโครงการ พร้อมด้วยรายละเอียดโดยย่อของปฏิญานิพนธ์ของแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์อินเวอร์ทแพนควิลัม ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุม คาร์แมนฟิลเตอร์หลักการการทำงานของ เซนเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

บทที่ 3 หลักการออกแบบ กล่าวถึงการออกแบบ โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติ การออกแบบวงจร และการออกแบบตัวควบคุม

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง เช่น การปรับค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ การออกแบบตัวควบคุม Pic การออกแบบควบคุมระบบป้อนกลับ การทดสอบเซนเซอร์ Gyroscope และ Accelerometer การออกแบบวงจร การออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป นำเสนอปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง และแนวทางการพัฒนาโครงการในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

### 2.1 หลักการทำงานของเซนเซอร์

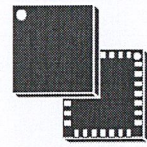
ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รักษาสมดุลให้ได้ตามต้องการนั้น การควบคุมที่เป็นสิ่งสำคัญที่สุดคือ การควบคุมการหมุนของมอเตอร์ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่ต้องการทิศทางที่ถูกต้อง ซึ่งการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เป็นการควบคุมแบบดิจิทัลซึ่งได้จากการเขียนโปรแกรมในMPLAB C30 เพื่อใช้คอนโทรลเลอร์คือ dsPIC30F4011 เป็นตัวควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ผ่านบอร์ดไดร์ฟมอเตอร์ zx motor298 และทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์วัดความเร็ว เช่น เซ็นเซอร์วัดความเอียง ซึ่งจะทำการตรวจจับหรือวัดสัญญาณป้อนกลับค่ามุมแกว่งและตำแหน่งของหุ่นยนต์รักษาสมดุล

#### 2.1.1 เซนเซอร์ไจโรสโคป

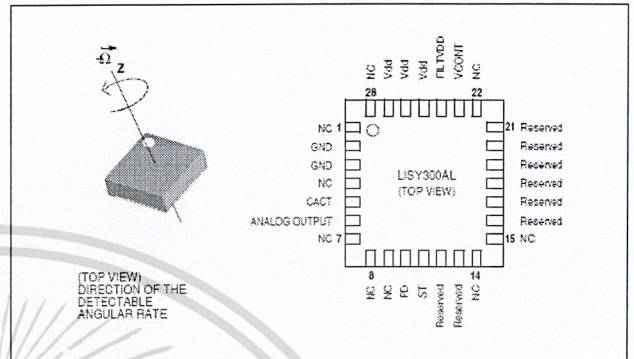
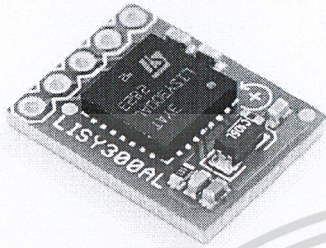
ทำหน้าที่ในการใช้วัดความเอียง ของหุ่นยนต์รักษาสมดุลขับเคลื่อนสองล้อ โดยความเอียงนั้นจะเปรียบเทียบกับพื้นโลก เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ออกมา ไปใช้ในการคำนวณรวม Accelerometer ในสมการของคามาานฟิลเตอร์ ซึ่งในการเลือกใช้ของเรานั้นได้เลือกเซนเซอร์ LISY300AL ซึ่งเป็นของ STMicroelectronics ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำงานที่แรงดันแหล่งจ่าย 2.7 V ถึง 3.6 V
- ใช้พลังงานต่ำ
- มีวงจร Low-pass ฟิลเตอร์ในตัว
- เอาท์พุทที่ได้เป็น Analog



LGA-28 (7x7x1.5mm)



### รูปที่ 2.1 เซนเซอร์ไจโรสโคป LISY300AL

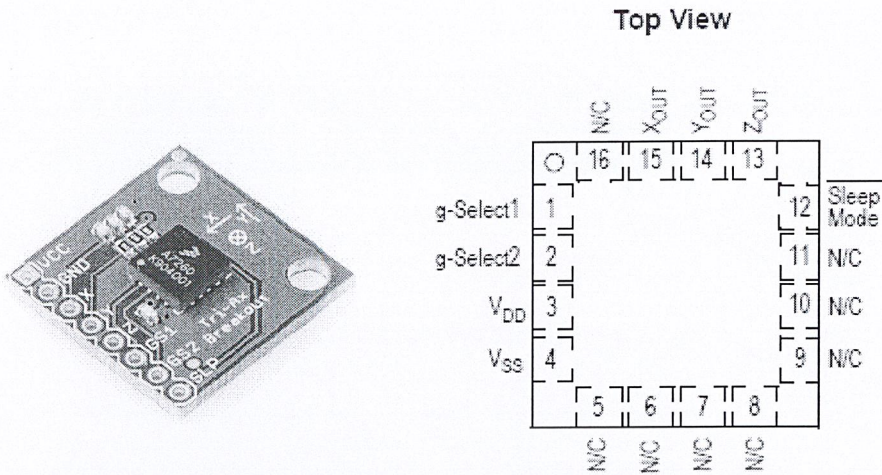
ซึ่งที่เรา เลือกใช้เซนเซอร์ตัวนี้เนื่องจากว่ามีขนาดเล็กเพียง 7x7x1.5 มิลลิเมตร มีการใช้งานที่ง่าย และได้ผลลัพธ์ที่ได้ออกมามีความละเอียดแต่เนื่องจากเอาท์พุทที่ออกมานั้นมาในลักษณะของสัญญาณอนาล็อกจึงต้องเปลี่ยนให้เป็นดิจิตอลด้วย

#### 2.1.2 เซนเซอร์ Accelerometer

ทำหน้าที่ในการวัดความเร่งที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาเวกเตอร์ทิศทางของความเร่ง วัดความโน้มเอียงและความสั่นสะเทือน จากความสามารถที่หลากหลายดังกล่าว จึงนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในการหามุมที่เปลี่ยนแปลงของหุ่นยนต์รักษาสมดุลขับเคลื่อนสองล้อ ซึ่งที่เราได้เลือกมาใช้นั้น จะเป็นเซนเซอร์ Accelerometer MMA 7260Q ของ Freescale Semiconductor ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- ทำงานที่แรงดันแหล่งจ่าย 2.2 V ถึง 3.6 V
- มีความไวสูง
- สัญญาณที่ออกมาผ่าน Low-pass filter
- Output ที่ออกมาเป็นสัญญาณอนาล็อก
- ราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

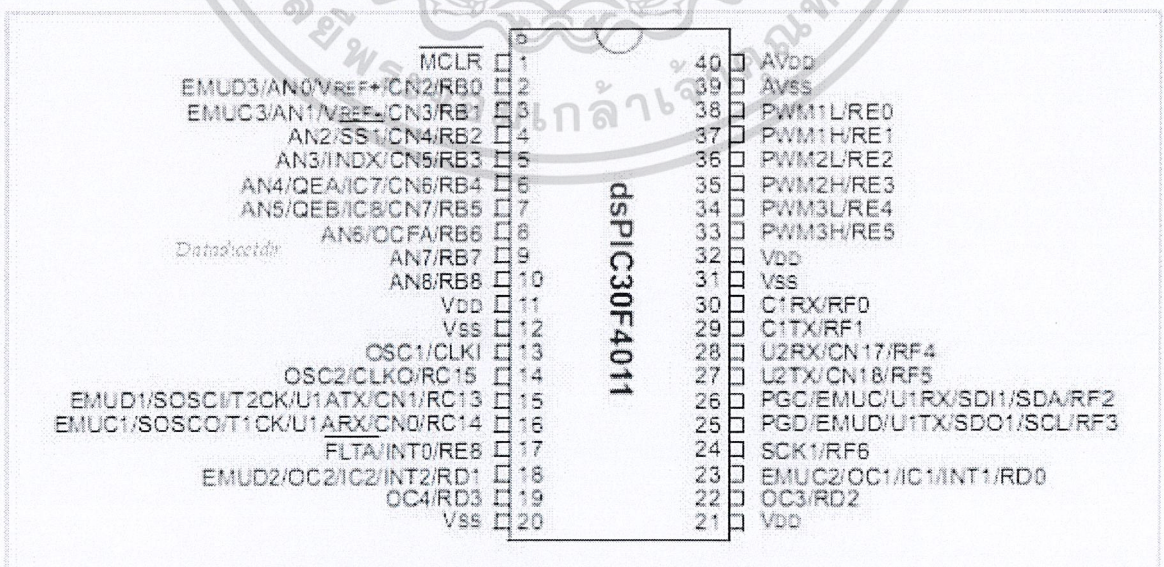


รูปที่ 2.2 เซนเซอร์ Accelerometer MMA 7260Q

## 2.2 Microcontroller

### 2.2.1 Dspic30F4011

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล dspic เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีการประมวลผลแบบ 16 บิต มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลแบบดิจิทัล สำหรับประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ โดยโครงสร้างภายในจะเป็นการผสมผสานระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรประมวลผลสัญญาณดิจิทัลรวมเข้าไว้ด้วยกัน

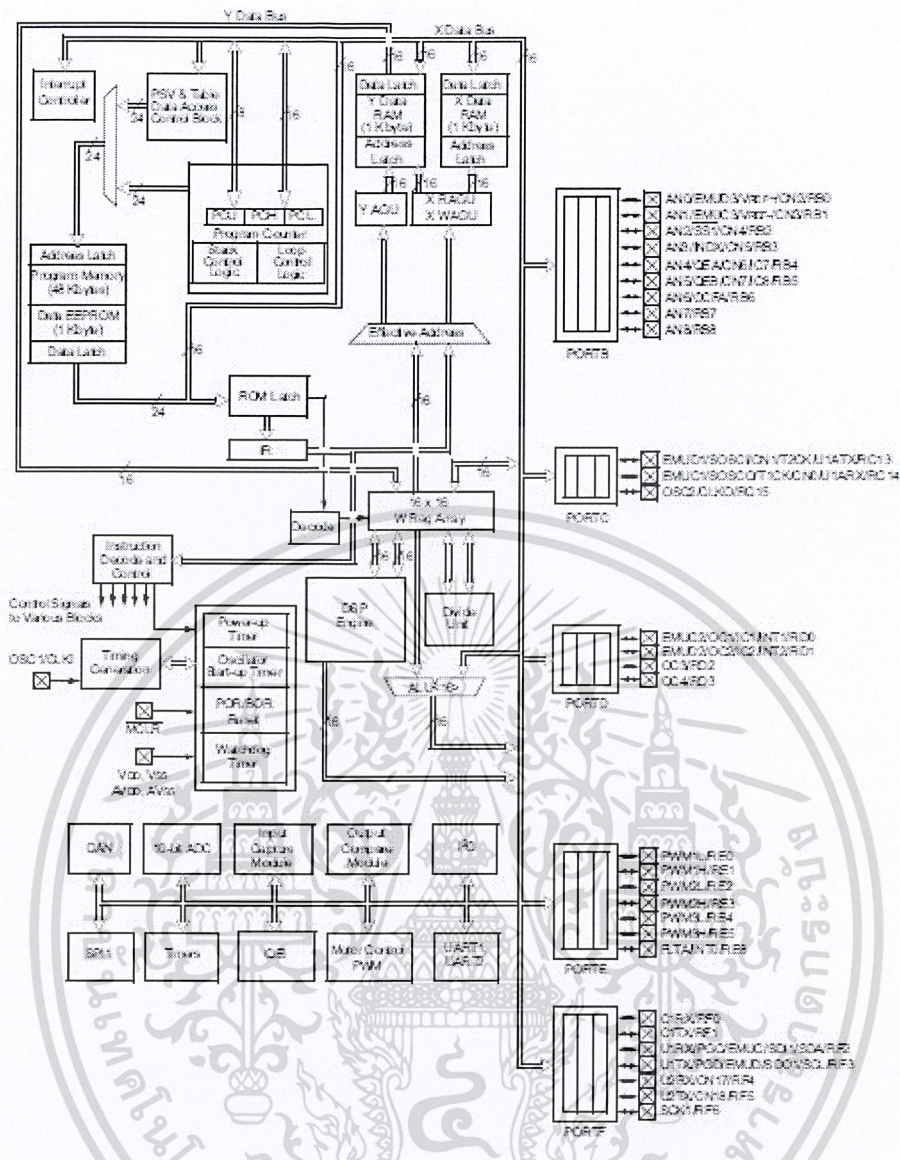


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ dspic30f4011 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คุณสมบัติด้านการประมวลผล

1. ใช้สถาปัตยกรรมแบบ risc โดยมี 83 คำสั่งมาตรฐาน รองรับการอ้างอิงตำแหน่ง แอดเดรสแบบต่างๆได้โดยอิสระ
2. ชุดคำสั่งมีขนาด 24 บิต และประมวลผลข้อมูลได้ 16 บิต
3. มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบแฟลช ขนาด 48 กิโลไบต์ โดยสามารถลบและโปรแกรมซ้ำใหม่ได้เป็นแสนครั้ง
4. มีหน่วยความจำแบบแรมขนาด 2 กิโลไบต์
5. มีหน่วยความจำข้อมูลแบบอีอีพรีออม ขนาด 1 กิโลไบต์ ซึ่งสามารถเก็บรักษาข้อมูลได้โดยไม่ต้องจ่ายไฟเลี้ยง
6. มีรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิตไว้ใช้งานจำนวน 16 ตัว
7. สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดประมาณล้านคำสั่งต่อวินาที
8. ยอมรับสัญญาณนาฬิกาภายนอกได้ตั้งแต่ย่านไฟตรงถึง 40 เมกะเฮิรตซ์
9. รองรับการใช้งานกับแหล่งกำเนิดความถี่แบบออสซิลเลเตอร์ค่า 4-10 เมกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แผนภาพของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011

10. มีวงจรความถี่ภายในแบบเฟสล็อกคูลูป โดยสามารถกำหนดค่าอัตราการคูณความถี่ได้ 3 ระดับ

11. รองรับการอินเตอร์รัปต์ได้ถึง 30 แห่ง พร้อมสัญญาณอินเตอร์รัปต์ภายนอก 3 แห่ง

12. มีอินเตอร์รัปต์เวกเตอร์ 48 ตำแหน่ง

13. มีวงจรไฟเลี้ยงต่ำกว่ากำหนดแบบโปรแกรมได้

14. มีพาวเวอร์อนรีเซ็ต พาวเวอร์อัพ ไทม์เมอร์ และออสซิลเลเตอร์สตาร์ทอัพ ไทม์เมอร์

15. มีวอตช์ดอก ไทม์เมอร์แบบโปรแกรมได้

16. มีวงจรถตรวจสอบการทำงานของวงกำเนิดสัญญาณนาฬิกา หากผิดพลาดจะเข้าสู่โหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สัญญาณ rc พลังงานต่ำทันที

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. รองรับโปรแกรมวงจรแบบอนุกรม
18. สามารถเลือกโหมดการใช้พลังงานได้
19. ย่านไฟเลี้ยง 2.5 ถึง 5.5 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 2.6 ถึง 44 มิลลิแอมป์ มีไฟเลี้ยง 5 โวลต์ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความเร็วของการทำงาน

## 2.2.2 หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชัน

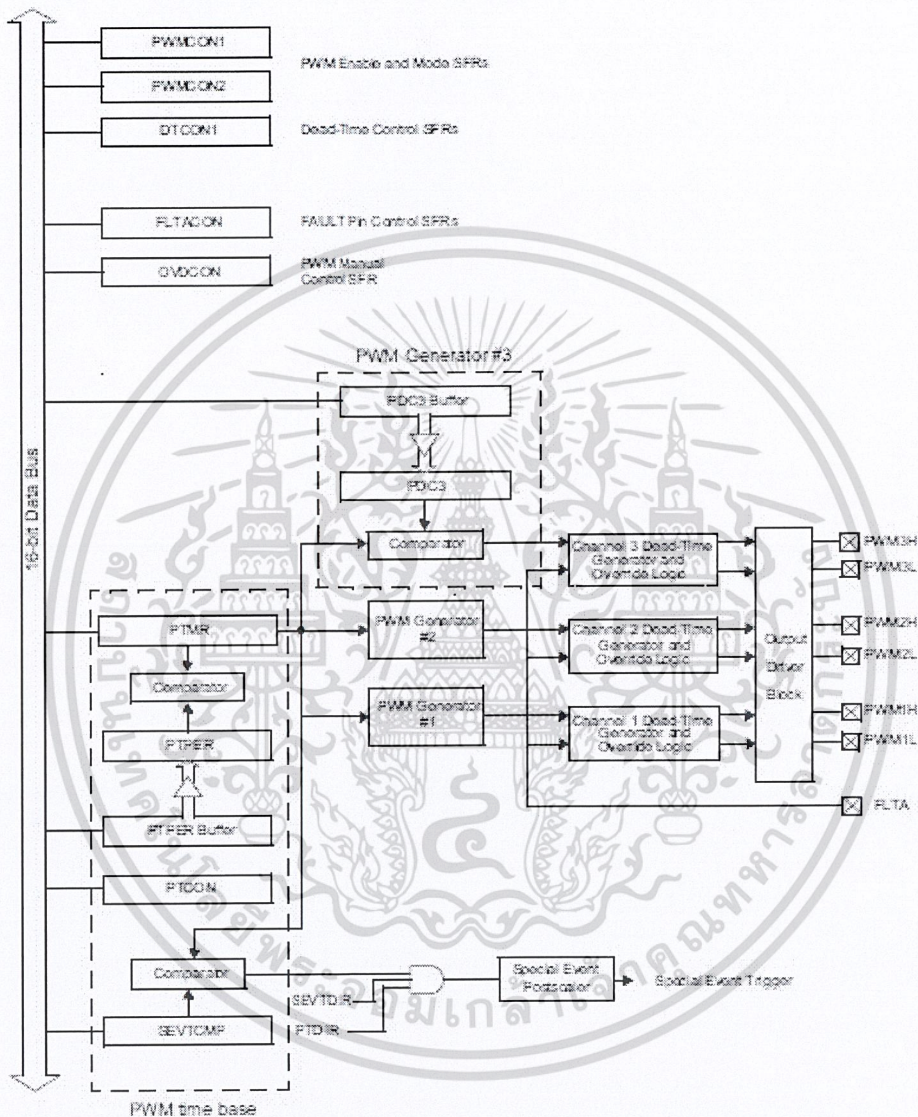
อีกหนึ่งหน่วยฟังก์ชันที่ใช้ในโครงการ คือหน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชัน ซึ่งใน dsPIC มีหน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชัน เพื่อควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะเรียกว่าหน่วย PWM ( Motor control PWM ) สำหรับ dsPIC30F4011 มีช่องใช้งาน 6 ช่อง จึงสามารถขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ 3 ตัว ซึ่งในโครงการนี้จะใช้เพียง 4 ช่องเท่านั้น สำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2 ตัว

ส่วนประกอบของหน่วยนี้คือส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชันซึ่งได้ค่าฐานเวลามาจากรีจิสเตอร์ PTMR และ PTPER ในหน่วย MCPWM นี้สามารถกำหนดค่าความกว้างพัลส์ หรือค่าดีวตีไซเคิล (Duty cycle) ในส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชัน แต่ละส่วนได้เป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดการทำงานของขาเอาต์พุตของหน่วย MCPWM โดยตรงผ่านทางรีจิสเตอร์ OVDCON สัญญาณที่ออกจากหน่วย MCPWM จะมีขาพอร์ต 2 ขาต่อช่องนั้นคือขาเอาต์พุตด้านแรงดันต่ำ PWMXL หรือเรียกว่าคู่เอาต์พุตฐานเวลาของสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชันของหน่วย MCPWM สามารถกำหนดให้ทำงานได้ 4 โหมด คือ

- โหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระ
- โหมดทำงานครั้งเดียว
- โหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่อง
- โหมดนับค่าขึ้นหรือลงอย่างต่อเนื่องพร้อมการอินเทอร์รัปต์เพื่อปรับปรุ่ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกโหมดทำได้โดยการกำหนดค่าที่บิต PTMOD1 และ PTMOD0 ซึ่งเป็นบิต 1 และ 0 ในรีจิสเตอร์ PTCON ซึ่งในโครงงานนี้จะเลือกใช้โหมดเปลี่ยนแปลงค่าอิสระ ในโหมดนี้ค่าฐานเวลาจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ PTER จากนั้นรีจิสเตอร์ PTMR จะรีเซ็ตและทำการนับค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องไปอีกตราบเท่าที่ บิต PTEN ยังคงมีค่าเป็น '1' อยู่



Note: Details of PWM Generator #1 and #2 not shown for clarity.

