

หุ่นยนต์สองล้อ

INVERTED PENDULUM CART



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2552

หุ่นยนต์สองล้อ

INVERTED PENDULUM CART



นางสาวพิศุภพรรณ แสนสุวรรณ
นางสาววรรณษา แก้วกค
นางสาววรรณ สงวนพรรค

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVERTED PENDULUM CART



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2552

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ่นยนต์สองล้อ

ผู้จัดทำ

- 1.นางสาวพิกุลพรรณ แสนสุวรรณ รหัสประจำตัว 49010639
2. นางสาววรรณิษา แก้วกต รหัสประจำตัว 49010828
3. นางสาววราภรณ์ สงวนพรรค รหัสประจำตัว 49010844

ลงชื่อ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ยุทธนา ทิศาใจเดียว)

วันที่ 14 / 5 / 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หุ่นยนต์สองล้อ

นางสาวพิกุลพรรณ แสนสุวรรณ	รหัส 49010639
นางสาววรรณิษา แก้วคด	รหัส 49010828
นางสาววราภรณ์ สงวนพรรค	รหัส 49010844
ผศ.ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2552	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาการทำงานและประยุกต์ใช้งานของหุ่นยนต์สองล้อ (อินเวิร์ตเพนดูลัม) ในส่วนควบคุมการทำงานและขับเคลื่อน ซึ่งเป็นการติดต่อแบบไร้สาย โดยจะรับและส่งสัญญาณผ่านทาง Zigbee มีการอินเตอร์เฟสที่รับและส่งข้อมูลกับ Zigbee ที่เป็น UART (TTL) สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ผ่าน X-CTU ได้ สัญญาณที่ขับเคลื่อนจะเป็นพัลส์วามอดดูเลชัน ซึ่งจะควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์

Inverted Pendulum Cart

Miss.Phikunphan Saensuwan ID. 49010639

Miss.Vannisa Kaewkot ID. 49010828

Miss.Waraporn Sa-nguanpak ID. 49010844

Asst. Prof. Dr.Yuttana Kidjaidure Advisor

Educational Year 2009

Abstract

This thesis aims to study and implement the controlling and driving system of a two-wheel balancing robot. Signals from sensor and control processing unit are transmitted and received by Zigbee which is a transceiver wireless technology. Zigbee can interface with UART (TTL) and is able to set parameter by X-CTU. Pulse width modulation (PWM) is a signal for velocity control and a spin direction of the motor.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยการสนับสนุน คำแนะนำ และคำปรึกษา
ต่างๆ จาก ผศ.ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว ผู้จัดทำขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ที่ได้รับจาก
อาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆ ท่านและบุคคลที่ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ที่ได้ให้คำแนะนำ
และคำปรึกษาต่างๆ เรื่อยมา ซึ่งมีประโยชน์ยิ่งต่อการทำงาน

ขอขอบคุณวงศ์สันต์(พีโอ) กฤษดา(พีเอ็กซ์) พี่ๆและเพื่อนๆทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้
กำลังใจ และให้แนวทางในการปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และการสนับสนุนในทุกด้าน
ตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอขอบแต่บิดา มารดา ครู
อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิกุลพรรณ แสนสุวรรณ

(นางสาวพิกุลพรรณ แสนสุวรรณ)

จรรยา แก้วคง

(นางสาวจรรยา แก้วคง)

จัทธกร สวงพาด

(นางสาวจัทธกร สวงพาด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
ABSTRACT	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูปภาพ	vii
สารบัญตาราง	xi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีอินเวอร์เพนดูลัม	3
บทที่ 3 ส่วนประกอบ	6
3.1 เซนเซอร์	6
3.1.1 เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer)	6
3.1.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)	6
3.2 Xbee/Zigbee	9
3.2.1 คุณสมบัติที่เหมือนกันของ Xbee และ Zigbee	9
3.2.1.1 Zigbee	10
3.2.1.2 Xbee	10
3.3 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)	14
3.3.1 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์	16
3.3.2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์	16
3.3.3 เ็นโค้ดเดอร์	18
3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC18F258	23
บทที่ 4 รูปแบบการรับส่ง ข้อมูล	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 UART, Universal Asynchronous Receiver Transmitter	25
4.2 Serial Port	25
4.2.1 จังหวะเวลาของการสื่อสารข้อมูลอนุกรม	25
4.2.2 รูปแบบของข้อมูลอนุกรม	26
4.2.3 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส	28
4.2.4 การสื่อสารแบบซิงโครนัส	28
บทที่ 5 ทฤษฎีการควบคุม	30
5.1 ตัวควบคุมและแบบการควบคุม (Controller and Control Action)	31
5.1.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control action: P -Action)	31
5.1.2 การควบคุมแบบรวม (Integral control action: I-Action)	32
5.1.3 การควบคุมแบบอัตรา (Derivative control action: D -Action)	33
5.2 การควบคุมแบบผสม (Mixed – Mode of Control Action)	34
5.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม (Proportional – Plus Integral Control Action)	35
5.2.2 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตรา (Proportional – Plus – Derivative Control Action)	36
5.2.3 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตรา (Proportional – Plus – Integral – Plus – Derivative Control Action)	37
5.3 การปรับ PID	38
5.3.1 ผลการตอบสนองที่ดี	38
5.3.2 ผลของ PID ต่อเสถียรภาพของระบบ	40
5.3.3 คุณภาพของการควบคุม	41
บทที่ 6 ขั้นตอนและโปรแกรมการทำงาน	43
6.1 แผนผังการทำงานของระบบ	43
6.2 Flow chart การทำงานของโปรแกรม visual c++	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตั้งวางอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์	47
7.1 กรณีที่หุ่นยนต์ไม่มี sample time (real time) และไม่มี noise	47
7.2 กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 50 เฮิร์ตและมี noise	50
7.3 กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 10 เฮิร์ตและมี noise	54
บทที่ 8 การสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์	58
8.1 โครงสร้างของระบบ	58
8.2 ภาคเซนเซอร์	59
8.2.1 เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer)	59
8.2.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)	59
8.3 ภาคควบคุม	60
8.3.1 ส่วนประมวลผลกลาง	60
8.3.2 คุณสมบัติของตัวควบคุม PID ที่ใช้งานจริง	61
8.4 ภาคเอาต์พุตขับเคลื่อนมอเตอร์	61
8.5 โครงสร้างของหุ่นยนต์	62
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง	65
9.1 น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์	65
9.2 วัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)	65
9.3 วัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer)	67
9.4 วัดการตอบสนองของมอเตอร์	71
บทที่ 10 สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา	73
10.1 สรุปผลการทดลอง	73
10.2 แนวทางในการพัฒนาปรับปรุง	74
10.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	74
บรรณานุกรม	xii
ภาคผนวก	

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 Free Body Diagram	3
รูปที่ 3.1 แอ็คเซเลอโรมิเตอร์แบบเชิงกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์	6
รูปที่ 3.2 เซนเซอร์ใจโรสโคปเบอร์ IDG500	7
รูปที่ 3.3 โครงสร้างภายในของใจโรสโคป	7
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแสดงความเร่งคอร์ริโอลิส	8
รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างทั่วไปของใจโรสโคป	8
รูปที่ 3.6 PIN of Xbee	9
รูปที่ 3.7 สายอากาศแบบ Chip, Whip ตามลำดับ	10
รูปที่ 3.8 Xbee USB Dongle	12
รูปที่ 3.9 BlueBee	13
รูปที่ 3.10 U2S_HOST Board	13
รูปที่ 3.11 โค้ดแกรมระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐาน	15
รูปที่ 3.12 สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PFM	17
รูปที่ 3.13 สัญญาณควบคุมมอเตอร์แบบ PWM	18
รูปที่ 3.14 แสดง Rotary Encoder	18
รูปที่ 3.15 แสดงการสร้าง pulse ของ Rotary Encoder	19
รูปที่ 3.16 แสดง Pulse ของ Rotary แบบสองเฟส	19
รูปที่ 3.17 แสดงการตรวจเช็คสัญญาณ pulse ของ Rotary Encoder	20
รูปที่ 3.18 ลักษณะ pulse ของ Rotary Encoder ทั้ง สองเฟส	20
รูปที่ 3.19 แสดงความละเอียดของ pulse	21
รูปที่ 3.20 แสดง Block Diagram ของ Rotary Encoder	22
รูปที่ 3.21 รูปแสดงการตรวจจับขอบขาขึ้น และขอบขาลงของทั้ง 2 เฟส	23
รูปที่ 3.22 รูปแสดงวิธีการตรวจจับทิศทางการหมุนของ Rotary Encoder	

โดยอ่านค่าเข้ามาทาง Port 1

23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตัด vii อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.23 แสดงการเช็คความกว้างของ Pulse	23
รูปที่ 3.24 แสดงขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC18F258	24
รูปที่ 4.1 รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าของข้อมูล ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลแบบอนุกรม ด้วยอัตราเร็ว 2400 บิต/วินาที	26
รูปที่ 4.2 แผนภาพสัญญาณเวลาของข้อมูลแบบอนุกรมจำนวน 8 บิต พร้อมด้วยบิตเริ่มต้นบิตพาริตี และ บิตสุดท้าย	27
รูปที่ 4.3 วิธีการถ่ายโอนข้อมูลแบบอนุกรม	28
รูปที่ 4.4 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส	28
รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับ	30
รูปที่ 5.2 โครงสร้างตัวควบคุม	31
รูปที่ 5.3 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพี	31
รูปที่ 5.4 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบไอ	32
รูปที่ 5.5 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบดี	33
รูปที่ 5.6 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีและไอ	36
รูปที่ 5.7 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพีและดี	37
รูปที่ 5.8 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี	38
รูปที่ 5.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	39
รูปที่ 5.10 ผลตอบของระบบควบคุมต่างๆ	39
รูปที่ 5.11 Transient and Steady-State Response	41
รูปที่ 6.1 แผนภาพการทำงานการ Simulate	43
รูปที่ 6.2 Flow chart	44
รูปที่ 6.3 flow chart แสดงการทำงานในส่วนของมาสเตอร์	45
รูปที่ 6.4 flow chart แสดงการทำงานในส่วนของ slave	46
รูปที่ 7.1 Simulation กรณีที่หุ่นยนต์ไม่มี sample time (real time) และไม่มี noise	47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.2 กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)	48
รูปที่ 7.3 กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)	49
รูปที่ 7.4 กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)	49
รูปที่ 7.5 Simulation กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 50 เฮิร์ตและมี noise	50
รูปที่ 7.6 สัญญาณรบกวนที่ความถี่เท่ากับ 1 เฮิร์ตและมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 เดซิเบล	51
รูปที่ 7.7 กราฟของ White Noise มีค่าเท่ากับ 1 เดซิเบล	51
รูปที่ 7.8 รูปกราฟของสัญญาณรบกวนรวมของระบบ	52
รูปที่ 7.9 กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)	52
รูปที่ 7.10 กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)	53
รูปที่ 7.11 กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)	53
รูปที่ 7.12 Simulation กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 10 เฮิร์ตและมี noise	54
รูปที่ 7.13 สัญญาณรบกวนที่ความถี่เท่ากับ 1 เฮิร์ตและมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 เดซิเบล	55
รูปที่ 7.14 กราฟของ White Noise มีค่าเท่ากับ 0.005 เดซิเบล	55
รูปที่ 7.15 รูปกราฟของสัญญาณรบกวนรวมของระบบ	56
รูปที่ 7.16 กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)	56
รูปที่ 7.17 กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)	57
รูปที่ 7.18 กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)	57
รูปที่ 8.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบ	58
รูปที่ 8.2 บล็อกไดอะแกรมของ ADXL335	59
รูปที่ 8.3 วงจรภายใน Breakout Boardของไจโรสโคป เบอร์ IDG – 500	60
รูปที่ 8.4 มอเตอร์	61
รูปที่ 8.5 ตัวถังของหุ่นยนต์	62
รูปที่ 8.6 ล้อของหุ่นยนต์	62
รูปที่ 8.7 เสาค้ำและตัวหมุน	63
รูปที่ 8.8 รูปตัวรถที่ประกอบสำเร็จ	63

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 8.9 วงจรด้านฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์ที่ออกแบบ	64
รูปที่ 9.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์	67
รูปที่ 9.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าความเร่งที่แกน Z	67
รูปที่ 9.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าความเร่งที่แกน X	68
รูปที่ 9.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าแรงดันเอาต์พุตของแกน Z	69
รูปที่ 9.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าแรงดันเอาต์พุตของแกน X	70
รูปที่ 9.6 กราฟแสดงความเร็วในการกลับขั้วมอเตอร์	72
รูปที่ 9.7 กราฟแสดงการเปลี่ยน % duty cycle	72



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงการ XOR ด้วยค่าต่างๆ	21
ตารางที่ 9.1 แสดงน้ำหนักของหุ่นยนต์	65
ตารางที่ 9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต จากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง	66
ตารางที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต จากแกน Z ของวงจรเซนเซอร์กับมุมเอียง	68
ตารางที่ 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต จากแกน X ของวงจรเซนเซอร์กับมุมเอียง	70
ตารางที่ 9.5 ผลการตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ในการกลับทิศทาง	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาหลายประเทศได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์สองล้อและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในประเทศไทยนับว่างานวิจัยด้านนี้อยู่ไม่ไกล ซึ่งเป็นการควบคุมการทรงตัวของยานพาหนะสองล้อ (two-wheeled) ที่มีลักษณะเป็นการทรงตัวประเภทลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว (inverted pendulum) และเป็นระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) อันเป็นผลของแรงโน้มถ่วงโลกซึ่งทำให้เป็นปัญหาวิจัยที่ซับซ้อน

แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านั้นได้สร้างให้เกิดผลิตภัณฑ์ถูกนำมาใช้งานจริง ได้แก่ ยานพาหนะสองล้อ SEGWAY ยานพาหนะเชิงพาณิชย์นี้ถูกใช้แพร่หลายในบางประเทศสำหรับการเดินทางในระยะใกล้หรือภายในบริเวณอาคารขนาดใหญ่ โดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน จึงไม่ก่อเกิดมลพิษทางอากาศประกอบกับรูปทรงที่มีขนาดกะทัดรัดอำนวยความสะดวกต่อการประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังถูกนำมาผลิตเป็นของเล่นวิทยุบังคับที่เป็นหุ่นยนต์สองล้อ

ซึ่งหุ่นยนต์จะติดต่อกับ Zigbee และควบคุมด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวตรวจรู้ (sensor) ประเภทต่างๆ เพื่อประมวลสัญญาณย้อนกลับไปยังระบบควบคุม โดยระบบหุ่นยนต์สองล้อที่ควบคุมนี้ต้องการออกแบบให้ระบบมีการตอบสนองดี มีความไวของระบบเพียงพอ ความผิดพลาด ณ สถานะคงตัวมีค่าต่ำ และสามารถปฏิเสธต่อการรบกวนจากแรงภายนอกได้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการทำงานพื้นฐานและประยุกต์ใช้งานของหุ่นยนต์สองล้อ (อินเวอร์ทเพนดูลัม) ในส่วนควบคุมการทำงานและขับเคลื่อน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

การศึกษการทำงานและประยุกต์ใช้งานของหุ่นยนต์สองล้อ (อินเวอร์ทเพนดูลัม) ในส่วน

ควบคุมการทำงานและขับเคลื่อน ซึ่งเป็นการติดต่อแบบไร้สาย โดยจะรับและส่งสัญญาณผ่านทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zigbee มีการอินเตอร์เฟสที่รับและส่งข้อมูลกับ Zigbee ที่เป็น UART (TTL) สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ผ่าน X-CTU ได้ สัญญาณที่ขั้วมอเตอร์จะเป็นพัลส์วัดมอดดูเลชัน ซึ่งจะควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์

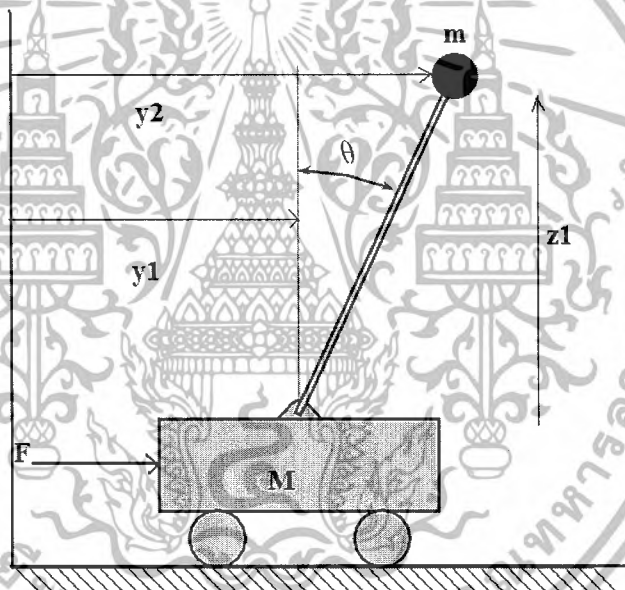


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีอินเวอร์ทเพนดูลัม

ในการสร้างหุ่นยนต์สองล้อให้สามารถสมดุลด้วยตัวเองจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ระบบก่อนเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ และค่าคงที่ป้อนกลับแสดงที่มีผลต่อเสถียรภาพของหุ่นยนต์ โดยในการวิเคราะห์ระบบจำเป็นต้องมีโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อใช้อธิบายระบบด้วยวิธี State space



รูปที่ 2.1 Free Body Diagram

M มวลของตัวรถ [kg]

m มวลของแกน pendulum [kg]

b ความเสียดทานของตัวรถ [Ns/m]

l ความยาวของแกน pendulum to CG [m]

I ความเฉื่อยของแกน pendulum [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

F แรงที่มากระทำจาก motor [N]

x พิกัดทางแกน x ของตัวรถ

θ มุมระหว่างแกน z กับ แกน pendulum [Degree]

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อรวมแรงและคิดพลังงานรวมที่ตัวรถแล้วจะได้พลังงานของแต่ละส่วน ดังนั้นใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_2 = y_1 + l \sin \theta \quad T_1 = \frac{1}{2} M(\dot{y}_1)^2 \quad (2.1)$$

และพลังงานรวมที่แกนเพนดูลัม คือ

$$T_2 = \frac{1}{2} M(\dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2} M(\dot{z}_1)^2 \quad (2.2)$$

สำหรับไดอะแกรมแรงอิสระ (Free Body Diagram) ของ y_2 และ z_2 มีค่าเป็น

$$y_2 = y_1 + l \sin \theta \quad (2.3)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_1 + \dot{\theta} l \cos \theta \quad (2.4)$$

$$z_1 = l \cos \theta \quad (2.5)$$

$$\dot{z}_1 = -l \dot{\theta} \sin \theta \quad (2.6)$$

ดังนั้น พลังงานรวมคือ

$$T = T_1 + T_2$$

$$T = \frac{1}{2} M(\dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} M[(\dot{y}_2)^2 + (\dot{z}_1)^2] \quad (2.7)$$

ให้พลังงานศักย์ (V) ของระบบจะเก็บไว้ที่แกนหลักเพนดูลัม ดังนั้น

$$V = mgz_1 = mgl \cos \theta \quad (2.8)$$

จากสมการของลากรองจ์ (Lagrange's Equation) คือ

$$L = T + V$$

$$= \frac{1}{2} [M + m](\dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2} M[(\dot{y}_2)^2 + (\dot{z}_1)^2] - mgl \cos \theta \quad (2.9)$$

แทนค่าตามสมการ 2.4 และ 2.6 ได้ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} [M + m](\dot{y}_1)^2 + m\dot{y}_1 \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} ml^2 \dot{\theta}^2 - mgl \cos \theta \quad (2.10)$$

สำหรับตัวแปรสแตตสเปจ (State Space Variable) ของระบบมีสองตัว คือ y_1 และ θ ดังนั้นจะ

ได้ สมการของลากรองจ์ คือ

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{y}_1} - \frac{\partial L}{\partial y_1} = f \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dy_1}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (2.12)$$

แต่

$$\frac{\partial L}{\partial y_1} = (M - m)\dot{y}_1 + ml \cos \theta \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_1} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_1} = ml \cos \theta \dot{y}_1 + ml^2 \dot{\theta} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_1} = ml \sin \theta \quad (2.16)$$

จะได้สมการของระบบซึ่งเป็นสมการไดนามิกแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Equation) คือ

$$(M + m)\ddot{y}_1 + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (2.17)$$

$$ml \cos \theta \dot{y}_1 - ml\dot{y}_1 \dot{\theta} - ml^2 \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = 0 \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.17 และ 2.18 เมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\ddot{y}_1 = -\frac{f + m\dot{\theta}^2 l \sin \theta - m\ddot{\theta} l \cos \theta}{M + m} \quad (2.19)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{f \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta - (m + M)g \sin \theta}{ml \cos^2 \theta - \frac{4}{3}(m + M)l} \quad (2.20)$$

สมการที่ 2.17 และ สมการที่ 2.18 สามารถที่จะประมาณให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ โดยการประมาณให้ มุม θ มีค่าเข้าใกล้ 0 มาก ๆ ดังนั้น จะได้ $\cos \theta = 1$ และ $\sin \theta = 0$ นั่นคือประมาณให้แกนเหล็กของเพนดูลัมมีการเปลี่ยนแปลงมุมน้อยมาก ซึ่งจะได้สมการเพนดูลัมแบบเชิงเส้น (Linear Pendulum Equation) ที่ต้องการนั่นเอง

$$\ddot{y}_1 = \frac{f}{M} - \frac{mg\theta}{M} \quad (2.21)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{f}{M} + \left(\frac{M + m}{Ml} \right) g\theta \quad (2.22)$$

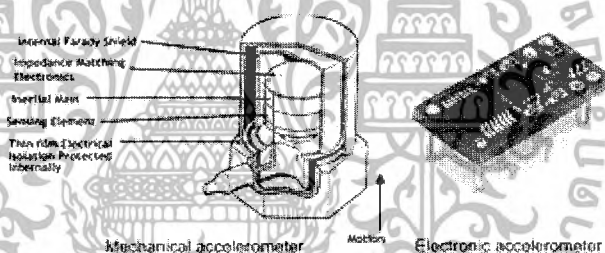
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ส่วนประกอบ

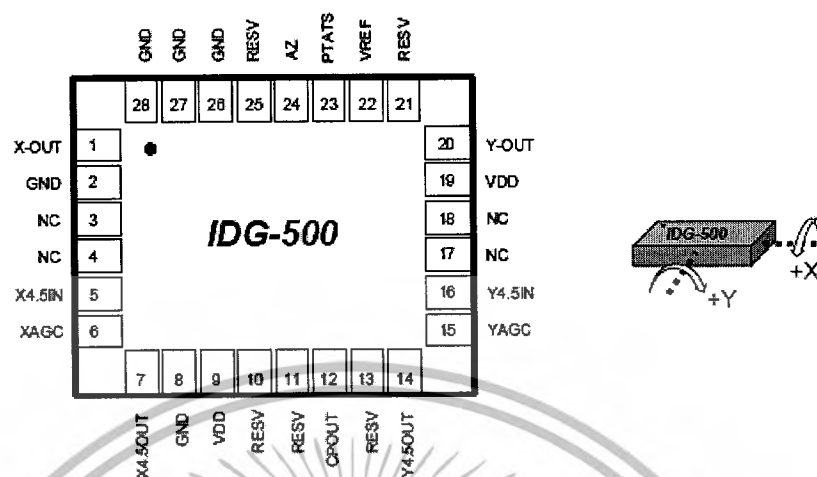
3.1 เซนเซอร์

3.1.1 เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) มาตรฐานความเร่ง หรือที่เรียกว่า แอ็คเซเลอโรมิเตอร์ (accelerometer) ใช้แอ็คเซเลอโรมิเตอร์เบอร์ ADXL335 โดยให้เอาท์พุทเป็นสัญญาณอนาล็อก เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร่งหรือการสั่นสะเทือน แอ็คเซเลอโรมิเตอร์มักถูกใช้เป็นเซนเซอร์ความเร่งในหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (mobile robot) สำหรับการตรวจวัดข้อมูลการเคลื่อนที่ หรือใช้วัดความเร่งในระบบควบคุมตัวทำงานแบบเชิงเส้นหรือข้อต่อที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง หรือใช้วัดการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรต่างๆ แอ็คเซเลอโรมิเตอร์มี 2 แบบด้วยกันคือ แบบเชิงกล และแบบอิเล็กทรอนิกส์

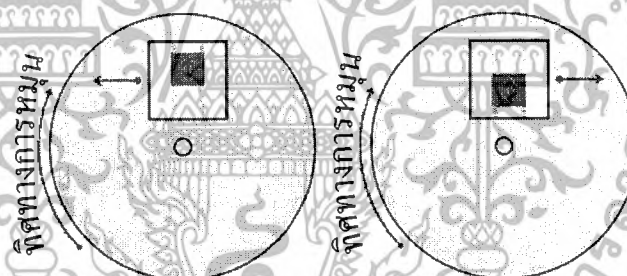


รูปที่ 3.1 แอ็คเซเลอโรมิเตอร์แบบเชิงกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์

3.1.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) โครงงานระบบควบคุมหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม ใช้เซนเซอร์ไจโรสโคปแบบสองแกนเบอร์ IDG-500 ดังรูปที่ 3.2 ของบริษัทอินเวนเซน (Invensense) เป็นเซนเซอร์ประเภทเรทไจโร (Rate gyro) สามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้สองแกน ให้สัญญาณเอาท์พุทเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน หรืออัตราเร็วเชิงมุมเท่ากับศูนย์ สัญญาณเอาท์พุทที่ออกมาเป็นค่าความต่างศักย์มีค่าเท่ากับ 1.35 โวลต์ และจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง 2 มิลลิโวลต์/องศา/วินาที ตามทิศทางการหมุน โครงสร้างภายในประกอบด้วยเฟรมหมุนที่ติดมวลขนาดเล็กไว้ ดังรูปที่ 3.3 เพื่อใช้วัดความเร่งคอริโอลิส (Coriolis acceleration)

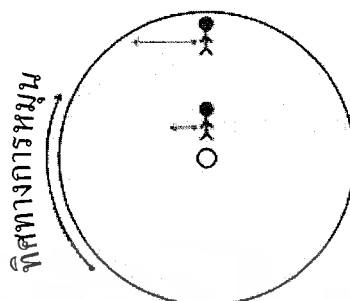


รูปที่ 3.2 เซนเซอร์ไจโรสโคปเบอร์ IDG500



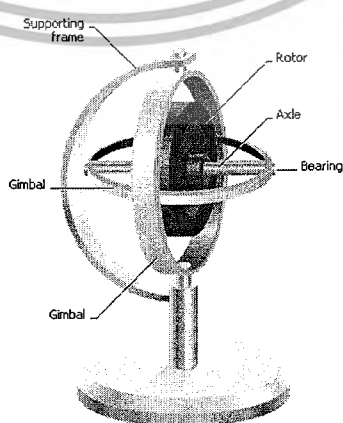
รูปที่ 3.3 โครงสร้างภายในของไจโรสโคป

ความเร่งคอรีโอลิสเป็นความเร่งที่เกิดกับวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน สามารถอธิบายได้จากการจินตนาการถึงการเคลื่อนที่บนเฟรมหมุนของคนสองคนดังรูปที่ 3.4 เพื่อรักษาดำแหน่งเดิมของเขาไว้ เขาทั้งสองจะต้องเดินสวนทางกับทิศทางการหมุนของเฟรมด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งไม่เท่ากัน โดยคนที่อยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางเฟรมเขาจะต้องใช้ความเร็วมากกว่าคนที่อยู่ใกล้ อัตราความเร็วที่เขาใช้เพิ่มขึ้นก็ของความเร่งคอรีโอลิส



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแสดงความเร่งคอริโอลิส

การทำงานของไจโรสโคปนั้นจะเป็นไปตามกฎของนิวตันคือ มวลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำ เมื่อตัวไจโรหมุนไป 90 องศา จุดบนจะหมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป 90 องศา และยังคงเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เช่นเดียวกับจุดล่าง เมื่อหมุนขึ้นมา 90 องศา มันยังคงเคลื่อนที่ไปทางขวา ทำให้ล้อเกิดการหมุนควง ขณะที่จุดบนและจุดล่างเปลี่ยนตำแหน่งไป 90 องศา การเคลื่อนที่ในครั้งแรก จะถูกยกเลิกไป ไม่เกิดการพลิกของล้อ ดังนั้นแกนหมุนของไจโรจะเหมือนกับล้ออยู่กับที่ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อเอาคุณสมบัติแบบนี้ไปสร้างอุปกรณ์วัดระดับก็จะสามารถรู้ได้เลยว่าอุปกรณ์ที่ติดตั้งไจโรสโคป มันเอียงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งเมื่อ โรเตอร์หมุนแล้ว มันก็จะคงตำแหน่งอยู่แบบนั้น กรอบที่เป็นแหวนซึ่งอยู่ล้อมรอบเมื่อเราได้ติดตั้งตัววัดระยะ วัดการหมุนก็สามารถตรวจสอบมุมที่เปลี่ยนไปได้



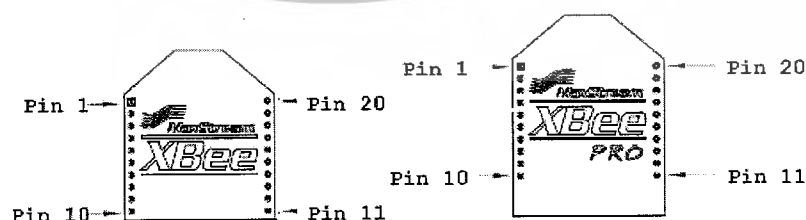
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างทั่วไปของไจโรสโคป นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 Xbee/Zigbee

Xbee สามารถใช้งานตามมาตรฐาน Zigbee ได้ โดยที่ไม่ต้องเขียนโปรแกรมสร้าง เครือข่าย Zigbee เลย เพราะว่าทางผู้ผลิตได้จัดทำ firmware ที่จะโหลดเข้าไปในตัว Xbee ให้เราสามารถ set parameter ผ่าน software interface (X-CTU หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเอง), ผ่านทาง At command โดยใช้ Hyper terminal หรือ ผ่านทางการรับส่งข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ โดยเมื่อ set Xbee ให้ทำงานเป็นอุปกรณ์ในเครือข่าย Zigbee แล้ว ซึ่งจะเรียก Xbee แต่ละตัวว่าเป็น Node