รูปที่ 2.5 แผนภาพของโมดูล MCPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนค่าความกว้างพัลส์ ของสัญญาณพัลส์วิท โมดูเลชัน ของหน่วย MCPWM กำหนดได้จากรีจิสเตอร์ PDC1 – PCD4 ซึ่งต่างก็มีบัพเฟอร์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเมื่อมีการปรับปรุงค่าของสัญญาณ PWM โดยค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณพัลส์วิท โมดูเลชัน จะถูกปรับปรุงค่าตามข้อมูลที่เขียนลงในรีจิสเตอร์ PDCX จากนั้นค่าจากรีจิสเตอร์ PDCX จะถูกส่งไปยังบัพเฟอร์เพื่อทำการเปรียบเทียบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในรีจิสเตอร์ PDCX เรียบร้อย ข้อมูลนั้นจึงถูกส่งไปยังบัพเฟอร์ข้อมูลนั้นจึงถูกส่งไปยังบัพเฟอร์เพื่อทำงานต่อไป ทำให้ไม่เกิดการติดขัดหรือเกิดความผิดพลาดในขณะที่เปลี่ยนค่าอิสระหรือ โหมดทำงานครั้งเดียว ความกว้างพัลส์ของสัญญาณพัลส์วิทโมดูเลชัน ถูกปรับปรุงเมื่อค่ารีจิสเตอร์ PTMR เท่ากับ PTPER และเมื่อรีจิสเตอร์ PTMR เกิดการรีเซตเป็น '0'

นอกจากนั้นในหน่วย MCPWM ยังมีความสามารถพิเศษอีกประการหนึ่ง คือ การป้องกันการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างพัลส์ ทำได้โดยกำหนด บิต UDIS ซึ่งเป็นบิต 2 ของรีจิสเตอร์ PWMCON2 ให้มีค่าเป็น '1'

## 2.3 คาร์แมนฟิลเตอร์

ในปี 1960 ได้มีการตีพิมพ์ผลงานของรูดอล์ฟ อีมีล คาร์แมน (Rudolf Emil Kalman) ที่นำเสนอวิธีการใหม่ในการแก้ปัญหาของตัวกรองเชิงเส้น และการประมาณ (Linear filtering and prediction problem) วิธีของคาร์แมนฟิลเตอร์ (Kalman filter) เป็นการหาสเตรตของระบบโดยทั่วไป สิ่งที่ต้องการทราบเมื่อต้องวิเคราะห์ระบบก็คือ ณ เวลานั้น ๆ ตัวแปรสเตรต ของระบบมีค่าเป็นอย่างไรและเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไร ซึ่งบ่อยครั้งในทางปฏิบัติ การหาค่าตัวแปรสเตรตของระบบไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะมีข้อจำกัดหลายปัจจัย เช่น ความไม่สมบูรณ์ของเซนเซอร์ที่ใช้งาน และความคลาดเคลื่อนในการวัด เป็นต้น คาร์แมนฟิลเตอร์จึงถูกคิดค้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยมีการนำคาร์แมนฟิลเตอร์มาใช้เป็นครั้งแรก ในการประมาณสเตรตให้กับระบบนำร่องของยาน อะพอลโล ที่โคจรรอบโลก ซึ่งปัจจุบัน คาร์แมนฟิลเตอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในศาสตร์ของการประสานข้อมูล (Data fusion) เพื่อใช้ประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์หลายประเภทร่วมกัน ภายใต้สัญญาณรบกวนจากหลายแหล่ง เพื่อนำมาใช้ในลักษณะเกื้อกูลซึ่งกันและกันเพื่อหาค่าประมาณของตัวแปรสเตรตของระบบที่ดีที่สุดในระบบหุ่นยนต์รักษาสมดุลสองล้อ นั้น ได้นำคาร์แมนฟิลเตอร์มาใช้ในการคำนวณร่วมกันของเซนเซอร์สองตัว คือ ไจโรสโคป และ Accelerometer ซึ่งเมื่อนำค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้งสองมาผ่านคาร์แมนฟิลเตอร์แล้วจะทำให้สามารถได้ค่าที่วัดได้อย่างถูกต้องและทำให้การรักษาสถิตของหุ่นยนต์ขึ้นหลักการประมวลผลของเซนเซอร์โดยใช้คาร์แมนฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาแบบจำลองปริภูมิสเตรตแบบดิคริตของระบบ จะได้สมการดังสมการที่

(2.3.1)

$$x_{(t_i+1)} = Fx(t_i) + Bu(t_i) + Gw(t_i) \quad (2.3.1)$$

โดย

F : เมตริกซ์ระบบของตัวแปรสเตรต  $x(t_i)$

B : เมตริกซ์ของสัญญาณรับเข้า  $u(t_i)$

G : เมตริกซ์ของสัญญาณรบกวนขาว (Gaussian white noise)  $w(t_i)$

$$Z(t_i) = Hx(t_i) + v(t_i) \quad (2.3.2)$$

สมการ(2)คือสมการการวัดของระบบที่เวลาดิคริตโดย

H : เมตริกซ์ของการวัด  $x(t_i)$

$v(t_i)$  : เวกเตอร์สัญญาณรบกวนขาวของการวัดจากสัญญาณรบกวน  $w(t_i)$

การประมาณสเตรตจะถูกปรับปรุงด้วยคาร์มานฟิลเตอร์ แสดงเป็นสมการได้ 3 สมการดังนี้

$$k(t_i) = P(t_i^-)HT[HP(t_i^-)HT + S_v(t_i)]^{-1} \quad (2.3.3)$$

$$\hat{x}(t_i^+) = \hat{x}(t_i^-) + k(t_i)[z_i(t_i) - H\hat{x}(t_i^-)] \quad (2.3.4)$$

$$P(t_i^+) = P(t_i^-) - k(t_i)HP(t_i^-) \quad (2.3.5)$$

โดย

$k(t_i)$  : อัตราขยายของคาร์มานฟิลเตอร์

H : เมตริกซ์ระบบของการวัด

$S_v(t_i)$  : เมตริกซ์โควาเรียนซ์ของ  $v(t_i)$  หรือสัญญาณรบกวนขาวของการวัด

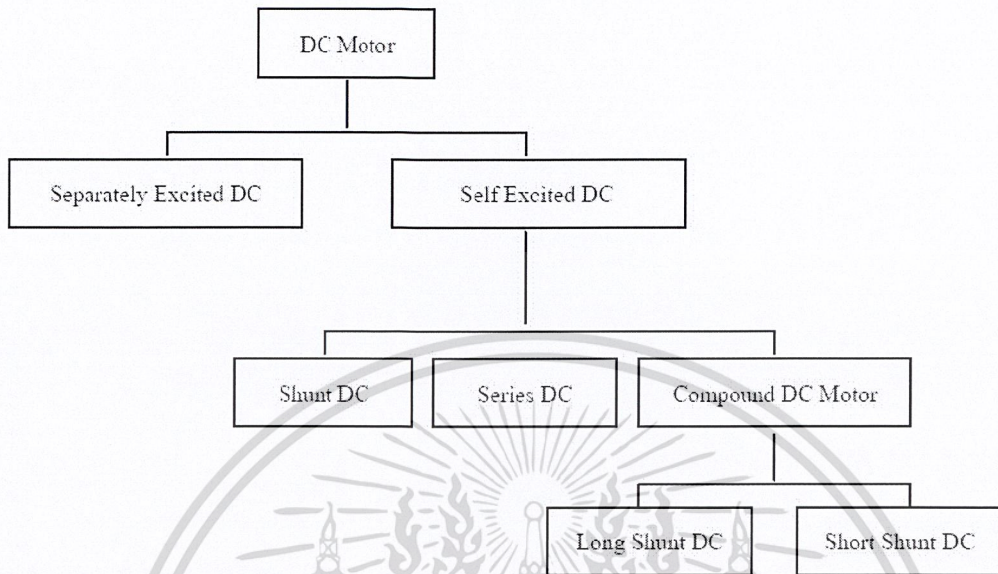
$\hat{x}(t_i^+)$  : เวกเตอร์สเตรตเริ่มต้นหลังประมาณของระบบ

$P(t_i^+), P(t_i^-)$  : เมตริกซ์โควาเรียนซ์หลังผ่านการประมาณสเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

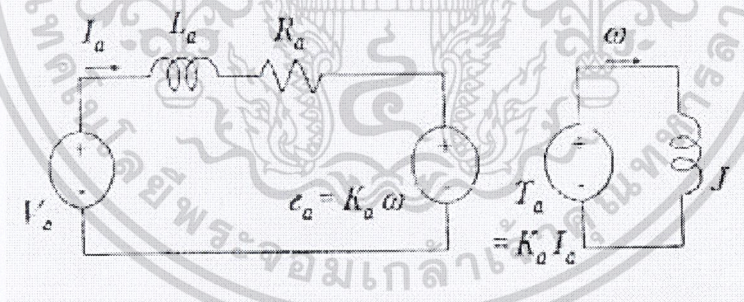
## 2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ DC Motor

DC Motor คือ เครื่องกำเนิดพลังงานที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยแบ่งตามลักษณะของการกระตุ้นได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดง DC Motor แบ่งตามลักษณะของการกระตุ้น

Motor Equivalent Circuit



รูปที่ 2.7 Motor Equivalent Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรเราจะได้สมการดังนี้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากการหมุน  $E_a = K_a \omega$  (2.4.1)

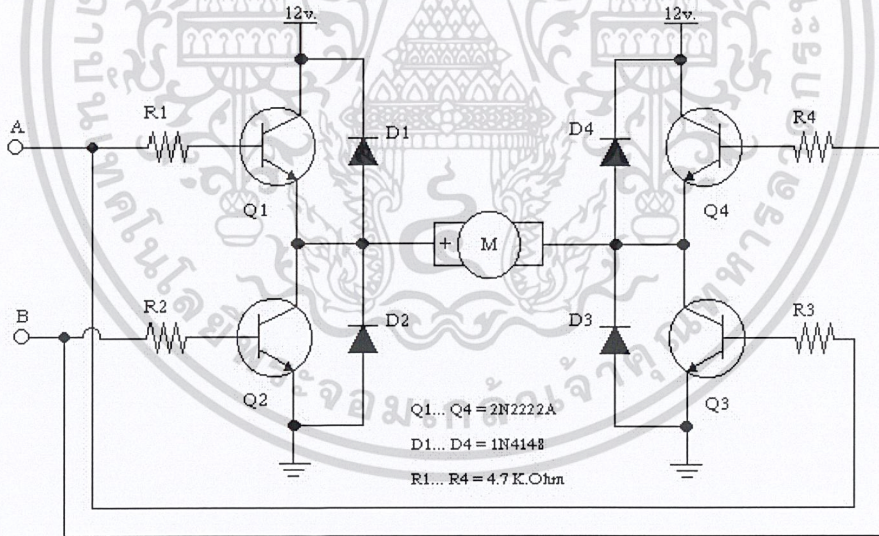
แรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในวงจร  $E_a = V_t - I_a R_a$  (2.4.2)

แรงบิดเนื่องจากกระแส  $T = K_a \Phi I_a$  (2.4.3)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลังไฟฟ้า  $T = 1000P/\omega$

### 2.5 การควบคุมการหมุนของ DC Motor

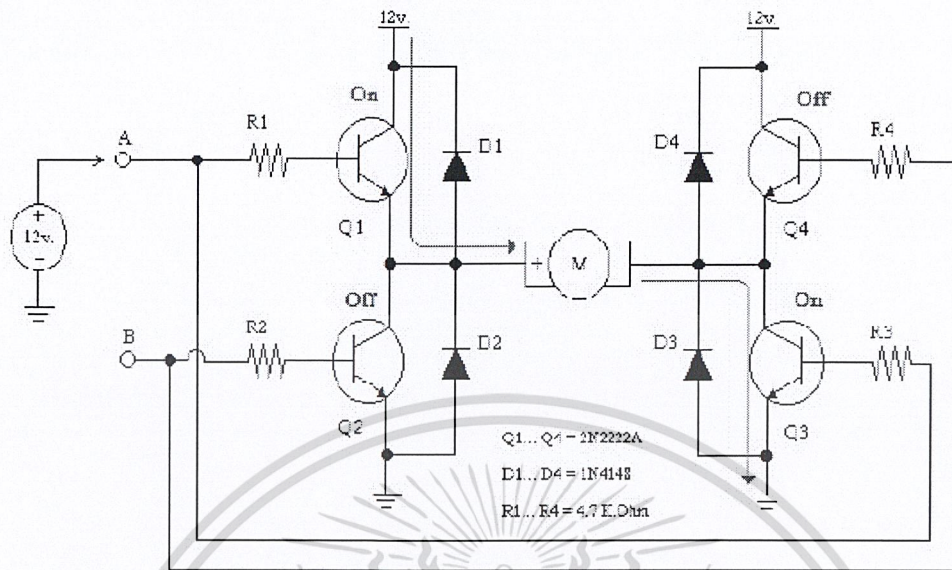
การควบคุมทิศทางการหมุนของ DC Motor โดยสร้างวงจร H-Bridge Switching Transistor วงจรในการควบคุมนี้ประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน และไดโอด ซึ่งสาเหตุที่เลือก ทรานซิสเตอร์เนื่องจากข้อดีที่สามารถตอบสนองจังหวะของการปิด/เปิดสวิตช์ได้นับล้านครั้งต่อวินาที (ความเร็วในการตอบสนองมีหน่วยเป็น ms) และที่สำคัญไม่ทำให้เกิดปัญหาการบวมจากสนามแม่เหล็ก โดยตัวต้านทานจะทำหน้าที่จำกัดกระแส  $I_b$  ส่วนไดโอดทำหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์ ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน



รูปที่ 2.8 แสดงวงจร H-Bridge Switching Transistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ Q1 และ Q3 ทำงาน

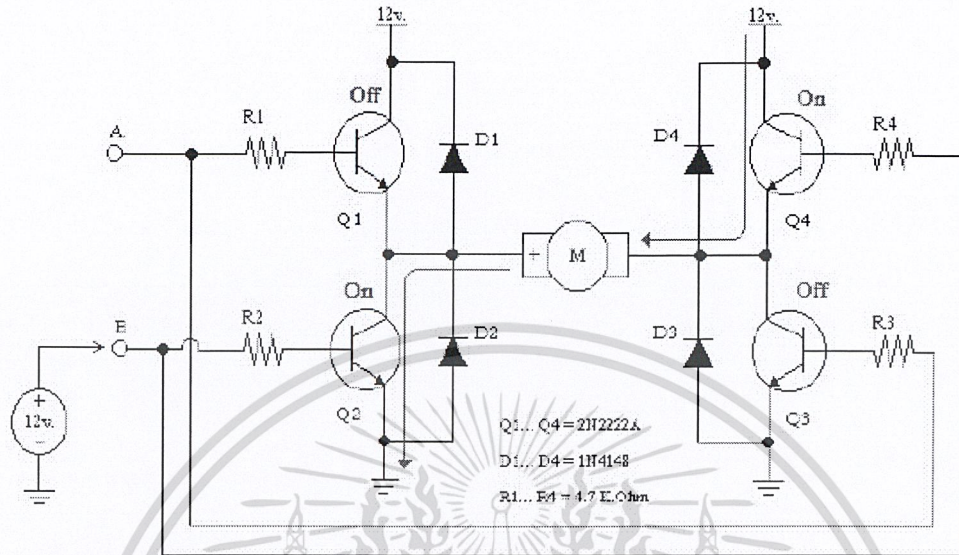


รูปที่ 2.9 แสดงวงจร H-Bridge Switching Transistor เมื่อ Q1 และ Q3 ทำงาน

เมื่อมีการจ่ายแรงดัน 12V เข้าที่จุด A ทำให้มีกระแสไหลผ่าน R1 เข้าสู่ base ของ Q1 และมีกระแสไหลผ่าน R3 เข้าสู่ base ของ Q3 ทำให้ Q1 และ Q3 ทำงาน (on) เปรียบเสมือน สวิตช์ปิดวงจร ส่งผลให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่าย 12V ผ่านขา Collector และ Emitter ของ Q1 ผ่านเข้าสู่ขั้วบวก (+) ของมอเตอร์ ผ่านไปยังขา Collector และ Emitter ของ Q3 ทำให้มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ในทิศทางบวก และครบวงจร จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนในทิศทาง Forward ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ Q2 และ Q4 ทำงาน



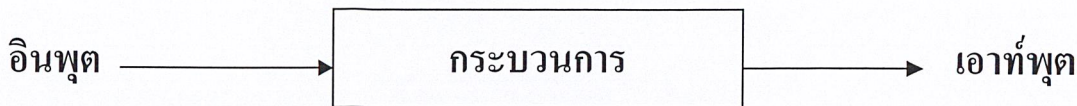
รูปที่ 2.10 แสดงวงจร H-Bridge Switching Transistor เมื่อ Q2 และ Q4 ทำงาน

เมื่อมีการจ่ายแรงดัน 12V เข้าที่จุด B ทำให้มีกระแสไหลผ่าน R2 เข้าสู่ base ของ Q2 และมีกระแสไหลผ่าน R4 เข้าสู่ base ของ Q4 ทำให้ Q2 และ Q4 ทำงาน (on) เปรียบเสมือน สวิตช์ปิดวงจร ส่งผลให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่าย 12V ผ่านขา Collector และ Emitter ของ Q4 ผ่านเข้าสู่ขั้วบวก (-) ของมอเตอร์ ผ่านไปยังขา Collector และ Emitter ของ Q2 ทำให้มีกระแสไหล ผ่านมอเตอร์ในทิศทางบวก และครบวงจร จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนในทิศทาง Reverse ได้

## 2.6 ระบบควบคุม (Control Systems)

ระบบควบคุม คือ การจัดการปริมาณหรือส่วนประกอบหลายๆส่วนที่สนใจต่อเชื่อมกันขึ้น เป็นระบบเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองตามที่เราต้องการหรือค่าที่ตั้งไว้ พื้นฐานของการวิเคราะห์ ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตหรือ การตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (process) ที่เราต้องการที่จะควบคุม สามารถ แทนด้วย บล็อก (block) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนอินพุตและเอาต์พุตของระบบมักจะแทนด้วย สัญญาณ โดยสัญญาณอินพุตจะเป็นส่วนสำคัญของผลลัพธ์หรือเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การควบคุมระบบ

ซึ่งคำจำกัดความของระบบควบคุมพื้นฐานมีดังนี้

1.สัญญาณด้านเข้า (Input) สัญญาณด้านเข้านั้นบางครั้งเราอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อินพุทอ้างอิง(Reference Input) หรือค่าที่ตั้งไว้ (Set Point) ซึ่งหมายถึงค่าหรือผลตอบสนองที่ต้องการของระบบที่ต้องการควบคุมที่กำหนดไว้ เช่น ต้องการควบคุมระยะห่างของรถไฟฟ้าที่ห่างจากกำแพง 15 เมตร

2.ตัวควบคุม (Controller) หมายถึงเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุม มีสัญญาณด้านออกหรือผลตอบสนองตามที่ต้องการโดยตัวควบคุมจะมีหลายแบบ เช่น ตัวควบคุมแบบ ON-OFF ตัวควบคุมชนิดพี (Proportional, P) ตัวควบคุมชนิดไอ (Integral, I) ตัวควบคุมชนิดดี (Derivative, D) เป็นต้น

3.กระบวนการ (Plant or Process) หมายถึงระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุม หรืออาจจะเป็นวัตถุทางกายภาพที่ถูกควบคุมก็ได้ เช่น กระบวนการในการควบคุมอุณหภูมิเตาเผา กระบวนการควบคุมระบบแขนกลในโรงงาน เป็นต้น

4.สัญญาณด้านออก ( output ) หมายถึงผลตอบสนองของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุม ซึ่งโดยทั่วไปแล้วต้องการจะควบคุมให้สัญญาณด้านออกมีค่าตามสัญญาณด้านเข้าที่กำหนด (หรือตามค่าของสัญญาณด้านเข้าที่เปลี่ยนแปลงไป) หรือมีค่าคงเดิมได้เมื่อมีการรบกวนทั้งภายในและภายนอกที่มากระทำต่อระบบควบคุม