3.2.1 คุณสมบัติที่เหมือนกันของ Xbee และ Zigbee

1. Operating Frequency ISM Band 2.4 Ghz (ISM Band หมายถึง ย่านความถี่ใช้งานเพื่อการวิจัย ซึ่งจะอนุญาตให้ใช้กับ อุตสาหกรรม (Industrial) วิทยาศาสตร์ (Scientific) และทางการแพทย์ (Medical) รวมเป็น ISM)
2. มีสายอากาศให้เลือกใช้หลายแบบ คือ แบบ Chip Ant , Whip Ant , UFL con , RPSMA con โดย 2 แบบหลังเราต้องไปหาเสาอากาศย่าน 2.4 Ghz ที่เป็น connector แบบ UFL หรือ SMA ครับ
3. Supply Voltage อยู่ที่ 2.8-3.4 V
4. Power Down Current < 10uA
5. มี RF data rate อยู่ที่ 250 Kbps (เป็นส่วนหนึ่งของ สัญญาณที่ส่งผ่านอากาศ)
6. มี Serial interface data rate อยู่ระหว่าง 1200 – 115200 Bps (เป็นส่วนที่ติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์)
7. เป็น Spread Spectrum ชนิด DSSS (Direct Sequence)
8. การกำหนด addressing มีลำดับลักษณะคือ กำหนด PAN ID สำหรับเครือข่ายหนึ่ง ๆ , กำหนด Channel และ กำหนด address ของแต่ละตัว



รูปที่ 3.6 PIN of Xbee

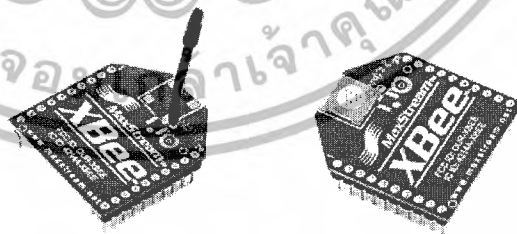
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 Zigbee มาตรฐานสากล กำหนดโดย ZigBee Alliance เป็นการสื่อสารแบบไร้สาย ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานต่ำ ราคาถูก จุดประสงค์ก็เพื่อให้สามารถสร้างระบบที่เรียกว่า Wireless Sensor Network ได้ ซึ่งระบบนี้ จะสามารถทำงาน ในร่ม กลางแจ้ง ทุ่งนา ไร่ สวน และ อยู่ได้ด้วยแบตเตอรี่ก้อนเล็ก (เช่นถ่าน AA 2 ก้อน) นานเป็นเดือน เป็นปี เหมาะสมใช้งานกับพวก Monitoring ต่างๆ

Zigbee ได้แบ่งตามลักษณะการทำงาน 3 แบบคือ

1. Coordinator มีหน้าที่สร้างการสื่อสาร เชื่อมโยงเครือข่าย ระหว่าง End device กับ Router หรือ Coordinator กับ Coordinator ด้วยกัน หรือ Coordinator กับ Router กำหนด address ให้กับ device ที่อยู่ในวงเครือข่าย ไม่ให้ซ้ำกัน ดูแลจัดการเรื่องการ Routing เส้นทาง ซึ่งเทียบได้กับ FFD
2. End-device เป็นอุปกรณ์ปลายทางสุด ซึ่งจะรับสัญญาณจาก Sensor ที่ปลายทาง โดยที่ใช้พลังงานต่ำในการทำงาน เทียบได้กับ RFD หรือ FFD บางกรณี ขึ้นอยู่กับ sensor ที่ใช้
3. Router มีหน้าที่ รับส่งข้อมูล ในเส้นทางต่าง ๆ ของเครือข่าย ซึ่งเทียบได้กับ FFD

3.2.1.2 Xbee เป็นอุปกรณ์ที่มี Microcontroller และ RF IC อยู่ภายใน ทำหน้าที่เป็น อุปกรณ์ transceiver (อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ) แบบ Half Duplex ย่านความถี่ 2.4 Ghz มีการจัดการโดยใช้พลังงานต่ำ ใช้งานง่าย มี interface ที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ Xbee เป็น UART (TTL) ซึ่งสำหรับทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำมาใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ Xbee ต่อเข้ากับ UART ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้เลย



รูปที่ 3.7 สายอากาศแบบ Chip, Whip ตามลำดับ

คุณสมบัติพิเศษของ Xbee

Xbee มีการทำงานในโหมดประหยัดพลังงาน ในช่วงเวลาที่ไม่มีการทำงาน รับส่งข้อมูล ดังนั้นตัว Xbee จึงมี Parameter ที่จะกำหนดการทำงานสำหรับ Sleep mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xbee Addressing

ตัว Xbee จะสามารถกำหนดค่าประจำตัวอ้างอิงของมัน (Address) 2 แบบ คือ แบบ 16 bit address และ 64 bit address ปกติแล้ว Xbee ทุกตัวจะถูกกำหนดค่ามาจากโรงงานเป็น Address 64 bit อยู่แล้ว ซึ่งจะสามารถอ่านค่าได้จาก parameter SH+SL การใช้งาน Address 64 bit สามารถทำได้ โดยกำหนด parameter MY ให้มีค่า 0xFFFF หรือ 0xFFFE ส่วน การกำหนด 16 bit address นั้นทำได้โดย กำหนด parameter MY ให้มีค่าน้อยกว่า 0xFFFE โดยจะเรียกเป็น mode การทำงาน 2 ประเภทคือ

1. Unicast Mode คือ การรับส่งข้อมูล โดยอาศัยหลักการ Acknowledgement คือหากทางด้านส่งนั้นส่งข้อมูลไปแต่ไม่ได้รับ Ack ตอบกลับจากตัวรับก็จะทำการส่งข้อมูลใหม่
2. Broadcast Mode คือการส่งข้อมูลไปยังปลายทางให้ได้รับข้อมูลทุกตัว

โหมดการทำงานของ Xbee

Xbee จะสามารถแบ่งช่วงการทำงานได้เป็น 5 แบบ คือ

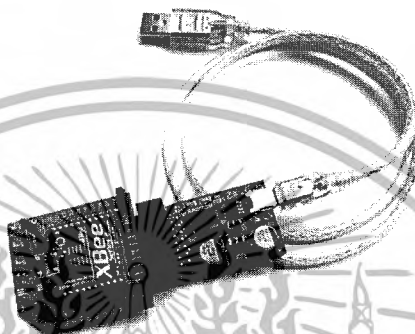
1. Idle Mode โหมดนี้ จะเป็นโหมดที่ไม่ได้รับส่งข้อมูล ตัว Xbee เตรียมที่จะทำงานในโหมดอื่นๆ ต่อไปทันที หากมีเงื่อนไขบางอย่าง
- 2-3. Transmit / Receive Mode คือช่วงที่ Xbee มีการรับ หรือ ส่งข้อมูล โดยจะแบ่งลักษณะการทำงานย่อยออกเป็น Direct กับแบบ Indirect , การกำหนด Address ต้นทางและปลายทาง , Clear Channel Assessment และการตอบรับ Acknowledgement
4. Sleep Mode คือ ช่วงที่ Xbee อยู่ในสถานการณ์ทำงานพลังงานต่ำที่สุด เมื่อไม่มีการใช้งาน
5. Command Mode คือ เป็นส่วนการปรับ parameter ของ Xbee ซึ่งจะมีการกำหนด 2 แบบ คือ แบบ AT command กับแบบ API Command

การทำงานทั่วไปของ Xbee

โดยทั่วไปการใช้งาน RF Module ควรจะกำหนดให้มี Buffer ด้วย เพื่อการปรับอัตรารับส่งข้อมูลระหว่างตอนที่รับส่งทางอากาศ กับตอนที่รับส่งไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ อุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม Data ที่รับส่งระหว่าง MCU กับ Xbee จะมีข้อจำกัด เรื่อง Packet อาจถูก Drop ได้ เนื่องจาก Data Over Flow โดยสำหรับด้านการส่งข้อมูลไปที่ Xbee เพื่อออกอากาศนั้นที่ขา DI จะมี Buffer อยู่ประมาณ 202 Bytes หากส่งเกิน Buffer จะเกิดการ Drop packet ทั้ง ซึ่งทางฝั่งรับข้อมูล ที่ขา DO ก็มี Buffer อยู่เช่นกัน โดยจะมี Parameter ที่เกี่ยวข้องกับ Data Throughput

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ RO และ BD ค่า RO คือค่า Packetization Timeout ซึ่งเป็น delay ของข้อมูลที่อยู่ใน DI Buffer ก่อนที่จะถูก encapsulate ไปที่ส่วน RF transmission เพื่อส่งข้อมูลออกอากาศ หากตั้ง RO = 0 Data ที่รับเข้ามาจาก MCU จะถูก Xbee Encapsulate Packet ส่งออกอากาศทันที ดังนั้นเราจะมี Parameter RO และ BD ที่จะช่วยในการปรับ Data รับส่งให้สามารถรับส่งกันได้ทันที ไม่ให้มีการ Drop Packet ได้ ในกรณีที่ส่งข้อมูลเกิน 200 Bytes



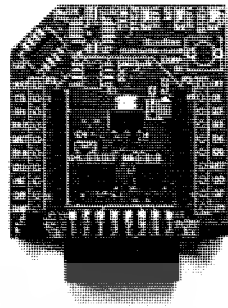
รูปที่ 3.8 Xbee USB Dongle

อัตราการรับส่งข้อมูล

อัตราการส่งข้อมูล (baud rate) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา เช่น จำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสัญญาณ เป็นต้น โดยปกติเปรียบเทียบหน่วยเวลาเป็นวินาที และการวัดอัตราการส่งข้อมูลจะใช้นับจำนวนลูกคลื่น (cycle) ที่เกิดขึ้นในหนึ่งวินาที เช่น 9600 bps หมายถึง การส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูล 9600 ครั้งต่อวินาที

อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับ Xbee

BlueBee Dongle เป็น Xbee Breadboard ที่ใช้งานเป็น Xbee Dongle ร่วมกันกับ USB to Serial เพื่อใช้งานกับคอมพิวเตอร์สำหรับ update firmware หรือ การ config parameter



รูปที่ 3.9 BlueBee

U2S_HOST เป็น Serial UART to USB mini B เชื่อมต่อ ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับ USB Bus โดยตรง ไม่จำเป็นต้องแปลงแรงดันเป็น RS232 และสามารถ ใช้ในการ Upgrade Firmware ผ่านพอร์ตอนุกรม โดยไม่ต้องมีแหล่งจ่ายไฟภายนอก



รูปที่ 3.10 U2S_HOST Board

คุณสมบัติโดยทั่วไปของ U2S_HOST Board

- เปลี่ยนสัญญาณจาก UART (TTL) เป็น USB
- สามารถเลือกระดับแรงดันของสัญญาณอนุกรม ให้เป็น 3.3V หรือ 5V ได้โดยการเสียบ Jumper ที่ตัวบอร์ด
- มีวงจร Regulator แปลงแรงดัน 5V จาก USB ให้เป็น 3.3V จ่ายกระแสได้สูงสุด 1A (กระแสที่จ่ายได้จะถูกจำกัดจากพอร์ต USB ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่อง PC หรือ Notebook) สามารถนำไปใช้ต่อกับบอร์ดภายนอกได้
- สามารถต่อแรงดัน 5V จากพอร์ต USB ไปใช้กับบอร์ดภายนอกได้
- PIN Function TX / RX / CTS / RTS / 3.3V / 5V / GND
- Dimension 28 * 45 mm. (รวม Connector)
- Driver รองรับการทำงาน Windows 98SE/ME/2000/XP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานเบื้องต้นของ Xbee

X-CTU เป็น software interface บนคอมพิวเตอร์ที่จะช่วยในการ update firmware หรือทดสอบการใช้งาน หรือ ปรับ parameter ใน Xbee

ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

1. ทำการ set parameter ให้ฝั่งหนึ่งเป็น End device และ อีกฝั่งเป็น Coordinator (CE)
2. การ set parameter จะทำการ set ผ่านทาง X-CTU โดยฝั่งส่งเป็น End Device (CE=0) และ ค่า MY = 1 (16 bit address) และ set ฝั่งรับ เป็น Coordinator (CE=1) และ ค่า MY = 2 (16 bit address) ทั้งนี้ ได้ set baud rate ที่ตัว Xbee ทั้ง 2 ตัวที่ 9600 bps (BD=3)
3. ทำการ set ให้ parameter DH และ DL ของแต่ละฝั่งให้มีค่าเท่ากับ SH และ SL ของฝั่งตรงข้าม โดย SH SL เป็นค่า address ที่เราเปลี่ยนไม่ได้ (Read Only) เป็นค่าที่ใส่มาจากโรงงาน
4. กด write firmware แล้วทดสอบใช้งาน

3.3 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เป็นเครื่องกลทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลผ่านทางแกนหมุนหรือเพลลา ในการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงนั้นจะใช้กระแสไฟตรงจ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้า หรือขดลวดผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า (motor armature) ภายใน

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงที่นิยมใช้งานทั่วไปนั้น จะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร และที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) สนามแม่เหล็กทั้งสองแหล่งกระทำต่อกันจะทำให้เกิดแรงบิดที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนนั่นเอง

สำหรับแรงบิดของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าหากเส้นแรงแม่เหล็กมากจะทำให้มีแรงบิดสูง มอเตอร์กระแสตรงส่วนใหญ่ถ้าหมุนด้วยความเร็วสูงจะมีแรงบิดต่ำ ถ้าหมุนด้วยความเร็วต่ำจะมีแรงบิดสูง

ส่วนประกอบหลักๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) คือขดลวดที่ถูกพันอยู่กับขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดกับ โครงมอเตอร์ ทำหน้าที่กำเนิดขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) แทนแม่เหล็กถาวรขดลวดที่ใช้เป็นขดลวดอาบนํ้ายาฉนวน สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟตรงให้มอเตอร์

2. ขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces) คือแกนสำหรับรองรับขดลวดสนามแม่เหล็กถูกยึดติดกับ โครง

มอเตอร์ด้านใน ขั้วแม่เหล็กทำมาจากแผ่นเหล็กอ่อนบางๆ อัดซ้อนกัน (Lamination Sheet Steel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อลดการเกิดกระแสไหลวน (Edy Current) ที่จะทำให้ความเข้าของสนามแม่เหล็กลดลง ขั้วแม่เหล็กทำหน้าที่ให้กำเนิดขั้วสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุด แทนขั้วสนามแม่เหล็กถาวร ผิวด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กทำให้โค้งรับกับอาร์เมเจอร์พอดี

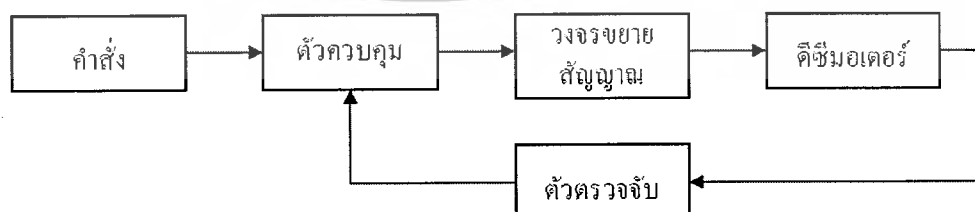
3. โครงมอเตอร์ (Motor Frame) คือส่วนเปลือกหุ้มภายนอกของมอเตอร์ และยึดส่วนอยู่กับที่ (Stator) ของมอเตอร์ไว้ภายในร่วมกับฝาปิดหัวท้ายของมอเตอร์ โครงมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กให้เกิดสนามแม่เหล็กครบวงจร

4. อาร์เมเจอร์ (Armature) คือส่วนเคลื่อนที่ (Rotor) ถูกยึดติดกับเพลา (Shaft) และรองรับการหมุนด้วยที่รองรับการหมุน (Bearing) ตัวอาร์เมเจอร์ทำจากเหล็กแผ่นบางๆ อัดซ้อนกัน ถูกเจาะร่องออกเป็นส่วนๆ เพื่อไว้พันขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นขดลวดคอปน้ำยาฉนวน ร่องขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีขดลวดพันอยู่และมีลิ่มไฟเบอร์อัดแน่นยึดขดลวดอาร์เมเจอร์ไว้ ปลายขดลวดอาร์เมเจอร์ต่อไว้กับคอมมิวเตเตอร์ อาร์เมเจอร์ปลั๊กดันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนเคลื่อนที่

5. คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) คือส่วนเคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่ง ถูกยึดติดเข้ากับอาร์เมเจอร์และเพลาร่วมกัน คอมมิวเตเตอร์ทำจากแท่งทองแดงแข็งประกอบเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก แต่ละแท่งทองแดงของคอมมิวเตเตอร์ถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวนไมก้า (Mica) อาร์เมเจอร์ คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่เป็นขั้วรับแรงดันไฟตรงที่จ่ายมาจากแปรงถ่าน เพื่อส่งไปให้ขดลวดอาร์เมอร์

6. แปรงถ่าน (Brush) คือตัวสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ ทำเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผลิตมาจากคาร์บอนหรือแกรไฟต์ผสมผงทองแดง เพื่อให้แข็งและนำไฟฟ้าได้ดี มีสายตัวนำต่อร่วมกับแปรงถ่านเพื่อไปรับแรงดันไฟตรงที่จ่ายเข้ามา แปรงถ่านทำหน้าที่รับแรงดันไฟตรงจากแหล่งจ่าย จ่ายผ่านไปให้คอมมิวเตเตอร์

ระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐานสามารถแสดงได้ดังไดอะแกรมรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐาน

คำสั่ง (Command) จะเป็นตัวสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวกำเนิดสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจขยายสัญญาณ (Amplifier) จะขยายสัญญาณจากตัวขยายให้แรงขึ้นเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณที่พอเหมาะสำหรับมอเตอร์แต่ละรุ่น

ตัวตรวจจับ (Encoder) จะประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์เพื่อตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์แล้วป้อนกลับมาให้ตัวควบคุมอีกทีหนึ่ง

3.3.1 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ กระแสที่ไหลในขดลวดจะสร้างสนามที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก Φ และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ r ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K \Phi I \quad (3.1)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร

Φ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

I คือ กระแส มีหน่วยเป็นแอมแปร์

K คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของสนามแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมันเอง แรงดันนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันย้อนกลับนี้กับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์คือ

$$E = K \Phi \omega \quad (3.2)$$

เมื่อ E คือ แรงดันย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็นโวลต์

Φ คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

θ

3.3.2 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

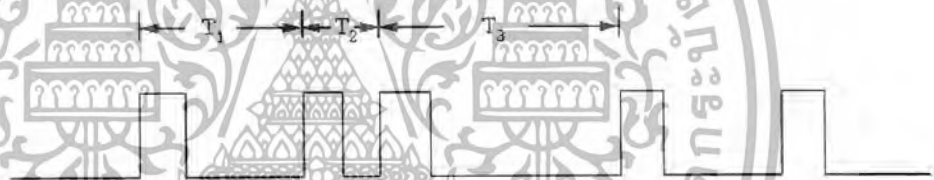
โดยทั่วไปแล้วเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ กระแสตรงจะทำให้มอเตอร์หมุน

ด้วยความเร็วสูงสุดที่สามารถหมุนได้ด้วยแรงดันค่านั้น การควบคุมความเร็วจะสามารถทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แต่การทำงานแบบนี้จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและมีความร้อนเกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ให้กับมอเตอร์แทน ถ้าหากช่วงการจ่ายแรงดันและหยุดจ่ายแรงดันแตกต่างกันไปก็จะทำให้ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ต่างกันไปด้วย การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้มีการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบมอดูเลชันทางความถี่พัลส์ (pulse frequency modulation : PFM) และแบบมอดูเลชันทางความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation : PWM)

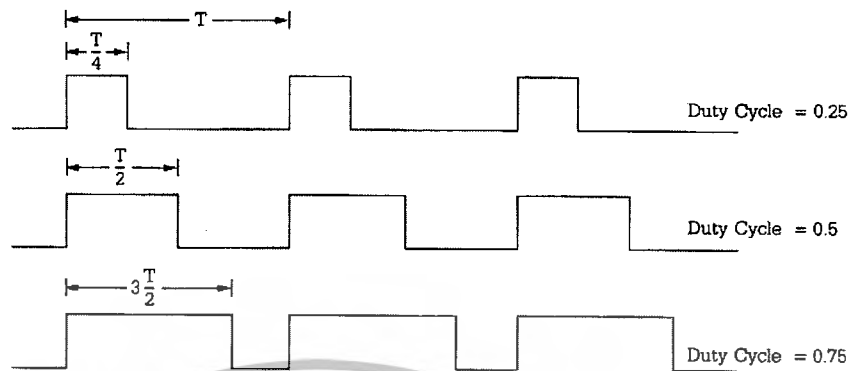
1.แบบมอดูเลชันทางความถี่พัลส์ การทำงานแบบนี้จะควบคุมการจ่ายแรงดันและหยุดจ่ายแรงดันเพื่อเปิดปิดมอเตอร์เป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 3.12 การทำงานแบบนี้จะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับมีค่าแตกต่างกันไป ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์จะขึ้นกับอัตราการปิดเปิดมอเตอร์นี้



รูปที่ 3.12 สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PFM

2.แบบมอดูเลชันทางความกว้างพัลส์ การควบคุมมอเตอร์ในแบบ PFM ค่าความถี่ของสัญญาณควบคุมจะไม่แน่นอน แต่การควบคุมแบบ PWM นี้จะใช้ความถี่ในการควบคุมที่คงที่แต่จะปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยวิธีการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล(Duty cycle) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 แต่วิธีนี้จะใช้ความถี่สูงมากๆ ไม่ดี

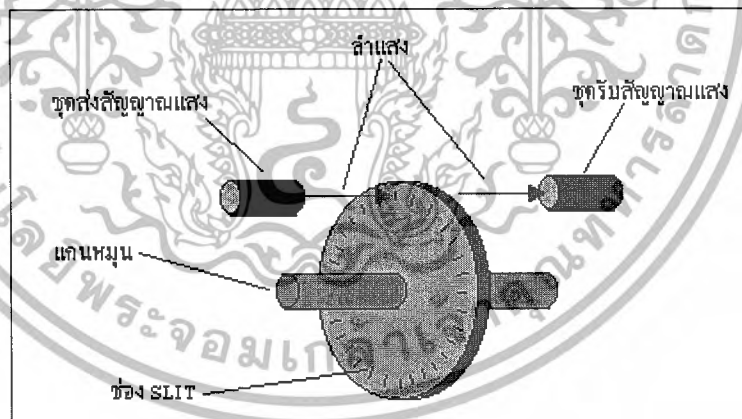
111013



รูปที่ 3.13 สัญญาณควบคุมมอเตอร์แบบ PWM

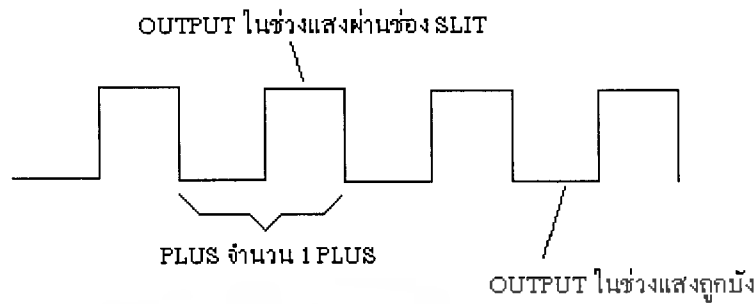
3.3.3 เอ็นโค้ดเดอร์

Rotary Encoder มีลักษณะเป็นแผ่นกลมมีแกนอยู่ตรงกลาง และ ที่แผ่นกลม จะมีช่องเล็ก ที่แสงสามารถ ส่องผ่านได้ เป็นจำนวนมากเราเรียกช่องนี้ว่า ช่อง slit ซึ่งที่ด้านหนึ่งของ แผ่นกลม นี้ จะมีตัวส่งแสง infrared ไปยังตัวรับสัญญาณแสง infrared ซึ่งจะอยู่ในด้านตรงกันข้าม ดังรูปที่ 3.14



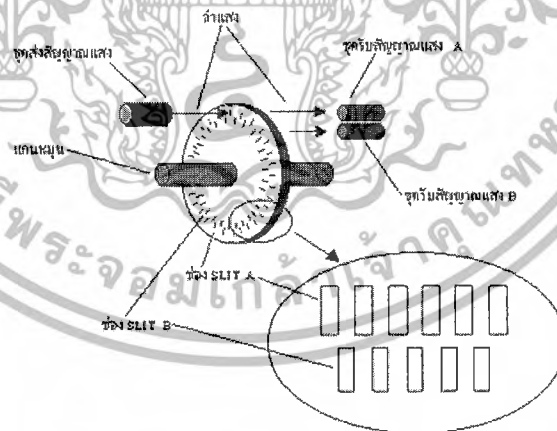
รูปที่ 3.14 แสดง Rotary Encoder

เมื่อหมุนแกนหมุนทำให้แผ่นกลมหมุนไปตัดลำแสง Infrared ดังนั้นชุดรับแสง infrared จึงมีแสงมากระทบเป็นช่วงๆ (เป็น pulse) ตามจังหวะที่แสงผ่านช่อง slit จึงทำให้ สัญญาณ out put ของ ชุดรับแสง infrared มีลักษณะเป็น plus ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการสร้าง pulse ของ Rotary Encoder

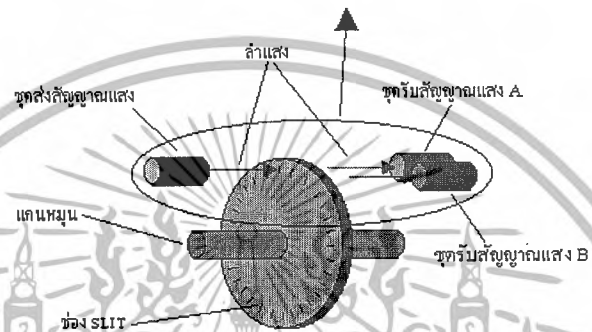
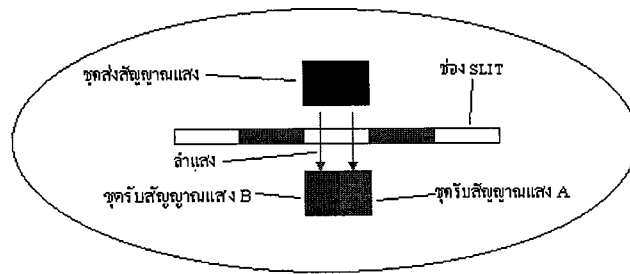
จำนวน pulse ที่ได้ออกมานี้ จะเป็นตัวที่ชี้บ่งว่า motor หมุนไปกี่องศา หรือกี่รอบ ซึ่งเราสามารถคำนวณได้จาก สูตร จำนวนรอบที่ motor หมุนไป = จำนวน plus ค่าความละเอียดของ rotary encoder โดยที่ ค่าความละเอียดของ rotary encoder นั้นนิยมใช้หน่วยเป็น plus/ round หรือ ppr เช่น 1000 ppr ก็หมายความว่าเมื่อ motor หมุนไป 1 รอบจะมี plus ออกมา 1000 plus เป็นต้น ส่วนในเรื่องที่ว่าเราจะทราบได้อย่างไรว่า motor หมุนไปทิศทางใดนั้น ส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีสร้าง ช่อง slit เป็น 2 ชุดเหลื่อมกัน 90 องศา ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดง Pulse ของ Rotary แบบสองเฟส

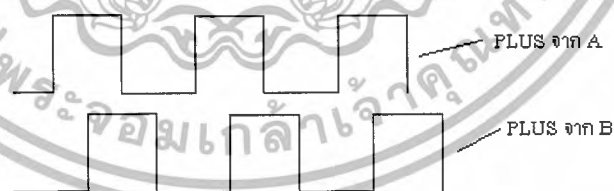
หรืออาจจะใช้ช่อง Slit เพียง1ชุดแต่มีการจัดวางชุดรับสัญญาณแสงดังรูปข้างล่างแต่ข้อสำคัญคือจะต้องมี phase ต่างกัน 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงการตรวจเช็คสัญญาณ pulse ของ Rotary Encoder

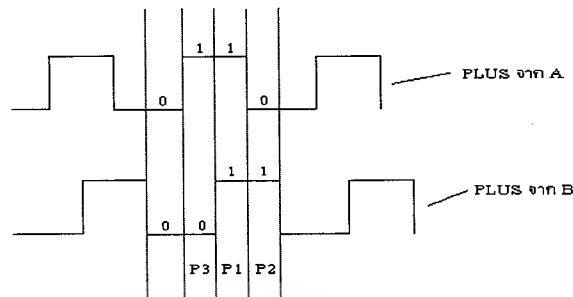
ดังนั้นสัญญาณ output จาก motor จึงมี 2 ชุด คือ A และ B โดยที่สัญญาณ pulse จาก A และ B ก็จะเลื่อนกัน 90 องศาด้วย อาจกล่าวได้ว่าสัญญาณ output จาก motor มีค่าเท่ากับ 2 bit คือหนึ่ง bit มาจาก A และอีกหนึ่ง bit มาจาก B ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะ pulse ของ Rotary Encoder ทั้ง สองเฟส

ถ้าเราให้ Pulse ในช่วง high มีค่าเป็น “1” และ pulse ในช่วง low มีค่าเป็น “0” เราสามารถใช้ค่าดังกล่าวมาคำนวณหาทิศทางที่ motor หมุนได้ด้วยใช้วิธีการทาง digital คือการนำค่าที่อ่านได้มาทำการ exclusive OR (XOR) กันโดยการนำ bit ทางขวาของค่าเก่ามา XOR กับ bit ทางซ้ายของค่าใหม่ที่เราอ่านได้ตามตัวอย่างข้างล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงความละเอียดของ pulse

สมมุติในตอนแรก motor อยู่ที่ตำแหน่ง P1 เพราะฉะนั้นค่าของตัวเลข binary ที่อ่านได้จาก encoder จะมีค่าเป็น 11 ถ้า servo motor หมุนไปที่ตำแหน่ง P3 จะทำให้ค่าของตัวเลข binary ที่อ่านได้จาก encoder จะมีค่าเป็น 10 ดังนั้นถ้าเรานำเอาค่าทางขวา จากค่าที่อ่านได้ในครั้งแรก (11) ซึ่งก็คือ 1 มา XOR กับค่าทางซ้ายที่อ่านได้ในครั้งต่อมา (10) ซึ่งก็คือ 1 จะได้ผลลัพธ์เท่ากับ 0 เพราะฉะนั้นค่า 0 จึงเป็นค่าที่บอกว่า motor หมุนไปทางขวา ในทางกลับกันถ้าในตอนแรก motor อยู่ที่ตำแหน่ง P1 และต่อมา motor หมุนไปที่ตำแหน่ง P2 ถ้าเรานำเอา ค่าทางขวา จากค่าที่อ่านได้ในครั้งแรก (11) ซึ่งก็คือ 1 มา XOR กับค่าทางซ้ายที่อ่านได้ในครั้งต่อมา (01) ซึ่งก็คือ 0 จะได้ผลลัพธ์เท่ากับ 1 เพราะฉะนั้นค่า 1 จึงเป็นค่าที่บอกว่า motor หมุนไปทางซ้าย และการ XOR ค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

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

ตารางที่ 3.1 แสดงการ XOR ด้วยค่าต่างๆ

Pulse ที่ได้จาก rotary encoder จะถูกนำไปเชื่อมต่อเข้ากับวงจรนับ pulse หรือวงจรคำนวณ