5.การรบกวน ( disturbance ) หมายถึงสัญญาณรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบที่ถูกควบคุม สัญญาณรบกวนนี้อาจเกิดขึ้นที่จุดใดๆในระบบก็ได้ เช่นเกิดขึ้นที่กระบวนการ เกิดขึ้นที่อุปกรณ์วัด เป็นต้น การเกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนอาจเกิดขึ้นในเวลาใดๆทั้งที่คาดเดาได้และคาดเดาไม่ได้การรบกวนนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะการรบกวนภายใน (Internal Disturbance) ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการรบกวนจากภายนอก (External Disturbance) เป็นการรบกวนที่เกิดขึ้นจากภายนอกระบบ แต่มีผลต่อระบบที่กำลังควบคุมอยู่ โดยทั่วไปจะถือว่าการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณด้านเข้าหนึ่งที่ไม่พึงประสงค์ของระบบควบคุม

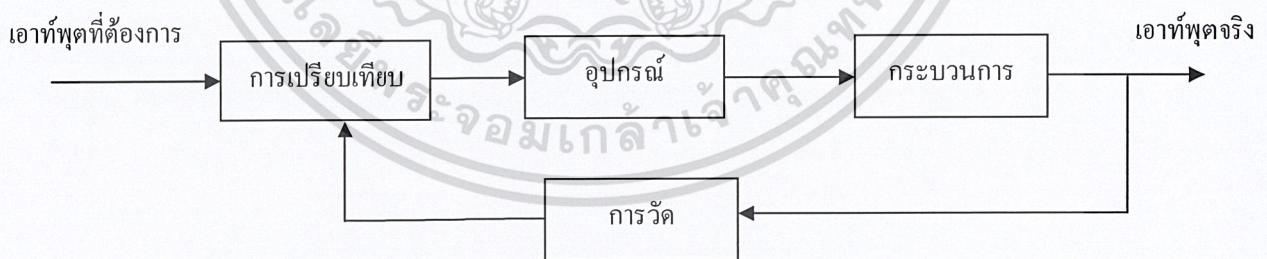
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments) หมายถึงอุปกรณ์ เช่น เซนเซอร์(Sensor) ทรานสดิวเซอร์(Transducer) หรืออุปกรณ์แปลง หรือวัดสัญญาณอื่นๆที่ทำหน้าที่วัดค่าของสัญญาณด้านนอกของระบบที่ถูกควบคุม

7. ระบบ (System) หมายถึงการนำเอาอุปกรณ์ต่างๆที่สามารถทำงานร่วมกันได้ มารวบรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้ทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งที่ต้องการ เช่น ระบบเชิงกล ระบบทางกายภาพของวงจรไฟฟ้า เป็นต้น

## 2.7 ระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control System)

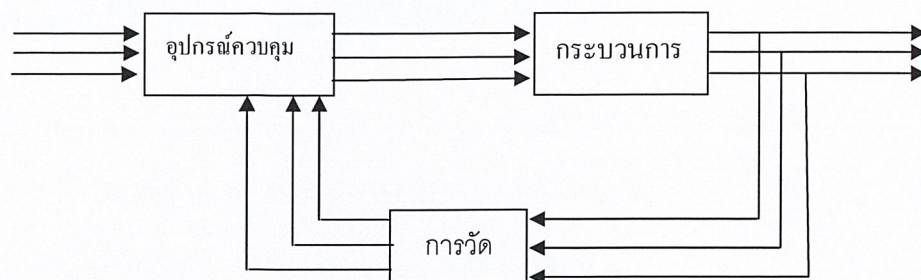
ระบบควบคุมป้อนกลับ หมายถึง ระบบควบคุมที่ต้องการควบคุมให้สัญญาณด้านนอกหรือผลตอบสนองของระบบมีค่าตามที่ต้องการ โดยมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการกลับเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบการที่เราจะทราบค่าเอาต์พุตได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาต์พุต เมื่อเราทราบค่าเอาต์พุตแล้ว เรามักจะนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการและเอาต์พุตที่แท้จริงจะได้รับการส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างของเอาต์พุตที่ต้องการ และเอาต์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็จะได้ว่า ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปแบบที่ 2.7 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.12 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้นอาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่เอกลักษณะอันหนึ่งอันหนึ่งซึ่งมีเพียงหนึ่งเดียวเท่านั้น และโดยผู้ที่จะวัดค่าของระบบนั้นสามารถทำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากเอาต์พุต และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรตัวนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.13



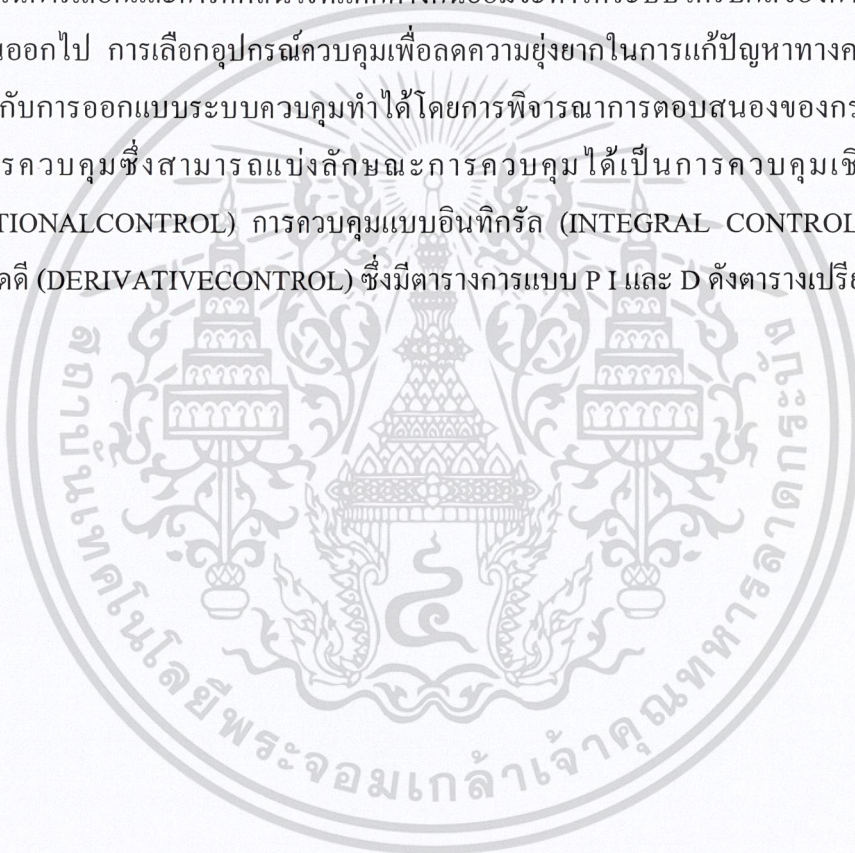
รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมหลายตัวแปร

ตัวอย่างของระบบควบคุมแบบเปิดที่เราเห็นกันทั่วไปในชีวิตประจำวันก็เช่น พัดลมไฟฟ้าที่เราใช้กันทั่วไป เราเลือกความแรงของพัดลมแล้วเราจะได้เอาต์พุตออกมาโดยที่ไม่มีการตรวจสอบหรือตรวจวัดค่าใดๆ ในทำนองกลับกันเครื่องปรับอากาศจะมีการตรวจสอบว่าอุณหภูมิของห้องเป็นเท่าใดเพื่อที่จะตรวจสอบว่าระบบปรับอากาศควรจะทำงานหรือไม่ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะเป็นตัวอย่างของระบบควบคุมแบบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบเพื่อมีหน้าที่ในการพยายามควบคุมให้ระบบมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การเลือกและปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุม

การเลือกและปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมควรใช้หลักการเลือกและตัดสินใจอย่างไรเราจึงจะทราบว่าระบบการควบคุมให้ผลที่ดีและเหมาะสมกับกระบวนการมากที่สุด (optimum control) หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกและปรับแต่งอุปกรณ์ควบคุมมีหลายวิธี โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการควบคุมและการออกแบบ ตัวอย่างเช่น ต้องการลดค่าการตอบสนองสูงสุดของระบบควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด ต้องการลดค่าช่วงเวลาเข้าสู่สมดุล หรือเสถียรภาพให้สั้นที่สุด ต้องการลดค่าความคลาดเคลื่อนรวมในการควบคุมให้มีค่าน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งแน่นอนว่าการใช้หลักเกณฑ์ในการเลือกและการตัดสินใจที่แตกต่างกันย่อมจะทำให้ระบบได้รับผลของการควบคุมที่แตกต่างกันออกไป การเลือกอุปกรณ์ควบคุมเพื่อลดความยุ่งยากในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ และเหมาะสมกับการออกแบบระบบควบคุมทำได้โดยการพิจารณาการตอบสนองของกระบวนการจากผลการควบคุมซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการควบคุมได้เป็นการควบคุมเชิงสัดส่วน (PROPORTIONAL CONTROL) การควบคุมแบบอินทิกรัล (INTEGRAL CONTROL) และการควบคุมชนิดดี (DERIVATIVE CONTROL) ซึ่งมีตารางแบบ PI และ D ดังตารางเปรียบเทียบนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบการควบคุมแบบต่างๆ

การควบคุมแบบ P	การควบคุมแบบ I	การควบคุมแบบ D
-ทำให้ระบบการตอบสนองของตัวแปรเข้าสู่ระบบเร็วขึ้น	-ทำให้ระบบควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมแต่มีค่าการตอบสนองสูงสุดเกิดขึ้นทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมของกระบวนการในช่วงแรกมากกว่ากระบวนการเดิน	-การควบคุมแบบนี้จะส่งสัญญาณควบคุมเพื่อปรับสภาพการ ก่อนการคลาดเคลื่อนจริงจะเกิดขึ้นกับกระบวนการทำให้ระบบควบคุมมีผลดีกว่าการควบคุมแบบอื่น
-ทำให้ระบบการควบคุมมีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเสมอภายหลังการเปลี่ยนแปลงเป้าหมายของการควบคุมหรือการควบคุม	-ทำให้กระบวนการตอบสนองจากตัวแปรเข้าภายนอกช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิมและผลการตอบสนองมีการแกว่งเกิดขึ้นเสมอ	-การควบคุมแบบนี้จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพกระบวนการให้ดีขึ้น
ควบคุม	-การปรับค่า $K_p$ เพิ่มขึ้นในการควบคุมจะทำให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้นแต่มีการแกว่งเพิ่มขึ้น ทกให้เสถียรภาพลดลง	

#### พิจารณาการเลือกชนิดอุปกรณ์

- เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ P ถ้าการควบคุมกระบวนการนั้นไม่จำเป็นต้องได้ผลการควบคุมที่แม่นยำนัก โดยการปรับค่า  $K_p$  ของอุปกรณ์ควบคุมให้มีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในช่วงที่ยอมรับได้

- การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PD เมื่อเราเลือกใช้การควบคุมแบบ P นั้นจะมีปัญหาในเรื่องของการเกิด overshoot ดังนั้นการควบคุมแบบ D จะเข้ามาช่วยในการลดค่า overshoot นี้ทำให้ระบบมีการตอบสนองของตัวแปรเข้าสู่ระบบเร็วขึ้นและค่า overshoot มีค่าลดลง ทำให้เสถียรภาพของระบบดีขึ้น

- การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI ถ้าเราไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ P ได้

ทั้งนั้นเนื่องจากการควบคุมไม่ต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมเกิดขึ้นเลย

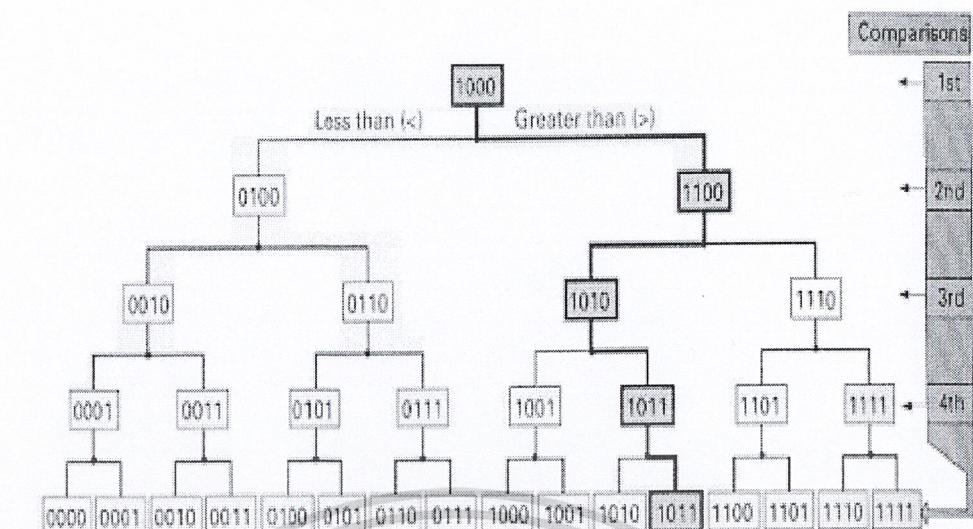
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของอาจารย์ ดร.สุวิทย์ ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID ถ้าไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PI นั้นแล้ว แม้ว่าจะไม่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมได้ก็จริงแต่การตอบสนองของกระบวนการจะช้าลง ซึ่งการเพิ่มความเร็วของการตอบสนองโดยการปรับค่า  $K_p$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการตอบสนองของระบบรวมมีการแกว่งเพิ่มขึ้นและเสถียรภาพลดลง ดังนั้นการใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ PID จะทำให้ผลของการควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเราสามารถปรับค่า  $K_p$  เพื่อให้กระบวนการตอบสนองเร็วขึ้นโดยเสถียรภาพของระบบยังคงเดิม

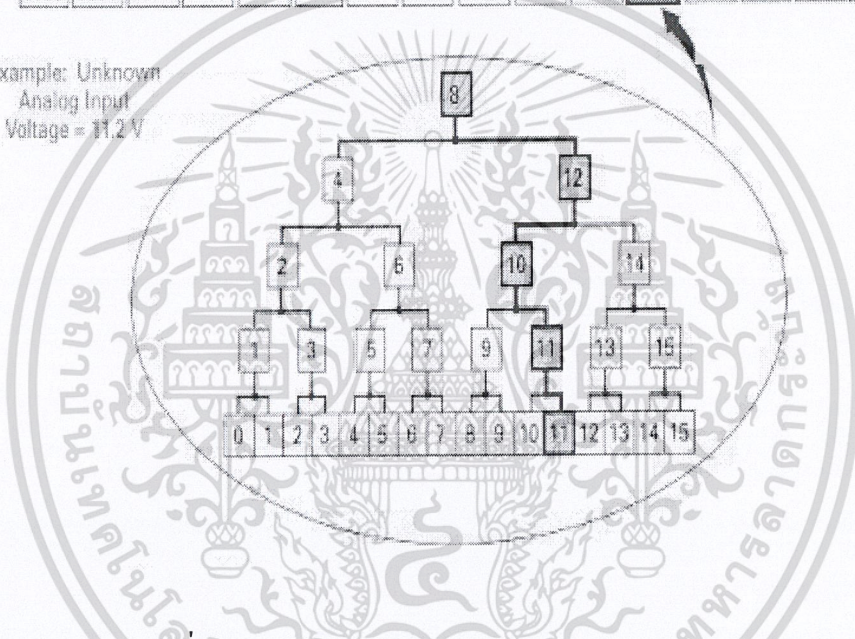
## 2.9 การแปลงสัญญาณอนาล็อก-ดิจิตอล (Analog to Digital Converter)

สัญญาณที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มี 2 ชนิด คือ สัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดิจิตอล สัญญาณอนาล็อกจะใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ไปและใช้ในการควบคุมแบบเก่าในปัจจุบันมีไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ เข้ามาช่วยในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย ซึ่งทำให้การควบคุมนั้นทำได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ในการควบคุมนั้นเราจำเป็นต้องใช้สัญญาณดิจิตอลในการติดต่อกับไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ในความเป็นจริงนั้นเราใช้สัญญาณอนาล็อกในการควบคุม ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล แล้วจึงนำสัญญาณนั้นเข้ามาสู่ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้ควบคุมระบบต่อไป Successive Approximation ใช้หลักการของ “binary search” ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยนำค่าผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับค่ากึ่งกลางของช่วงเพื่อทราบค่าว่า ค่านั้นมากกว่าหรือน้อยกว่า โดยจะปรับช่วงให้แคบลงมาเรื่อยๆ แล้วเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับค่ากึ่งกลางของช่วงไปเรื่อยๆ จนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ จากหลักการที่กล่าวมาอาจเขียน flow chart ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Example: Unknown  
Analog Input  
Voltage = 11.2 V



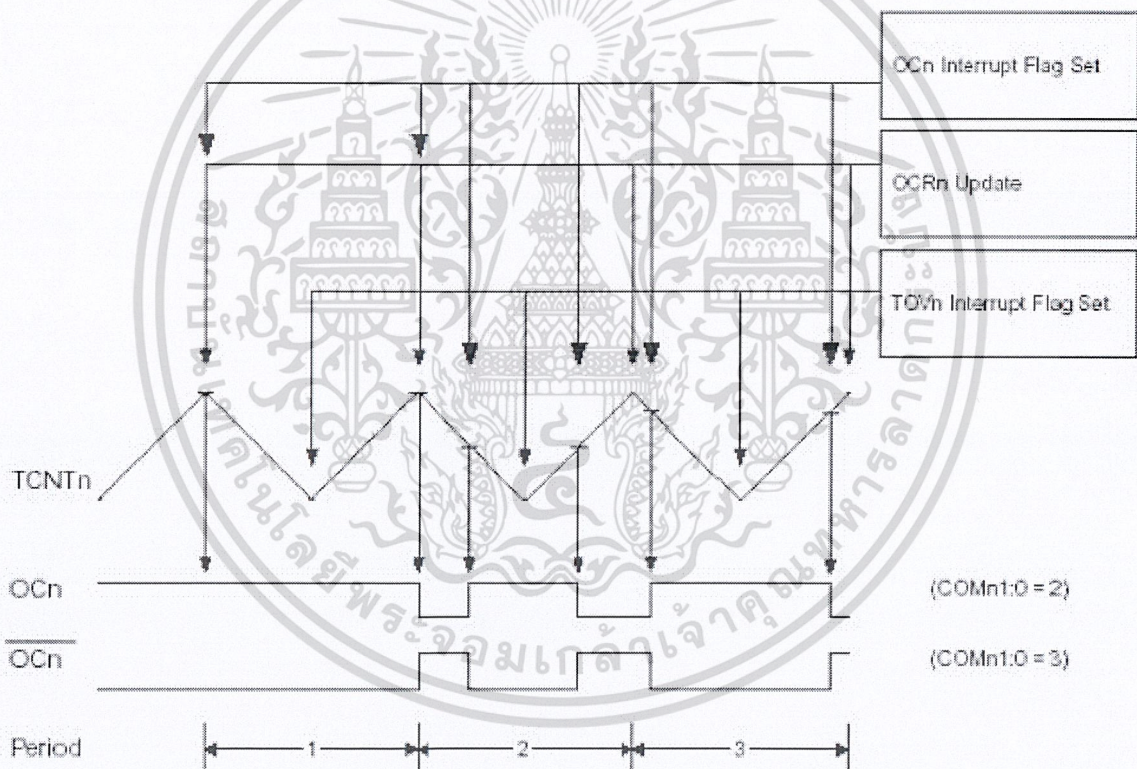
รูปที่ 2.14 การทำงาน Analog to Digital Converter

ข้อดีของวิธี Successive Approximation คือ เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ  $n$  รอบแน่นอน  
(สำหรับ  $n$  bit converter ซึ่งอ้างอิงได้  $2^n$  ระดับ และระดับ  $V_{in}$  ที่คงที่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 Pulse Width Modulation

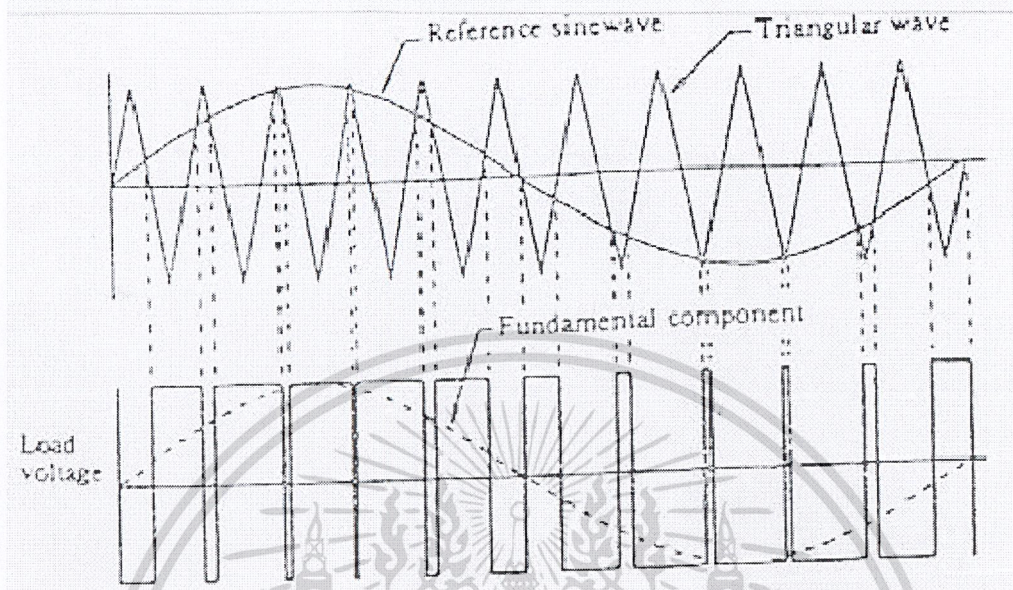
Pulse Width Modulation (PWM) คือ หลักการที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์เพื่อที่จะสามารถควบคุมระดับความเร็วของมอเตอร์ได้ โดยควบคุมจากแรงดัน โดยจะอาศัยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุตและเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง (reference voltage) ของวงจร เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุต ค่าความแตกต่างที่ได้จะถูกขยายโดยวงจรขยายความแตกต่างก่อนที่จะส่งต่อไปยังวงจร PWM โดยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรขยายความแตกต่าง จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันรูปฟันเลื่อยของ PWM อีกครั้งหนึ่ง เอาต์พุตที่ได้จากวงจร PWM จะมีลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมซึ่งมีคาบเวลาคงที่เท่ากับคาบเวลาของแรงดันรูปฟันเลื่อยและมีความกว้างของพัลส์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามผลมอดูเลชันของค่าแรงดันค่าความกว้างของพัลส์นี้เองที่จะเป็นตัวกำหนดระดับความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความกว้างของพัลส์จาก PWM หลักการของ Pulse Width Modulation

เป็นวิธีการนำสัญญาณสองสัญญาณมาทำการ Modulate กันแล้วจะได้สัญญาณ pulse ที่มี Pulse Width ขนาดต่างๆ กันตัวอย่างเช่น การนำสัญญาณ sine wave ที่มีความถี่ต่ำมาทำการ Modulate กับสัญญาณ Triangle wave ที่มีความถี่สูงจะได้ สัญญาณ pulse ที่มีขนาด pulse width ไม่เท่ากันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามระดับสัญญาณ sine wave และมีความถี่ตามสัญญาณ Triangle wave ดังรูปที่ 2.14  
 ถ้านำสัญญาณดังกล่าวไปผ่านวงจร low pass filter ก็จะได้สัญญาณ sine wave เหมือนเดิม



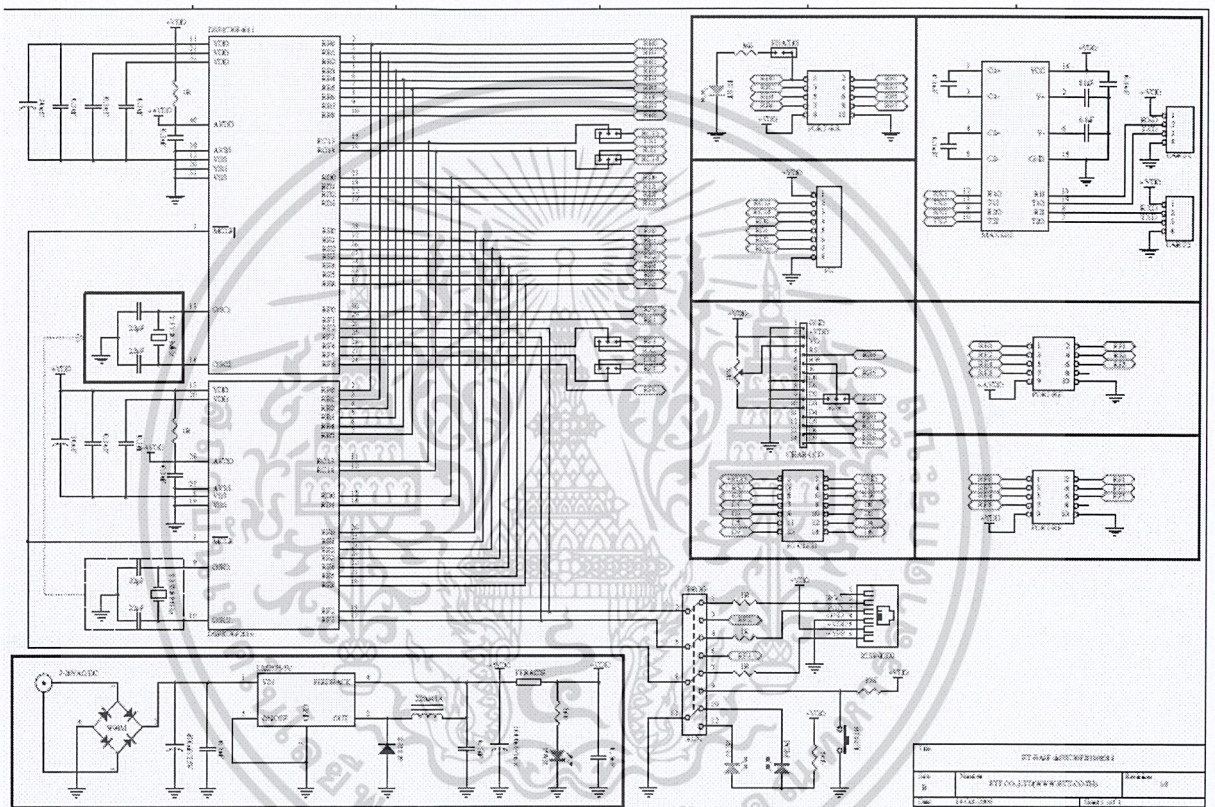
รูปที่ 2.16 แสดงการควบคุมลักษณะ Pulse Width Modulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3.2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นวงจรที่ใช้รับค่าจากเซนเซอร์และประมวลผลส่งไปยังบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อไปควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ในที่นี้เราใช้บอร์ดทดลอง ET-BASE dsPIC30F4011 ในการควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์รักษาสมดุลประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังรูปที่ 3.2

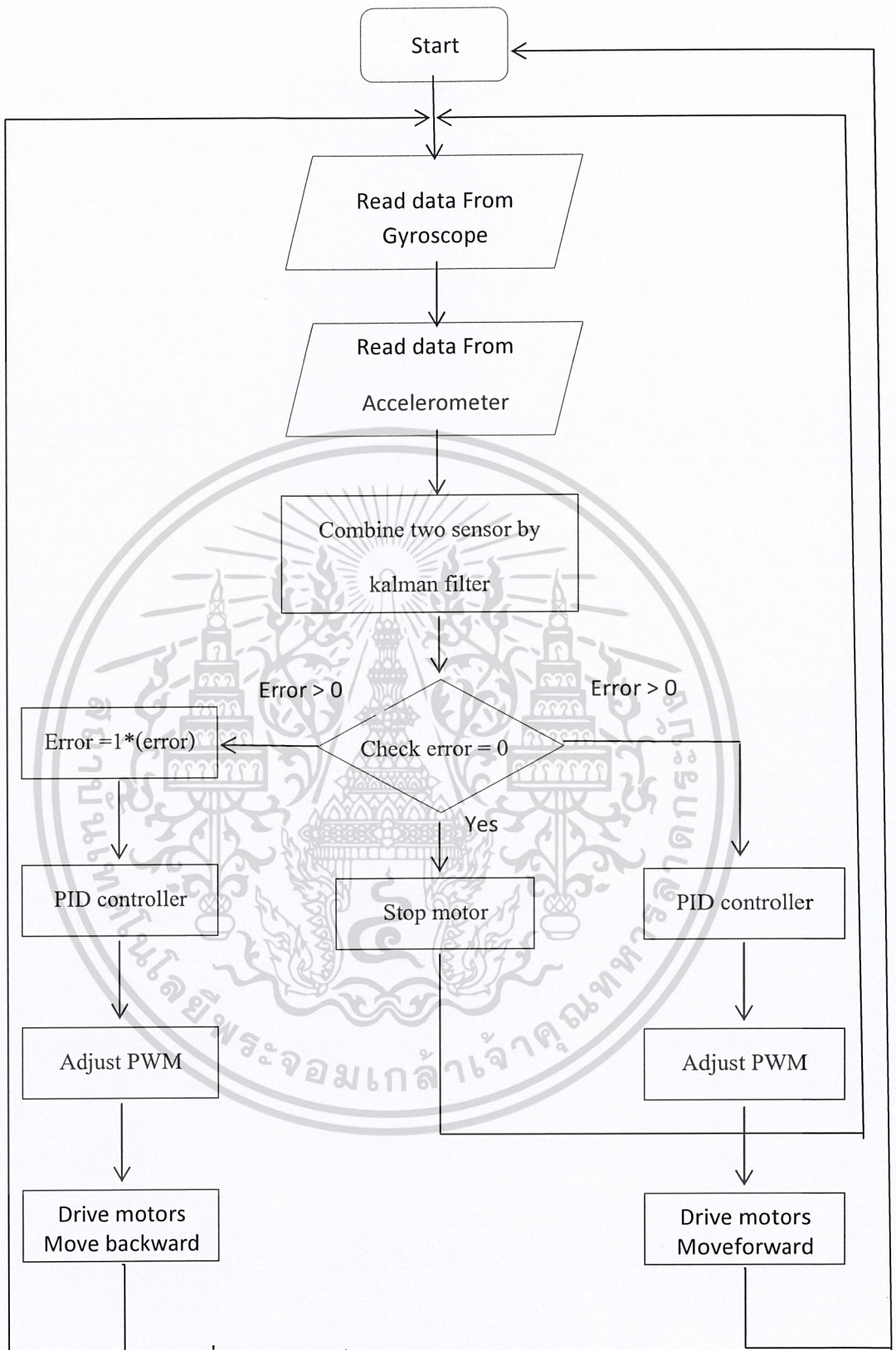


รูปที่ 3.2 วงจรบอร์ดคู่มือ ET-BASE dsPIC30F4011

#### 3.2.1 การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่น

ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุลนี้ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก และใช้ MPLAB C30 เป็นตัวคอมไพล์เลอร์ มีกระบวนการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์แสดงในโฟลวชาร์ตดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



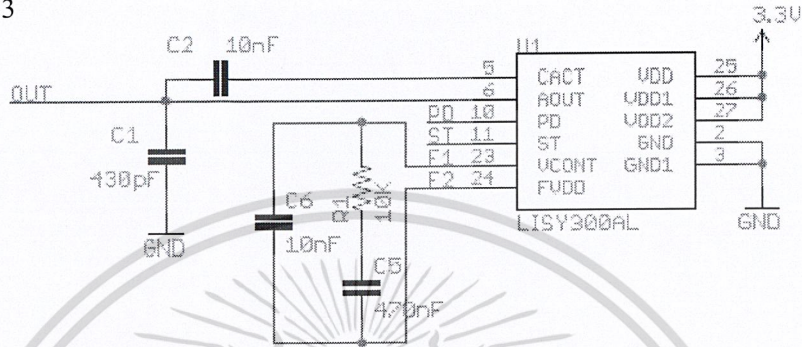
รูปที่ 3.3 โฟลวชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วงจรเซนเซอร์

#### 3.3.1 ไจโรสโคป

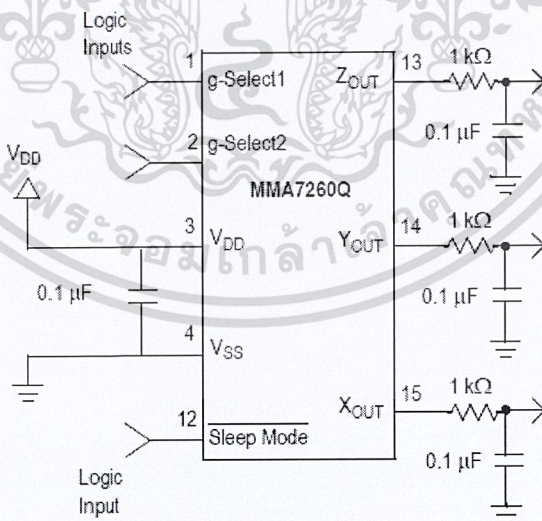
เซ็นเซอร์ไจโรสโคปเป็นเซนเซอร์ที่วัดอัตราการเร็วเชิงมุมนำมาใช้ในการควบคุมสมดุลให้หุ่นยนต์โดยเลือกใช้ LISY300AL ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อกและใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ มีวงจรตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 วงจรเซ็นเซอร์ไจโรสโคป

#### 3.3.2 วงจรเซนเซอร์วัดความเร่ง

สำหรับเซ็นเซอร์ความเร่งถูกนำมาใช้วัดค่ามุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์ โดยในโครงงานนี้เลือกใช้ เซ็นเซอร์ MMA7260q ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก และใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ มีวงจรตามรูปที่ 3.3

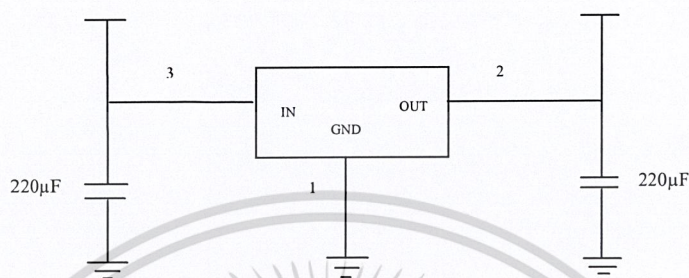


รูปที่ 3.5 วงจรวัดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วงจรลดแรงดัน 3.3 โวลต์

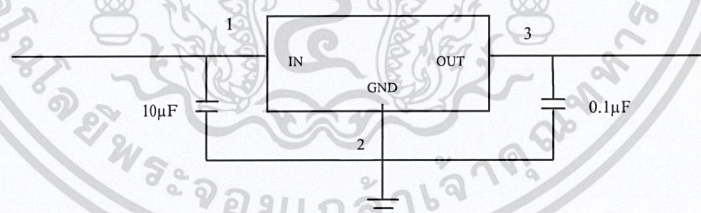
เนื่องจากเซนเซอร์ไอโรสโคปและเซนเซอร์ความเร่งที่ใช้ในโครงการ ใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ จึงต้องมีแหล่งวงจรจ่ายแรงดัน 3.3 โวลต์ โดยมีวงจрдังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.6 วงจรลดแรงดัน 3.3 โวลต์

### 3.5 วงจรจ่ายแรงดัน 5 โวลต์

เนื่องจากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ไฟเลี้ยง 5 โวลต์ จึงได้ใช้ ไอซีเรกูเลเตอร์ 5 โวลต์ LM7805 มีวงจрдังรูปที่ 3.5

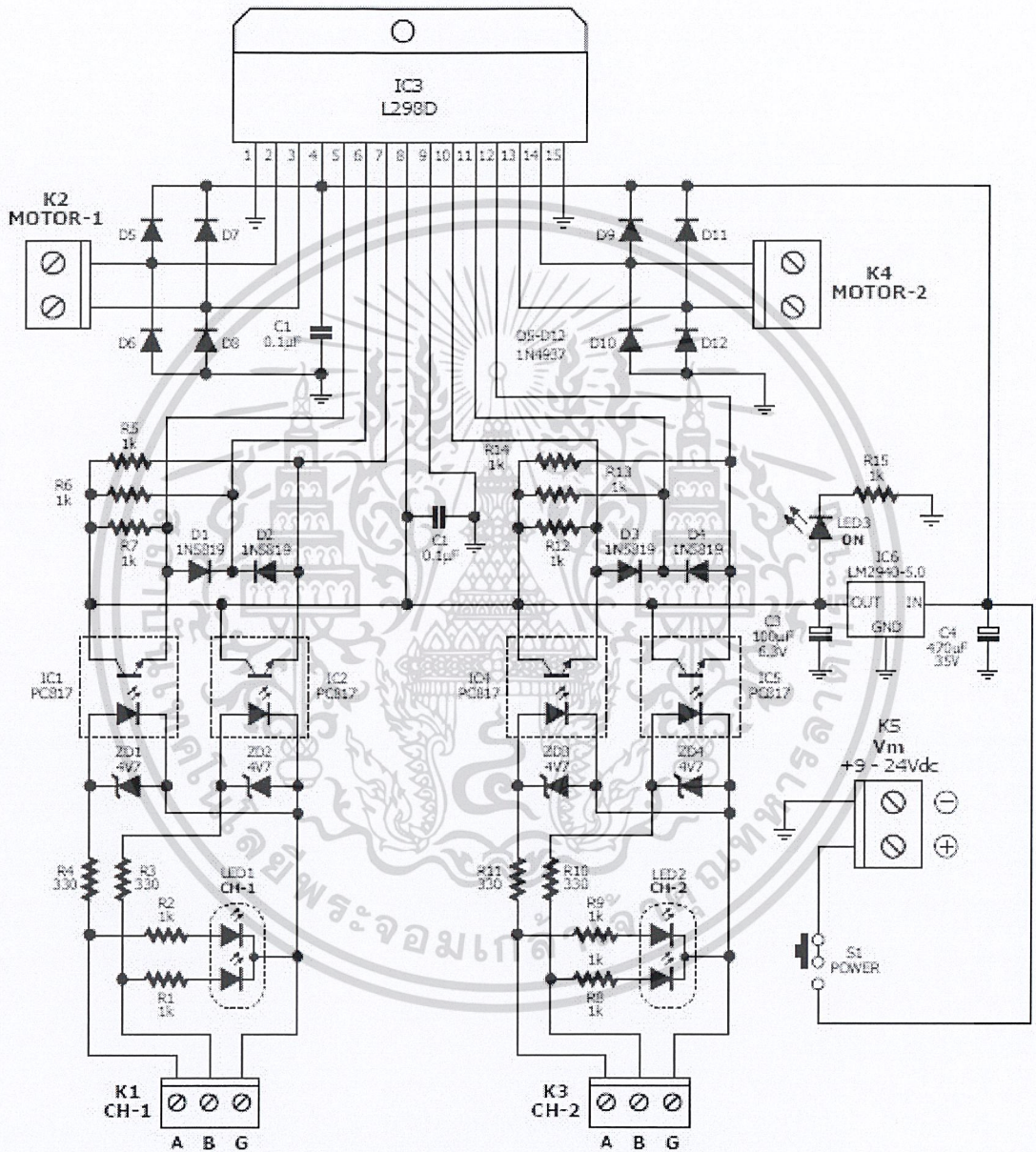


รูปที่ 3.7 วงจรจ่ายแรงดัน 5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วงจรขับมอเตอร์

ในการทำโครงงานครั้งนี้ต้องมีการใช้มอเตอร์กระแสตรงเราจึงใช้บอร์ดขับมอเตอร์ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ในที่นี้เราใช้บอร์ดขับมอเตอร์ ZX-MOTOR298



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ในบอร์ด ZX MOTOR 298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.1 การทำงานของวงจรถับมอเตอร์

เราจ่ายสัญญาณของกระแสไฟฟ้าออกมาในรูปของ Pulse Wide Modulation (PWM) โดยที่เรากำหนดค่าความกว้างของ Duty cycle ให้เป็น 0 – 100% ซึ่งจะเป็นตัวที่ใช้กำหนดความเร็วในการหมุนมอเตอร์ นอกจากนี้ความถี่ของ PWM ก็มีผลอย่างมากกับการทำงานของมอเตอร์ ยิ่งมีความถี่สูงความเร็วของมอเตอร์ก็จะสูงตามและถ้าความถี่การจ่าย PWM ต่ำก็จะส่งผลทำให้ความเร็วต่ำด้วย