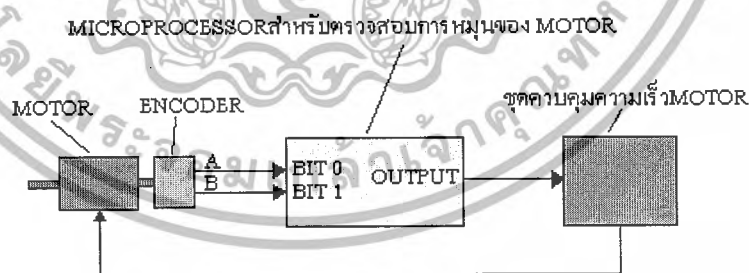
เพื่อที่จะตรวจสอบว่า motor หมุนไปทิศทางใดและอยู่ที่ตำแหน่งใด ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยส่วนมากแล้ว motor ที่ใช้ rotary encoder แบบนี้ จะมีจำนวนรอบ ของการหมุน ที่ไม่จำกัด โดยจะหมุนไปกี่รอบ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับ ความสามารถของวงจรนับ plus และ วงจรคำนวณ

ดังนั้นเราอาจจะกล่าวได้ว่า encoder ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปนั้นมีอยู่ 2 แบบใหญ่ๆคือเป็นแบบมีค่า output ที่ไม่จำกัด(incremental encoder) และแบบที่มีค่า output ที่จำกัด(absolute encoder) Incremental encoder มักจะเป็น encoder แบบ rotary encoder ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่า ขนาดของ output ของ encoder แบบนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบวงจรนับและวงจรคำนวณ

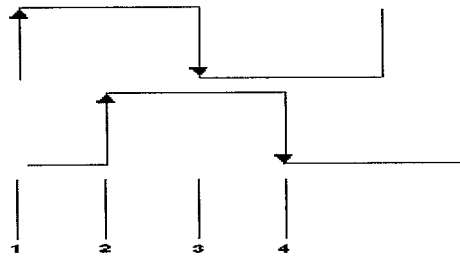
Absolute encoder ที่พบเห็นส่วนใหญ่จะเป็นแบบ potentiometer แต่ในบางครั้งก็อาจเป็นแบบ rotary encoder ก็ได้แต่จะมีการออกแบบลักษณะของช่อง slit ที่ต่างไปจาก rotary encoder ที่ได้ไว้ในตอนต้น โดยอาจจะมีค่าของ output ตั้งแต่ 4 bit ถึง 16 bit

ในแง่ของการใช้งานแล้ว motor ที่มี encoder แบบ incremental encoder นั้นจะใช้งานยุ่งยากกว่า motor ที่มี encoder แบบ absolute encoder เพราะ output ของ increment encoder นั้นไม่สามารถเชื่อมต่อกับชุดควบคุม motor (controller) ได้ทันทีโดยต้องต่อผ่านวงจรนับ plus และวงจรคำนวณที่ย่างยากซับซ้อนก่อน ถึงจะต่อเข้ากับกับ controller ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเรามี microprocessor เช่น microcontroller ตระกูล PIC เป็นต้น ดังนั้นเราจึงสามารถนำมาใช้แทนวงจรนับ pulse และวงจรคำนวณ ได้จึงทำให้การใช้งานมีความง่ายขึ้น ดังรูปที่ 3.20

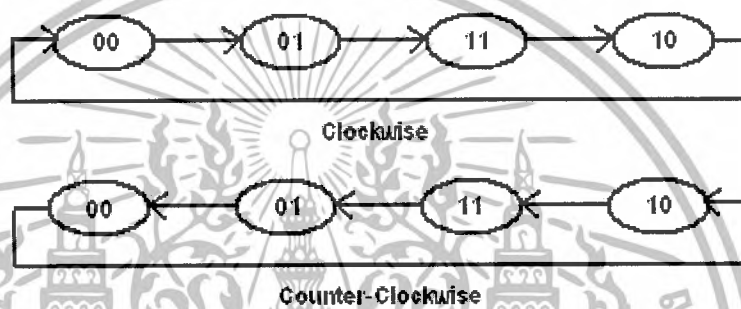


รูปที่ 3.20 แสดง Block Diagram ของ Rotary Encoder

ในโครงการอาศัยการตรวจนับขอบขาขึ้นและขาของทั้งเฟส A และเฟส B ทำให้สามารถแบ่ง 1 Pulse เป็น 4 ส่วน



รูปที่ 3.21 รูปแสดงการตรวจนับขอบขาขึ้น และขอบขาลงของทั้ง 2 เฟส



รูปที่ 3.22 รูปแสดงวิธีการตรวจนับทิศทางการหมุนของ Rotary Encoder โดยอ่านค่าเข้ามาทาง Port 1

- ในการนับจำนวน Pulse จะทำการนับขอบขาขึ้นของ Pulse A ว่าเท่าไร
- ในการหาความกว้างของ Pulse จะทำการเช็คขอบขาขึ้นของ A กับขอบขาลงของ A ว่ามีระยะห่างระหว่างกันเท่าไร โดยใช้ Timer เป็นตัวจับ



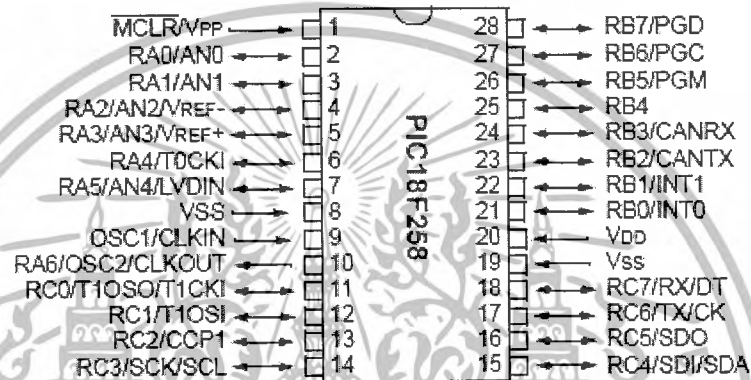
รูปที่ 3.23 แสดงการเช็คความกว้างของ Pulse

3.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC18F258

ในส่วนของการประมวลผลและ การควบคุมการทำงานต่างๆจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

ตระกูล PIC เบอร์ 18F258 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถ มีประสิทธิภาพสูง และ เพียบพร้อมไปด้วยทรัพยากร หรือ ฟังก์ชันการใช้งานต่างๆ มากมาย เช่น โมดูล Analog to Digital , Timer /Counter , USART , SPI , I2C , PWM และอื่นๆ ซึ่งส่วนต่างๆ เหล่านี้จะถูกสร้างรวมอยู่ภายใน ซีพียู เพียงตัวเดียว ทำให้ ซีพียู ตระกูลนี้จะใช้เวลาในการทำคำสั่งต่างๆ เพียง 1 หรือ 2 ไชเคิล ต่อคำสั่งเท่านั้น โดยการทำงานนี้จะ เป็นลักษณะ ไปป์ไลน์ (Pipe Line) ทำให้มีความเร็วในการทำงานมากกว่า ซีพียูทั่วไป (ที่ความถี่ เดียวกัน)



รูปที่ 3.24 แสดงขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC18F258

บทที่ 4

รูปแบบการรับส่ง ข้อมูล

4.1 UART, Universal Asynchronous Receiver Transmitter

UART ย่อมาจากคำว่า Universal Asynchronous Receiver Transmitter ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสนั่นเอง สำหรับการสื่อสารอนุกรมบนคอมพิวเตอร์แล้ว UART ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการสื่อสารแบบอนุกรม

หน้าที่หลักของ UART คือทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบขนานจากคอมพิวเตอร์ให้อยู่ในรูปแบบอนุกรมแบบอะซิงโครนัสแล้วส่งออกไป และทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนุกรมแบบอะซิงโครนัสที่ป้อนเข้ามายัง UART ให้เป็นแบบขนานก่อนที่จะส่งเข้าคอมพิวเตอร์ ซึ่งนอกจาก UART จะส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์แล้ว ยังทำการแจ้งข้อมูลอื่นๆ ให้คอมพิวเตอร์ทราบด้วย เช่น อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูล (baud rate), รูปแบบการส่งข้อมูล, ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล (ผิดพลาดจากพาริตี, เฟรมข้อมูล, โอเวอร์รัน) เป็นต้น

ภายใน UART จะมีส่วนของวงจรสร้างอัตราการถ่ายทอดข้อมูลแบบโปรแกรมได้ (Programmable Baudrate Generator) โดยการกำหนดค่าตัวหารให้กับสัญญาณนาฬิกาของ UART โดยตัวหารนี้มีขนาด 16 บิต ดังนั้นจึงกำหนดตัวหารให้อยู่ในช่วง 10 – 65,535

UART สามารถรับส่งข้อมูลได้ทั้งแบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์ (Half Duplex) และฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex) โดยการส่งแบบ ฮาล์ฟดูเพล็กซ์เป็นการส่งแบบทิศทางเดียว ส่วนการส่งแบบฟูลดูเพล็กซ์นั้นสามารถรับและส่งข้อมูลได้ในคราวเดียวกัน

4.2 Serial Port

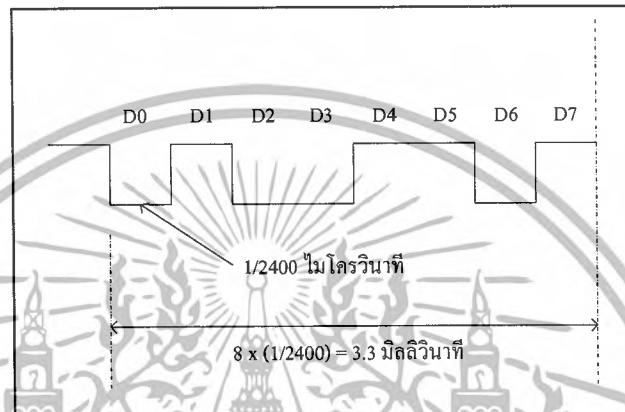
Serial port เป็นส่วนที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกของคอมพิวเตอร์ เช่น modem mouse keyboard เป็นต้น โดยรูปแบบการสื่อสารของพอร์ตนี้นั้นจะเป็นการส่งข้อมูลแบบทีละบิต การเชื่อมต่อแบบอนุกรมนิยมใช้กันมาก เช่น การเคลื่อนย้ายกันระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์ หรือ อุปกรณ์เสริมต่างๆ เช่น mouse เป็นต้น

4.2.1 จังหวะเวลาของการสื่อสารข้อมูลอนุกรม

โดยทั่วไปมักจะระบุกันหน่วยของจำนวนบิตข้อมูลภายในเวลาหนึ่งวินาที เรียกว่า อัตราบอด ตามค่ามาตรฐานเหล่านี้ ได้แก่ 110, 150, 300, 1200, 2400, 4800, และ 9600 จากรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นลักษณะของรูปแบบสัญญาณข้อมูลอนุกรมที่ปรากฏในสายส่งสัญญาณ ข้อมูลทั้ง 8 บิตนี้หากว่าถูกส่งออกมาด้วยอัตรา 2400 บอดจะใช้เวลาในการส่งข้อมูลหนึ่งบิตมีค่าเท่ากับ $1/2400$ หรือ 416 ไมโครวินาที และเวลาในการส่งข้อมูลทั้ง 8 บิตมีค่าเท่ากับ 8×416 หรือ 3,328 ไมโครวินาที



รูปที่ 4.1 รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าของข้อมูล ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลแบบอนุกรมด้วยอัตราเร็ว 2400 บิต/วินาที (สังเกตว่าจะเริ่มส่งจากบิต D0 ซึ่งเป็นบิตที่สำคัญต่ำออกมาก่อนเป็นลำดับแรก)

4.2.2 รูปแบบของข้อมูลอนุกรม

วิธีการที่จะทำให้ข้อมูลสื่อสารอนุกรมมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จะใช้การเพิ่มเติมบิตข้อมูลบางอย่างร่วมไปกับการส่งข้อมูลจริง ได้แก่

1. บิตเริ่มต้น (Start Bit)

มีหน้าที่สำหรับการบ่งบอกให้วงจรฮาร์ดแวร์ทางด้านรับทราบถึง ตำแหน่งจุดเริ่มต้นของบิตข้อมูลกลุ่มใหม่ เพื่อที่จะทำการปรับจังหวะของสัญญาณการรับข้อมูลให้ตรงกัน ดังนั้นบิตเริ่มต้นนี้จึงจะถูกเพิ่มเข้าไปก่อนระดับลอจิกของสภาวะของสายสื่อสาร ขณะเมื่อไม่มีการส่งข้อมูล

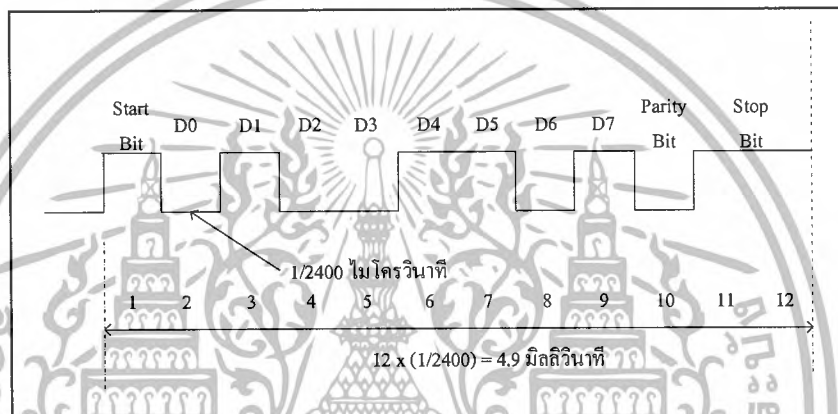
2. บิตแสดงภาวะความเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ (Parity Bit)

มีหน้าที่เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยทั่วไปมักเรียกว่า บิตพาริตีและจะนำไปแทรกต่อท้ายบิตข้อมูล ค่าของบิตนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนค่าของบิตข้อมูลที่เป็น 1 ซึ่งจะเป็นได้สองลักษณะ คือ พาริตีคู่ (Even Parity) หรือ พาริตีคี่ (Odd Parity)

3. บิตสุดท้าย (Stop Bit)

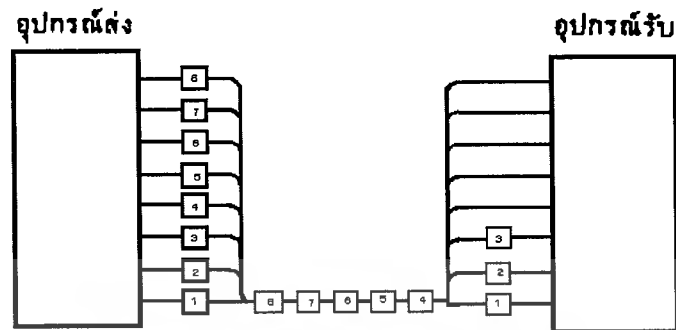
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นบิตที่เพิ่มเติมขึ้นเพื่อระบุถึงขอบเขตการสิ้นสุดของกลุ่มบิตข้อมูล บิตสุดท้ายนี้อาจจะมีจำนวนมากกว่าหนึ่งบิตได้ คือ 1.5 บิต และ 2 บิต ดังนั้นกรณีของการส่งข้อมูล 8 บิตพร้อมบิตที่เพิ่มเติมเข้าไปโดยสมบูรณ์ คือ บิตเริ่มต้น บิตพาริตี และ บิตสุดท้าย รวมทั้งสิ้น 12 บิต ตามแผนภาพสัญญาณเวลาในรูปที่ 2 หากข้อมูลถูกส่งออกไปด้วยอัตราเร็ว 2400 บอด เวลาโดยรวมในการส่งข้อมูลหนึ่งไบต์จะมีค่าเป็น 12×416 ไมโครวินาที หรือ 4.99 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.2 แผนภาพสัญญาณเวลาของข้อมูลแบบอนุกรมจำนวน 8 บิต
พร้อมด้วยบิตเริ่มต้นบิตพาริตี และ บิตสุดท้าย

การส่งข้อมูลแบบอนุกรม ข้อมูลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแบบอนุกรมเสียก่อนแล้วค่อยทยอยส่งครั้งละ 1 บิต ไปยังที่จะรับ ณ จุดรับจะต้องมีกลไกในการเปลี่ยนข้อมูลที่ส่งมาครั้งละบิตให้เป็นสัญญาณแบบขนาน ซึ่งลงตัวพอดี นั่นคือ บิตที่ 1 ลงที่บัสข้อมูลเส้นที่ 1พอดีการที่จะทำให้การแปลงสัญญาณจากแบบอนุกรม ครั้งละบิตให้ลงพอดีนั้น จำเป็นต้องมีกลไกที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการผิดพลาดจากการรับกลไกที่ว่าแบ่ง ออกเป็น 2 แบบ คือ แบบซิงโครนัส(synchronous) และแบบอะซิงโครนัส (asynchronous)



รูปที่ 4.3 วิธีการถ่ายโอนข้อมูลแบบอนุกรม

4.2.3 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

การสื่อสารแบบนี้ประกอบด้วยบิตเริ่มต้น หรือ บิตสตาร์ท(start bit) และบิตสิ้นสุด หรือ บิตสต็อป(stop bit)



รูปที่ 4.4 การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

ขณะที่สถานะของการส่งเป็นแบบว่าง หรือ ไอเดิล(idle) คือยังไม่มีสัญญาณที่ส่งออกมาแต่จะมีสัญญาณ หรือมีแรงดันตลอดเวลาเพื่อความแน่ใจว่าฝ่ายรับยังติดต่อยู่กับฝ่ายส่งฝ่ายส่งจะเริ่มส่งข้อมูลบอกจุด เริ่มต้น สัญญาณของอะซิงโครนัสจะเป็น "0" หนึ่งช่วงสัญญาณนาฬิกา บิตนี้เรียกว่าบิตสตาร์ท ข้อมูล 1 ตัวอักษรที่ตามหลังบิตสตาร์ทจะมีขนาดตั้งแต่ 5 บิต จนถึง 8 บิต โดยอักขระนี้ส่วนมากจะนิยมใช้ รหัสแอสกี(ASCII CODE)

4.2.4 การสื่อสารแบบซิงโครนัส

ข้อแตกต่างระหว่างวงจรการส่งข้อมูลอนุกรมแบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัสก็คือ ความต่อเนื่อง ของข้อมูลที่ส่ง ในแบบซิงโครนัส ข้อมูลที่ส่งออกมาเป็นแบบต่อเนื่อง ไม่มีบิต

สตาร์ทหรือบิตสต็อป การซิงโครไนซ์จะทำในระดับอักขระซึ่งหมายความว่าอักขระแต่ละตัวมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตที่แน่นอนแต่ละอักขระ ไม่มีบิตสตาร์ท หรือบิตสต็อปเหมือนอะซิงโครนัส การซิงโครนัส จะกระทำที่จุดเริ่มต้นของการส่งข้อมูล สถานีส่งจะส่งสัญญาณที่เรียกว่า ตัวอักษรนำ(leading pad character)ไปยังสถานีรับก่อนที่จะเริ่มส่งข้อมูล ตัวอักษรนำจะประกอบด้วย "0" และ "1" สลับกัน เพื่อให้สถานีรับจัดสัญญาณนาฬิกาให้ตรงกันก่อนส่ง ข้อมูลก็จะมีอักขระที่เรียกว่า อักขระซิงก์ ซึ่งเป็นบิตจำนวนหนึ่งที่ทางอุปกรณ์เครื่องรับสามารถใช้ในการกำหนดอัตราเร็วของข้อมูลให้ตรงกับทางอุปกรณ์เครื่องส่ง จึงตามหลังตัวอักษรนำออกมาสถานีส่งจำเป็นต้องบอกความยาว ของข้อมูลมาในกลุ่มนี้ และต้องบอกเครื่องหมายที่เป็นตัวบอกจุดเริ่มต้นของข้อมูลด้วย



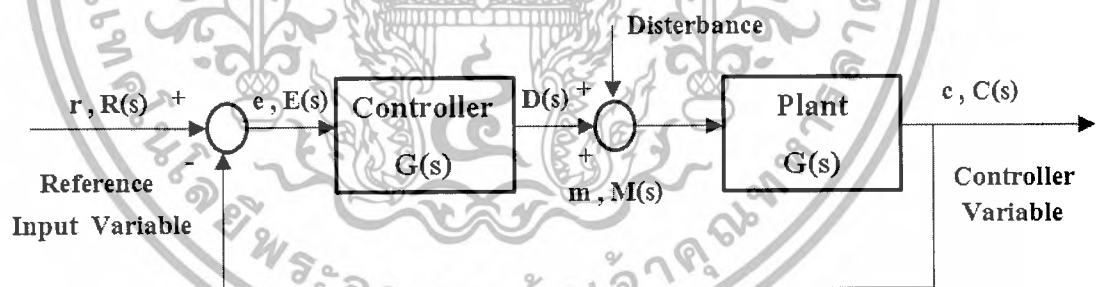
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ทฤษฎีการควบคุม

ข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากแก่การวิเคราะห์ วิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติ ได้แก่ ชนิดของการควบคุมและแบบของระบบควบคุมเพราะเป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของระบบโดยทั่วไปที่ทำให้ทำนายคุณสมบัติและการตอบสนองของระบบอย่างประมาณได้ ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นชนิดของตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถใช้กับงานประยุกต์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม สามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ได้ขณะปฏิบัติงานและมีวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้หลายวิธี ในบทที่ 5 นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของตัวควบคุมพีไอดีและพฤติกรรมของตัวควบคุม

การควบคุมแบบ PID control เป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมในระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control Systems, Feedback Control Systems) ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ระบบควบคุมอัตโนมัติชนิดที่มีการป้อนกลับ

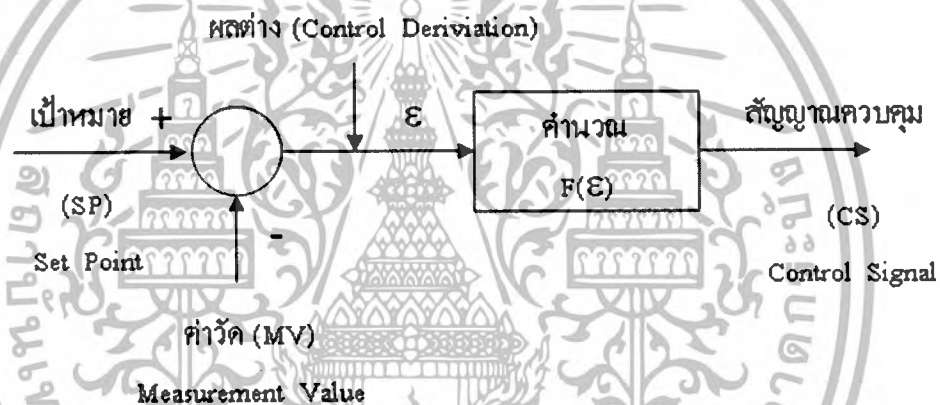
ค่าความผิดพลาดหรือตัวแปร e ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้มาจากการนำเอาสัญญาณป้อนกลับ f ไปเปรียบเทียบกับอินพุตตัวแปร r เป็นสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนที่เป็นการควบคุมเบื้องต้น $G_1(s)$ เพื่อให้การควบคุมเบื้องต้นตอบสนองให้โยกย้ายตัวแปร m แก่ส่วนที่เป็นต้นกำลังเพื่อแก้ไขให้เอาต์พุต หรือควบคุมตัวแปร c มีลักษณะเป็นไปในทางที่สอดคล้องกับการเปรียบเทียบกับอินพุตตัวแปร r มากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าหัวใจของระบบควบคุม คือส่วนที่เป็นการควบคุมเบื้องต้น $G_1(s)$ เพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นส่วนทำหน้าที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนระหว่างเอาต์พุต c กับอินพุต r ของทั้งระบบกล่าวคือรับเอาความคลาดเคลื่อนคือค่าผิดพลาด e เข้ามาสู่ตัวมัน แล้วสั่งให้ส่วนที่เป็นต้นกำลังทำงาน (โดยการโยกย้ายตัวแปร m)

5.1 ตัวควบคุมและแบบการควบคุม(Controller and Control Action)

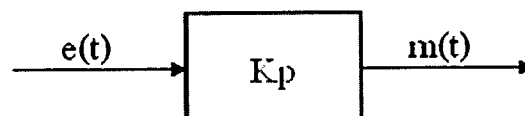
ตัวควบคุมจะรับสัญญาณเข้าจากการวัด เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย หรือ Set point ผลต่างของค่าทั้งสองจะถูกส่งไปให้ภาคคำนวณ เพื่อผลิตสัญญาณควบคุมขาออก ซึ่งจะส่งกลับไปที่กับส่วนขับเคลื่อนอีกทีหนึ่ง โครงสร้างภายในตัวควบคุมมีดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างตัวควบคุม

5.1.1 การควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional control action : P-Action)

ในกรณีที่ชนิดของการควบคุมเป็นแบบสัดส่วนการทำงานการควบคุมเบื้องต้นหรือตัวควบคุมจะเป็นไปในลักษณะของสัดส่วน คือ การโยกย้ายตัวแปรจะมีค่าน้อยตามความน้อยของค่าความผิดพลาด e กล่าวคือ



รูปที่ 5.3 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = K_p \cdot e \quad (5.1)$$

โดยที่ m = การเปลี่ยนแปลงของการ โยกย้ายตัวแปร (จาก Ref.Op.Condition)

e = การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (จาก Ref.Op.Condition)

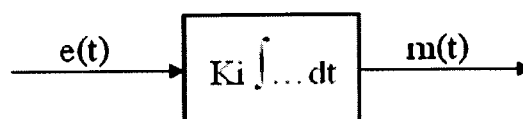
K_p = Proportional gain สัญญาณควบคุมก็คือ การขยายผลต่างด้วยอัตราขยาย K นั้นเอง ตามปกติในระบบการควบคุมมักจะไม่นิยมใช้ K แต่จะใช้ Proportional Band (PB) แทน ผลของ Proportional Band (PB) กับการควบคุมกระบวนการ Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5.2

$$GAIN = \frac{100}{PB} \quad (5.2)$$

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

5.1.2 การควบคุมแบบรวม (Integral control action : I-Action)

ตัวควบคุมมีลักษณะการทำงานคือการควบคุมเป็นแบบรวมหรือตัวควบคุมแบบไอ คือ ตัวควบคุมที่ให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อน m ในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับช่วงเวลาที่ไ้ขึ้นของค่าความผิดพลาด



รูปที่ 5.4 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m \propto \int e dt$$

หรือ

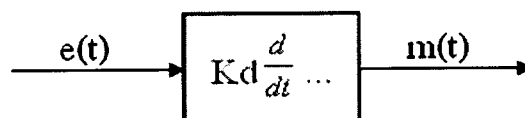
$$m = K_i \int e dt \quad (5.3)$$

โดยที่ K_i = Integral Gain คือตัวคงค่าเรียกว่า อัตราขยาย หรือกำลังขยายของตัวควบคุมแบบไอ

สำหรับ I-Action นั้นจะมีผลกับผลตอบสนองของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบสนองในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time ($T_i = K_p/K_i$) จะมีผลทำให้ออฟเซตหรือค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเรื่อง I-Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบสนอง แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้กระบวนการนั้นมีค่าน้อยเกินไป (I-Action มากเกินไป) ก็จะทำให้ผลตอบของกระบวนการเกิดการแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานมากขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวของผลตอบของกระบวนการ ถ้าผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบสนองที่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่งหรือค่าพุ่งเกินของการตอบสนองของกระบวนการ

5.1.3 การควบคุมแบบอัตรา (Derivative control action : D -Action)

การควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดีเป็นการควบคุมแบบซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของระบบในลักษณะที่เป็นสัดส่วนกับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด e กล่าวคือ



รูปที่ 5.5 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบดี

$$m \propto \frac{de}{dt}$$

หรือ

$$m = K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (5.4)$$

โดยที่ K_d = Derivative Gain คือตัวคงค่าซึ่งเรียกว่าอัตราขยายตัวควบคุมแบบดิ

ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมเบื้องต้น หรือตัวควบคุมชนิดนี้จะให้การ โยกย้ายตัวแปร m ทันทีที่ค่าของค่าความผิดพลาด e มีการเปลี่ยนแปลงผิดกับการควบคุมชนิดอื่นๆ ซึ่งจะทำให้การแก้ไขความคลาดเคลื่อนจากปริมาณของความคลาดเคลื่อน e การควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดินี้จึงมีประโยชน์มาก เพราะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเฝ้าความเคลื่อนไหวของค่าความผิดพลาดโดยจะให้การแก้ไขทันทีที่สภาพของค่าผิดพลาดเปลี่ยนไป จึงเท่ากับเป็นการการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของระบบล่วงหน้าแทนที่จะให้การแก้ไขหลังจากมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นแล้วเหมือนการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบรวม ดังที่ได้กล่าวมา โดย D – Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวกับกระบวนการ โดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ D – Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Set Point แต่อย่างใด

ข้อเสียของการควบคุมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบดินี้ก็คือถ้าหากค่าความผิดพลาด e มีค่าคงที่ไม่ว่าจะมากหรือน้อยเท่าใด การควบคุมเบื้องต้นของตัวควบคุมชนิดนี้จะไม่ให้มีการโยกย้ายตัวแปร m กล่าวคือ

$$m = K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

$$= 0 \text{ เมื่อ } e = \text{ตัวคงค่า}$$

นั่นคือ มันจะไม่ตอบสนองต่อค่าผิดพลาด e ใดๆ ในทางปฏิบัติจึงไม่ใช้การควบคุมชนิดนี้เพียงชนิดเดียวในระบบควบคุมอัตโนมัติ แต่จะถูกนำไปใช้ร่วมกับการควบคุมชนิดอื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นการควบคุมแบบผสมเสมอ

5.2 การควบคุมแบบผสม (Mixed – Mode of Control Action)

การควบคุมแบบผสม เป็นการควบคุมซึ่งมีการแก้ไขความคลาดเคลื่อนหรือ ของระบบเป็น

แบบผสมคือให้ การ โยกย้ายตัวแปร m ในลักษณะที่เหมือนกับเอาลักษณะการทำงานของ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมชนิดต่างๆ มาผสมกัน เช่น การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมหรือตัวควบคุมแบบพีและแบบไอ, การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบพีและดี และการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตราหรือตัวควบคุมแบบพีไอดี

จุดประสงค์ของการนำเอาการควบคุมแบบต่างๆ มาผสมกันเป็นแบบการควบคุมแบบผสมก็เพื่อแก้ไขการตอบสนองของระบบดีขึ้น กล่าวคือเพื่อปรับปรุงความเร็ว ความแม่นยำ และความเสถียรของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยนำเอาข้อดีของการควบคุมแต่ละแบบมารวมกัน เช่น ระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนย่อมมีประสิทธิภาพไม่เท่ากับระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมเพราะระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วน อาจจะทำให้การตอบสนองที่รวดเร็วได้จริง แต่ไม่ว่าเวลาจะผ่านไปนานเท่าไร (ที่ค่าสูญเสีย) ย่อมมีความคลาดเคลื่อนเสมอ หากระบบถูกรบกวนจากภายนอกซึ่งปัญหานี้จะแก้ไขไปได้หากใช้การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม และในทำนองเดียวกันการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม สำหรับระบบควบคุมบางชนิด เช่น การควบคุมแบบเบางยอมให้การตอบสนองของระบบผู้การตอบสนองของระบบที่มีการควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผสมแบบอัตราไม่ได้ ในแง่ที่ว่าขาดระบบล่วงหน้าไป กล่าวคือ ในบางครั้งระบบจะให้การตอบสนองที่มีความคลาดเคลื่อนหรือเอาต์พุตที่แกว่งไปจากอินพุตตัวแปร (x) มาก เพราะในระบบที่มีการควบคุมแบบพีและไอนั้นจะไม่ทำงานในทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของค่าความผิดพลาด e ผิดกับแบบหรือในกรณีของการควบคุมแบบเบางระบบที่มีการควบคุมแบบพีและไออาจทำงานไม่ทัน เพราะการเปรียบเทียบกับอินพุตตัวแปร (x) เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

5.2.1 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวม (Proportional – Plus Integral Control)

Action)

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร m กับค่าความผิดพลาด e ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$\text{ใน } T - \text{domain} \text{ จะได้ ; } m(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5.5)$$

$$\text{ใน } S - \text{domain} \text{ จะได้ ; } m(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{TiS} \right] e(s) \quad (5.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

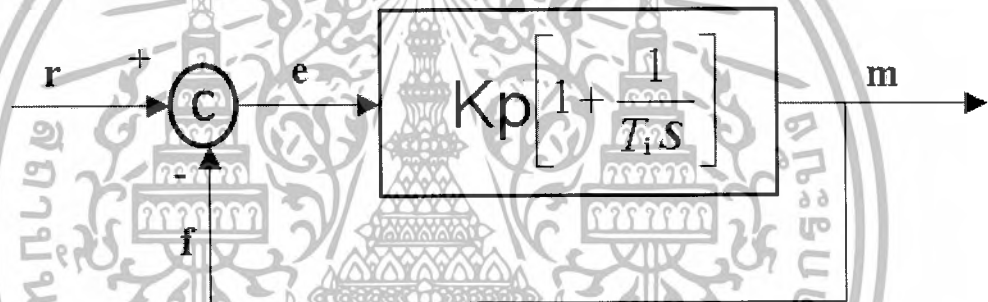
โดยที่ $K_p \equiv$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี

$K_i \equiv$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบไอ

$$T_i \equiv \text{ช่วงเวลากิริยาควบคุมแบบไอ} = \frac{K_p}{K_i}$$

= ระยะเวลาที่ตัวควบคุมแบบไอ ให้การตอบสนองเท่ากับการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุม (ส่วนกลับของ T_i คือ อัตราส่วนเริ่มต้น)

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีและไอ

5.2.2 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอัตรา (Proportional – Plus – Derivative Control

Action)

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร m กับค่าความผิดพลาด e ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้คือ

$$\begin{aligned} \text{ใน } T - \text{domain} \text{ จะได้; } m(t) &= K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \\ &\equiv K_p \cdot e(t) + K_d \cdot T_d \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\text{ใน } S - \text{domain} \text{ จะได้; } m(s) = K_p [1 + T_d \cdot S] e(s) \quad (5.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

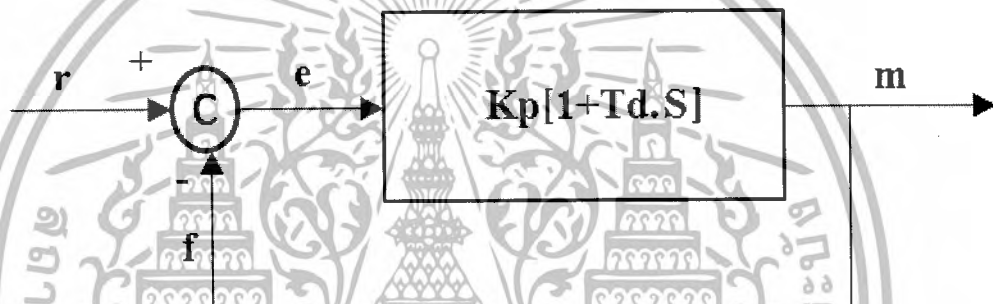
โดยที่ $K_p \equiv$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี

$K_d \equiv$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบดี

$$T_d \equiv \text{ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบดี} = \frac{K_d}{K_p}$$

= ระยะเวลาที่ ตัวควบคุมแบบดีให้การตอบสนองนำการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แผนผังการทำงานตัวควบคุมแบบพีและดี

5.2.3 การควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบรวมผลแบบอัตรา (Proportional – Plus – Integral – Plus – Derivative Control Action)

ความสัมพันธ์ของการโยกย้ายตัวแปร m กับค่าความผิดพลาด e ของการควบคุมแบบผสมชนิดนี้ คือ

$$\begin{aligned} \text{ใน T-domain จะได้ ; } m(t) &= K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \\ &\equiv K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\text{ใน S-domain จะได้ ; } m(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] e(s) \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

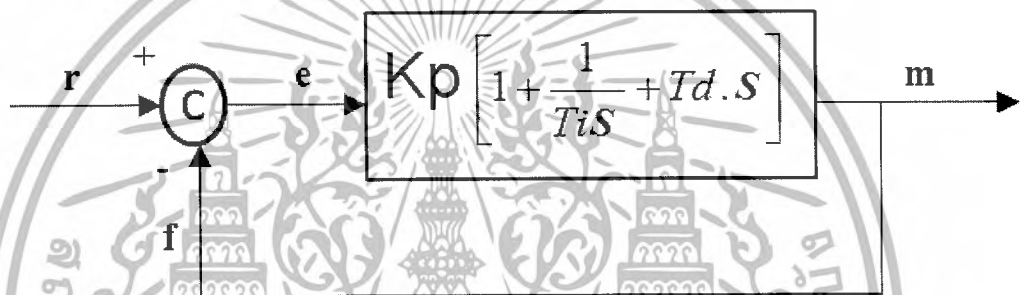
$K_i \equiv$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบไอ

$K_d \equiv$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบดี

$T_i \equiv$ ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบไอ

$T_d \equiv$ ช่วงเวลาของตัวควบคุมแบบดี

ซึ่งอาจแทนได้ด้วยแผนผังการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.8

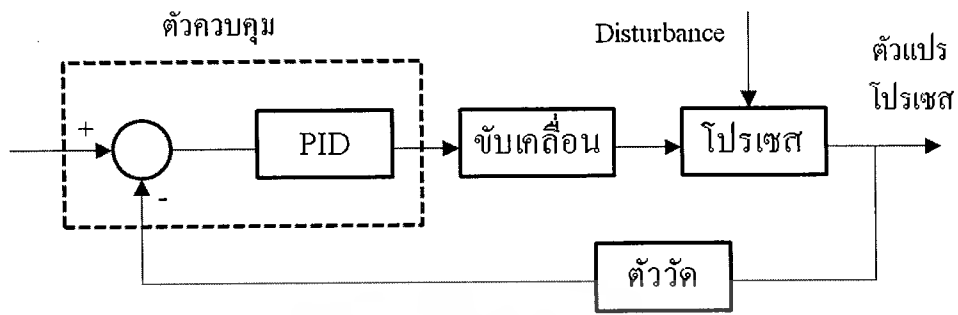


รูปที่ 5.8 แผนผังการทำงานของตัวควบคุมพีไอดี

5.3 การปรับ PID

5.3.1 ผลการตอบสนองที่ดี

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ตัวควบคุมจะพยายามรักษาค่าตัวแปรโปรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายอยู่เสมอ ในกรณีที่เกิด Disturbance ในระบบหรือมีการเปลี่ยนค่าเป้าหมายจะทำให้ตัวแปรโปรเซส มีค่าต่างจากค่าเป้าหมายไปขณะหนึ่ง ตัวควบคุมจะพยายามควบคุมให้ตัวแปรโปรเซสมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายนี้ในที่สุด ลักษณะการนำค่าตัวแปร โปรเซสให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายนี้จะแตกต่างกันตามคุณสมบัติของระบบควบคุม บางระบบควบคุมอาจควบคุมให้ตัวแปรโปรเซสส่งเข้าหาค่าเป้าหมายได้เร็ว แต่บางระบบอาจทำได้ดีกว่า เราสามารถทดสอบความสามารถของระบบควบคุมนี้โดยดูที่ผลตอบของการควบคุม



รูปที่ 5.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เป้าหมาย

เปลี่ยนเป้าหมาย

เวลา

ตัวแปรโปรเซส

เป้าหมาย

เวลา

(ข)

ตัวแปรโปรเซส

เป้าหมาย

เวลา

(ค)

รูปที่ 5.10 ผลตอบของระบบควบคุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อตัวแปรโปรเซสหยุดนิ่งมีค่าเป้าหมาย ในขณะนั้นเกิดมี Disturbance เข้ามารบกวนโปรเซส (Disturbance ได้แก่ การเปลี่ยนของโหลด การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เป็นต้น) ผลตอบของโปรเซส จะมีหลายแบบดังแสดงในรูป

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

เมื่อพิจารณาผลตอบของการควบคุมชนิดต่างๆ เหล่านี้พอสรุปได้ว่า ระบบการควบคุมที่ดี จะมีคุณสมบัติ ดังนี้

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

5.3.2 ผลของ PID ต่อเสถียรภาพของระบบ

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งใช้การควบคุมแบบ PID นั้นถ้าเราลองแปรค่า PB , Ti และ Td จะมีผลต่อผลตอบสนองของระบบควบคุมดังนี้

ผลของ P – Action

เมื่อลดค่า PB ลงทำให้อัตราขยายสูงขึ้น จะมีผลทำให้

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

ผลของ I – Action

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ผลของ D – Action

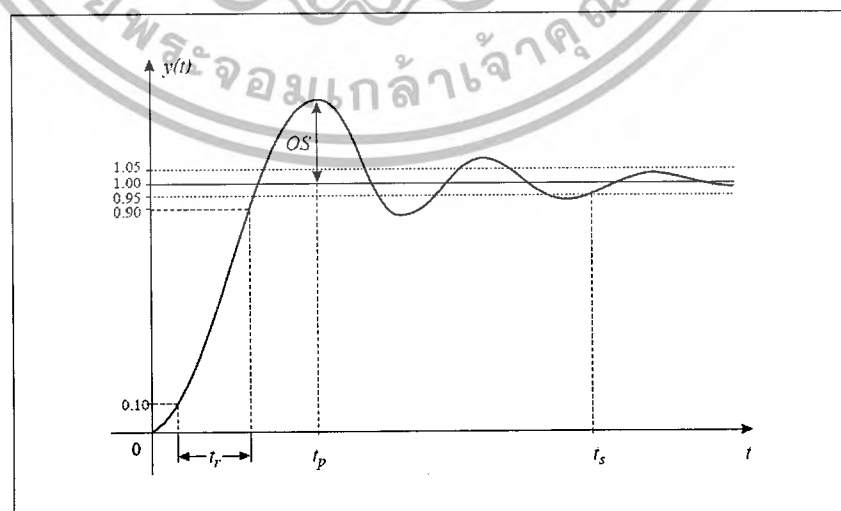
เมื่อให้ P – Action และ I – Action คงที่แล้วเพิ่มเวลา T_d (Derivative time) ให้ยาวขึ้นจะทำให้

- ก) อัตราส่วนของช่วงกว้างการแกว่งลดลง ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น
- ข) Period ของการแกว่งสั้นลง

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

5.3.3 คุณภาพของการควบคุม

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ FeedBack เราจะใช้สัญญาณอินพุตแบบ Unit Step ใส่เข้าไปในระบบเพื่อใช้วิเคราะห์ transient ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยสามารถตรวจจากลักษณะดังรูปนี้



รูปที่ 5.11 Transient and Steady-State Response

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Steady State Performance

ค่านี้จะได้จากการหาค่า steady-state error ของการตอบสนองต่อฟังก์ชันอินพุตพื้นฐานที่กล่าวมาแล้ว

2. Transient Performance

ค่านี้จะวิเคราะห์โดยการใส่ unit-step function เป็นอินพุตอ้างอิงและจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 5.11 ลักษณะที่สำคัญของผลตอบสนองนี้ได้แก่

- Overshoot

เป็นค่า error ที่มากที่สุดระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ค่านี้จะใช้ในการประมาณความเสถียรของระบบ ค่า overshoot จะวัดเป็นสัดส่วนเทียบกับค่าสุดท้ายหรือค่าอินพุตอ้างอิงดังนี้

$$\text{Percent overshoot} = \text{Maximum overshoot} / \text{Final desired value} \times 100$$

- Time delay

ค่า Time delay (t_d) เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของระบบตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเอาต์พุตมีค่าเป็น 50 % ของค่าอินพุตอ้างอิง

- Rise time

ค่า Rise time (t_r) เป็นช่วงเวลาดังแต่เอาต์พุตมีค่าเป็น 10 % จนถึง 90 % ของค่าอินพุตอ้างอิง

- Settling time

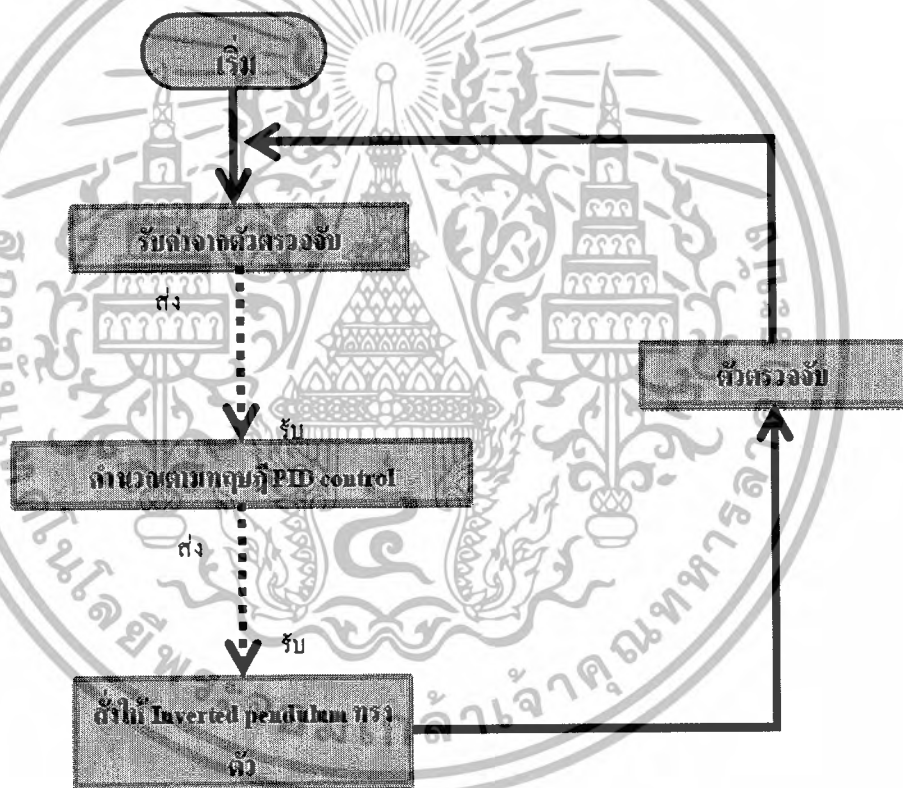
ค่า Settling time (t_s) เป็นช่วงเวลาดังแต่เริ่มต้นจนกระทั่งการแกว่งของเอาต์พุตลดลงอยู่ในขอบเขตที่กำหนด โดยปกติแล้วขอบเขตนี้จะอยู่ในช่วง 2-5 % ของอินพุตอ้างอิง

บทที่ 6

ขั้นตอนและโปรแกรมการทำงาน

6.1 แผนผังการทำงานของระบบระหว่างโปรแกรม visual studio c++ และโปรแกรม MATLAB

การทำงานของโปรแกรมนี้เป็นการ simulate ระหว่างโปรแกรม MATLAB ที่คอมพิวเตอร์ตัวที่ 1 ส่งค่าพารามิเตอร์ไปคำนวณตามทฤษฎี PID ในคอมพิวเตอร์ตัวที่ 2 ที่ใช้โปรแกรม visual studio c++ ในการรัน



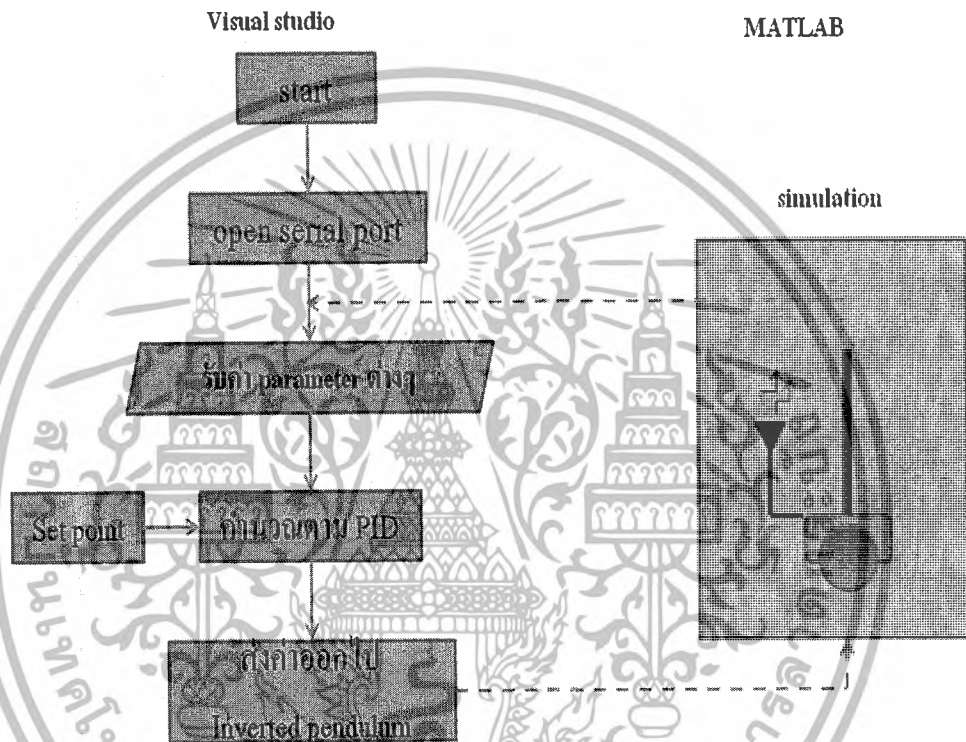
รูปที่ 6.1 แผนภาพการทำงานการ Simulate

จากแผนภาพ เมื่อทำการ Run Program จะมีการส่งค่าเอาต์พุต $y(k)$ จากคอมพิวเตอร์ 1 ผ่าน Xbee ตัวที่ 1 เข้าสู่ Xbee ตัวที่ 2 เข้าคอมพิวเตอร์ 2 จากนั้น คอมพิวเตอร์ 2 จะทำการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี PID ในที่นี้ใช้ทฤษฎี PID ควบคุม 3 ส่วนคือ ส่วนมอเตอร์ ส่วนเซนเซอร์ความเร็ว และส่วนเซนเซอร์มุม จากนั้นนำค่าที่ได้ส่งกลับคอมพิวเตอร์ 1 ผ่าน Xbee คอมพิวเตอร์ 1 จะทำการ Simulate ควบคุมการทรงตัวของหุ่น และส่งค่าเอาต์พุต $y(k)$ ตัวใหม่นี้ก็กลับไปคำนวณตามทฤษฎี PID ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์ 2 ต่อไป โปรแกรมจะทำงานวนซ้ำไปเรื่อยๆ ผลที่ได้คือ หุ่นยนต์จำลองนี้จะพยายามรักษาการทรงตัวให้ได้

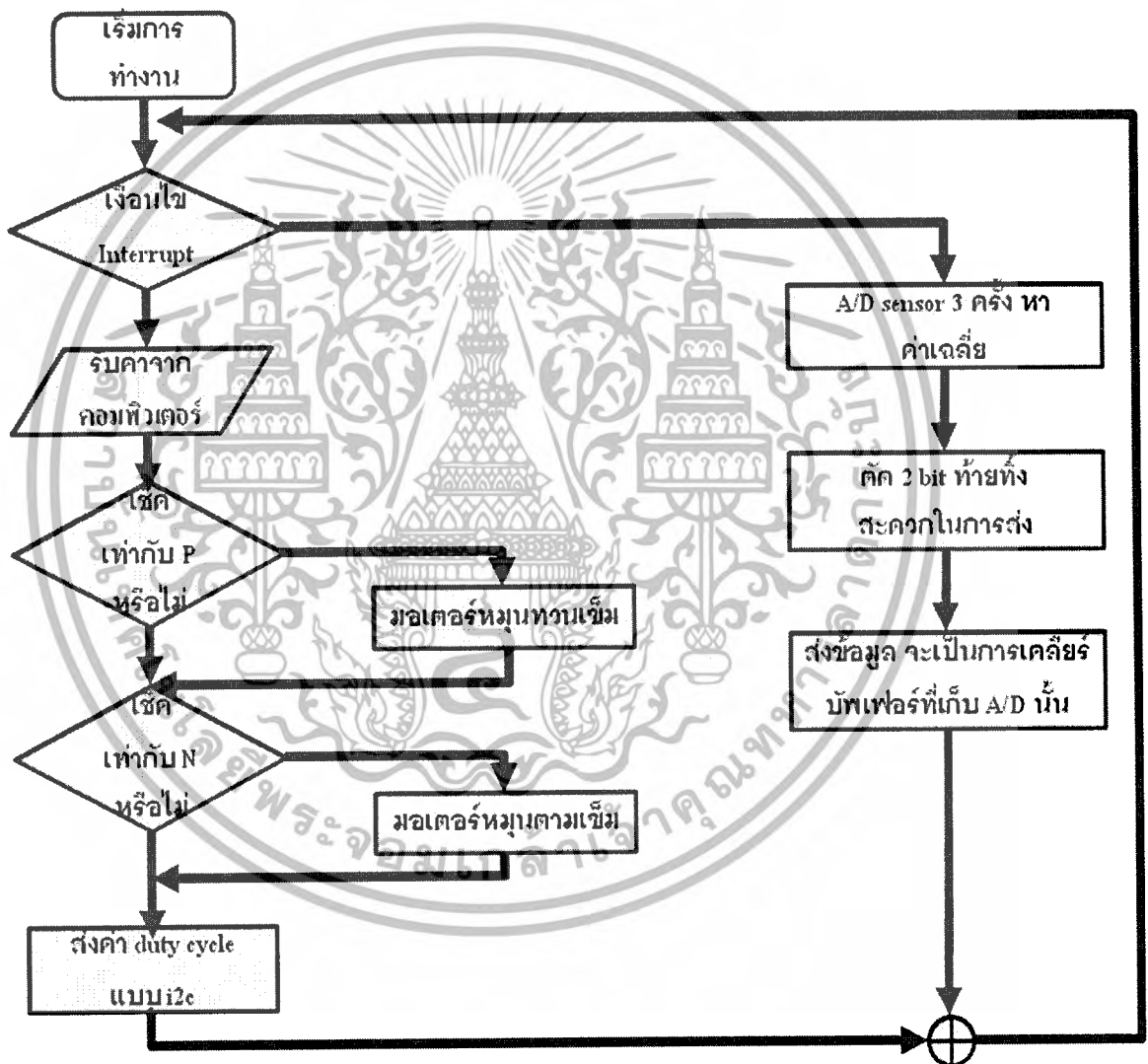
6.2 Flow chart การทำงานของโปรแกรม visual c++



รูปที่ 6.2 Flow chart

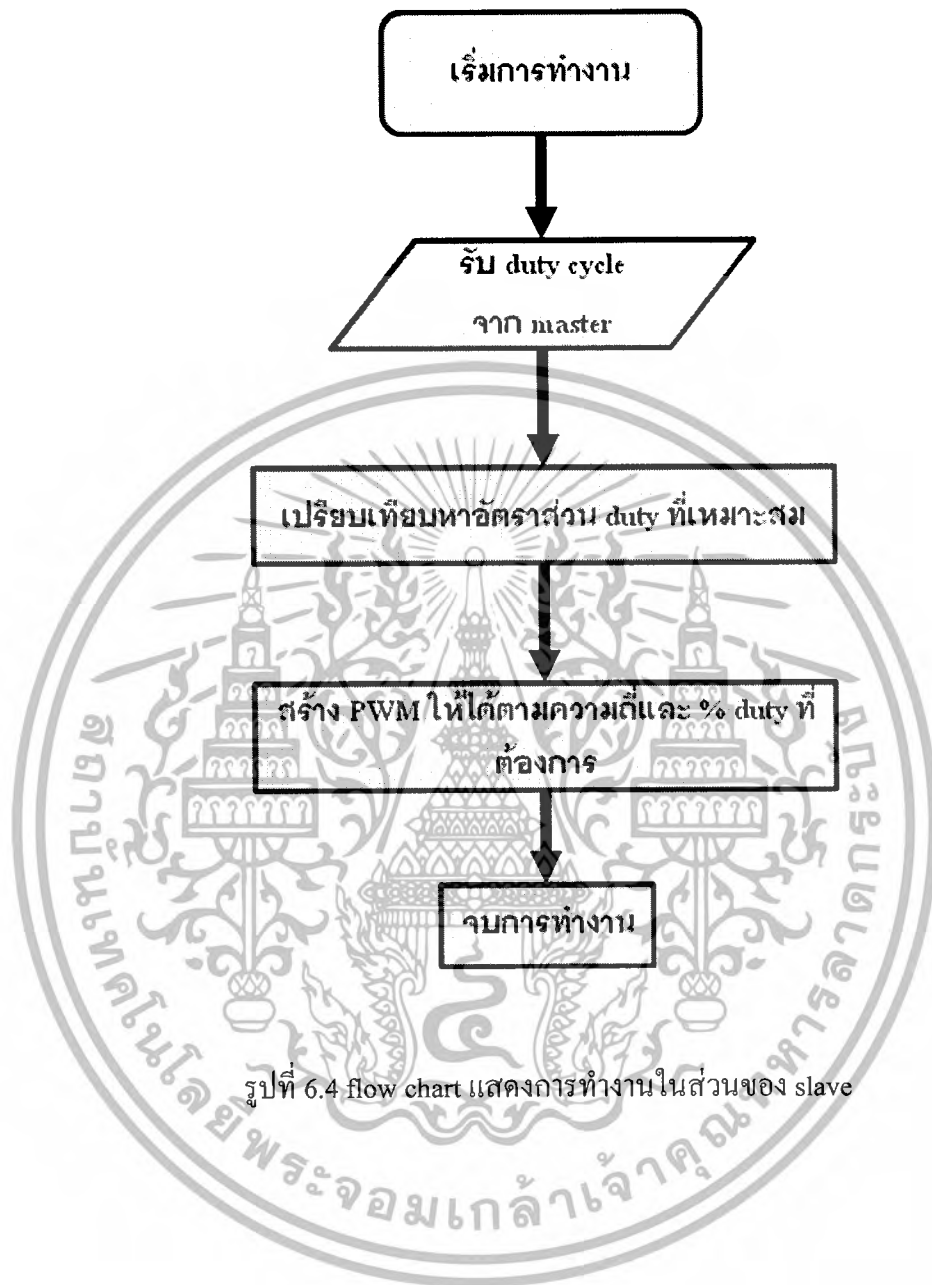
จาก Flow chart นี้ประกอบด้วยส่วนของการคำนวณโดยโปรแกรม Visual studio กับส่วนของการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งเมื่อทำการ Run Program จะเริ่มด้วยการเปิด Serial port โดยหุ่นยนต์ที่จำลองจะทำการส่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เข้ามาในโปรแกรม Visual studio โดยจะทำการคำนวณตามทฤษฎี PID โดยนำค่า Set point ที่กำหนดไว้มาคำนวณด้วย จากนั้นจะนำค่าที่ได้ส่งออกไปยังหุ่นยนต์ โดยโปรแกรมจะทำงานวนซ้ำไปเรื่อยๆ ผลที่ได้คือ หุ่นยนต์จำลองนี้จะพยายามรักษาการทรงตัวให้ได้

ในการทำงานของส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนของมาสเตอร์ และส่วนของสเลฟ โดยที่มาสเตอร์จะรับค่าจากเซนเซอร์เข้ามาแปลงเป็น A/D จากนั้นก็ส่งค่าให้กับ คอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณตามทฤษฎี PID ค่าที่คำนวณได้จะถูกส่งให้มาสเตอร์ มาสเตอร์จะทำการส่งข้อมูลให้กับสเลฟเพื่อสร้าง PWM และตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ (L293) เพื่อกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยสเลฟจะสร้าง PWM ป้อนให้ L293 เพื่อให้ L293 เกิดการทำงาน



รูปที่ 6.3 flow chart แสดงการทำงานในส่วนของมาสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

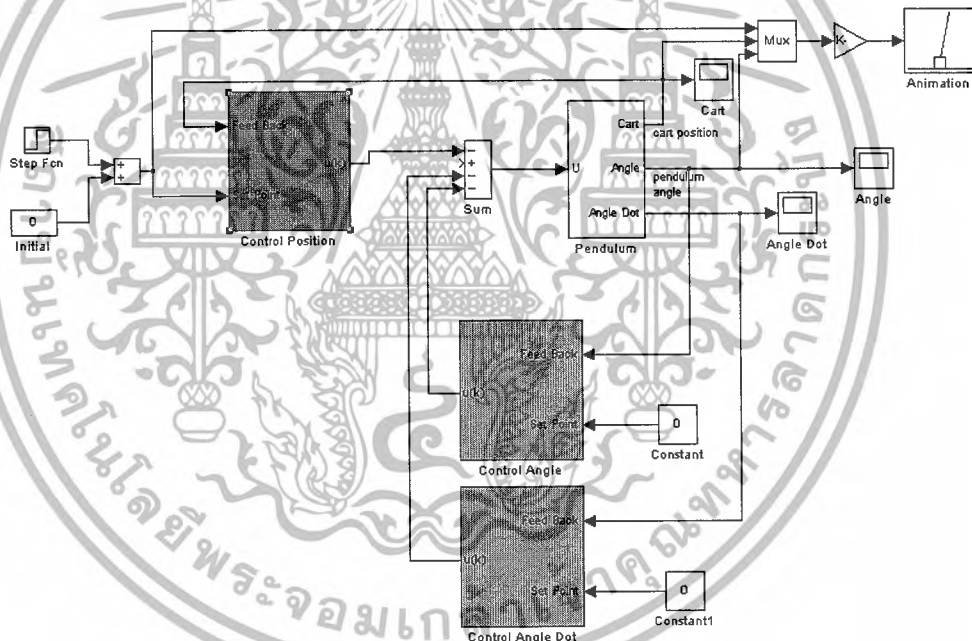


บทที่ 7

การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์

เป็นการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งมีการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ด้วยทฤษฎี PID Control และในการจำลองของระบบการทำงานนี้ได้มีการควบคุมทั้งหมด 3 ส่วนซึ่งก็คือ ควบคุมมุม (Control Angle), ควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot) และ ควบคุมตำแหน่ง (Control Position) ซึ่งมีการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ในกรณีต่าง ๆ ดังนี้