สัญญาณ PWM นี้จะนำไปใช้ควบคุมมอเตอร์ซึ่งใช้ด้วยกัน 2 channel โดยที่เราจะจ่ายสัญญาณออกไปเพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์โดยผ่านชุดขับมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งตัวขับนี้จะเป็นตัวที่ขยายสัญญาณจากสัญญาณ control คือ PWM ที่ออกจาก Microcontroller ให้เป็นสัญญาณแบบ Power เพื่อใช้ในการขับมอเตอร์กระแสตรง ระดับแรงดันของสัญญาณ Power กำหนดจากแรงดันของมอเตอร์กระแสตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้นำเสนอการทดลองของโครงงานหุ่นยนต์รักษาสมดุล ซึ่งแบ่งออกเป็น การทดลองการทำงานของ Gyroscope การทดลองการทำงานของ Accelerometer และการทดลองการรวมสัญญาณของ Gyroscope และ Accelerometer ด้วย Kalman Filter

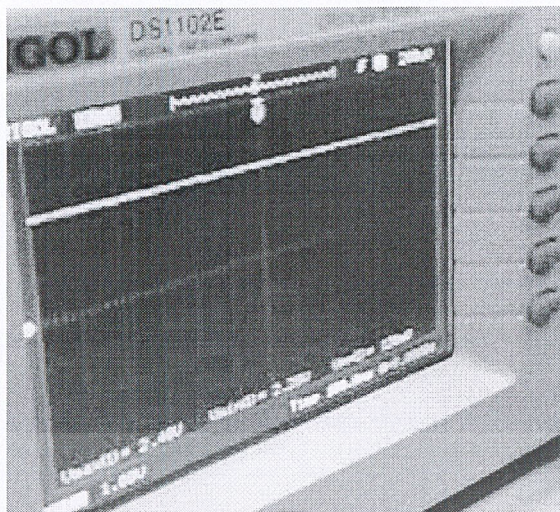
#### 4.1 การทดลองทำงานของ Gyroscope

เมื่อเคลื่อน Gyroscope ไปมา ก็จะทำให้แรงดันเปลี่ยนแปลงขึ้นลงจากแรงดันอ้างอิงคือ 1.65 V โดยค่าที่เปลี่ยนไปนั้นจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.94 -2.4 V



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบ Gyroscope ขณะอยู่กับที่

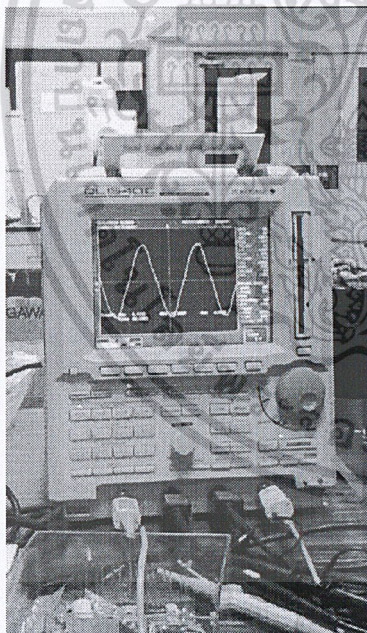
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



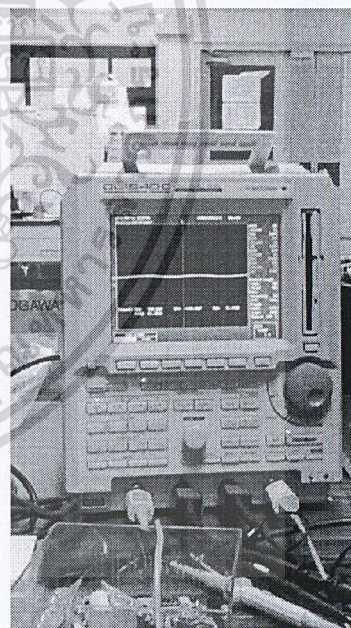
รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบ Gyroscope ขณะเคลื่อนที่ไปมา

### 4.2 การทดลองทำงานของ Accelerometer

ได้ทำการทดลองโดยใช้วิธีเดียวกับ Gyroscope ซึ่งให้ผลของแรงดันนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามการเอียงของเซนเซอร์ ซึ่งการเอียงของมันนั้นจะมีช่วงของแรงดันอยู่ระหว่าง 1.7 – 2.5 V



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ Accelerometer (ก) ขณะที่เซนเซอร์เอียง

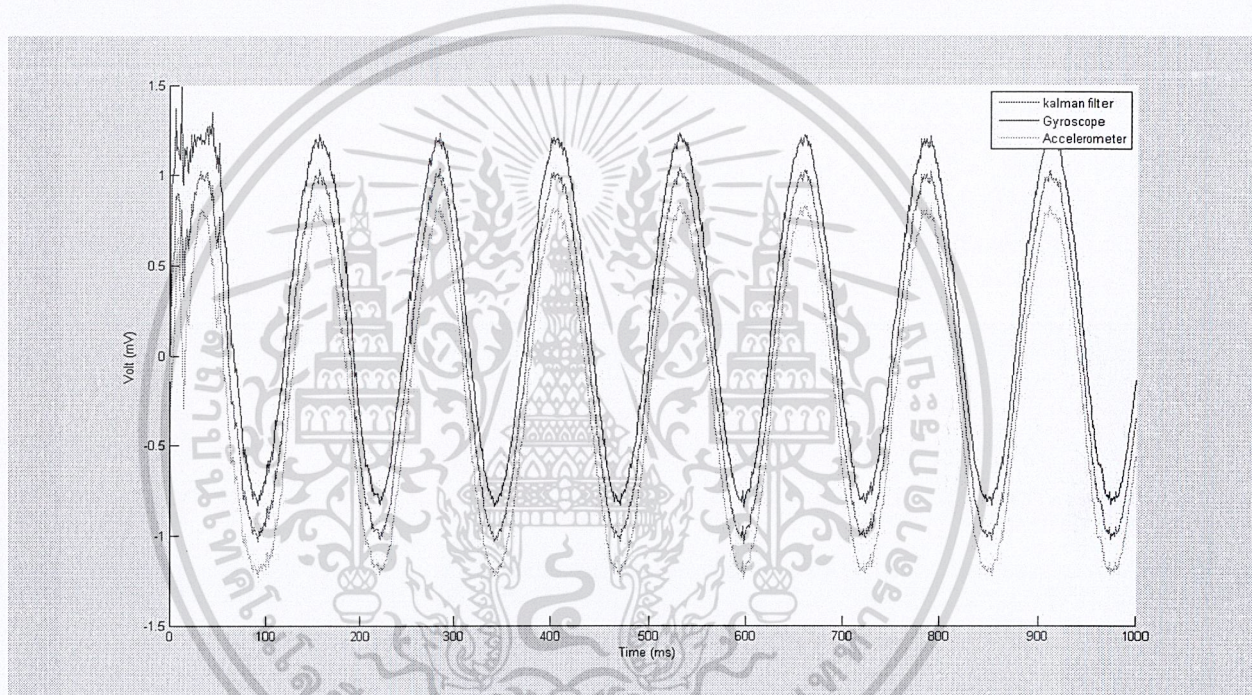
(ข) ขณะที่เซนเซอร์ตั้งฉากกับพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดลองการรวมสัญญาณของ Gyroscope และ Accelerometer ด้วย

#### Kalman Filter

การทดสอบเซนเซอร์เราได้ทำการทดสอบโดยการอ่านค่าของเซนเซอร์ทั้งสองผ่าน UART ของ Microcontroller แล้วเชื่อมต่อเข้ากับ RS232 ของคอมพิวเตอร์ และนำค่าที่อ่านได้ไปผ่าน kalman filter และ plot เป็นกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะสามารถเห็นถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้จากกราฟเส้นประแสดง Output ของ Gyroscope ซึ่งมีหน่วยเป็น degree/second กราฟเส้นทึบแสดงถึง Output ของ Accelerometer ซึ่งมีหน่วยเป็น degree และกราฟที่เป็นจุดแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ Kalman filter



รูปที่ 4.4 ทดลองการรวมสัญญาณของ Gyroscope และ Accelerometer ด้วย Kalman Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดสอบหาค่าระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์

การทดสอบนี้ต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กับกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ขณะมีโหลด โดยโหลดที่ใช้เป็นแท่งเหล็กที่ทราบความยาวและน้ำหนัก จะผูกติดกับปลายข้างหนึ่งของแท่งเหล็กให้ติดอยู่กับเพลาของมอเตอร์ เพื่อที่จะหาค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ ( $K_m$ )

##### 4.4.1 การหาแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์

###### 1. อุปกรณ์การทดสอบ

- ดีซีมอเตอร์ มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นมอเตอร์ใช้ไฟกระแสตรง 0-24 โวลต์ สามารถกลับทางหมุนได้ โดยการสลับขั้วหรือสลับแรงดัน

- วงจรจับมอเตอร์

- แอมป์มิเตอร์ โดยแอมป์มิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบตัวเลข (digital) สามารถวัดได้ตั้งแต่ 0-10 แอมแปร์

- แท่งเหล็ก โดยในการทดสอบจะใช้แท่งเหล็ก 2 แท่งมีขนาดความยาว 75.3 เซนติเมตรหนัก 0.04 กิโลกรัม และแท่งเหล็กความยาว 72.5 เซนติเมตร หนัก 0.046 กิโลกรัม

###### 2. วิธีการทดสอบ

นำแท่งเหล็กความยาว 75.3 เซนติเมตร หนัก 0.04 กิโลกรัม มายึดติดกับเพลาของดีซีมอเตอร์ จากนั้นค่อยๆปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยผ่านวงจรจับมอเตอร์จนกระทั่งแท่งเหล็กเคลื่อนตัวมาอยู่ในแนวราบ อ่านค่ากระแสจากแอมป์มิเตอร์ขณะที่แท่งเหล็กอยู่ในแนวราบและบันทึกผล นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์ ( $K_m$ ) ได้จากสมการ

$$K_m = \frac{T}{i_a} = \frac{mgl}{2i_a} \quad \text{Nm/A} \quad (4.4.1)$$

เปลี่ยนแท่งเหล็กเป็นความยาว 72.5 เซนติเมตร หนัก 0.046 กิโลกรัม โดยทำการทดลองซ้ำแบบเดิม และบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าคงที่ระหว่างแรงบิดกับกระแสของมอเตอร์

แท่งเหล็ก	ความยาว(cm)	น้ำหนัก(kg)	กระแส(A)	$K_m$ (Nm/A)
1	75.3	0.04	0.185	0.7986
2	72.5	0.046	0.225	0.7270

จากตารางที่ 4.1 สามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์ได้ 0.7628 Nm/A

## 4.4.2 การทดสอบหาค่าของค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์

จากสมการที่ว่า

$$V_b = K_b \omega \quad (4.4.2)$$

ในการหาค่าของ  $V_b$  ไม่สามารถหาโดยตรงได้ ถ้าพิจารณาจากวงจรสมมูล (equivalent circuit) ของมอเตอร์ สามารถหา  $V_b$  ได้จากสมการ

$$V_b = V_a - R_a I_a \quad (4.4.3)$$

ดังนั้นการหาค่าของ  $V_b$  ทำได้โดยการวัดค่าของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ กระแสอาร์เมเจอร์และความต้านทานของอาร์เมเจอร์

ส่วนในการวัดความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์นั้น เนื่องจากเครื่องมือในการวัดไม่พร้อมเพียงไม่สามารถวัดความเร็วเชิงมุมโดยตรงได้ จึงประยุกต์มาวัดค่าความเร็วเชิงเส้นแทน พิจารณาภาพที่ 3.4 เป็นการแสดงการต่อชุดทดสอบหาความเร็วเชิงเส้น ซึ่งทำได้โดยการจับมอเตอร์ให้มีความเร็วคงที่ ซึ่งสังเกตได้จากค่าแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีค่าคงที่ โดยกำหนดจำนวนรอบของการเคลื่อนที่ และทำการจับเวลา จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วเชิงเส้นและคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุมต่อไป

## 1. อุปกรณ์การทดสอบ

- ดีซีมอเตอร์ มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นมอเตอร์ใช้ไฟกระแสตรง 0-24 โวลต์

สามารถกลับทางหมุนได้ โดยการสลับขั้วหรือสลับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- วงจรขั้วมอเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แอมป์มิเตอร์ โดยแอมป์มิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบตัวเลข (digital) สามารถวัดได้ตั้งแต่ 0-10A
- โวลต์มิเตอร์ ใช้โวลต์มิเตอร์ที่เป็นแบบตัวเลข (digital) สามารถวัดแรงดันได้ 0-750 V
- ชุดทดสอบหาความเร็วเชิงเส้น โดยประกอบไปด้วย ล้อรถและมอเตอร์
- นาฬิกาจับเวลา

## 2. วิธีการทดสอบ

ติดตั้งล้อเข้ากับมอเตอร์ให้เป็นดังรูป 3.4 พร้อมทั้งวัดรัศมีของล้อรถ และกำหนดรอบของการเคลื่อนที่พร้อมทำเครื่องหมายที่สายพาน จากนั้นต่อวงจรขั้วมอเตอร์เข้ากับมอเตอร์และปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ค่าแรงดันที่กำหนด วัดค่าแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์และกระแสอาร์เมเจอร์ นับจำนวนรอบของการเคลื่อนที่ และจับเวลา จากนั้นเปลี่ยนค่าแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์และบันทึกผลการทดสอบ

## 3. ผลการทดสอบ

รัศมีของล้อรถมีค่าเท่ากับ 3.335 เซนติเมตร ซึ่งกำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่ 10 รอบ ดังนั้นสามารถคำนวณระยะทางในการเคลื่อนที่ครบ 10 รอบ ได้เท่ากับ  $10 * 2\pi r = 2.073$  เมตร สามารถคำนวณความเร็วเชิงเส้นได้จากสมการ

$$v = \frac{s}{t} \quad \text{m/s} \quad (4.4.4)$$

และความเร็วเชิงมุมคำนวณได้จาก

$$\omega = \frac{v}{r} \quad \text{rad/s} \quad (4.4.5)$$

สุดท้ายสามารถคำนวณหาค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์ได้จาก

$$K_b = \frac{v_a - R_a i_a}{\omega} \quad \text{V/rad/sec} \quad (4.4.6)$$

เมื่อค่าความต้านทางอาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 9.5 โอห์ม

สามารถเขียนผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

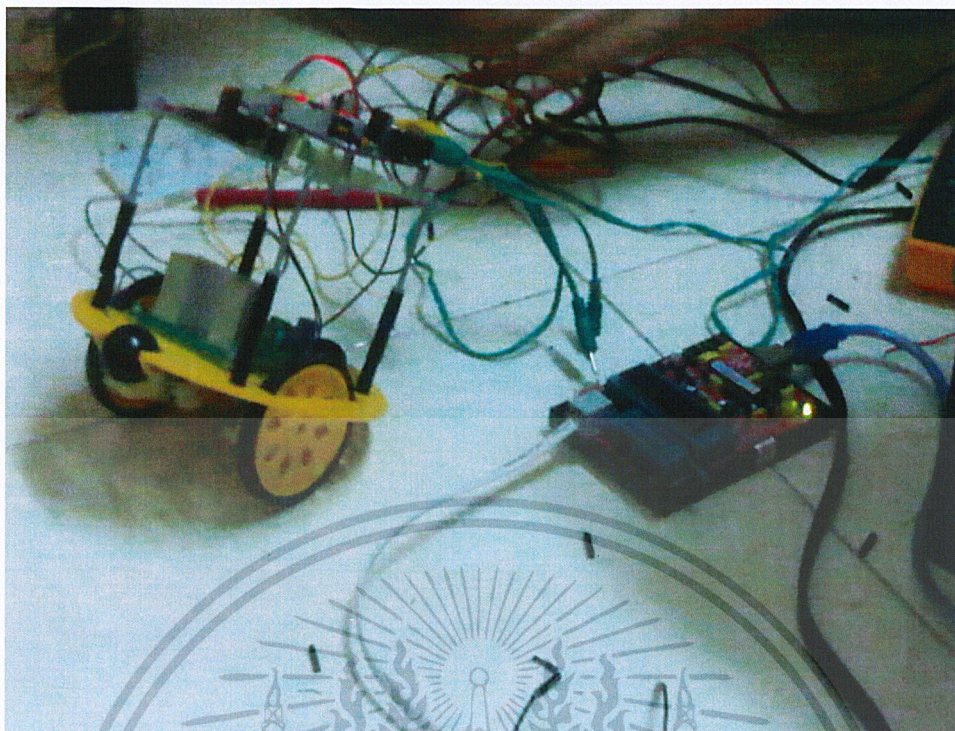
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณหาค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์

แรงดัน (โวลต์)	กระแส(แอมแปร์)	เวลา 10 รอบ(วินาที)	$K_b$ (V/rad/sec)
3	0.02	35.01	0.613
4	0.02	23.81	0.795
5	0.02	17.07	0.887
6	0.02	13.00	0.848
7	0.02	11.63	0.944
8	0.02	10.28	0.998

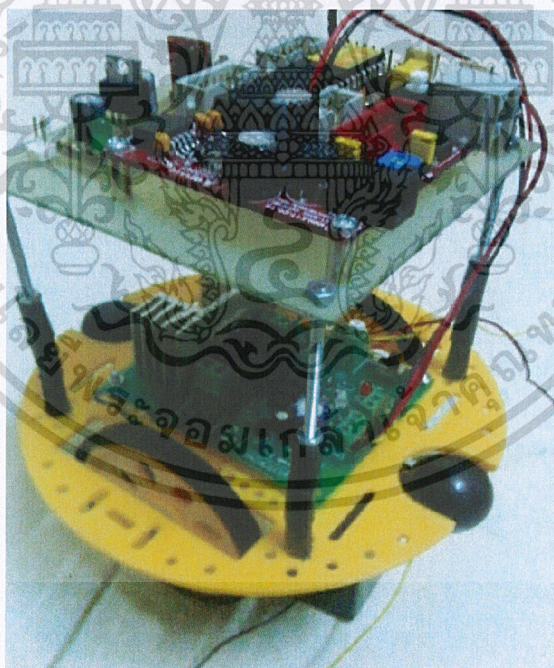
จากตารางที่ 4.2 สามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าคงที่ระหว่างแรงดันกับความเร็วของมอเตอร์ได้ 0.8475 v/rad/sec



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การเบิร์นโปรแกรม



รูปที่ 4.6 หุ่นยนต์รักษาสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปและวิเคราะห์ปัญหา

### 5.1 สรุปผลการดำเนินการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการศึกษาและการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ควบคุมมุมการทรงตัวอัตโนมัติ โดยอาศัยหลักการอินเวอร์ทแพนดูลัมหรือที่เรียกว่าลูกตุ้มหัวกลับ มาช่วยในการรักษาการทรงตัวของหุ่นยนต์ให้สามารถทรงตัวอยู่ได้ซึ่งมีการทำงานร่วมกันของ เซนเซอร์ gyroscope และ Accelerometer ในการวัดค่ามุมและหาค่าความเร่ง และใช้ Kaman Filter ในการรวมสัญญาณของเซนเซอร์สองตัวนี้ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด เพื่อนำไป โปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป จากการศึกษาจะพบว่าในการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ในแต่ละตัวจะพบค่าผิดพลาดอยู่เสมอถึงแม้จะใช้สมการมาช่วยในการแก้ไขก็ตาม ซึ่งเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นผลให้หุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่ แต่เราสามารถหาค่าตัวแปรต่างๆได้และนำไปคำนวณในเชิงคณิตศาสตร์ทำให้เรารู้ผลของอนาคตและนำไปแก้ไขและโปรแกรมได้ต่อไป ซึ่งหุ่นยนต์จะสามารถรักษาสมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ปัญหาและอุปสรรคที่พบจากการทำโครงการนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เซนเซอร์ gyroscope ซึ่งใช้วัดอัตราเร็วเชิงมุมในโครงการนี้ ต้องปรับตัวเองก่อนเมื่อเริ่มใช้งานจึงจะให้ค่าวัดที่เชื่อถือได้
2. ไม่สามารถวัดค่ามุมได้โดยตรง แต่อาศัยผลคำนวณค่าจากเซนเซอร์ความเร่งร่วมกับเซนเซอร์ไจโรสโคป จึงทำให้ค่าวัดมีความผิดพลาดในระดับหนึ่ง
3. เสียเวลามากที่สุดคือในส่วนของ มอเตอร์ เพราะว่า มอเตอร์มันจะเกิดภาวะ Non linear คือไม่เสถียรภาพ เมื่อเราต้องการให้มอเตอร์หมุนในรอบที่ต่ำๆ นั้น มันไม่สามารถที่จะทำได้และเมื่อเราป้อนกระแสไปเรื่อยๆ ก็จะทำให้ มอเตอร์นั้นเร็วเกินไปอีก
4. ผลจากการทดสอบการทำงานของ Gyroscope Accelerometer และการรวมสัญญาณของ Gyroscope และ Accelerometer ด้วย Kalman Filter อาจมีค่าผิดพลาดบ้างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

1. ควรเปลี่ยนค่าเซนเซอร์ความเร่งและเซนเซอร์ไจโรสโคป ที่มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูง
2. ออกแบบหุ่นยนต์ควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติให้สามารถเคลื่อนที่ในหลายๆแกน
3. ศึกษาการออกแบบควบคุมด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น การออกแบบด้วยวิธีฟuzzy เป็นต้น
4. ควรพัฒนาโดยอาศัยหลักการนี้ในการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์อื่นเช่น เซ็กเวย์ เครื่องบินบังคับ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุล

โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์รักษาสมดุล เขียนด้วยภาษาซี โดยใช้โปรแกรม MPLAB C30 เวอร์ชัน 3.02 ของบริษัทไมโครชิพ

### โปรแกรมแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

```
#include<p30f4011.h>

#define adc_read(pin) adc_buf(pin)

#define __ADC10_H

unsigned int adc_buf[16];

volatile unsigned int*ADC16Ptr=&ADCBUF0;

void init_adc()
{
    ADCON1bits.ADON=0;

    ADCON2bits.SMPI=3;

    ADCON2bits.CHPS=0;

    ADCON1bits.SIMSAM=0;

    ADCON2bits.BUFM=0;

    ADCON2bits.ALTS=0;

    ADCHSbits.CH0SA=0;

    ADCHSbits.CH0NA=0;

    ADCON2bits.CSCNA=1;

    ADCHSbits.CH123SA=0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ADCHSbits.CH123NA=0;  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADCHSbits.CH123SB=0;

ADCHSbits.CH123NB=0;

ADCON1bits.FORM=0b10;

ADCON1bits.SSRC=7;

ADCON1bits.ASAM=1;

ADCON2bits.VCFG=1;

ADCON3bits.ADCS=0b011111;

ADPCFG=0xFFF0;

TRISB=0b1111111;

IEC0bits.ADIE=1;

ADCON1bits.ADON=1;
}

extern void __attribute__((interrupt)) ADCInterrupt(void)
{

unsigned int buffer=0;

for (buffer=0; buffer<3;buffer++)

adc_buf[buffer] = ADC16Ptr[buffer];

IF0bits.ADIF=0;

}

return 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมอ่านค่ามุมจากเซนเซอร์ความเร่ง

```
#include<math.h>

static const int ADC_X_NEUTRAL = 32500;

static const int ADC_Z_NEUTRAL = 32500;

#define ACCEL_Z_ADC 2

#define ACCEL_X_ADC 1

Float read_angle()

{

    int shifted_z = (int) adc_read(ACCEL_Z_ADC)-ADC_Z_NEUTRAL;

    int shifted_x = (int) adc_read(ACCEL_X_ADC)-ADC_X_NEUTRAL;

    float z = (float) shifted_z;

    float x = (float) shifted_x;

    return (atan2(-z,x));