7.1 กรณีที่หุ่นยนต์ไม่มี sample time (real time) และไม่มี noise



รูปที่ 7.1 Simulation กรณีที่หุ่นยนต์ไม่มี sample time (real time) และไม่มี noise

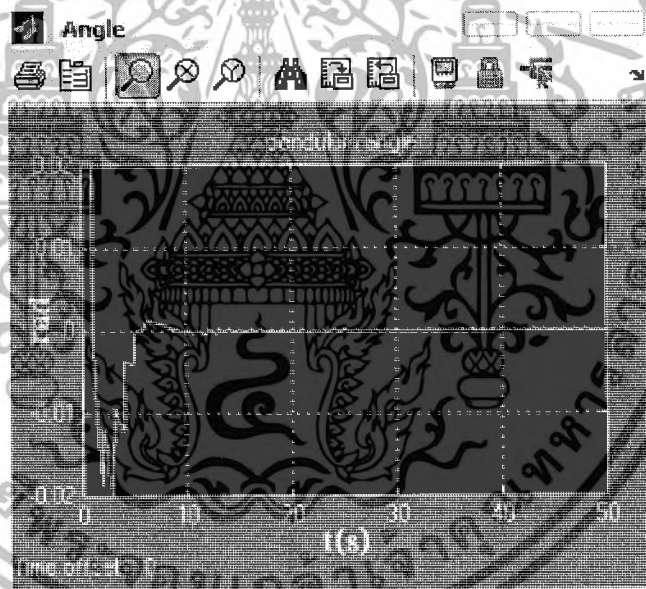
ได้มีการควบคุมทั้ง 3 ส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนควบคุม	ค่า Kp		ค่า Ki		ค่า Kd	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
Control Angle	800	2000	0	5	0	50
Control Angle Dot	5	100	0	2	0	20
Control Position	5	15	0	0.1	20	40

ได้กราฟผลการจำลองการทำงาน ดังนี้

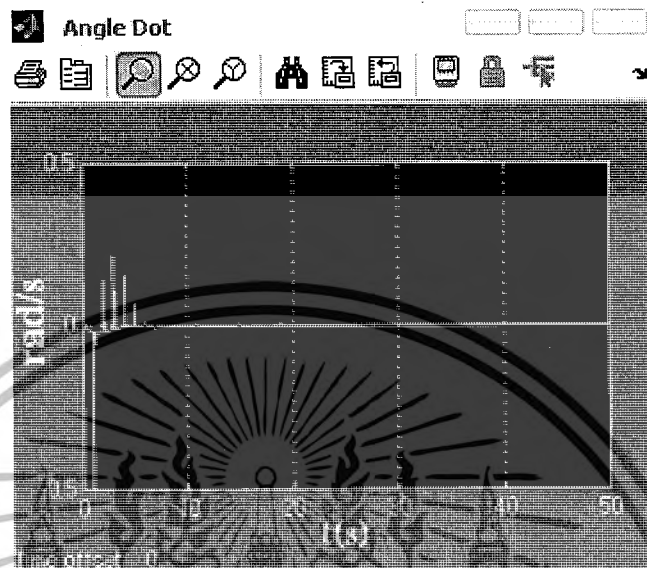
กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)



รูปที่ 7.2 กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)

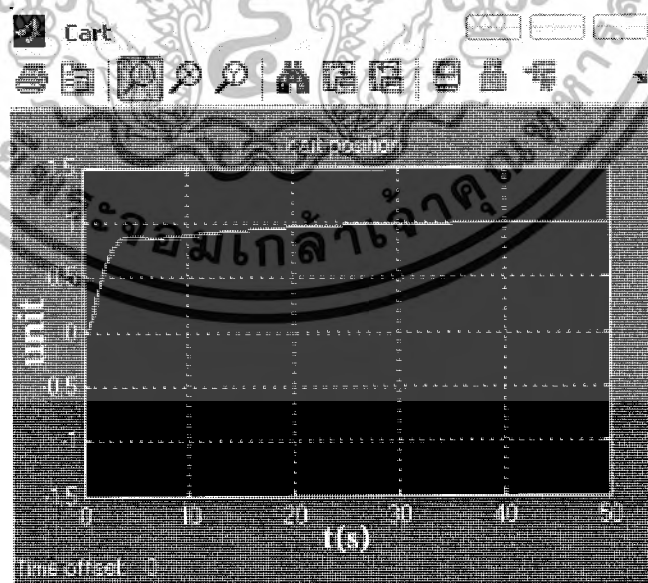
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)



รูปที่ 7.3 กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)

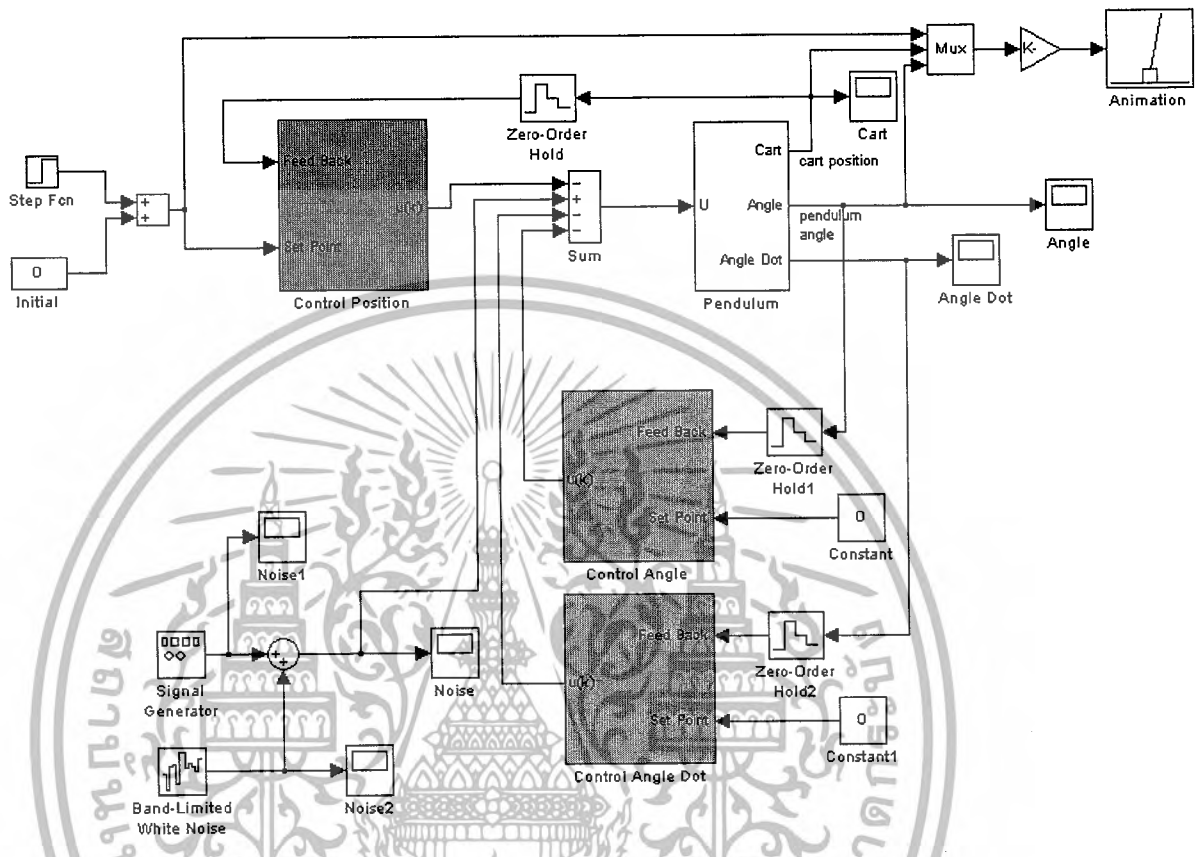
กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)



รูปที่ 7.4 กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 50 เฮิรตซ์และมี noise



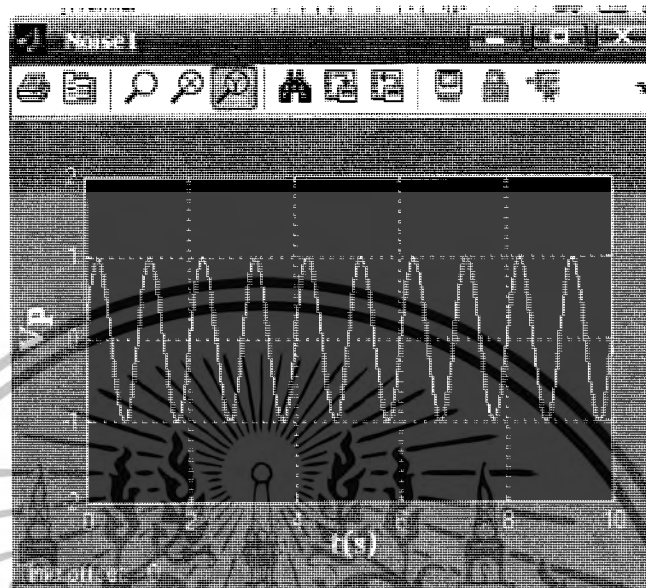
รูปที่ 7.5 Simulation กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 50 เฮิรตซ์และมี noise

ได้มีการควบคุมทั้ง 3 ส่วน คือ

ส่วนควบคุม	ค่า Kp		ค่า Ki		ค่า Kd	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
Control Angle	4	30	0	0.1	40	80
Control Angle Dot	600	1200	0	8	0	200
Control Position	10	13	0	0.3	0	0.8

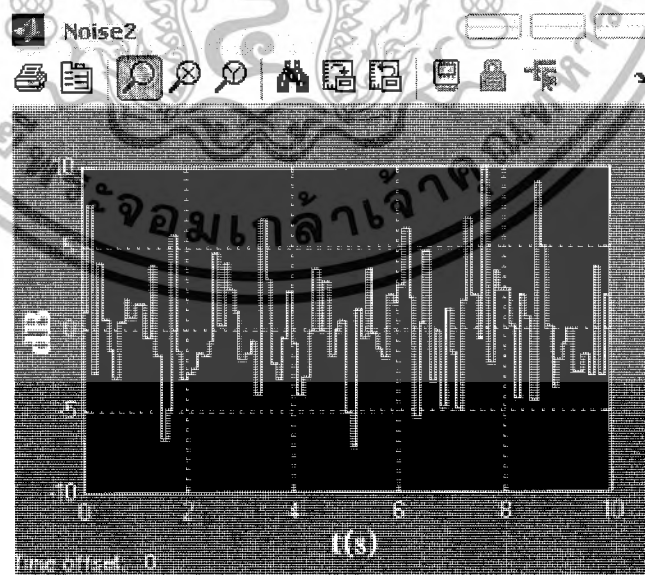
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสัญญาณรบกวนที่ความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 เดซิเบล



รูปที่ 7.6 สัญญาณรบกวนที่ความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 เดซิเบล

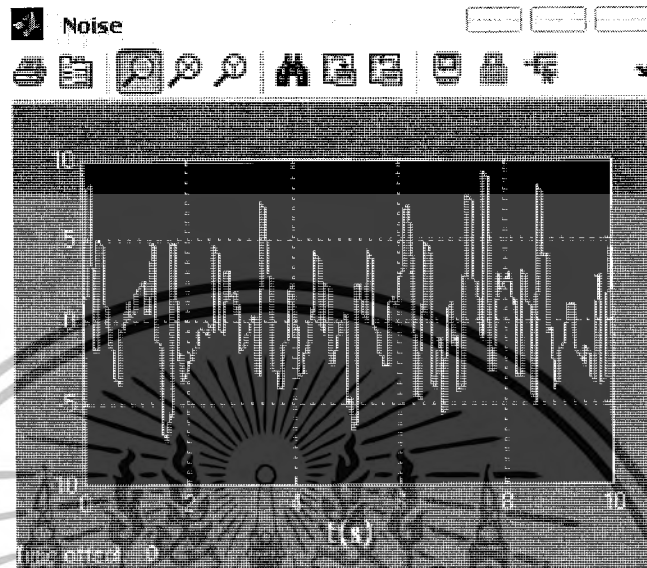
เมื่อส่วนของ White Noise มีค่าเท่ากับ 1 เดซิเบล



รูปที่ 7.7 กราฟของ White Noise มีค่าเท่ากับ 1 เดซิเบล

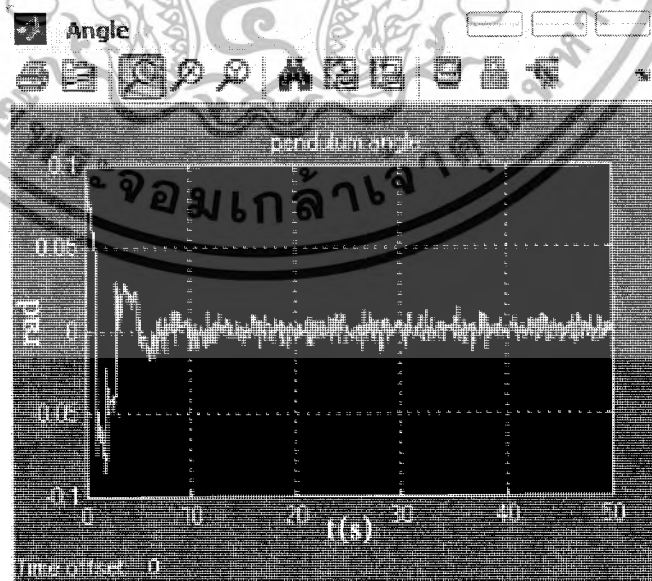
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนรวมของระบบ



รูปที่ 7.8 รูปกราฟของสัญญาณรบกวนรวมของระบบ

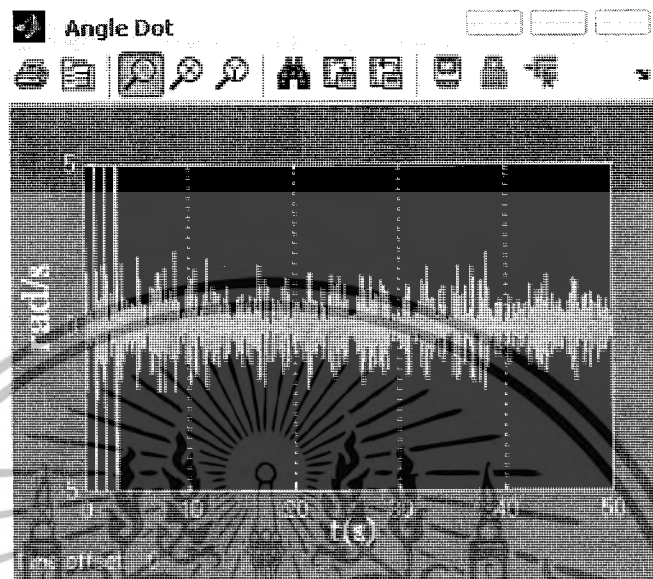
ได้กราฟผลการจำลองการทำงาน ดังนี้
กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)



รูปที่ 7.9 กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)

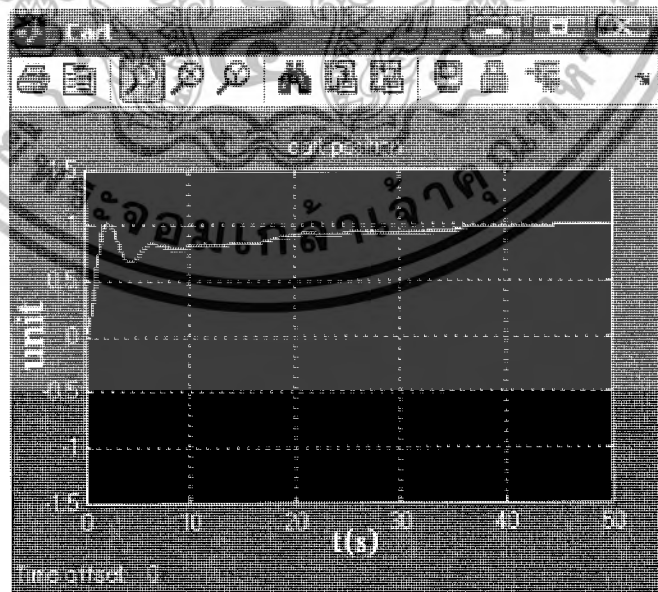
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)



รูปที่ 7.10 กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)

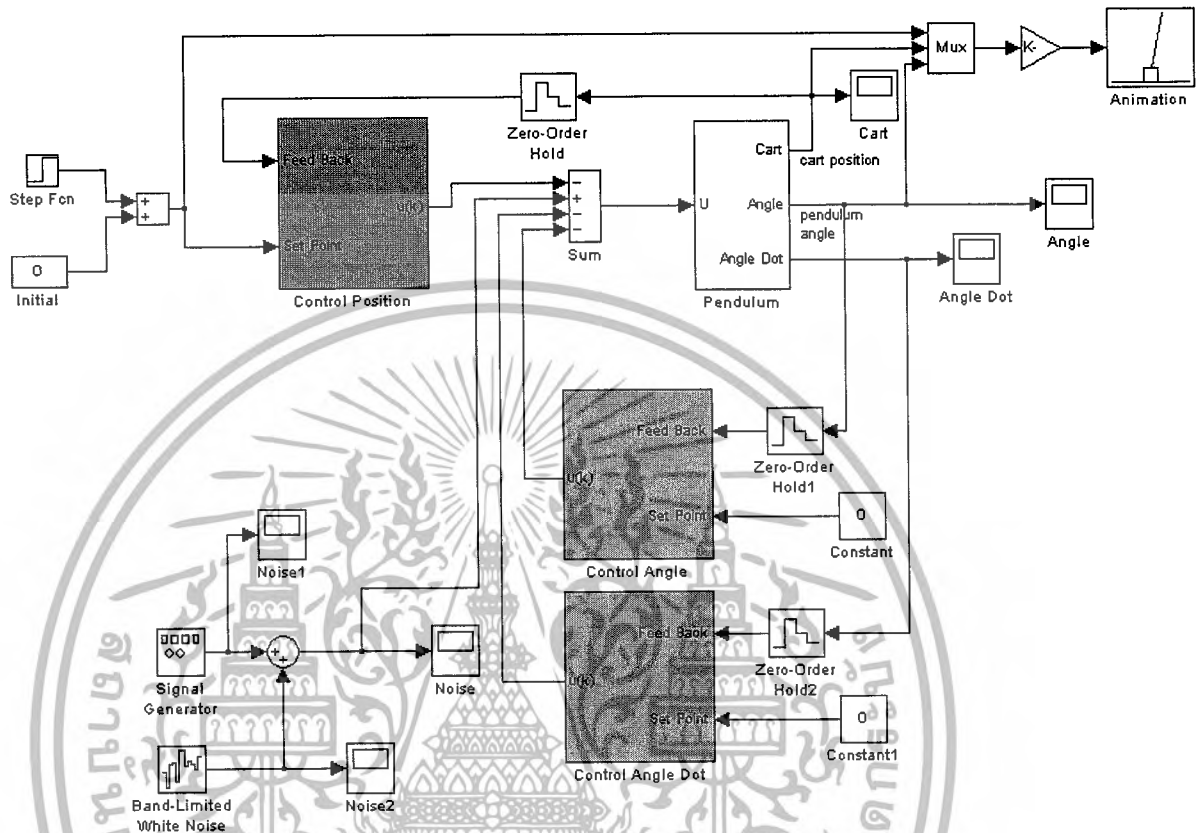
กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)



รูปที่ 7.11 กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 10 เฮิรตซ์และมี noise



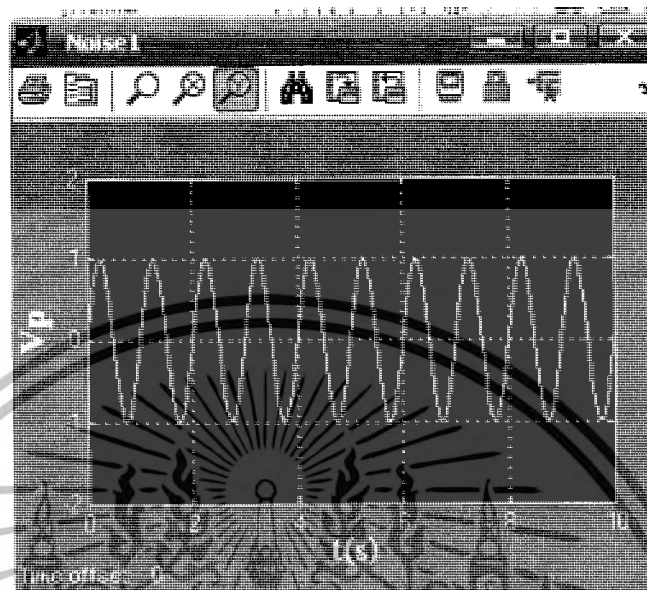
รูปที่ 7.12 Simulation กรณีที่หุ่นยนต์มี sample time ความถี่ 10 เฮิรตซ์และมี noise

ได้มีการควบคุมทั้ง 3 ส่วน คือ

ส่วนควบคุม	ค่า Kp		ค่า Ki		ค่า Kd	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
Control Angle	24	35	0	5	0	3
Control Angle Dot	2	2.5	0	0.5	0	0.5
Control Position	1	2	1	3	2	3

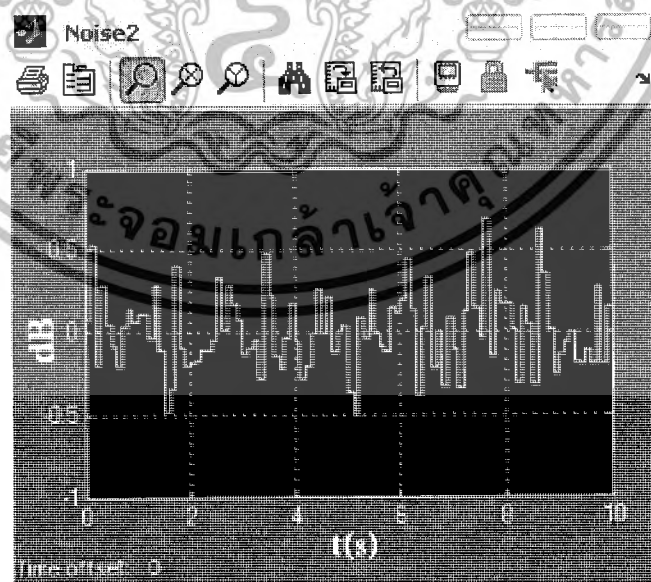
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสัญญาณรบกวนที่ความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 เดซิเบล



รูปที่ 7.13 สัญญาณรบกวนที่ความถี่เท่ากับ 1 เฮิรตซ์และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 เดซิเบล

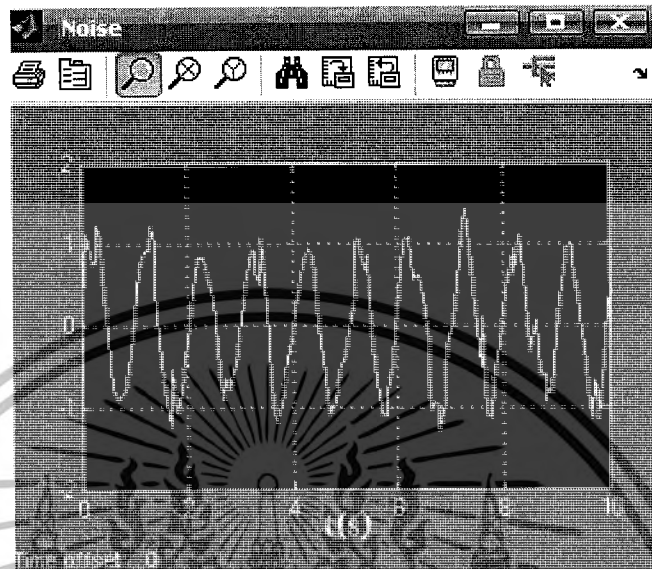
เมื่อส่วนของ White Noise มีค่าเท่ากับ 0.005 เดซิเบล



รูปที่ 7.14 กราฟของ White Noise มีค่าเท่ากับ 0.005 เดซิเบล

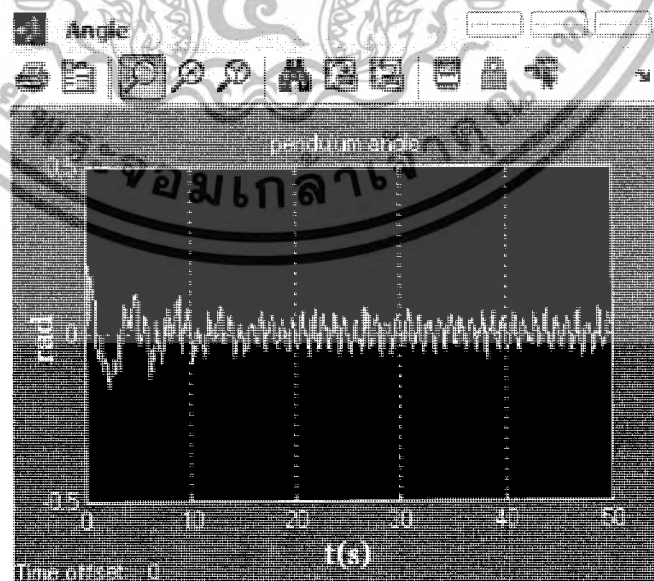
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนรวมของระบบ



รูปที่ 7.15 รูปกราฟของสัญญาณรบกวนรวมของระบบ

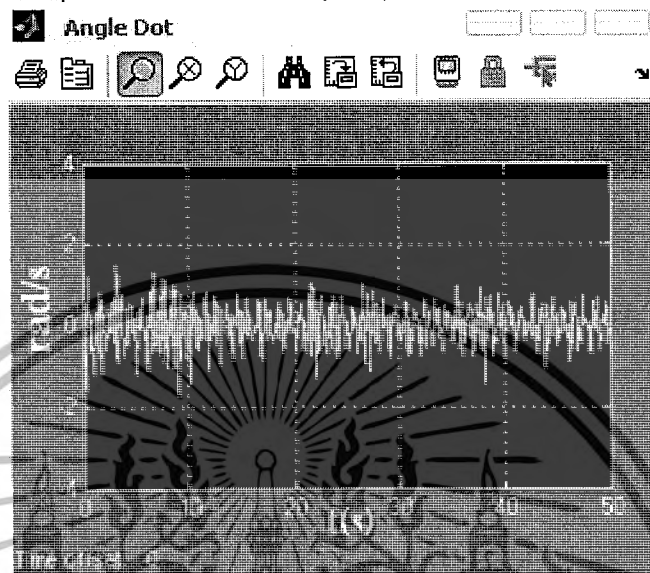
ได้กราฟผลการจำลองการทำงาน ดังนี้
กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)



รูปที่ 7.16 กราฟในส่วนการควบคุมมุม (Control Angle)

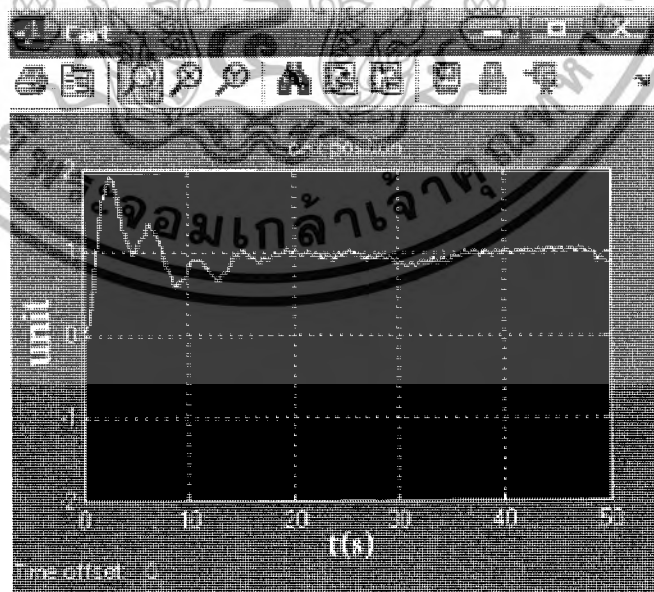
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)



รูปที่ 7.17 กราฟในส่วนการควบคุมความเร็ว (Control Angle Dot)

กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)



รูปที่ 7.18 กราฟในส่วนการควบคุมตำแหน่ง (Control Position)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

การสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์

8.1 โครงสร้างของระบบ

โครงสร้างของระบบจะแบ่งออกเป็นสามภาคหลักด้วยกัน ได้แก่ ภาคเซนเซอร์ ภาคควบคุม และภาคเอาต์พุตขับเคลื่อน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 8.1 ในส่วนของภาคเซนเซอร์จะทำหน้าที่รับข้อมูลพฤติกรรมการทำงานของตัวรถซึ่งได้แก่ มุมของแขนเพนคูลัมและอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนคูลัมแล้วป้อนข้อมูลที่ได้นี้ให้แก่ภาคควบคุมหรือตัวควบคุม PID ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอินพุตเพื่อสร้างสัญญาณเอาต์พุตควบคุมการทำงานของมอเตอร์อีกที สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะประกอบด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดคูลेशनในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์และสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์



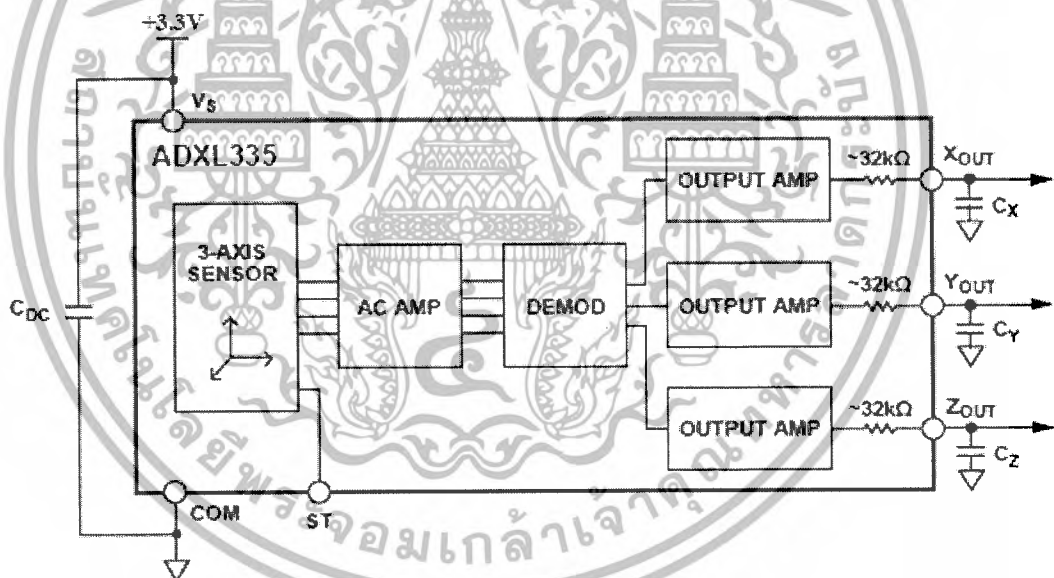
รูปที่ 8.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบ

8.2 ภาคเซนเซอร์

ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ จะอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 2 ประเภทด้วยกัน อันได้แก่ การวัดความเร็วเชิงเส้นและอัตราเร็วเชิงมุม เพื่อใช้ในการควบคุมการทรงตัว โดยในที่นี้จะใช้เซนเซอร์สองประเภทด้วยกัน ได้แก่ เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงเส้น (accelerometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วหรือการสั่นสะเทือนและไจโรสโคปเพื่อวัดอัตราเร็วเชิงมุม

8.2.1 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงเส้น (Accelerometer)

เลือกใช้เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงเส้น (Accelerometer) เบอร์ ADXL335 เป็นแอ็คเซเลอโรมิเตอร์แบบ 3 แกน โดยให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งความไวในการตอบสนองของเอาต์พุต (sensitivity) มีค่าเป็น 300 mV/g โดยใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์



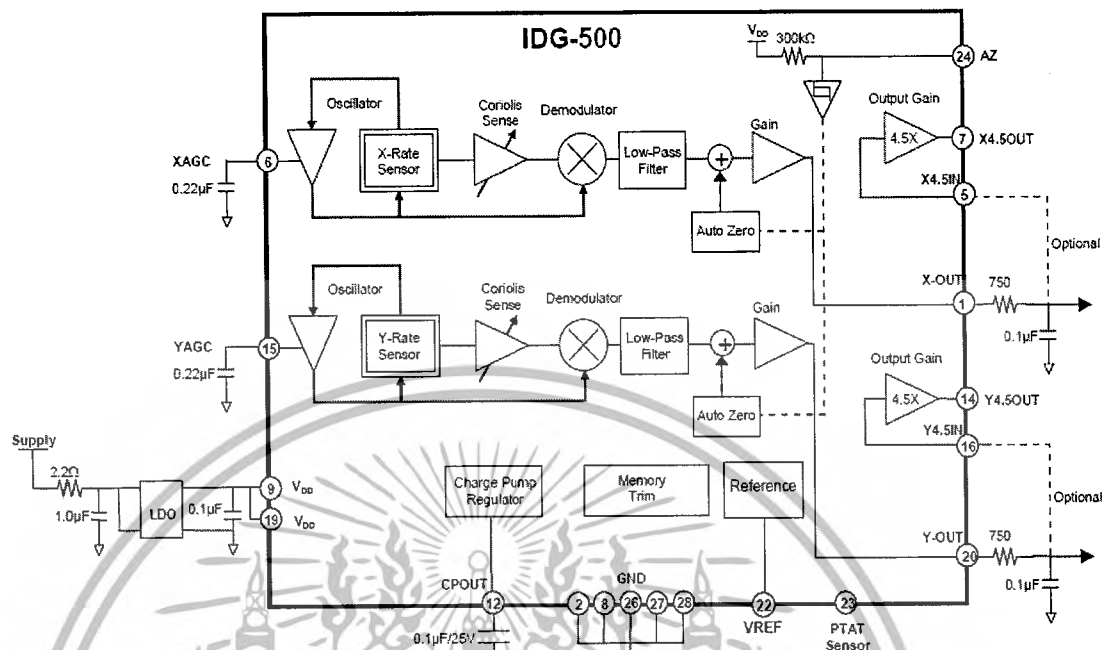
รูปที่ 8.2 บล็อกไดอะแกรมของ ADXL335

8.2.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

เลือกใช้ไจโรสโคป เบอร์ IDG – 500 ซึ่งเป็นไจโรสโคปแบบ 2 แกน โดยใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์และใช้แรงดันอ้างอิง 1.35 โวลต์ ซึ่งวงจรภายใน Breakout Board จะประกอบด้วยวงจร LPF

และ Diagram ภายใน ไจโรสโคป เบอร์ IDG – 500 แสดงดังในรูปที่ 8.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.3 วงจรภายใน Breakout Board ของไจโรสโคป เบอร์ IDG-500

8.3 ภาคควบคุม

8.3.1 ส่วนประมวลผลกลาง

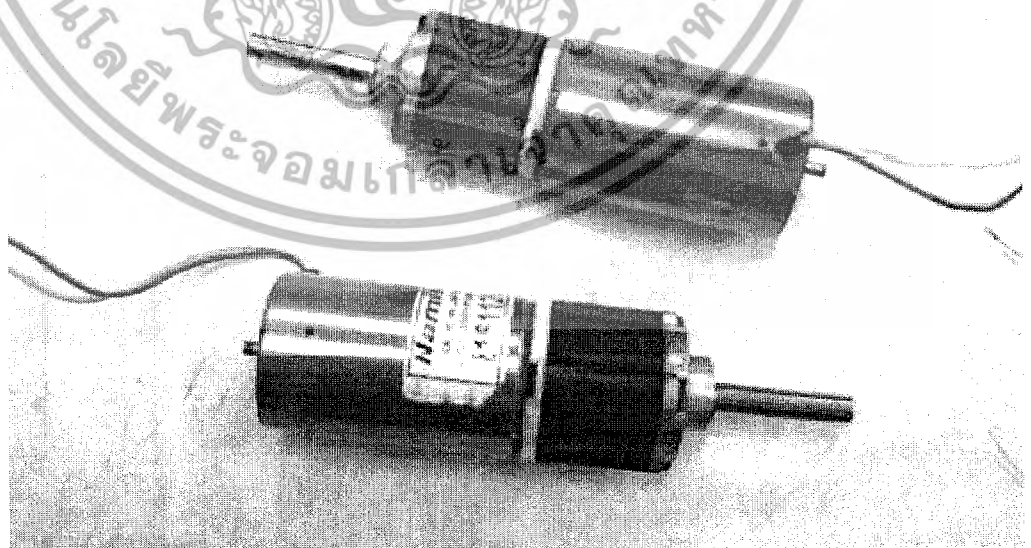
ในส่วนของภาคควบคุมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนประมวลผลใหญ่ที่ทำการควบคุมการทำงานของทั้งระบบ และส่วนประมวลผลย่อยที่ทำการประมวลผลในส่วนของมอเตอร์และเซนเซอร์ โดยส่วนประมวลผลใหญ่จะใช้โปรแกรม visual studio c++ ในการประมวลผล ที่อัตราการรับส่ง 115200 bit/s และจะทำการเชื่อมต่อกับส่วนประมวลผลย่อยโดยการต่อกับ Zigbee ที่มีการส่งแบบ serial port ซึ่งในส่วนของการประมวลผลย่อยได้ใช้ PIC18F258 ในการประมวลผลค่าในมอเตอร์และเซนเซอร์ แล้วส่งผลที่ประมวลได้ไปยัง Zigbee เพื่อเป็นการนำผลที่ได้เข้าสู่การประมวลผลใหญ่ที่ทำการควบคุมการทำงานของระบบ

8.3.2 คุณสมบัติของตัวควบคุม PID ที่ใช้งานจริง

จากตัวควบคุม PID ที่ได้จากการจำลองการทำงานในบทที่ 8 จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ได้แก่ ปรับค่าสเกลของมุมให้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ปรับค่าสเกลของอัตราเร็วเชิงมุมให้อยู่ในช่วงแรงดันที่วัดได้จริงจากเอาต์พุตของไจโรสโคป และปรับจูนค่าจากเอาต์พุตให้เหมาะสมกับระบบ โดยจากเดิมตัวควบคุมจะให้เอาต์พุตเป็นแรงที่กระทำกับตัวรถ ในการโปรแกรมจะเปลี่ยนให้เอาต์พุตเป็นความกว้างของพัลส์ของสัญญาณพัลส์ วิตมอดคูลเลชัน (Ton) ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์

8.4 ภาคเอาต์พุตขับเคลื่อนมอเตอร์

ในส่วนของภาคควบคุมจะสร้างสัญญาณเอาต์พุตออกมาเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยจะใช้หลักการควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณพัลส์ วิตมอดคูลเลชัน ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ นั้นจะให้การขับเคลื่อนด้วยไอซีไดรเวอร์เบอร์ L293 ขับกระแสได้สูงสุด 2 แอมแปร์ และสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์จะประกอบด้วยสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ สัญญาณลอจิกควบคุมทิศทาง มอเตอร์ที่ใช้คือมอเตอร์ไฟตรงขนาด 8 โวลต์ ยี่ห้อ Namiki โดยที่ตัวมอเตอร์จะมีกล่องเพื่อติดตั้งเพื่อช่วยเพิ่มทอร์กในการหมุน โดยจะมีกล่องเฟืองที่ใช้มีอัตราทด 80:1



รูปที่ 8.4 มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5 โครงสร้างของหุ่นยนต์

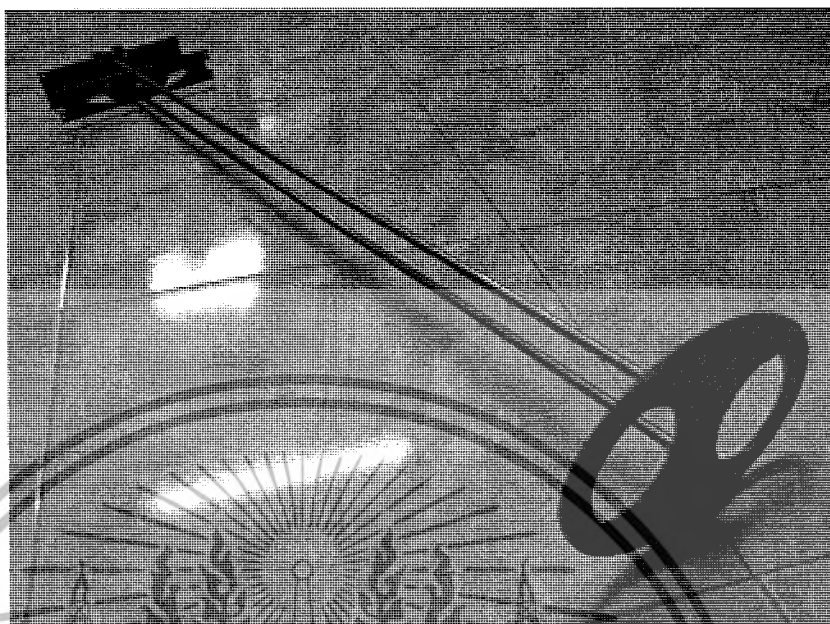
ตัวหุ่นยนต์สร้างจากแผ่นอะคริลิก จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ตัวถัง ล้อ เส้า และ ตั้มเพน
คู่มือ ดังรูป



รูปที่ 8.5 ตัวถังของหุ่นยนต์

รูปที่ 8.6 ล้อของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

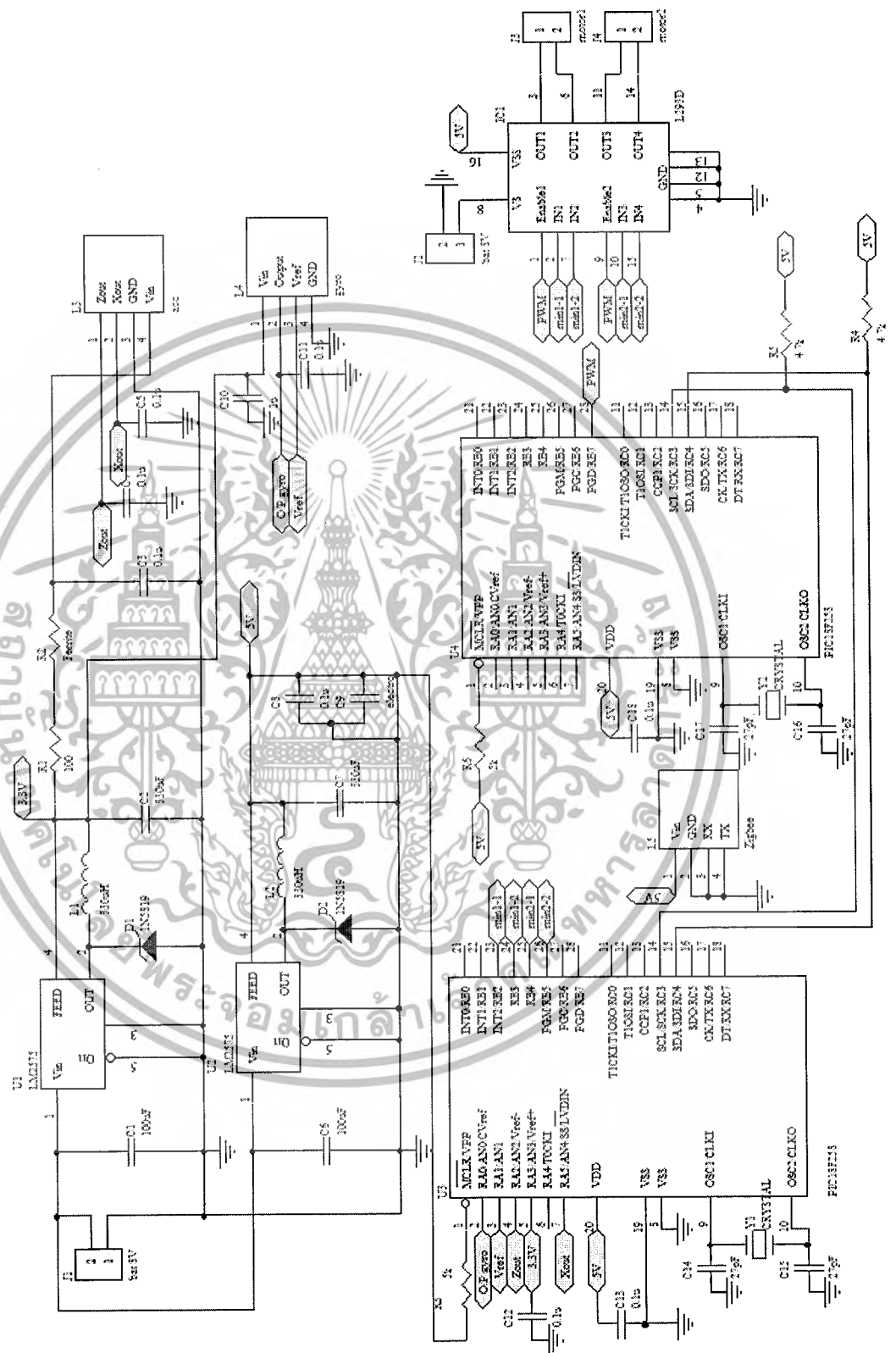


รูปที่ 8.7 เสาและคัมเพนคูล์ม



รูปที่ 8.8 รูปตัวรถที่ประกอบสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.9 วงจรด้านฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

การทดลองและผลการทดลอง

จากการทดลองนี้ได้ทำการชั่งน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์โดยการแยกชั่งแต่ละส่วนแล้วนำมา
รวมเป็นน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์รวมทั้งหมด ทำการทดลองวัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัด
ความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) และทำการวัดการ
ตอบสนองของมอเตอร์

9.1 น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์

ส่วนของหุ่นยนต์	ชั่งครั้งที่ 1	ชั่งครั้งที่ 2	ชั่งครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
ล้อ	138.564	138.584	138.582	138.577
ตัวถัง	228.196	228.185	228.192	228.191
เสา+ตุ้มเพนดูลัม	90.157	90.153	90.164	90.158
วงจรขับเคลื่อน	146.988	146.98	146.981	146.983
เอ็นโค้ดเดอร์	1.797	1.799	1.797	1.798
มอเตอร์	208.744	208.84	208.84	208.808

ตารางที่ 9.1 แสดงน้ำหนักของหุ่นยนต์

น้ำหนักรวมทั้งหมดของรถคือ 874.515 กรัม

น้ำหนักของส่วนแขนเพนดูลัม(ไม่นับจุดหมุนคือ มอเตอร์ เอ็นโค้ดเดอร์ และล้อ) คือ
525.332 กรัม

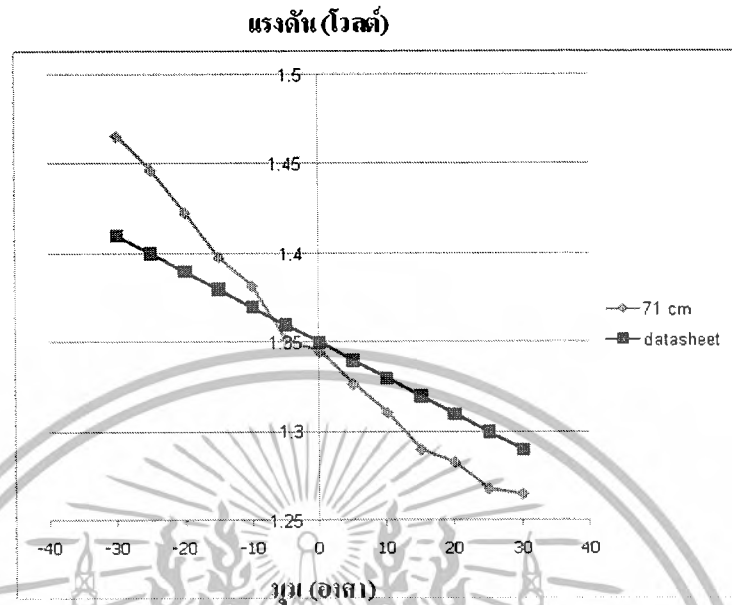
9.2 วัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดแรงดันเมื่อหุ่นยนต์เอียงทำมุมต่างๆกับพื้น แล้วหาผลต่างของแรงดันที่มุมเอียงนั้นๆ เทียบกับค่ากลาง ณ จุดที่หุ่นยนต์สมดุลน้ำหนัก จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์ได้ดังกราฟในรูปที่ 9.1

มุม(องศา)	ความสูงจากหุ่น 71 cm
	แรงดัน(v)
-30	1.466
-25	1.447
-20	1.423
-15	1.398
-10	1.382
-5	1.352
0	1.345
5	1.327
10	1.311
15	1.290
20	1.283
25	1.268
30	1.265

ตารางที่ 9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง

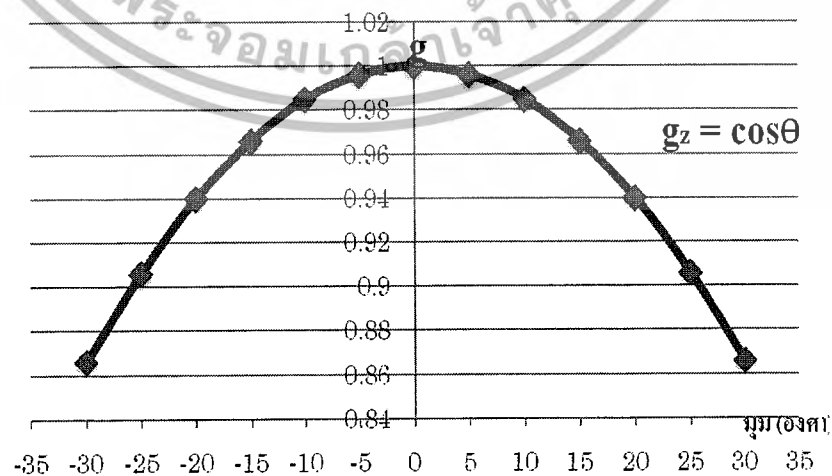


รูปที่ 9.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์ ได้กราฟ 2 เส้น ได้แก่ เส้น 71cm เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้น datasheet ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จาก datasheet

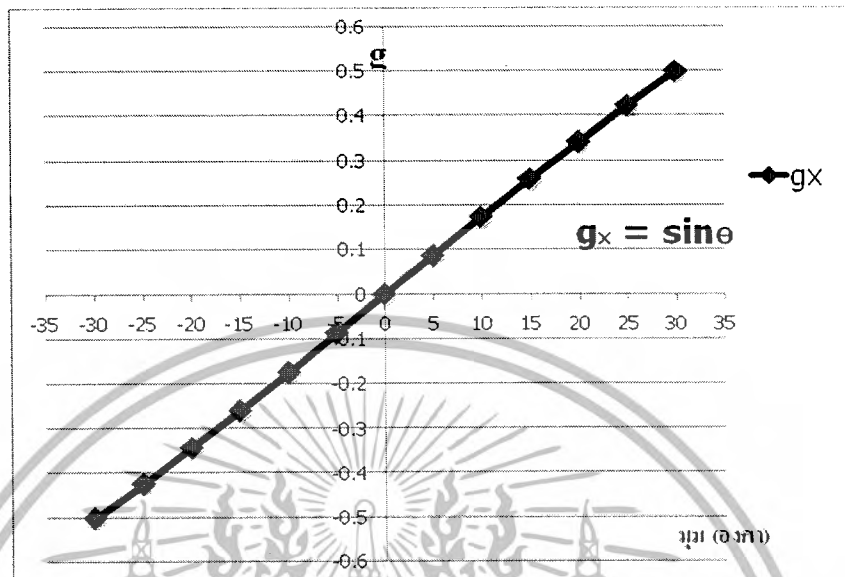
9.3 วัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer)

เป็นการวัดค่าการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความเร่ง



รูปที่ 9.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าความเร่งที่แกน Z

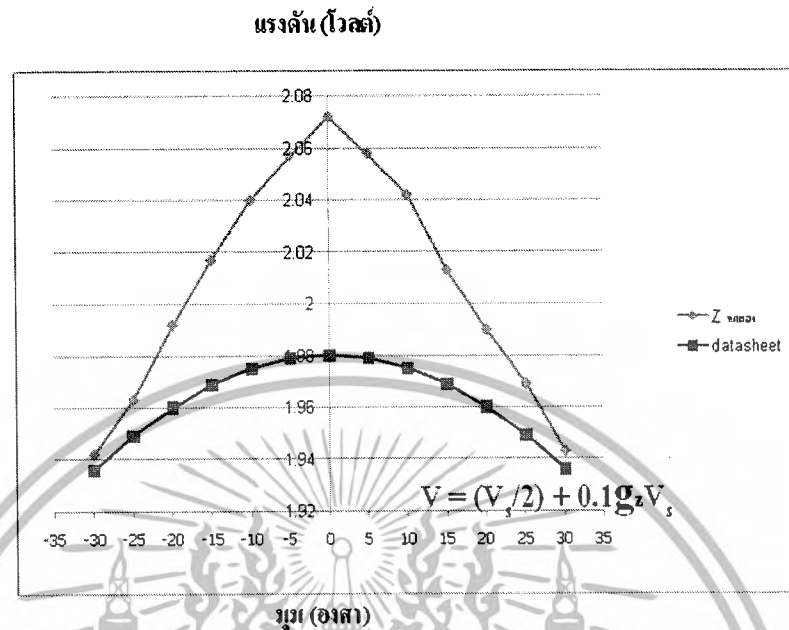
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าความเร่งที่แกน X
ทำการวัดแรงดันจากแกน Z ในค่ามุมต่างๆ จะได้ผลตามตารางที่ 9.3

มุม (องศา)	ระดับแรงดัน (โวลต์)
-30	1.942
-25	1.963
-20	1.992
-15	2.017
-10	2.040
-5	2.057
0	2.072
5	2.058
10	2.042
15	2.013
20	1.99
25	1.969
30	1.943

ตารางที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตจากแกน Z ของวงจรเซนเซอร์กับมุมเอียง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



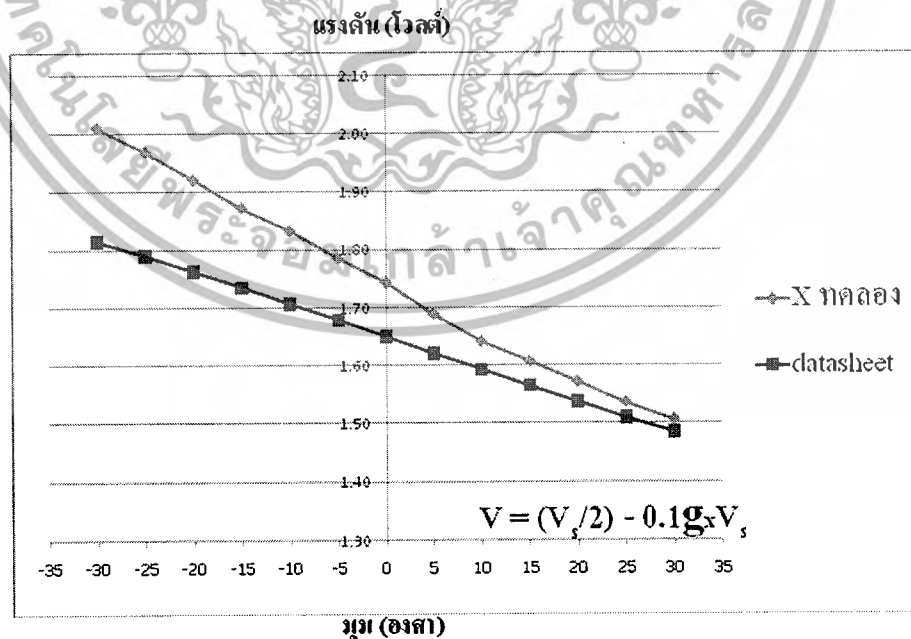
รูปที่ 9.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าแรงดันเอาต์พุตของแกน Z

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าแรงดันเอาต์พุตของแกน Z ได้กราฟ 2 เส้น ได้แก่ เส้น Z ทดลอง เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้น datasheet ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จาก datasheet

ทำการวัดแรงดันจากแกน X ในค่ามุมต่างๆ จะได้ผลตามตารางที่ 9.4

มุม	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
-30	2.023	1.996	2.010
-25	1.968	1.969	1.969
-20	1.920	1.921	1.921
-15	1.877	1.868	1.873
-10	1.838	1.827	1.833
-5	1.789	1.781	1.785
0	1.743	1.743	1.743
5	1.689	1.687	1.688
10	1.639	1.642	1.641
15	1.601	1.612	1.607
20	1.578	1.564	1.571
25	1.540	1.531	1.536
30	1.505	1.507	1.506

ตารางที่ 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตจากแกน X ของวงจรเซนเซอร์กับมุมเอียง



รูปที่ 9.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าแรงดันเอาต์พุตของแกน X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศากับค่าแรงดันเอาต์พุตของแกน X ได้กราฟ 2 เส้น ได้แก่ เส้น X ทดลอง เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และเส้น datasheet ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จาก datasheet

9.4 วิศวกรรมการตอบสนองของมอเตอร์

ในการทำงาน มอเตอร์จะมีการหมุนกลับทิศทางตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบความสามารถในการตอบสนองของมอเตอร์ในการกลับทิศทาง โดยป้อนสัญญาณพัลส์ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้กลับทิศตลอดเวลา แล้วหาความถี่สูงสุดที่มอเตอร์จะยังคงตอบสนองและหมุนกลับทิศไปมาได้ ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 9.5

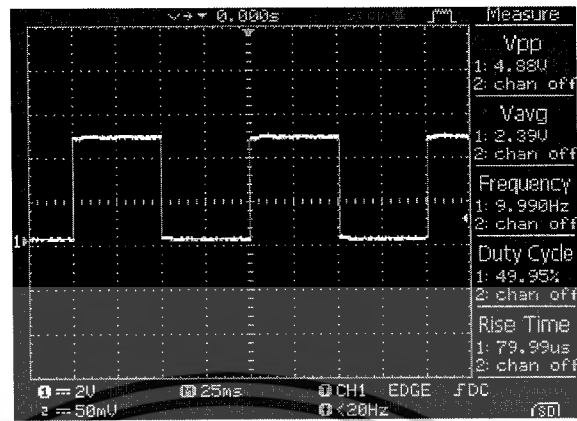
แรงดันไฟเลี้ยงมอเตอร์ (โวลต์)	ความถี่สูงสุดที่ตอบสนอง (เฮิรตซ์)
5	33.33
6	38.46
7	38.46
8	38.46
9	16.67
10	12.50
11	9.62
12	6.41

ตารางที่ 9.5 ผลการตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ในการกลับทิศทาง

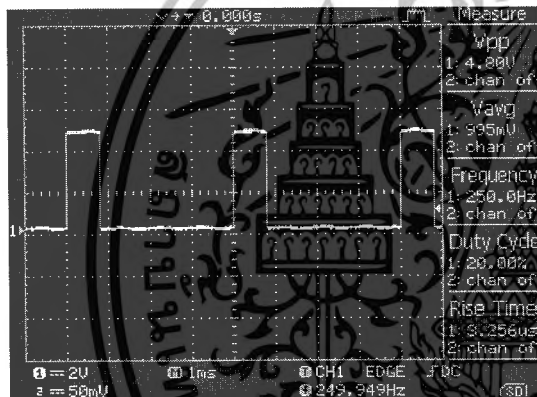
จากการทดลองจะเห็นว่าความถี่สูงสุดที่มอเตอร์ยังสามารถหมุนกลับทิศทางได้คือที่ความถี่ในช่วง 30 ถึง 40 เฮิรตซ์ แต่เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นมากกว่า 8 โวลต์ ความถี่สูงสุดที่ตอบสนองได้จะลดลง เนื่องจากที่มอเตอร์ดึงกระแสมากเกินไปที่แหล่งจ่ายจะจ่ายให้ได้ (ในที่นี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายกระแสได้สูงสุด 1.5 แอมแปร์) เมื่อแรงดันไฟเลี้ยงมากขึ้น มอเตอร์จะดึงกระแสมากยิ่งขึ้น และยิ่งความถี่ในการกลับทิศเพิ่มสูงขึ้น ก็จะต้องดึงกระแสมากยิ่งขึ้นด้วย

เมื่อต่ออุปกรณ์และวงจรเข้ากับหุ่นยนต์แล้วทำการวัดค่าความเร็วในการกลับตัวของมอเตอร์ ได้ผลตามรูปที่ 9.6 ซึ่งมอเตอร์สามารถกลับตัวโดยที่ไม่สั่น ที่ความถี่ 10 Hz

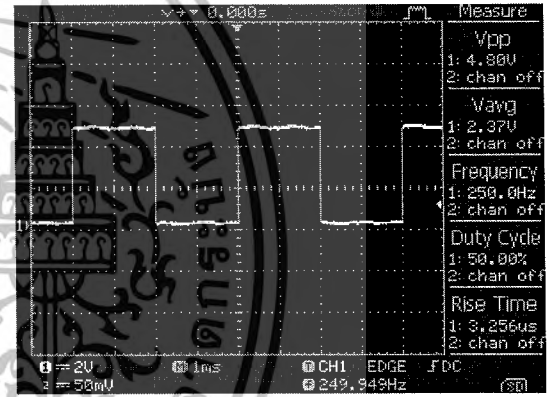
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



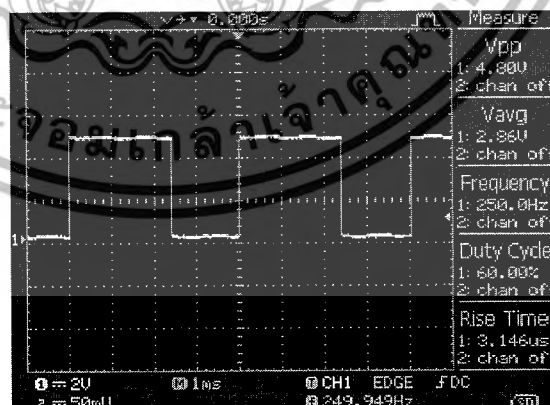
รูปที่ 9.6 กราฟแสดงความเร็วในการกลับขั้วมอเตอร์



a) 20% duty cycle



b) 50% duty cycle



c) 60% duty cycle

รูปที่ 9.7 กราฟแสดงการเปลี่ยน % duty cycle โดยที่ a) คือ 20% duty cycle b) คือ 50% duty cycle และ d) คือ 60% duty cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10

สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา

10.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุม PID จะได้ว่า การออกแบบตัวควบคุม PID ประเภทที่นำมาใช้งานนี้ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องสังเกตและศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบที่ต้องการควบคุมและนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมอีกที โดยตัวควบคุมยังไม่มีความสามารถที่จะเรียนรู้ระบบด้วยตัวเองได้ ทำให้ต้องคอยมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการควบคุมและตัวควบคุมที่ได้ก็ยังสามารถจำกัดกล่าวคือถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการทำงานหรือสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปนอกเหนือจากข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ ระบบจะไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ขอบเขตในการทำงานค่อนข้างแคบ

ในส่วนของชิ้นงานที่ได้จากการนำตัวควบคุมที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้นั้น จะมีความสามารถในการทรงตัวระดับหนึ่ง กล่าวคือ ที่สถานะเริ่มต้นแขนเพนดูลัมจะต้องอยู่ในตำแหน่งสมดุลหรือตั้งฉากกับพื้นโลก และขีดจำกัดของมุมที่แขนเพนดูลัมเอนไปแล้วระบบยังรักษาสมดุลได้นั้นยังอยู่ในช่วงมุมที่แคบ นอกจากนี้ ยังไม่สามารถควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นได้ และในขณะที่แขนเพนดูลัมอยู่ในสถานะสมดุล หุ่นยนต์จะยังคงมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งโดยไม่สามารถอยู่นิ่งกับที่ได้

จากการศึกษาการทำงานและการปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพบางประการของหุ่นยนต์แสดงให้เห็นถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ดังนี้

1. การตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ ในขณะที่หุ่นยนต์ทำงานจำเป็นต้องมีการวิ่งกลับทิศทางไปมาตลอดเวลา ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการที่มอเตอร์ประกอบขึ้นจากขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหน่วงกระแสและไม่สามารถกลับทิศทางที่ทันใดได้ ความถี่สูงสุดในการกลับทิศของมอเตอร์จึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมมาก จากการทดลองจะได้ว่ามอเตอร์มีความสามารถในการกลับทิศทางด้วยความถี่ที่ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานไม่ดีเท่าที่ควร

2. ความสามารถในการจ่ายกระแสของแหล่งจ่ายไฟของมอเตอร์ ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงกระแสของมอเตอร์ก็คือแรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายและความถี่ในการกลับทิศของมอเตอร์ ยิ่งแรงดันและความถี่ในการกลับทิศสูงก็จะยิ่งดึงกระแสมากขึ้น เมื่อแหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสในการขับมอเตอร์

ได้ตามที่ต้องการ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแย่ลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2 แนวทางในการพัฒนาและปรับปรุง

ควรมีการปรับปรุงตัวรถให้มีขนาดใหญ่และสูงมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมการทรงตัวได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขนาดของล้อให้ใหญ่ขึ้นก็จะช่วยให้ควบคุมการทรงตัวได้ดีขึ้นด้วย เนื่องจากเป็นการลดภาระของมอเตอร์เพราะตัวรถจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าเมื่อมีการหมุนของมอเตอร์ด้วยจำนวนรอบที่เท่ากัน ซึ่งจะช่วยให้ปริมาณกระแสที่ต้องใช้ในการขับมอเตอร์น้อยลงและการหน่วงการทำงานของมอเตอร์ก็จะน้อยลงด้วย

ในส่วนของภาคเซนเซอร์ก็มีข้อจำกัดคือ การใช้เซนเซอร์วัดระยะทางนี้จะต้องให้หุ่นยนต์ทำงานบนพื้นที่เรียบเท่านั้น ถ้าเกิดมีสิ่งกีดขวางหรือวิ่งบนทางไม่เรียบก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานได้

ในส่วนของมอเตอร์นั้น ควรเลือกใช้มอเตอร์ที่มีความสามารถในการตอบสนองความถี่ที่ดีกว่านี้ และควรคำนึงถึงทอร์กของมอเตอร์ด้วย เพราะยิ่งหุ่นยนต์มีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักมากยิ่งขึ้น มอเตอร์ที่ใช้งานก็ควรจะมีทอร์กที่มากขึ้นด้วย

10.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของตัวควบคุม PID และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เข้าใจถึงข้อดีข้อเสียและขอบเขตการทำงานของตัวควบคุม นอกจากนี้ยังทำให้ได้ตระหนักถึงความสำคัญในการพิจารณาถึงรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ ที่จำเป็นต้องให้ความสนใจในการออกแบบระบบควบคุม อาทิเช่น ลักษณะทางกายภาพต่างๆ ของหุ่นยนต์อื่นจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของตัวรถ มอเตอร์และแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้สามารถออกแบบระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี

บรรณานุกรม

1. Dogan Ibrahim. "Advanced PIC Microcontroller Project in C". : Elsevier, 2008.
2. พงษ์ศักดิ์ ตันเซ่ง. "ชุดปฏิบัติการการควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี". ปริญญานิพนธ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
3. รัชภูมิ กิณญ. "ชุดทดลองควบคุม พี.ไอ.ดี.". ปริญญานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรม
เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
2541.
4. จุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน. "การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วน
คุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน". วิทยานิพนธ์สาขาวิชา
วิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
5. <http://www.thaieasyelec.com/>
6. www.alldatasheet.com
7. http://student.nu.ac.th/45273380_mod/sicknel.htm
8. http://ptkrobot.blogspot.com/2009/06/blog-post_23.html (smart mechanics)

บรรณานุกรม

1. Dogan Ibrahim. “Advanced PIC Microcontroller Project in C”. : Elsevier, 2008.
2. พงษ์ศักดิ์ ตันเซ่ง. “ชุดปฏิบัติการการควบคุมกระบวนการแบบพีไอดี”. ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
3. รัชภูมิ กิบุญ. “ชุดทดลองควบคุม พี.ไอ.ดี.”. ปริญญานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
4. จุฑารัตน์ ชาวไร่เงิน. “การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังแบบมีผลต่อกัน”. วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
5. <http://www.thaieasyelec.com/>
6. www.alldatasheet.com
7. http://student.nu.ac.th/45273380_mod/sicknel.htm
8. http://ptkrobot.blogspot.com/2009/06/blog-post_23.html (smart machanics)

FEATURES

- Integrated X- and Y-axis gyros on a single chip
- Two separate outputs per axis for standard and high sensitivity:

X-/Y-Out Pins: 500°/s full scale range
2.0mV/°/s sensitivity

X/Y4.5Out Pins: 110°/s full scale range
9.1mV/°/s sensitivity

- Integrated amplifiers and low-pass filters
- Auto-Zero function
- On-chip temperature sensor
- High vibration rejection over a wide frequency range
- High cross-axis isolation by proprietary MEMS design
- 3V single-supply operation
- Hermetically sealed for temp and humidity resistance
- 10,000 g shock tolerant
- Smallest dual axis gyro package at 4 x 5 x 1.2mm
- RoHS and Green Compliant

APPLICATIONS

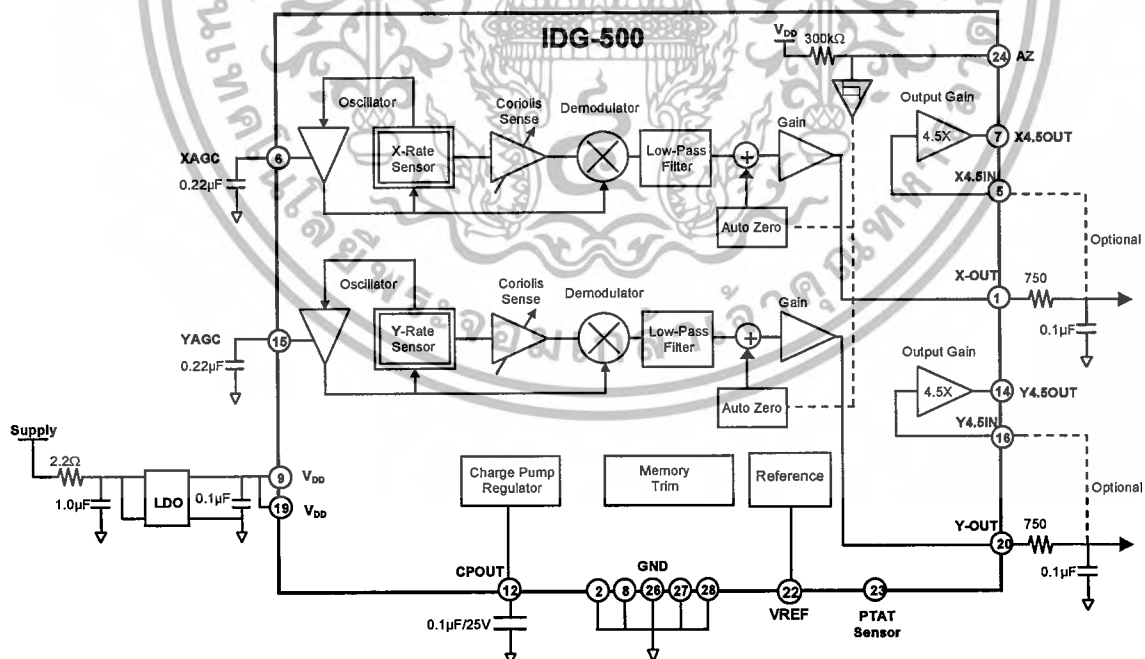
- General Motion Sensing
- Vehicle Motion Analysis
- Platform Stabilization
- Inertial Measurement Units

GENERAL DESCRIPTION

The IDG-500 is an integrated dual-axis angular rate sensor (gyroscope). It uses InvenSense's proprietary and patented MEMS technology with vertically driven, vibrating masses to make a functionally complete, low-cost, dual-axis angular rate sensor. All required electronics are integrated onto a single chip with the sensor.

The IDG-500 gyro uses two sensor elements with novel vibrating dual-mass bulk silicon configurations that sense the rate of rotation about the X- and Y-axis (in-plane sensing). This results in a unique, integrated dual-axis gyro with guaranteed-by-design vibration rejection and high cross-axis isolation. It is specifically designed for demanding consumer applications requiring low cost, small size and high performance.

The IDG-500 gyro includes the integrated electronics necessary for application-ready functionality. It incorporates X- and Y-axis low-pass filters and an EEPROM for on-chip factory calibration of the sensor. Factory trimmed scale factors eliminate the need for external active components and end-user calibration. This product is lead-free and Green Compliant.



SPECIFICATIONS

All parameters specified are @ VDD = 3.0 V and Ta = 25°C. External LPF @ 2kHz. All specifications apply to both axes.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
SENSITIVITY					
Full-Scale Range	At X-OUT and Y-OUT At X4.5Out and Y4.5Out		±500 ±110		°/s °/s
Sensitivity	At X-OUT and Y-OUT At X4.5Out and Y4.5Out		2.0 9.1		mV/°/s mV/°/s
Initial Calibration Tolerance	At X-OUT and Y-OUT		±6		%
Over Specified Temperature	At X-OUT and Y-OUT		±10		%
Nonlinearity	At X-OUT and Y-OUT, Best Fit Straight Line		<1		% of FS
Cross-axis Sensitivity			±1		%
REFERENCE					
Voltage (VREF)			1.35		V
Tolerance			±50		mV
Load Drive			100		μA
Capacitive Load Drive	Load directly connected to VREF		100		pF
Power Supply Rejection	VDD= 2.7V to 3.3V		1		mV/V
Over Specified Temperature			±5		mV
ZERO-RATE OUTPUT					
Static Output (Bias)	Factory Set		1.35		V
Initial Calibration Tolerance	Relative to VREF	With Auto Zero	±20		mV
		Without Auto Zero	±250		
Over Specified Temperature	Relative to VREF	Without Auto Zero	±50		mV
Power Supply Sensitivity	@ 50 Hz		10		°/sec/V
FREQUENCY RESPONSE					
High Frequency Cutoff	Internal LPF -90°		140		Hz
LPF Phase Delay	10Hz		-4.5		°
MECHANICAL FREQUENCIES					
X-Axis Resonant Frequency		20	24	28	kHz
Y-Axis Resonant Frequency		23	27	31	kHz
Frequency Separation	X and Y Gyroscopes		3		kHz
NOISE PERFORMANCE					
Total RMS Noise	Bandwidth 1Hz to 1kHz, At X-OUT and Y-OUT		0.8		mV rms
OUTPUT DRIVE CAPABILITY					
Output Voltage Swing	Load = 100kΩ to V _{dd} /2	0.05		V _{dd} -0.05	V
Capacitive Load Drive			100		pF
Output Impedance			100		Ω
POWER ON-TIME					
Zero-rate Output	Settling to ±3°/s		50	200	ms
AUTO ZERO CONTROL					
Auto Zero Logic High	Rising Input		1.9		V
Auto Zero Logic Low	Falling Input		0.9		V
Auto Zero Pulse Duration		2		1500	μsec
Offset Settle Time After Auto Zero			7		msec



IDG-500

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
POWER SUPPLY (VDD) Operating Voltage Range Quiescent Supply Current Over Specified Temperature		2.7	3.0 7 ±2	3.3	V mA mA
TEMPERATURE SENSOR Sensitivity Offset Output Impedance	Range -20 to +85°C		4 1.25 12		mV/°C V kΩ
TEMPERATURE RANGE Specified Temperature Range		-20		+85	°C

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

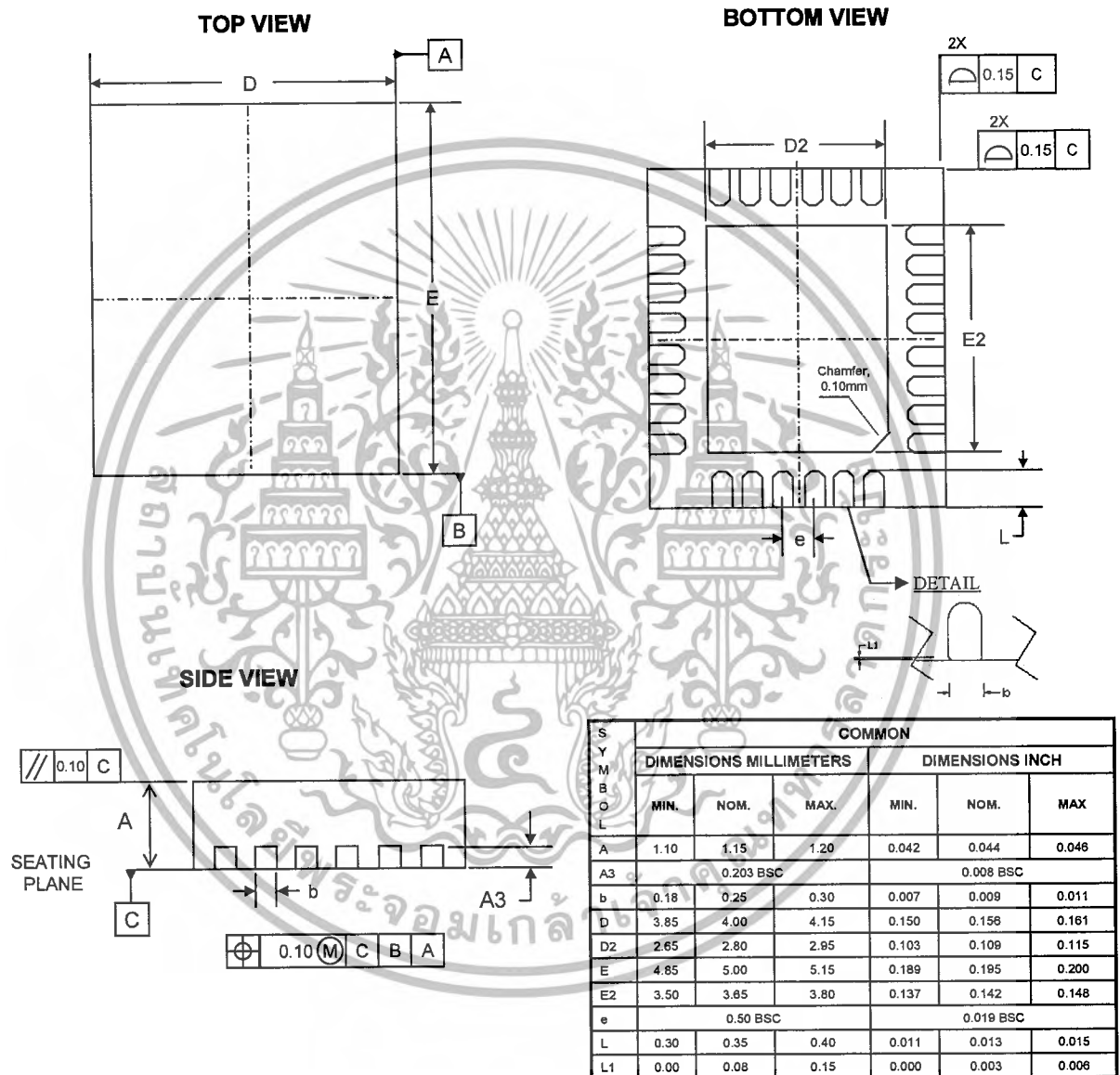
Parameter	Min	Typical	Max	Unit
Power Supply Voltage (VDD)	2.7	3.0	3.3	V
Power Supply Voltage (VDD) Rise Time (10% - 90%)			20	ms

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Stress 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 absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

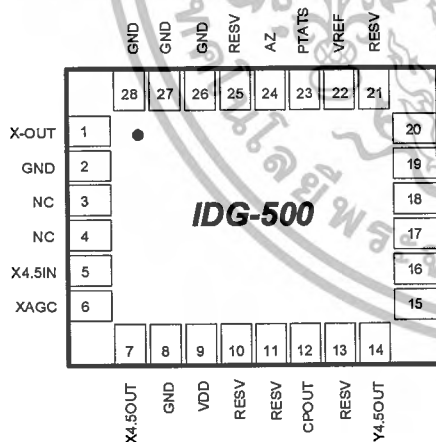
Parameter	Rating
Power Supply Voltage (VDD)	-0.3V to +6.0V
Acceleration (Any Axis, unpowered)	10,000g for 0.3ms
Operating Temperature Range	-40 to +105°C
Storage Temperature Range	-40 to +125°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS (all dimensions in mm)


PIN DESCRIPTION

Number	Pin	Description
2, 8, 26, 27, 28	GND	Ground
9, 19	VDD	Positive supply voltage
1	X-OUT	Rate output for rotation about the X-axis
5	X4.5IN	X-axis input to the 4.5X amplifier
6	XAGC	Amplitude control capacitor connection
7	X4.5OUT	X-axis output of the 4.5X amplifier
12	CPOUT	Charge pump capacitor connection
14	Y4.5OUT	Y-axis output of the 4.5X amplifier
15	YAGC	Amplitude control capacitor connection
16	Y4.5IN	Y-axis input to the 4.5X amplifier
20	Y-OUT	Rate output for rotation about the Y-axis
22	VREF	Precision reference output
23	PTATS	Temperature Sensor Output
24	AZ	X & Y Auto Zero control pin
10, 11, 13, 21, 25	RESV	Reserved. Do not connect.
3, 4, 17, 18	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.

PIN CONNECTION (TOP VIEW)

RATE SENSITIVE AXIS

This is a dual-axis rate sensing device. It produces a positive output voltage for rotation about the X- or Y-axis, as shown in the figure below.



**28-pin, 4mm x 5mm x 1.2mm
QFN Package**

DESIGN NOTES

1. Overview

The IDG-500 gyro is a dual-axis gyroscope consisting of two independent vibratory MEMS gyroscopes. One detects rotation about the X-axis; the other detects rotation about the Y-axis. Each structure is fabricated using InvenSense's proprietary bulk silicon technology. The structures are covered and hermetically sealed at the wafer-level. The cover shields the gyro from EMI.

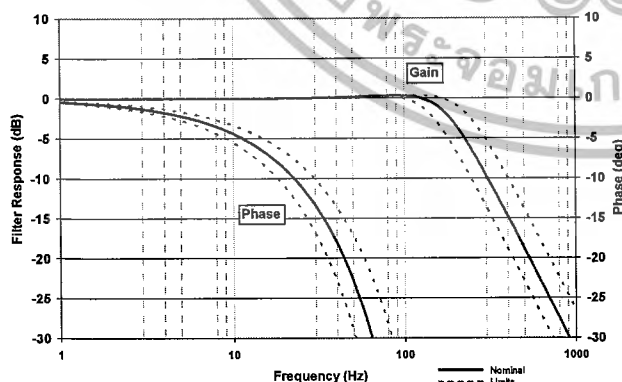
The gyroscope's proof-masses are electrostatically oscillated at resonance. An internal automatic gain control circuit precisely sets the oscillation of the proof masses. When the sensor is rotated about the X- or Y-axis, the Coriolis effect causes a vibration that can be detected by a capacitive pickoff. The resulting signal is amplified, demodulated, and filtered to produce an analog voltage that is proportional to the angular rate.

2. Amplitude Control

The scale factor of the gyroscope depends on the amplitude of the mechanical motion and the trim setting of the internal programmable gain stages. The oscillation circuit precisely controls the amplitude to maintain constant sensitivity over the temperature range. The capacitors (0.22 μ F, $\pm 10\%$) connected to Pin 6 (XAGC) and Pin 15 (YAGC) are compensation capacitors for the amplitude control loops.

3. Internal Low-Pass Filter

After the demodulation stage, there is a low-pass filter that limits noise and high frequency artifacts from the demodulator before final amplification. The typical filter characteristics are shown below.



4. External Low-Pass Filter

To further attenuate high-frequency noise, an optional external low-pass filter may be used.

5. Gyro Outputs

The IDG-500 gyro has two X-outputs and two Y-outputs, with scale factors and full-scale sensitivities as summarized below.

Axis	Gyro Output	Sensitivity (mV/ $^{\circ}$ /s)	Full-Scale Range ($\pm^{\circ}$ /s)
X	X-OUT	2	500
	X4.5OUT	9.1	110
Y	Y-OUT	2	500
	Y4.5OUT	9.1	100

Having two sensitivities and two full-scale ranges per output allows the end user to have one output that can be used for faster motions (over a full scale range of $\pm 500^{\circ}$ /sec), and second output that can be used for slower motions (over a full scale range of $\pm 110^{\circ}$ /sec). Thus a lower-resolution analog-to-digital converter (ADC) may be used to digitize the motion, with the gain of 4.5 in the _4.5OUT output effectively giving the user additional two-plus bits of resolution.

The IDG-500 gyro outputs are independent of supply voltage (i.e. they are not ratiometric).

Gyro rotation rate is calculated as:

$$(\text{Gyro Output Voltage} - \text{Gyro Zero-Rate Out}) / \text{Sensitivity}$$

where the Zero-Rate Output (ZRO) is nominally VREF. There is a temperature dependence to ZRO, and an initial accuracy to ZRO.

6. Auto Zero

Auto Zero (AZ) is a function that is used to maximize the gyro's dynamic range when using the _4.5OUT outputs.

AZ works by keeping the gyro's Zero-Rate Output (ZRO) close to VREF, and thus allows the user to achieve a wider usable signal range, without using external analog high pass filters.

When activated, the Auto Zero circuit internally nulls the ZRO to VREF. The typical usage of Auto Zero is in conditions where:

1. The gyro's motion is known, such as when:
 - a. The gyro is stationary

- b. Other sensors can report angular rotation rate
2. The DC value of the gyro output is not important, but only the AC value is. In this case, a digital ac filter may be used to extract the gyro data, which provides a higher-quality output than is possible with an analog R-C filter.

The Auto Zero function is initiated on the rising edge of the AZ pin. The Auto Zero settling time is typically 7ms. This time includes the time required for nulling the ZRO and for the settling of the internal low pass filter (LPF). If the external LPF bandwidth is less than 200Hz, the Auto Zero settling time will be longer than specified.

The AZ pulse width should meet the specified minimum time requirement of 2 μ s to start the Auto Zero function, and should be shorter than the maximum specified time of 1500 μ s. The Auto Zero pulse should occur after the start-up period to cancel any initial calibration error.

7. Temperature Sensor

A built-in Proportional-To-Absolute-Temperature (PTAT) sensor provides temperature information on Pin 23 (PTATS). The temperature sensor output signal is analog, and has a bias of approximately 1.25V at room temperature, and increases at a rate of 4mV/ $^{\circ}$ C. The output impedance is nominally 12k Ω and is therefore not designed to drive low impedance loads. If necessary, the output can be externally buffered with a low offset-drift buffer, and optionally a low-pass filter to minimize noise.

8. High Impedance Nodes

XAGC (pin 6) and YAGC (pin 15) pins are high impedance (>1Mohm) nodes. Any coating, glue or epoxy on these pins or on the capacitors connected to these pins, will affect part performance and should be avoided.

9. Proper Interface Cleaning

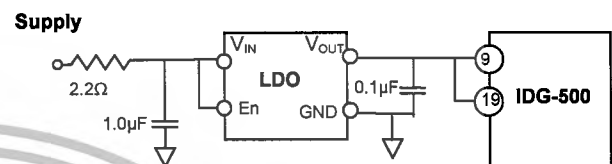
Proper cleaning of PCB solder pads prior to assembly is recommended. PCB surface contaminants at XAGC (pin 6) or YAGC (pin 15) device interfaces may affect part performance.

10. Power Supply Filtering

NOTE: Power supply Voltage (VDD) rise time (10% - 90%) must be less than 20 ms, at VDD (pins 9 and 19), for proper device operation.

The IDG-500 gyro should be isolated from system power supply noise by a combination of an RC filter that attenuates high frequency noise and a Low Drop Out

Power supply regulator (LDO) that attenuates low frequency noise. The figure below shows a typical configuration.



The low-pass RC filter should be chosen such that it provides significant attenuation of system noise at high frequencies. The LDO should be a low noise regulator (<100 μ V/rHz) that exhibits good noise rejection at low frequencies.



Integrated Dual-Axis Gyro

IDG-500



This information furnished by InvenSense is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by InvenSense for its use, or for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications are subject to change without notice. InvenSense reserves the right to make changes to this product, including its circuits and software, in order to improve its design and/or performance, without prior notice. InvenSense makes no warranties, neither expressed nor implied, regarding the information and specifications contained in this document. InvenSense assumes no responsibility for any claims or damages arising from information contained in this document, or from the use of products and services detailed therein. This includes, but is not limited to, claims or damages based on the infringement of patents, copyrights, mask work and/or other intellectual property rights.

Certain intellectual property owned by InvenSense and described in this document is patent protected. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of InvenSense. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. Trademarks that are registered trademarks are the property of their respective companies. InvenSense sensors should not be used or sold in the development, storage, production or utilization of any conventional or mass-destructive weapons or any other weapons or life threatening applications, as well as in any other life critical applications such as medical equipment, transportation, aerospace and nuclear instruments, undersea equipment, power plant equipment, disaster prevention and crime prevention equipment.

©2008 InvenSense, Inc. All rights reserved.





Small, Low Power, 3-Axis ± 3 g Accelerometer

ADXL335

FEATURES

3-axis sensing

Small, low profile package

4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.45 mm LFCSP

Low power : 350 μ A (typical)

Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V

10,000 g shock survival

Excellent temperature stability

BW adjustment with a single capacitor per axis

RoHS/WEEE lead-free compliant

APPLICATIONS

Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing

applications

Mobile devices

Gaming systems

Disk drive protection

Image stabilization

Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of ± 3 g. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_x , C_y , and C_z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_LQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

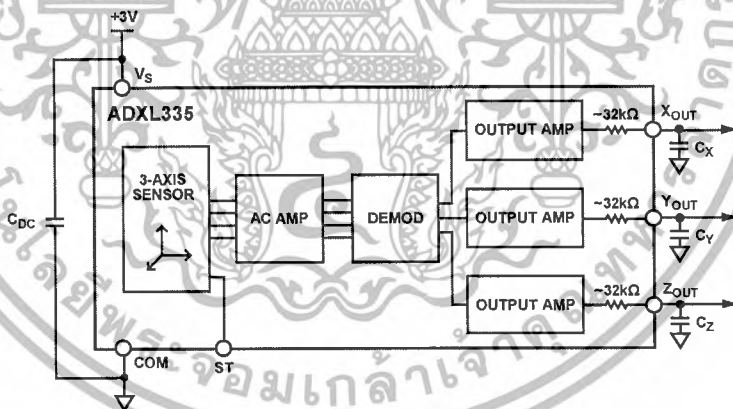


Figure 1.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700
Fax: 781.461.3113
www.analog.com

©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Performance	10
Applications	1	Applications Information	11
General Description	1	Power Supply Decoupling	11
Functional Block Diagram	1	Setting the Bandwidth Using C_x , C_y , and C_z	11
Revision History	2	Self Test	11
Specifications	3	Design Trade-Offs for Selecting Filter Characteristics:	
Absolute Maximum Ratings	4	The Noise/BW Trade-Off	11
ESD Caution	4	Use with Operating Voltages Other than 3 V	11
Pin Configuration and Function Descriptions	5	Axes of Acceleration Sensitivity	12
Typical Performance Characteristics	6	Layout and Design Recommendations	13
Theory of Operation	10	Outline Dimensions	14
Mechanical Sensor	10	Ordering Guide	14

REVISION HISTORY

1/09—Revision 0: Initial Version



SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3\text{ V}$, $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\text{ }\mu\text{F}$, acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Measurement Range		± 3	± 3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		± 0.3		%
Package Alignment Error			± 1		Degrees
Interaxis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			± 1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC)²	Each axis				
Sensitivity at X_{out} , Y_{out} , Z_{out}	$V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature ³	$V_S = 3\text{ V}$		± 0.01		%/ $^\circ\text{C}$
ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 g Voltage at X_{out} , Y_{out}	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at Z_{out}	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			± 1		mg/ $^\circ\text{C}$
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X_{out} , Y_{out}			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density Z_{out}			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
FREQUENCY RESPONSE⁴					
Bandwidth X_{out} , Y_{out} ⁵	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z_{out} ⁵	No external filter		550		Hz
R_{FLT} Tolerance			$32 \pm 15\%$		k Ω
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF-TEST⁶					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		μA
Output Change at X_{out}	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at Y_{out}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at Z_{out}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		μA
Turn-On Time ⁷	No external filter		1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	$^\circ\text{C}$

¹ Defined as coupling between any two axes.

² Sensitivity is essentially ratiometric to V_S .

³ Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

⁴ Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_X , C_Y , C_Z).

⁵ Bandwidth with external capacitors = $1/(2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C)$. For C_X , $C_Y = 0.003\text{ }\mu\text{F}$, bandwidth = 1.6 kHz. For $C_Z = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, bandwidth = 500 Hz. For C_X , C_Y , $C_Z = 10\text{ }\mu\text{F}$, bandwidth = 0.5 Hz.