}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมอ่านค่าอัตราเร็วเชิงมุมจากเซนเซอร์ไจโรสโคป

```
#include "adc.h"

#define gyro_y 0

static const float gyro_y_degrees_per_second = 500.0*2.0;

static const float gyro_y_rad_per_second = 8.72*2.0;

float gyro_y_degrees()
{
    Return -(((float)adc_read(gyro_y)/ 65500.0*3.3)-1.5)/0.002;
}

float gyro_y_rad()
{
    return-(((float)adc_read(gyro_y)*0.0004394279)-13.09;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

G = [1;0];      %G is the Jacobian of the plant transfer functions due to the error.

H = [ 1 0];    %H is the Jacobian of the sensor transfer functions due to the variables involved

W = 1;        %W is the Jacobian of the sensor transfer functions due to the error.

steps = 1000; %Amount of steps to simulate

% bucle

for i =2:steps    %start @ time=2

% the real plant

x(:,i) = [sin(x(2,i-1)*(i-1)) + randn*sigmav ; x(2,i-1) ];

z(i) = x(1,i) + randn*sigmaw;

% blind prediction (just for comparison)

xc(:,i) = [sin(xc(2,i-1)*(i-1)); xc(2,i-1)];

% prediction

x_(:,i) = [sin(x_(2,i-1)*(i-1)); x_(2,i-1)];

z_(i) = x_(1,i);

% compute F

F = [0 i*cos(x_(2,i)*i);

      0 1];

% Prediction of the plant covariance

P = F*P*F' + G*Q*G';

% Innovation Covariance

S = H*P*H'+R;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 % Kalman's gain  
 ไม่วางรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

K = P*H'*inv(S);

% State check up and update

x_(:,i) = x_(:,i) + K * (z(i)-z_(i));

% Covariance check up and update

P = (eye(2)-K*H)*P;

end

figure(1);clf; hold on;

plot(x_(1,:),'-r');           %plot the Kalman filter prediction over the plant

plot(x_(1,.)+2*sigmaP(1,),'-b'); %These two are the threshold in witch I'm certain that the plant state is
at a given time

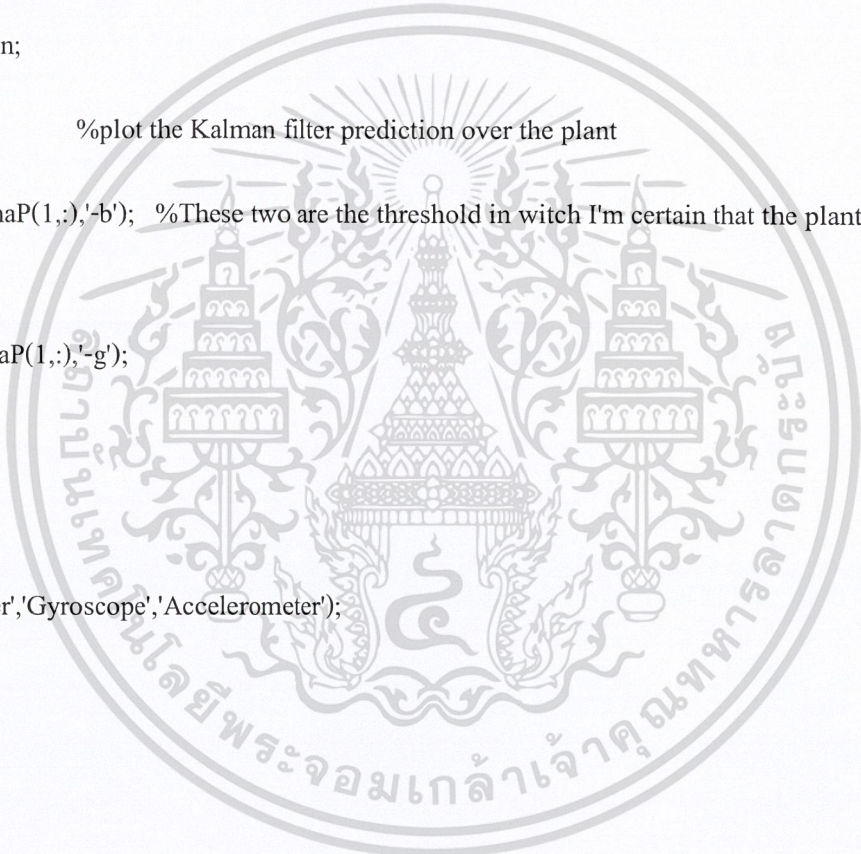
plot(x_(1,.)-2*sigmaP(1,),'-g');

xlabel('Time (ms)');

ylabel('Volt (mV)');

legend('kalman filter','Gyroscope','Accelerometer');

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

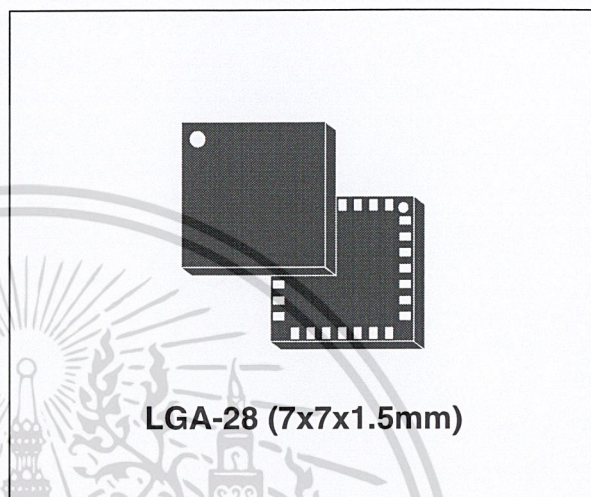


## LISY300AL

MEMS inertial sensor:  
single-axis  $\pm 300^\circ/\text{s}$  analog output yaw rate gyroscope

### Features

- 2.7 V to 3.6 V single supply operation
- Low power consumption
- Embedded power-down
- $\pm 300^\circ/\text{s}$  full scale
- Absolute analog rate output
- Integrated low-pass filters
- Embedded self-test
- High shock survivability
- ECOPACK<sup>®</sup> RoHS and "Green" compliant (see Section 4)



### Description

The LISY300AL is a low-power single-axis yaw rate sensor. It includes a sensing element and an IC interface able to provide the measured angular rate to the external world through an analog output voltage.

The sensing element, capable of detecting the yaw rate, is manufactured using a dedicated micromachining process developed by ST to produce inertial sensors and actuators on silicon wafers.

The IC interface is manufactured using a CMOS process that allows a high level of integration to design a dedicated circuit which is trimmed to better match the sensing element characteristics.

The LISY300AL has a full scale of  $\pm 300^\circ/\text{s}$  and is capable of measuring rates with a -3 dB bandwidth up to 88 Hz.

The LISY300AL is available in a plastic land grid array (LGA) package and can operate within a temperature range from  $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ .

The LISY300AL belongs to a family of products suitable for a variety of applications, including:

- Gaming and virtual reality input devices
- Motion control with MMI (man-machine interface)
- Image stabilization for digital video and digital still cameras
- GPS navigation systems
- Appliances and robotics

**Table 1. Device summary**

Order code	Temperature range ( $^\circ\text{C}$ )	Package	Packing
LISY300AL	-40 to +85	LGA-28 (7x7x1.5)	Tray
LISY300ALTR	-40 to +85	LGA-28 (7x7x1.5)	Tape and reel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
May 2008 Rev 1 1/13

ไม่มีกรรมสิทธิ์ในสิ่งใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรรมสิทธิ์ไปใช้  
www.st.com



Edited with the demo version of  
Infix Pro PDF Editor

To remove this notice, visit:  
www.iceni.com/unlock.htm

# Contents

<b>1</b>	<b>Block diagram and pin description</b> .....	<b>3</b>
1.1	Pin description .....	3
<b>2</b>	<b>Mechanical and electrical specifications</b> .....	<b>5</b>
2.1	Mechanical characteristics .....	5
2.2	Electrical characteristics .....	6
2.3	Absolute maximum ratings .....	7
2.4	Terminology .....	8
2.4.1	Sensitivity .....	8
2.4.2	Zero-rate level .....	8
2.4.3	Self-test .....	8
<b>3</b>	<b>Application hints</b> .....	<b>9</b>
3.1	Soldering information .....	10
<b>4</b>	<b>Package information</b> .....	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Revision history</b> .....	<b>12</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
 2/13 ไม่มีการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Table 2. Pin description

Pin #	Pin Name	Function
1	NC	Internally not connected
2	GND	0V supply
3	GND	0V supply
4	NC	Internally not connected
5	CACT	Active filter capacitor
6	ANALOG OUTPUT	Rate signal output voltage
7-9	NC	Internally not connected
10	PD	Power-down (logic 0: normal mode; logic 1: power-down mode)
11	ST	Self-test (logic 0: normal mode; logic 1: self-test)
12-13	Reserved	Leave unconnected
14-15	NC	Internally not connected
16-21	Reserved	Leave unconnected
22	NC	Internally not connected
23	VCONT	PLL filter connection pad #1
24	FILTVDD	PLL filter connection pad #2
25	Vdd	Power supply
26	Vdd	Power supply
27	Vdd	Power supply
28	NC	Internally not connected

## 2 Mechanical and electrical specifications

### 2.1 Mechanical characteristics

Table 3. Mechanical characteristics @ Vdd = 3.3 V, T = 25 °C unless otherwise noted<sup>(1)</sup>

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ. <sup>(2)</sup>	Max.	Unit
FS	Measurement range			±300		°/s
So	Sensitivity			3.3		mV/°/s
SoDr	Sensitivity change vs. temperature	From -40 °C to +85 °C		4		%
Voff	Zero-rate level <sup>(3)</sup>			1.65		V
OffDr	Zero-rate level change vs. temperature	From -40 °C to +85 °C		5		°/s
NL	Non linearity <sup>(4)</sup>	Best fit straight line		±0.8		% FS
BW	-3dB bandwidth <sup>(3)(5)</sup>	C <sub>ACT</sub> = 10 nF		88		Hz
Rn	Rate noise density			0.1		°/s/ √Hz
Vt	Self-test output voltage change <sup>(6)</sup>			+300		mV
Sup	Start-up time	Settling to ±5 %/s		300		ms
Fres	Sensing element resonant frequency			4.5		kHz
Top	Operating temperature range		-40		+85	°C
Wh	Product weight			160		mg

1. The product is factory calibrated at 3.3 V. The operational power supply range is specified in Table 4.

2. Typical specifications are not guaranteed

3. The product is capable of sensing angular rates extending from DC to the selected bandwidth

4. Guaranteed by design

5. User selectable by external capacitor C<sub>ACT</sub>

6. "Self-test output voltage change" is defined as  $V_{out}(V_{st} = \text{logic } 1) - V_{out}(V_{st} = \text{logic } 0)$

## 2.2 Electrical characteristics

Table 4. Electrical characteristics @ V<sub>dd</sub> = 3.3 V, T = 25 °C unless otherwise noted<sup>(1)</sup>

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ. <sup>(2)</sup>	Max.	Unit
V <sub>dd</sub>	Supply voltage		2.7	3.3	3.6	V
I <sub>dd</sub>	Supply current	PD pin connected to GND		4.8		mA
I <sub>ddPdn</sub>	Supply current in power-down mode	PD pin connected to V <sub>dd</sub>		1		μA
V <sub>ST</sub>	Self-test input	Logic 0 level	0		0.2*V <sub>dd</sub>	V
		Logic 1 level	0.8*V <sub>dd</sub>		V <sub>dd</sub>	
V <sub>PD</sub>	Power-down input	Logic 0 level	0		0.2*V <sub>dd</sub>	V
		Logic 1 level	0.8*V <sub>dd</sub>		V <sub>dd</sub>	
C <sub>ACT</sub>	Active low-pass filter capacitor		10			nF
OVS	Output voltage swing <sup>(3)</sup>	I <sub>out</sub> = ±100μA	0.4		V <sub>dd</sub> -0.4	V
C <sub>LOAD</sub>	Capacitive load drive <sup>(3)</sup>		0.4		10	nF
Top	Operating temperature range		-40		+85	°C

1. The product is factory calibrated at 3.3 V
2. Typical specifications are not guaranteed
3. Referred to ANALOG OUTPUT pin #6

## 2.3 Absolute maximum ratings

Stresses above those listed as “Absolute maximum ratings” may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device under these conditions is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

**Table 5. Absolute maximum ratings**

Symbol	Ratings	Maximum value	Unit
V <sub>dd</sub>	Supply voltage	-0.3 to 6	V
V <sub>in</sub>	Input voltage on any control pin (PD, ST)	-0.3 to V <sub>dd</sub> +0.3	V
A <sub>UNP</sub>	Acceleration (not powered)	3000 g for 0.5 ms 10000 g for 0.1 ms	
T <sub>STG</sub>	Storage temperature range	-40 to +125	°C
ESD	Electrostatic discharge protection	2 (HBM)	kV



This is a mechanical shock sensitive device, improper handling can cause permanent damage to the part



This is an ESD sensitive device, improper handling can cause permanent damage to the part

## 2.4 Terminology

### 2.4.1 Sensitivity

A yaw rate gyroscope is a Z-axis rate device that produces a positive-going output voltage for counterclockwise rotation around the axis normal to the package top. Sensitivity describes the gain of the sensor and can be determined by applying a defined angular velocity to it. This value changes very little over temperature and also very little over time.

### 2.4.2 Zero-rate level

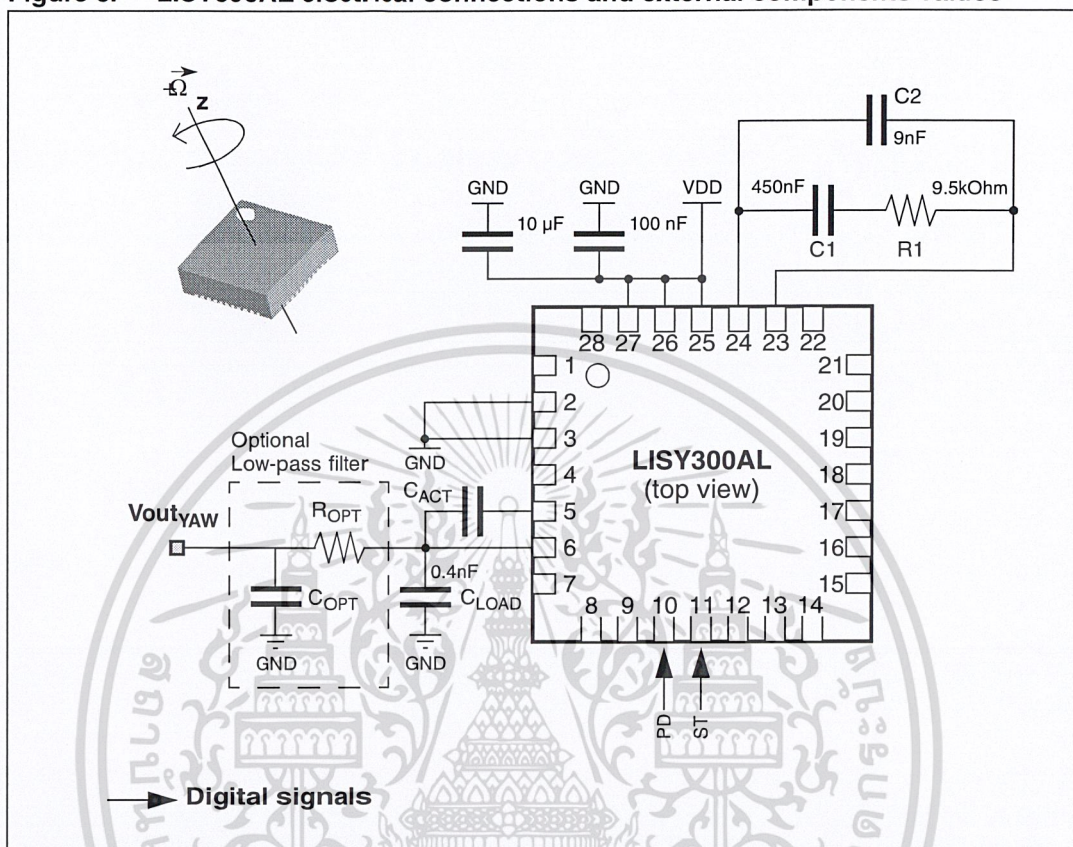
Zero-rate level describes the actual output signal if there is no angular rate present. For a 3.3 V powered sensor the absolute zero-rate output is ideally 1.65 V. Zero-rate level of precise MEMS sensors is, to some extent, a result of stress to the sensor and therefore zero-rate level can slightly change after mounting the sensor onto a printed circuit board or after exposing it to extensive mechanical stress. This value changes very little over temperature and also very little over time.

### 2.4.3 Self-test

Self-test allows to test the mechanical and electric part of the sensor, allowing the seismic mass to be moved by means of an electrostatic test-force. The Self-test function is off when the ST pin is connected to GND. When the ST pin is tied to Vdd, an actuation force is applied to the sensor, emulating a definite Coriolis force. In this case the sensor output will exhibit a voltage change in its DC level which is also depending on the supply voltage. When ST is active, the device output level is given by the algebraic sum of the signals produced by the velocity acting on the sensor and by the electrostatic test-force. If the output signals change within the amplitude specified in *Table 3*, then the mechanical element is working properly and the parameters of the interface chip are within the defined specification.

### 3 Application hints

Figure 3. LISY300AL electrical connections and external components values



Power supply decoupling capacitors (100 nF ceramic or polyester + 10 µF Aluminum) should be placed as near as possible to the device (common design practice).

The LISY300AL allows to band limit the output rate response through the use of two first-order on-chip filters: a switched capacitor low-pass filter, with 400Hz -3dB bandwidth, in combination with an active low-pass filter. The active filter -3 dB nominal frequency ( $f_{tA}$ ) is set through an internal resistor  $R_{ACT}$  and the external capacitor  $C_{ACT}$  (added between **CACT** pin #5 and **ANALOG OUTPUT** pin #6), by the formula:

$$f_{tA} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{ACT} \cdot C_{ACT}}$$

The value of the internal resistor  $R_{ACT}$  is 180 kΩ, while the external capacitor  $C_{ACT}$  is used to select the signal bandwidth. The sensed frequency range spans from DC up to the selected bandwidth.

In order to further reduce high-frequency noise, the LISY300AL supports an additional optional low-pass filter on **ANALOG OUTPUT** pin #6 (Figure 3). The cutoff frequency ( $f_{tP}$ ) is given by the formula:

$$f_{tP} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{OPT} \cdot C_{OPT}}$$

The LISY300AL IC includes a PLL (phase locked loop) circuit to synchronize driving and sensing interfaces. Capacitors and resistors must be added at the **FILTVDD** and **VCONT** pads (as shown in *Figure 3*) to implement a second-order low-pass filter. *Table 6* summarizes the PLL low-pass filter components' values.

**Table 6. PLL low-pass filter components' values**

Component	Value
C1	450 nF $\pm$ 10%
C2	9 nF $\pm$ 10%
R1	9.5 k $\Omega$ $\pm$ 10%

### 3.1 Soldering information

The LGA package is compliant with the ECOPACK<sup>®</sup>, RoHS and "Green" standard. It is qualified for soldering heat resistance according to JEDEC J-STD-020C.

Leave "Pin 1 Indicator" unconnected during soldering.

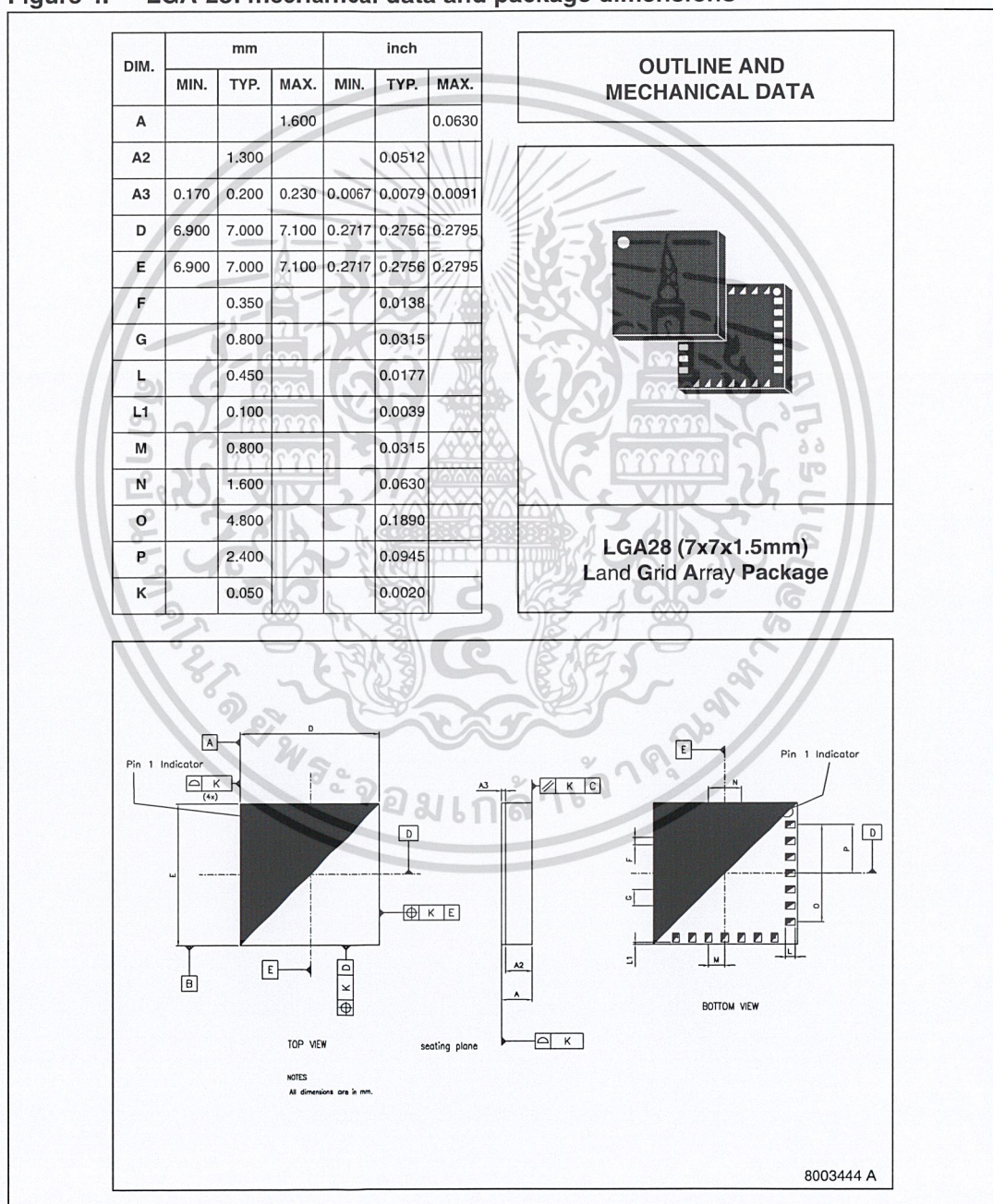
Land pattern and soldering recommendations are available at [www.st.com/mems](http://www.st.com/mems).

## 4 Package information

In order to meet environmental requirements, ST offers these devices in ECOPACK® packages. These packages have a lead-free second level interconnect. The category of second level interconnect is marked on the inner box label, in compliance with JEDEC Standard JESD97. The maximum ratings related to soldering conditions are also marked on the inner box label. ECOPACK® is an ST trademark.

ECOPACK® specifications are available at: [www.st.com](http://www.st.com).

Figure 4. LGA-28: mechanical data and package dimensions



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่มีการแก้ไข ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5 Revision history

Table 7. Document revision history

Date	Revision	Changes
29-May-08	1	Initial release



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ  
 12/13



**Please Read Carefully:**

Information in this document is provided solely in connection with ST products. STMicroelectronics NV and its subsidiaries ("ST") reserve the right to make changes, corrections, modifications or improvements, to this document, and the products and services described herein at any time, without notice.

All ST products are sold pursuant to ST's terms and conditions of sale.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection and use of the ST products and services described herein, and ST assumes no liability whatsoever relating to the choice, selection or use of the ST products and services described herein.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted under this document. If any part of this document refers to any third party products or services it shall not be deemed a license grant by ST for the use of such third party products or services, or any intellectual property contained therein or considered as a warranty covering the use in any manner whatsoever of such third party products or services or any intellectual property contained therein.

**UNLESS OTHERWISE SET FORTH IN ST'S TERMS AND CONDITIONS OF SALE ST DISCLAIMS ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTY WITH RESPECT TO THE USE AND/OR SALE OF ST PRODUCTS INCLUDING WITHOUT LIMITATION IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE (AND THEIR EQUIVALENTS UNDER THE LAWS OF ANY JURISDICTION), OR INFRINGEMENT OF ANY PATENT, COPYRIGHT OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT.**

**UNLESS EXPRESSLY APPROVED IN WRITING BY AN AUTHORIZED ST REPRESENTATIVE, ST PRODUCTS ARE NOT RECOMMENDED, AUTHORIZED OR WARRANTED FOR USE IN MILITARY, AIR CRAFT, SPACE, LIFE SAVING, OR LIFE SUSTAINING APPLICATIONS, NOR IN PRODUCTS OR SYSTEMS WHERE FAILURE OR MALFUNCTION MAY RESULT IN PERSONAL INJURY, DEATH, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE. ST PRODUCTS WHICH ARE NOT SPECIFIED AS "AUTOMOTIVE GRADE" MAY ONLY BE USED IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS AT USER'S OWN RISK.**

Resale of ST products with provisions different from the statements and/or technical features set forth in this document shall immediately void any warranty granted by ST for the ST product or service described herein and shall not create or extend in any manner whatsoever, any liability of ST.

ST and the ST logo are trademarks or registered trademarks of ST in various countries.

Information in this document supersedes and replaces all information previously supplied.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics. All other names are the property of their respective owners.

© 2008 STMicroelectronics - All rights reserved

STMicroelectronics group of companies

Australia - Belgium - Brazil - Canada - China - Czech Republic - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States of America

[www.st.com](http://www.st.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่มีการเผยแพร่ หักล้าง อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกร วนาไปใช้

13/13



Edited with the demo version of  
Infix Pro PDF Editor

To remove this notice, visit:  
[www.infix.com/unlock.htm](http://www.infix.com/unlock.htm)

## $\pm 1.5g$ - 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer

The MMA7260Q low cost capacitive micromachined accelerometer features signal conditioning, a 1-pole low pass filter, temperature compensation and g-Select which allows for the selection among 4 sensitivities. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. Includes a Sleep Mode that makes it ideal for handheld battery powered electronics.

### Features

- Selectable Sensitivity (1.5g/2g/4g/6g)
- Low Current Consumption: 500  $\mu A$
- Sleep Mode: 3  $\mu A$
- Low Voltage Operation: 2.2 V – 3.6 V
- 6mm x 6mm x 1.45mm QFN
- High Sensitivity (800 mV/g @1.5 g)
- Fast Turn On Time
- High Sensitivity (1.5 g)
- Integral Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Robust Design, High Shocks Survivability
- Pb-Free Terminations
- Environmentally Preferred Package
- Low Cost

### Typical Applications

- HDD MP3 Player : Freefall Detection
- Laptop PC : Freefall Detection, Anti-Theft
- Cell Phone : Image Stability, Text Scroll, Motion Dialing, E-Compass
- Pedometer : Motion Sensing
- PDA : Text Scroll
- Navigation and Dead Reckoning : E-Compass Tilt Compensation
- Gaming : Tilt and Motion Sensing, Event Recorder
- Robotics : Motion Sensing

## MMA7260Q

**MMA7260Q: XYZ AXIS  
 ACCELEROMETER**  
 $\pm 1.5g/2g/4g/6g$

Bottom View



16 LEAD  
 QFN  
 CASE 1622-01

Top View

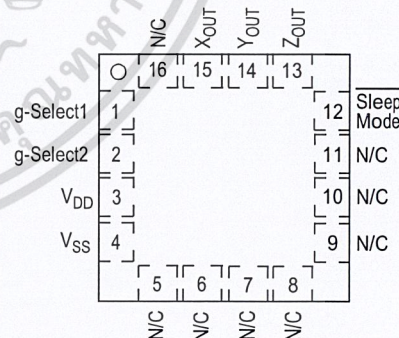


Figure 1. Pin Connections

### ORDERING INFORMATION

Device Name	Temperture Range	Case No.	Package
MMA7260Q	- 20 to +85°C	1622-01	QFN-16, Tube
MMA7260QR2	- 20 to +85°C	1622-01	QFN-16, Tape & Reel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© Freescale Semiconductor, Inc., 2005. All rights reserved.

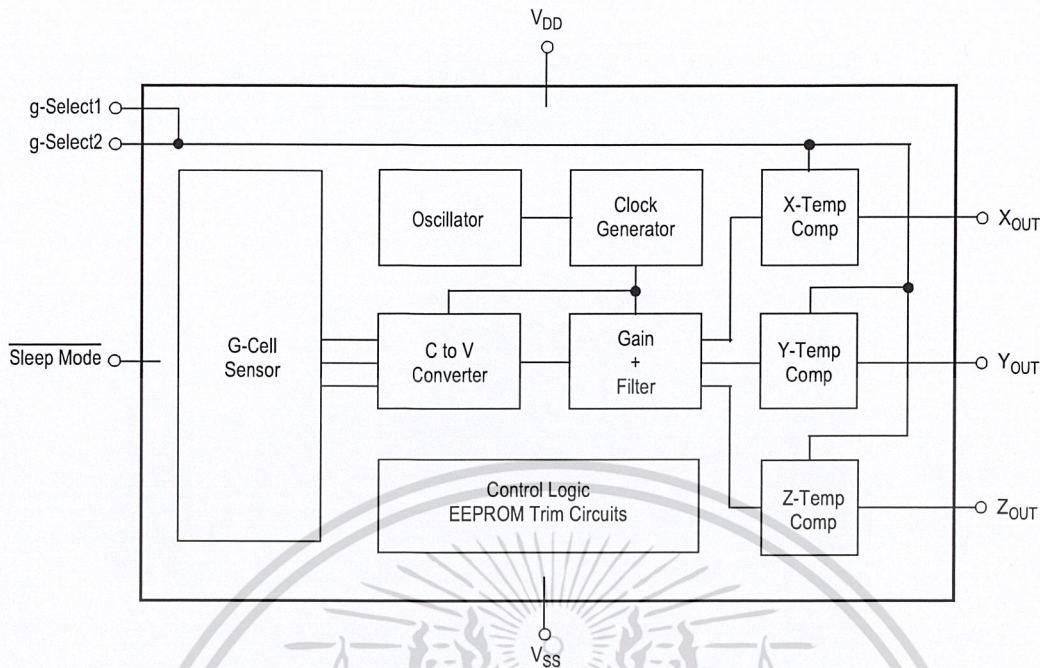


Figure 2. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Acceleration (all axis)	$g_{max}$	±2000	g
Supply Voltage	$V_{DD}$	-0.3 to +3.6	V
Drop Test <sup>(1)</sup>	$D_{drop}$	1.8	m
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

### ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

**WARNING:** This device is sensitive to electrostatic discharge.

Although the Freescale accelerometer contains internal 2000 V ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can

alter the performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table 2. Operating Characteristics**Unless otherwise noted:  $-20^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 85^{\circ}\text{C}$ ,  $2.2\text{ V} \leq V_{\text{DD}} \leq 3.6\text{ V}$ , Acceleration = 0g, Loaded output<sup>(1)</sup>

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range <sup>(2)</sup>					
Supply Voltage <sup>(3)</sup>	$V_{\text{DD}}$	2.2	3.3	3.6	V
Supply Current	$I_{\text{DD}}$	—	500	800	$\mu\text{A}$
Supply Current at Sleep Mode <sup>(4)</sup>	$I_{\text{DD}}$	—	3	10	$\mu\text{A}$
Operating Temperature Range	$T_A$	-20	—	+85	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range, X-Axis, Y-Axis, Z-Axis					
g-Select1 & 2: 00	$g_{\text{FS}}$	—	$\pm 1.5$	—	g
g-Select1 & 2: 10	$g_{\text{FS}}$	—	$\pm 2.0$	—	g
g-Select1 & 2: 01	$g_{\text{FS}}$	—	$\pm 4.0$	—	g
g-Select1 & 2: 11	$g_{\text{FS}}$	—	$\pm 6.0$	—	g
Output Signal					
Zero g ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{\text{DD}} = 3.3\text{ V}$ ) <sup>(5)</sup>	$V_{\text{OFF}}$	1.485	1.65	1.815	V
Zero g	$V_{\text{OFF}}, T_A$	—	$\pm 2$	—	$\text{mg}/^{\circ}\text{C}$
Sensitivity ( $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ , $V_{\text{DD}} = 3.3\text{ V}$ )					
1.5g	$S_{1.5g}$	740	800	860	$\text{mV/g}$
2g	$S_{2g}$	555	600	645	$\text{mV/g}$
4g	$S_{4g}$	277.5	300	322.5	$\text{mV/g}$
6g	$S_{6g}$	185	200	215	$\text{mV/g}$
Sensitivity	$S, T_A$	—	$\pm 0.03$	—	$\%/^{\circ}\text{C}$
Bandwidth Response					
XY	$f_{-3\text{dB}}$	—	350	—	Hz
Z	$f_{-3\text{dB}}$	—	150	—	Hz
Noise					
RMS (0.1 Hz – 1 kHz) <sup>(4)</sup>	$n_{\text{RMS}}$	—	4.7	—	$\text{mV}_{\text{rms}}$
Power Spectral Density RMS (0.1 Hz – 1 kHz) <sup>(4)</sup>	$n_{\text{PSD}}$	—	350	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Control Timing					
Power-Up Response Time <sup>(6)</sup>	$t_{\text{RESPONSE}}$	—	1.0	2.0	ms
Enable Response Time <sup>(7)</sup>	$t_{\text{ENABLE}}$	—	0.5	2.0	ms
Sensing Element Resonant Frequency					
XY	$f_{\text{GCELL}}$	—	6.0	—	kHz
Z	$f_{\text{GCELL}}$	—	3.4	—	kHz
Internal Sampling Frequency	$f_{\text{CLK}}$	—	11	—	kHz
Output Stage Performance					
Full-Scale Output Range ( $I_{\text{OUT}} = 30\ \mu\text{A}$ )	$V_{\text{FSO}}$	$V_{\text{SS}}+0.25$	—	$V_{\text{DD}}-0.25$	V
Nonlinearity, $X_{\text{OUT}}$ , $Y_{\text{OUT}}$ , $Z_{\text{OUT}}$	$NL_{\text{OUT}}$	-1.0	—	+1.0	%FSO
Cross-Axis Sensitivity <sup>(8)</sup>	$V_{\text{XY}, \text{XZ}, \text{YZ}}$	—	—	5.0	%

1. For a loaded output, the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1.0 k $\Omega$  resistor and a 0.1  $\mu\text{F}$  capacitor to ground.
2. These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
3. Within the supply range of 2.2 and 3.6 V, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
4. This value is measured with g-Select in 1.5g mode.
5. The device can measure both + and – acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above  $V_{\text{DD}}/2$ . For negative acceleration, the output will decrease below  $V_{\text{DD}}/2$ .
6. The response time between 10% of full scale Vdd input voltage and 90% of the final operating output voltage.
7. The response time between 10% of full scale Sleep Mode input voltage and 90% of the final operating output voltage.
8. A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90° from the true axis of sensitivity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of two surface micromachined capacitive sensing cells (g-cell) and a signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing elements are sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined cap wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as a set of beams attached to a movable central mass that move between fixed beams. The movable beams can be deflected from their rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

As the beams attached to the central mass move, the distance from them to the fixed beams on one side will increase by the same amount that the distance to the fixed beams on the other side decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell beams form two back-to-back capacitors (Figure 3). As the center beam moves with acceleration, the distance between the beams changes and each capacitor's value will change, ( $C = A\epsilon/D$ ). Where A is the area of the beam,  $\epsilon$  is the dielectric constant, and D is the distance between the beams.

The ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

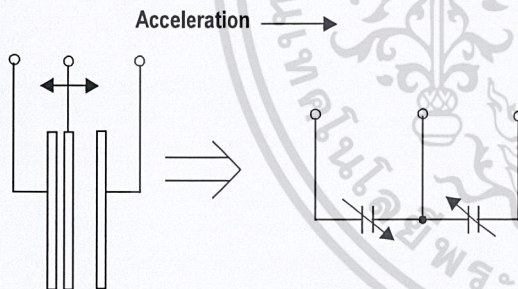


Figure 3. Simplified Transducer Physical Model

## SPECIAL FEATURES

### g-Select

The g-Select feature allows for the selection among 4 sensitivities present in the device. Depending on the logic input placed on pins 1 and 2, the device internal gain will be changed allowing it to function with a 1.5g, 2g, 4g, or 6g sensitivity (Table 3). This feature is ideal when a product has applications requiring different sensitivities for optimum performance. The sensitivity can be changed at anytime during the operation of the product. The g-Select1 and g-Select2 pins can be left unconnected for applications requiring only a 1.5g sensitivity as the device has an internal pulldown to keep it at that sensitivity (800mV/g).

Table 3. g-Select pin Descriptions

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800mV/g
0	1	2g	600mV/g
1	0	4g	300mV/g
1	1	6g	200mV/g

### Sleep Mode

The 3 axis accelerometer provides a Sleep Mode that is ideal for battery operated products. When Sleep Mode is active, the device outputs are turned off, providing significant reduction of operating current. A low input signal on pin 12 (Sleep Mode) will place the device in this mode and reduce the current to 3uA typ. For lower power consumption, it is recommended to set g-Select1 and g-Select2 to 1.5g mode. By placing a high input signal on pin 12, the device will resume to normal mode of operation.

### Filtering

The 3 axis accelerometer contains onboard single-pole switched capacitor filters. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

### Ratiometricity

Ratiometricity simply means the output offset voltage and sensitivity will scale linearly with applied supply voltage. That is, as supply voltage is increased, the sensitivity and offset increase linearly; as supply voltage decreases, offset and sensitivity decrease linearly. This is a key feature when interfacing to a microcontroller or an A/D converter because it provides system level cancellation of supply induced errors in the analog to digital conversion process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## BASIC CONNECTIONS

### Pin Descriptions

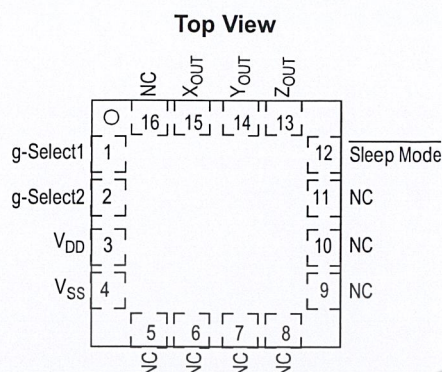


Figure 4. Pinout Description

Table 4. Pin Descriptions

Pin No.	Pin Name	Description
1	g-Select1	Logic input pin to select g level.
2	g-Select2	Logic input pin to select g level.
3	V <sub>DD</sub>	Power Supply Input
4	V <sub>SS</sub>	Power Supply Ground
5 - 7	N/C	No internal connection. Leave unconnected.
8 - 11	N/C	Unused for factory trim. Leave unconnected.
12	Sleep Mode	Logic input pin to enable product or Sleep Mode.
13	Z <sub>OUT</sub>	Z direction output voltage.
14	Y <sub>OUT</sub>	Y direction output voltage.
15	X <sub>OUT</sub>	X direction output voltage.
16	N/C	No internal connection. Leave unconnected.

### PCB Layout

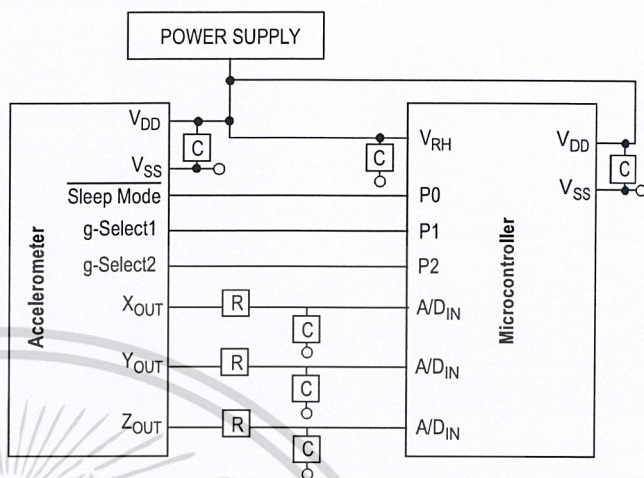


Figure 6. Recommended PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller

#### NOTES:

1. Use 0.1  $\mu\text{F}$  capacitor on V<sub>DD</sub> to decouple the power source.
2. Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
3. Flag underneath package is connected to ground.
4. Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in Figure 6.
5. Use an RC filter with 1.0 k $\Omega$  and 0.1  $\mu\text{F}$  on the outputs of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
6. PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
7. Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
8. A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency (11 kHz for the sampling frequency). This will prevent aliasing errors.

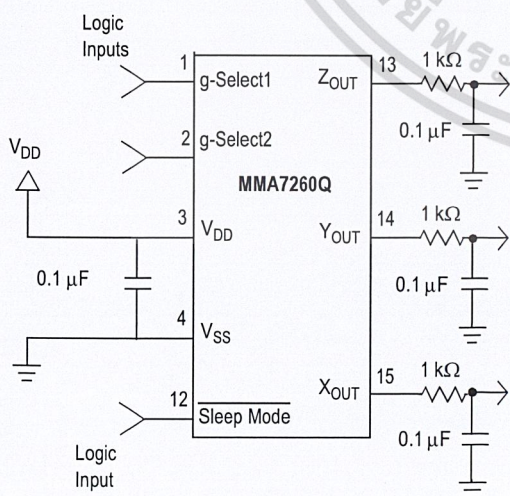
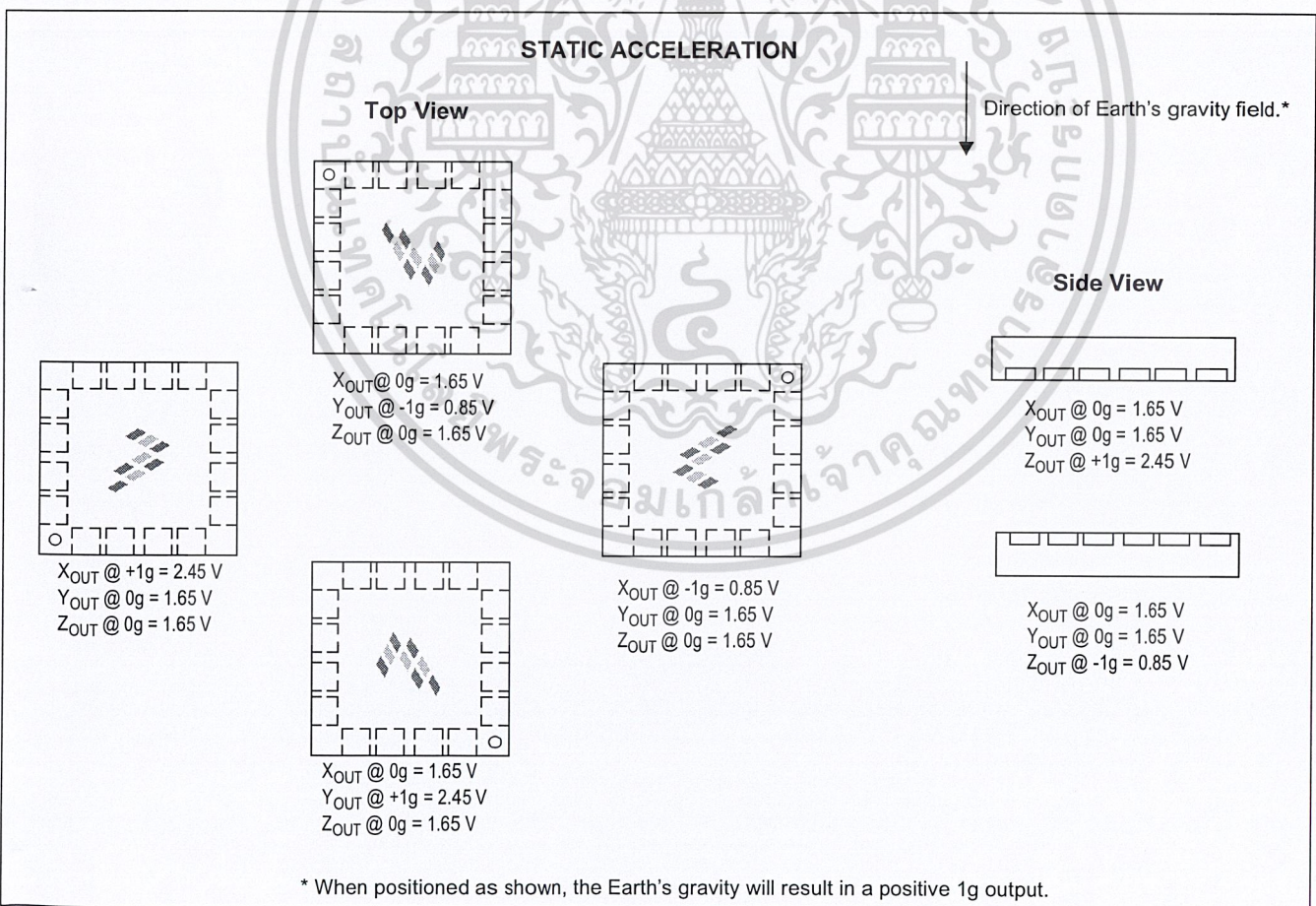
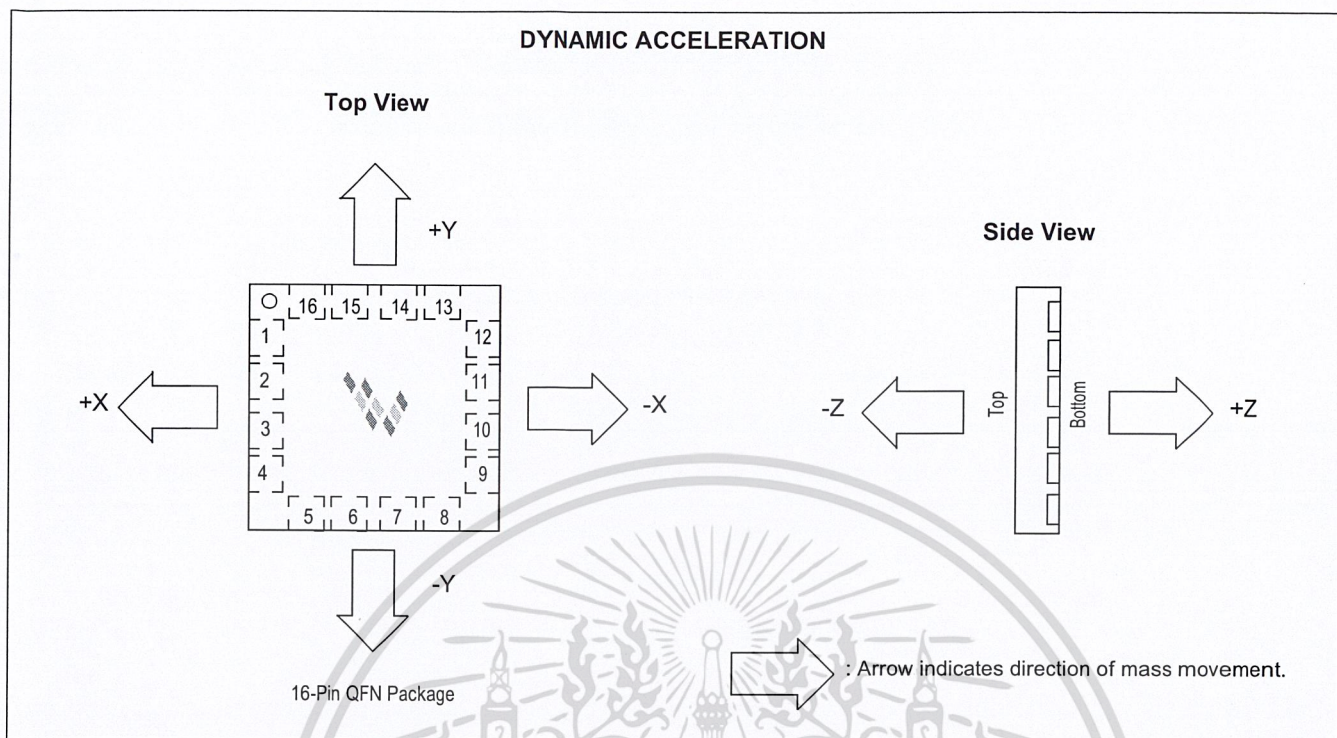


Figure 5. Accelerometer with Recommended Connection Diagram

เอกสารนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

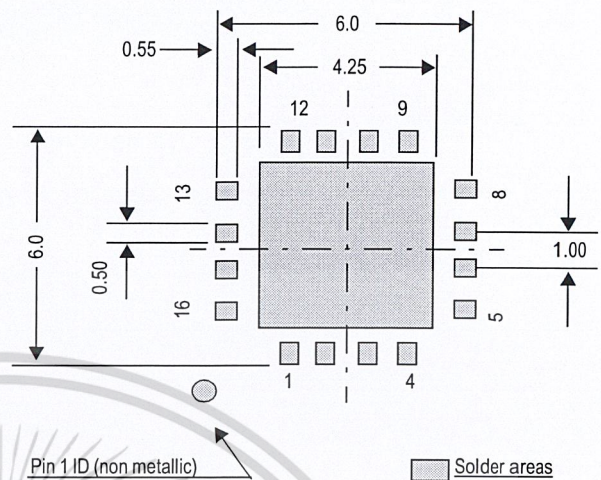


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

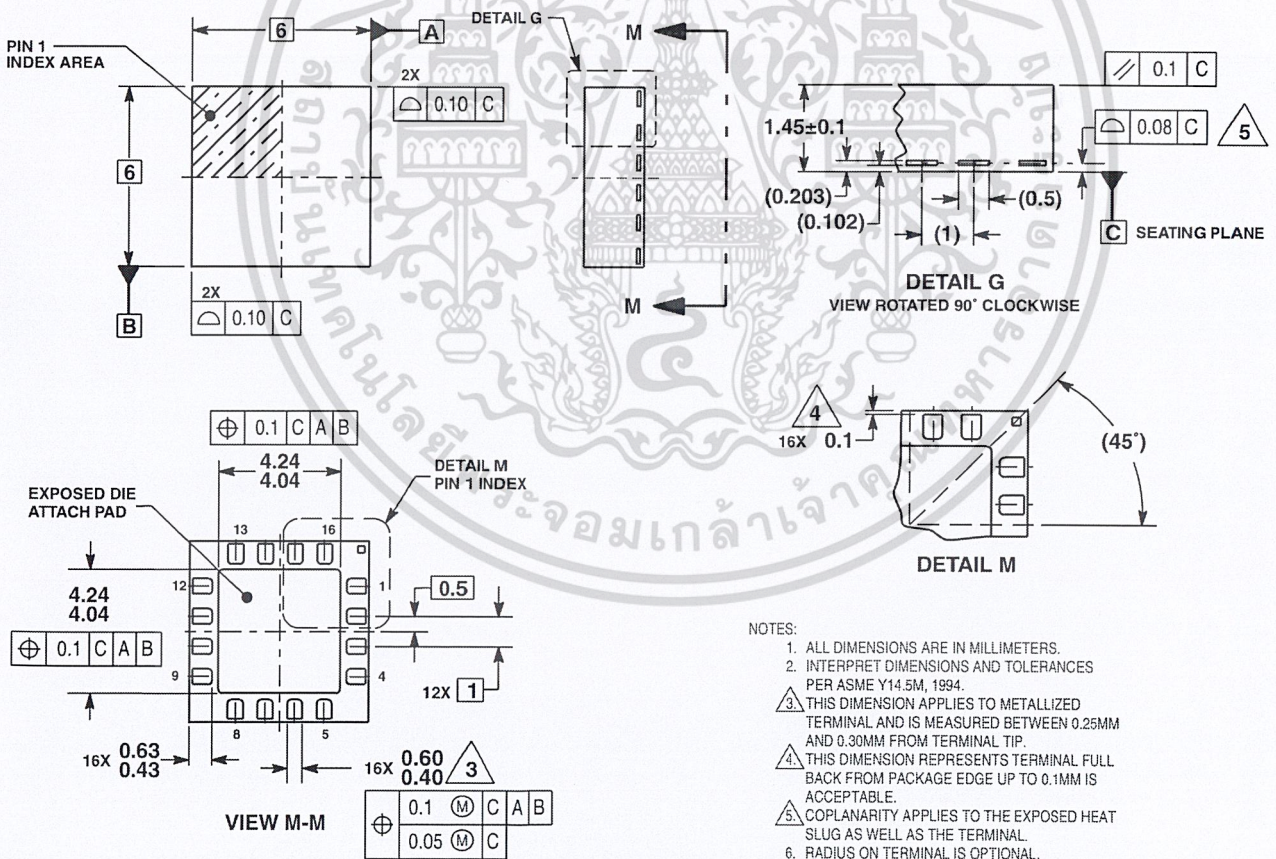
### MINIMUM RECOMMENDED FOOTPRINT FOR SURFACE MOUNTED APPLICATIONS

Surface mount board layout is a critical portion of the total design. The footprint for the surface mount packages must be the correct size to ensure proper solder connection interface between the board and the package.

With the correct footprint, the packages will self-align when subjected to a solder reflow process. It is always recommended to design boards with a solder mask layer to avoid bridging and shorting between solder pads.



### PACKAGE DIMENSIONS



- NOTES:
1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
  2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M, 1994.
  3. THIS DIMENSION APPLIES TO METALLIZED TERMINAL AND IS MEASURED BETWEEN 0.25MM AND 0.30MM FROM TERMINAL TIP.
  4. THIS DIMENSION REPRESENTS TERMINAL FULL BACK FROM PACKAGE EDGE UP TO 0.1MM IS ACCEPTABLE.
  5. COPLANARITY APPLIES TO THE EXPOSED HEAT SLUG AS WELL AS THE TERMINAL.
  6. RADIUS ON TERMINAL IS OPTIONAL.
  7. MINIMUM METAL GAP 0.2MM.

**CASE 1622-01  
ISSUE O  
16-LEAD QFN**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MMA7260Q

Sensors  
Freescale Semiconductor

Edited with the demo version  
iText Pro PDF Editor

To remove this notice, visit:  
[www.iceni.com/unlock.htm](http://www.iceni.com/unlock.htm)

## How to Reach Us:

**Home Page:**  
www.freescale.com

**E-mail:**  
support@freescale.com

**USA/Europe or Locations Not Listed:**  
Freescale Semiconductor  
Technical Information Center, CH370  
1300 N. Alma School Road  
Chandler, Arizona 85224  
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130  
support@freescale.com

**Europe, Middle East, and Africa:**  
Freescale Halbleiter Deutschland GmbH  
Technical Information Center  
Schatzbogen 7  
81829 Muenchen, Germany  
+44 1296 380 456 (English)  
+46 8 52200080 (English)  
+49 89 92103 559 (German)  
+33 1 69 35 48 48 (French)  
support@freescale.com

**Japan:**  
Freescale Semiconductor Japan Ltd.  
Headquarters  
ARCO Tower 15F  
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,  
Tokyo 153-0064  
Japan  
0120 191014 or +81 3 5437 9125  
support.japan@freescale.com

**Asia/Pacific:**  
Freescale Semiconductor Hong Kong Ltd.  
Technical Information Center  
2 Dai King Street  
Tai Po Industrial Estate  
Tai Po, N.T., Hong Kong  
+800 2666 8080  
support.asia@freescale.com

**For Literature Requests Only:**  
Freescale Semiconductor Literature Distribution Center  
P.O. Box 5405  
Denver, Colorado 80217  
1-800-441-2447 or 303-675-2140  
Fax: 303-675-2150  
LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Freescale Semiconductor, Inc. 2005. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ประจันพลังสันติกุล. เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์เขียน โปรแกรมภาษา C ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร : อินโนเวตีฟเอ็กเพอริเมนต์.2547.
- [2] ทีมงานสมาร์ทเลิร์นนิ่ง. การออกแบบลายวงจรพิมพ์ด้วย Protel DXP. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ด้านอุตสาหกรรมพิมพ์ จำกัด.2549.
- [3] นิรุช อำนวยศิลป์. คู่มือการเขียนโปรแกรม Microsoft Visual C++ Version 6.0 ฉบับการใช้งานจริง. กรุงเทพมหานคร : ซัคเซสมิเดีย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้