⁶ Self-test response changes cubically with V_S .

⁷ Turn-on time is the delay time between C_X , C_Y , C_Z and is approximately $160 \times C_X$ or C_Y or $C_Z + 1\text{ ms}$, where C_X , C_Y , C_Z are in microfarads (μF).

ADXL335

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration (Any Axis, Unpowered)	10,000 g
Acceleration (Any Axis, Powered)	10,000 g
V_s	-0.3 V to +3.6 V
All Other Pins	(COM - 0.3 V) to (V_s + 0.3 V)
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Common)	Indefinite
Temperature Range (Powered)	-55°C to +125°C
Temperature Range (Storage)	-65°C to +150°C

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

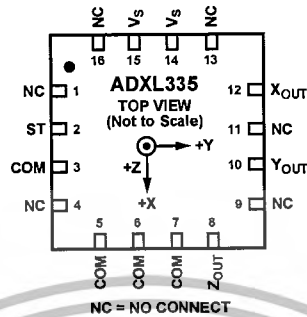
ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.



PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



NOTES
1. EXPOSED PAD IS NOT INTERNALLY CONNECTED BUT SHOULD BE SOLDERED FOR MECHANICAL INTEGRITY.

Figure 2. Pin Configuration

Table 3. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	No Connect ¹ .
2	ST	Self-Test.
3	COM	Common.
4	NC	No Connect ¹ .
5	COM	Common.
6	COM	Common.
7	COM	Common.
8	Z _{OUT}	Z Channel Output.
9	NC	No Connect ¹ .
10	Y _{OUT}	Y Channel Output.
11	NC	No Connect ¹ .
12	X _{OUT}	X Channel Output.
13	NC	No Connect ¹ .
14	V _S	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
15	V _S	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
16	NC	No Connect ¹ .
EP	Exposed Pad	Not internally connected. Solder for mechanical integrity.

¹NC pins are not internally connected and can be tied to COM pins, unless otherwise noted.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

N > 1000 for all typical performance plots, unless otherwise noted.

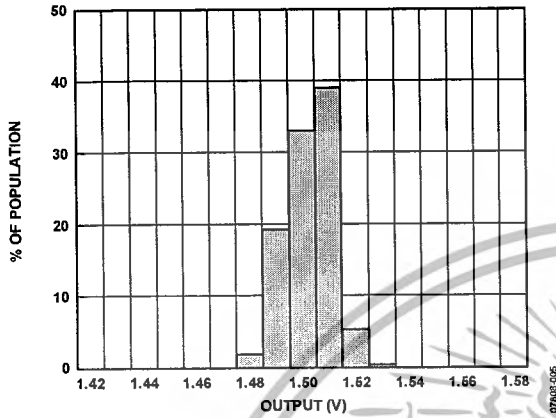


Figure 3. X-Axis Zero g Bias at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

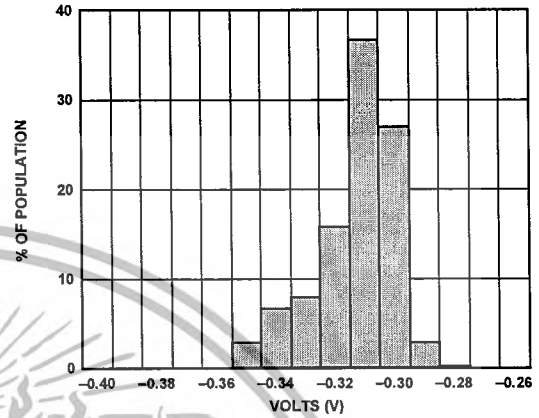


Figure 6. X-Axis Self-Test Response at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

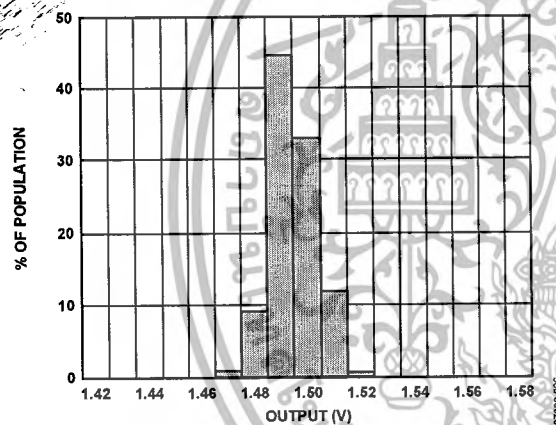


Figure 4. Y-Axis Zero g Bias at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

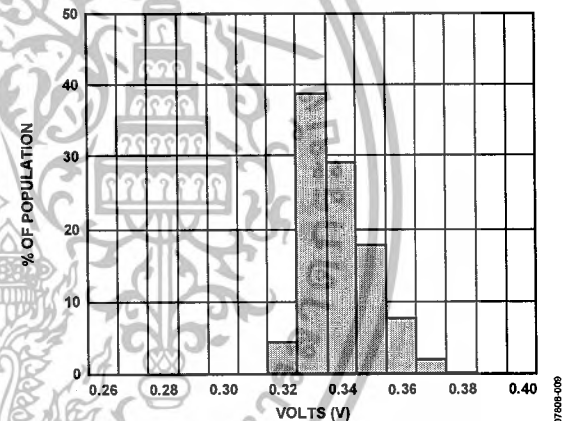


Figure 7. Y-Axis Self-Test Response at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

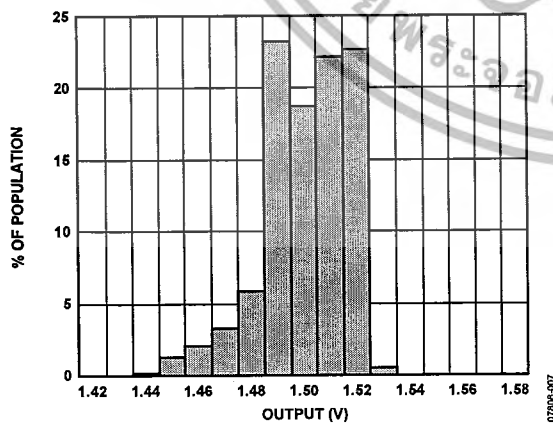


Figure 5. Z-Axis Zero g Bias at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

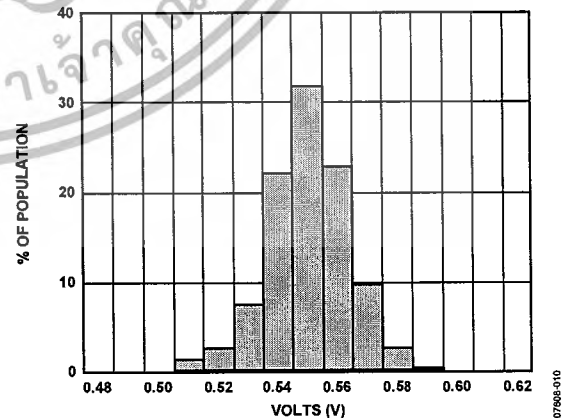
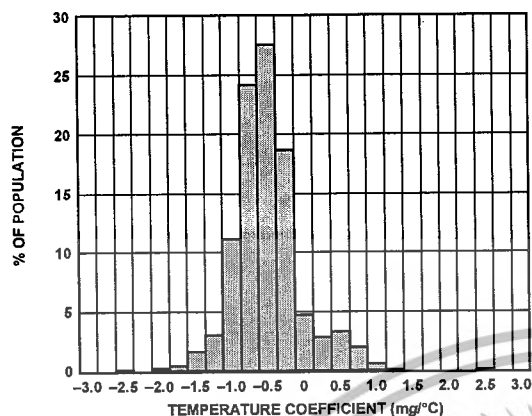
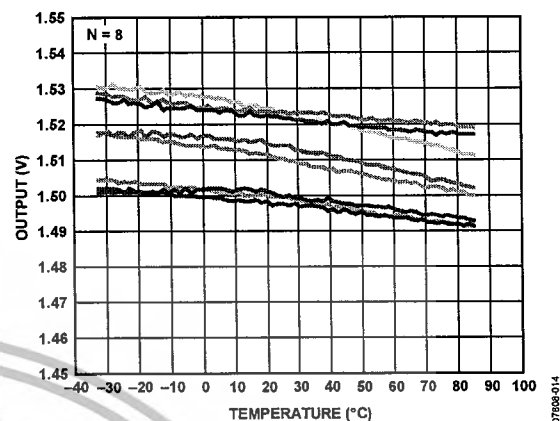
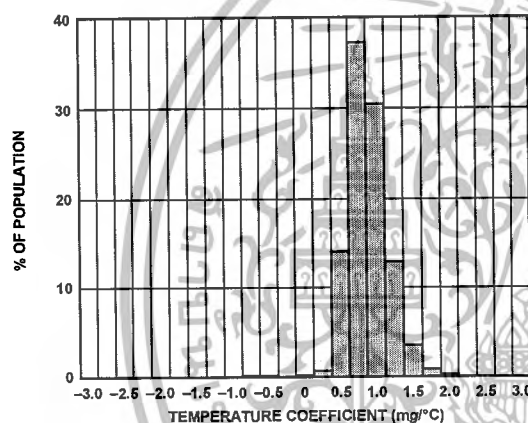
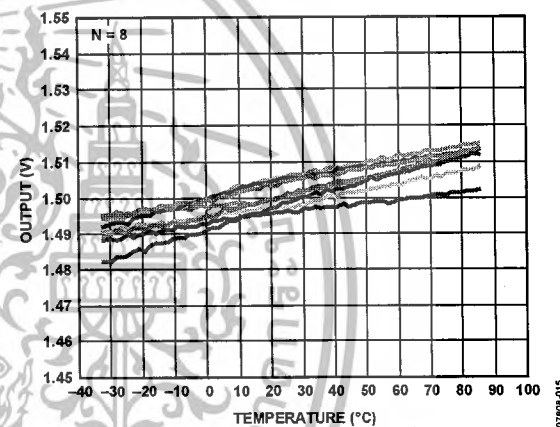
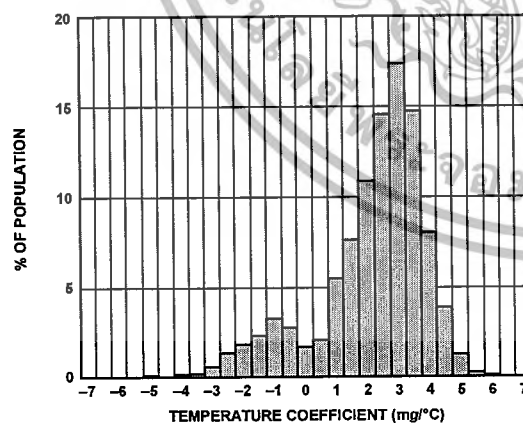
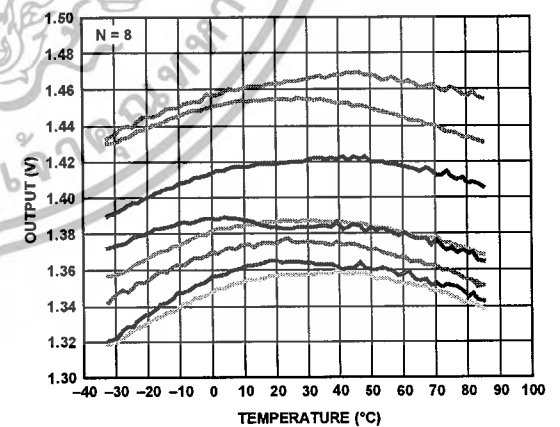


Figure 8. Z-Axis Self-Test Response at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

Figure 9. X-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient, $V_s = 3\text{ V}$ Figure 12. X-Axis Zero g Bias vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCBFigure 10. Y-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient, $V_s = 3\text{ V}$ Figure 13. Y-Axis Zero g Bias vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCBFigure 11. Z-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient, $V_s = 3\text{ V}$ Figure 14. Z-Axis Zero g Bias vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB

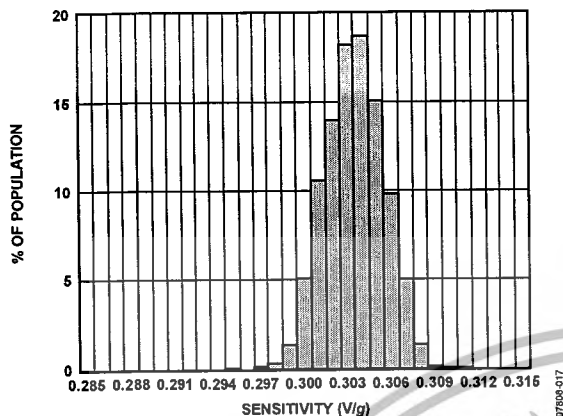


Figure 15. X-Axis Sensitivity at 25°C, $V_s = 3\text{ V}$

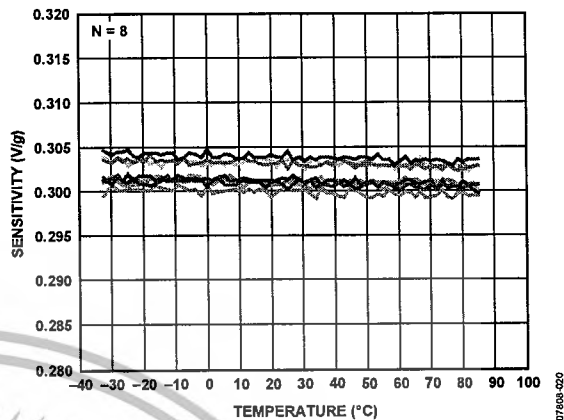


Figure 18. X-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_s = 3\text{ V}$

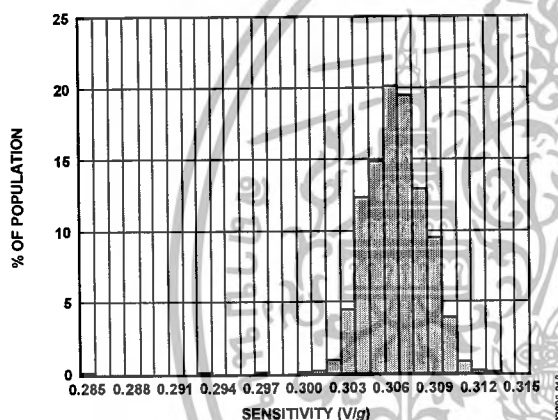


Figure 16. Y-Axis Sensitivity at 25°C, $V_s = 3\text{ V}$

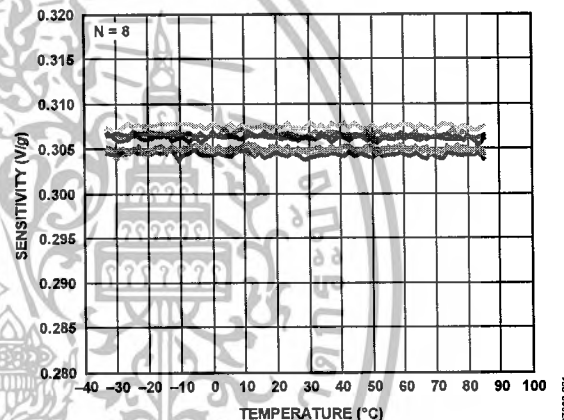


Figure 19. Y-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_s = 3\text{ V}$

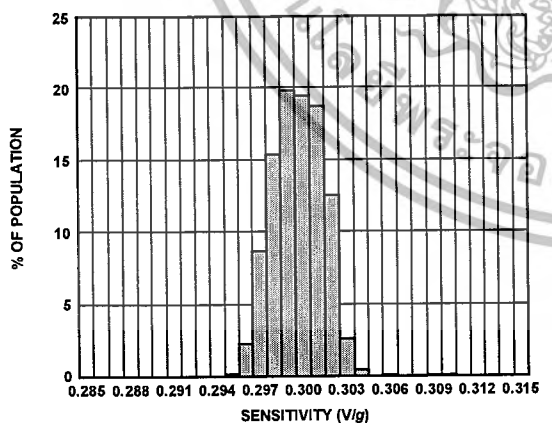


Figure 17. Z-Axis Sensitivity at 25°C, $V_s = 3\text{ V}$

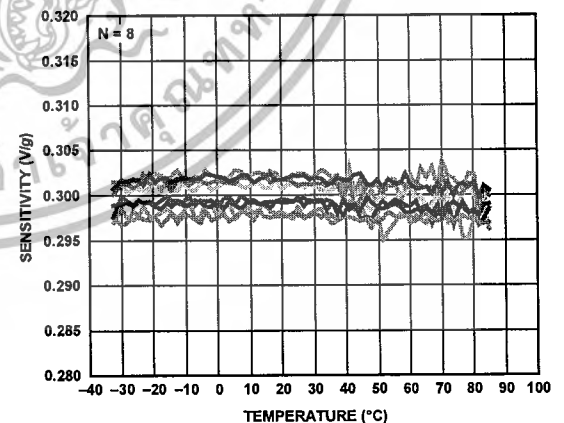


Figure 20. Z-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_s = 3\text{ V}$

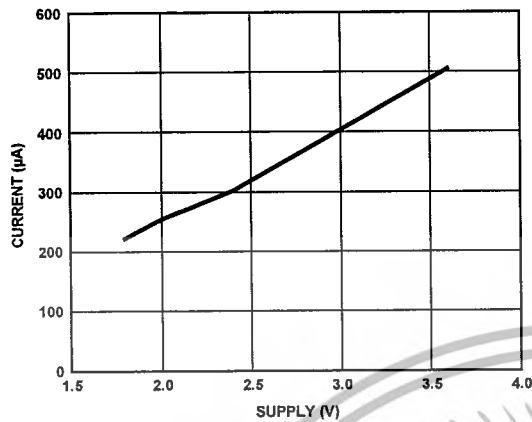


Figure 21. Typical Current Consumption vs. Supply Voltage

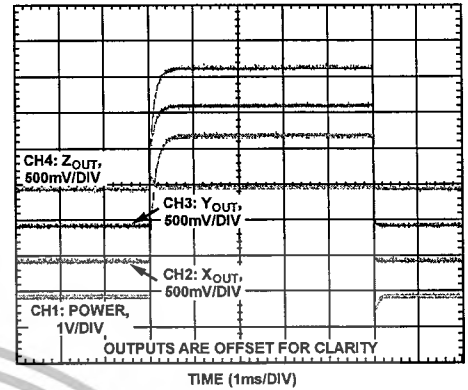


Figure 22. Typical Turn-On Time, $V_S = 3\text{ V}$

ADXL335

THEORY OF OPERATION

The ADXL335 is a complete 3-axis acceleration measurement system. The ADXL335 has a measurement range of ± 3 g minimum. It contains a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltages that are proportional to acceleration. The accelerometer can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The sensor is a polysilicon surface-micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out-of-phase square waves. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to determine the magnitude and direction of the acceleration.

The demodulator output is amplified and brought off-chip through a $32\text{ k}\Omega$ resistor. The user then sets the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

MECHANICAL SENSOR

The ADXL335 uses a single structure for sensing the X, Y, and Z axes. As a result, the three axes' sense directions are highly orthogonal and have little cross-axis sensitivity. Mechanical misalignment of the sensor die to the package is the chief source of cross-axis sensitivity. Mechanical misalignment can, of course, be calibrated out at the system level.

PERFORMANCE

Rather than using additional temperature compensation circuitry, innovative design techniques ensure that high performance is built in to the ADXL335. As a result, there is no quantization error or nonmonotonic behavior, and temperature hysteresis is very low (typically less than 3 mg over the -25°C to $+70^\circ\text{C}$ temperature range).

APPLICATIONS INFORMATION

POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single 0.1 μF capacitor, C_{DC} , placed close to the ADXL335 supply pins adequately decouples the accelerometer from noise on the power supply. However, in applications where noise is present at the 50 kHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), additional care in power supply bypassing is required because this noise can cause errors in acceleration measurement.

If additional decoupling is needed, a 100 Ω (or smaller) resistor or ferrite bead can be inserted in the supply line. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (1 μF or greater) can be added in parallel to C_{DC} . Ensure that the connection from the ADXL335 ground to the power supply ground is low impedance because noise transmitted through ground has a similar effect to noise transmitted through V_s .

SETTING THE BANDWIDTH USING C_x , C_y , AND C_z

The ADXL335 has provisions for band limiting the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Capacitors must be added at these pins to implement low-pass filtering for antialiasing and noise reduction. The equation for the 3 dB bandwidth is

$$F_{-3\text{dB}} = 1 / (2\pi(32\text{ k}\Omega) \times C_{(x,y,z)})$$

or more simply

$$F_{-3\text{dB}} = 5\text{ }\mu\text{F} / C_{(x,y,z)}$$

The tolerance of the internal resistor (R_{FLT}) typically varies as much as $\pm 15\%$ of its nominal value (32 k Ω), and the bandwidth varies accordingly. A minimum capacitance of 0.0047 μF for C_x , C_y , and C_z is recommended in all cases.

Table 4. Filter Capacitor Selection, C_x , C_y , and C_z

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

SELF-TEST

The ST pin controls the self-test feature. When this pin is set to V_s , an electrostatic force is exerted on the accelerometer beam. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output is -1.08 g (corresponding to -325 mV) in the X-axis, $+1.08\text{ g}$ (or $+325\text{ mV}$) on the Y-axis, and $+1.83\text{ g}$ (or $+550\text{ mV}$) on the Z-axis. This ST pin can be left open-circuit or connected to common (COM) in normal use.

Never expose the ST pin to voltages greater than $V_s + 0.3\text{ V}$. If this cannot be guaranteed due to the system design (for instance, if there are multiple supply voltages), then a low V_F clamping diode between ST and V_s is recommended.

DESIGN TRADE-OFFS FOR SELECTING FILTER CHARACTERISTICS: THE NOISE/BW TRADE-OFF

The selected accelerometer bandwidth ultimately determines the measurement resolution (smallest detectable acceleration). Filtering can be used to lower the noise floor to improve the resolution of the accelerometer. Resolution is dependent on the analog filter bandwidth at X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} .

The output of the ADXL335 has a typical bandwidth of greater than 500 Hz. The user must filter the signal at this point to limit aliasing errors. The analog bandwidth must be no more than half the analog-to-digital sampling frequency to minimize aliasing. The analog bandwidth can be further decreased to reduce noise and improve resolution.

The ADXL335 noise has the characteristics of white Gaussian noise, which contributes equally at all frequencies and is described in terms of $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (the noise is proportional to the square root of the accelerometer bandwidth). The user should limit bandwidth to the lowest frequency needed by the application to maximize the resolution and dynamic range of the accelerometer.

With the single-pole, roll-off characteristic, the typical noise of the ADXL335 is determined by

$$\text{rms Noise} = \text{Noise Density} \times (\sqrt{BW \times 1.6})$$

It is often useful to know the peak value of the noise. Peak-to-peak noise can only be estimated by statistical methods. Table 5 is useful for estimating the probabilities of exceeding various peak values, given the rms value.

Table 5. Estimation of Peak-to-Peak Noise

Peak-to-Peak Value	% of Time That Noise Exceeds Nominal Peak-to-Peak Value
$2 \times \text{rms}$	32
$4 \times \text{rms}$	4.6
$6 \times \text{rms}$	0.27
$8 \times \text{rms}$	0.006

USE WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL335 is tested and specified at $V_s = 3\text{ V}$; however, it can be powered with V_s as low as 1.8 V or as high as 3.6 V. Note that some performance parameters change as the supply voltage is varied.

ADXL335

The ADXL335 output is ratiometric, therefore, the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to the supply voltage. At $V_s = 3.6$ V, the output sensitivity is typically 360 mV/g. At $V_s = 2$ V, the output sensitivity is typically 195 mV/g.

The zero g bias output is also ratiometric, thus the zero g output is nominally equal to $V_s/2$ at all supply voltages.

The output noise is not ratiometric but is absolute in volts; therefore, the noise density decreases as the supply voltage increases. This is because the scale factor (mV/g) increases while the noise voltage remains constant. At $V_s = 3.6$ V, the X-axis and Y-axis noise density is typically $120 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, whereas at $V_s = 2$ V, the X-axis and Y-axis noise density is typically $270 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Self-test response in g is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when ratiometricity of sensitivity is factored in with supply voltage, the self-test response in volts is roughly proportional to the cube of the supply voltage. For example, at $V_s = 3.6$ V, the self-test response for the ADXL335 is approximately -560 mV for the X-axis, +560 mV for the Y-axis, and +950 mV for the Z-axis.

At $V_s = 2$ V, the self-test response is approximately -96 mV for the X-axis, +96 mV for the Y-axis, and -163 mV for the Z-axis.

The supply current decreases as the supply voltage decreases. Typical current consumption at $V_s = 3.6$ V is 375 μA , and typical current consumption at $V_s = 2$ V is 200 μA .

AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY

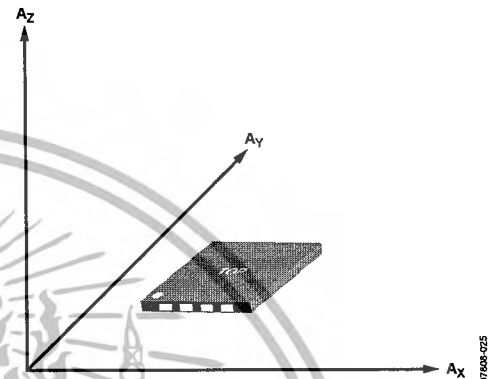


Figure 23. Axes of Acceleration Sensitivity; Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis.

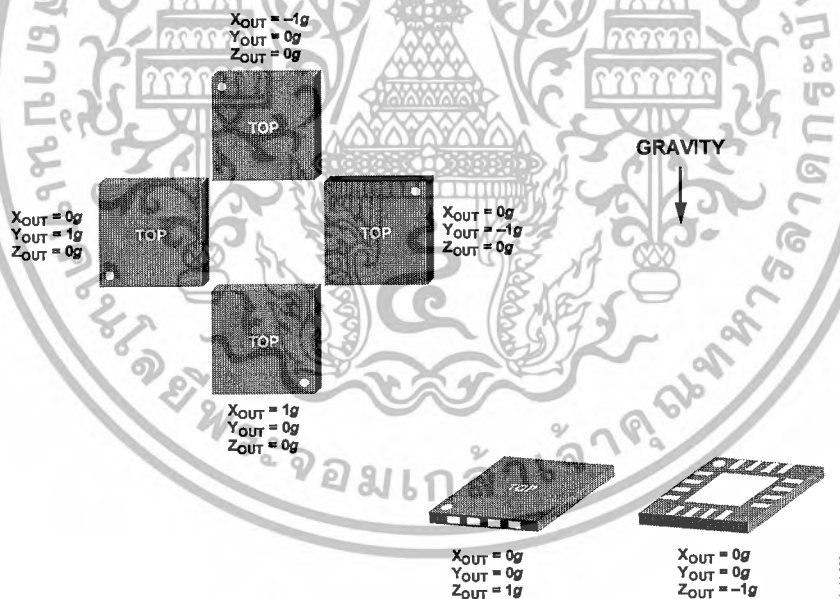


Figure 24. Output Response vs. Orientation to Gravity

LAYOUT AND DESIGN RECOMMENDATIONS

The recommended soldering profile is shown in Figure 25 followed by a description of the profile features in Table 6. The recommended PCB layout or solder land drawing is shown in Figure 26.

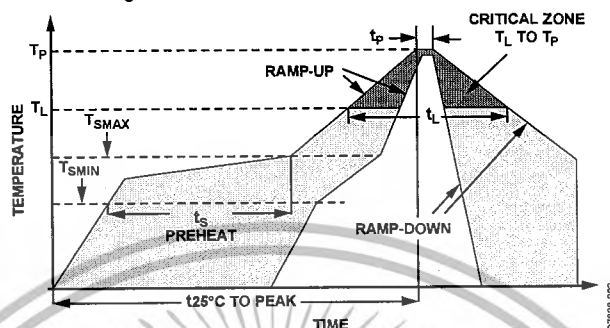


Figure 25. Recommended Soldering Profile

Table 6. Recommended Soldering Profile

Profile Feature	Sn63/Pb37	Pb-Free
Average Ramp Rate (T_L to T_P)	3°C/sec max	3°C/sec max
Preheat		
Minimum Temperature (T_{SMIN})	100°C	150°C
Maximum Temperature (T_{SMAX})	150°C	200°C
Time (T_{SMIN} to T_{SMAX}) (t_s)	60 sec to 120 sec	60 sec to 180 sec
T_{SMAX} to T_L		
Ramp-Up Rate	3°C/sec max	3°C/sec max
Time Maintained Above Liquidous (t_L)		
Liquidous Temperature (T_L)	183°C	217°C
Time (t_L)	60 sec to 150 sec	60 sec to 150 sec
Peak Temperature (T_P)	240°C + 0°C/-5°C	260°C + 0°C/-5°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature (t_P)	10 sec to 30 sec	20 sec to 40 sec
Ramp-Down Rate	6°C/sec max	6°C/sec max
Time 25°C to Peak Temperature	6 minutes max	8 minutes max

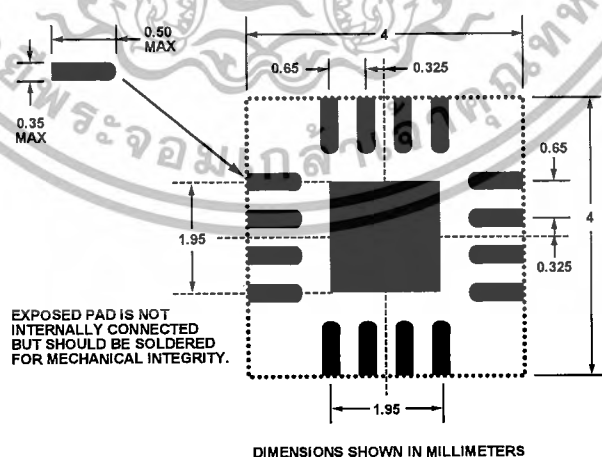


Figure 26. Recommended PCB Layout

ADXL335

OUTLINE DIMENSIONS

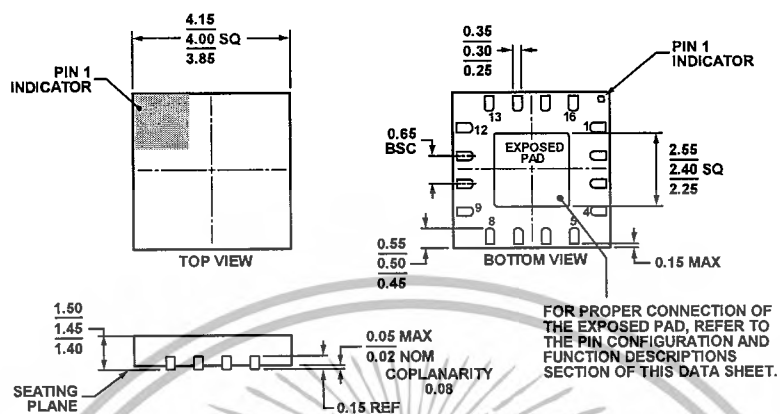


Figure 27. 16-Lead Lead Frame Chip Scale Package [LFCSP_LQ]
4 mm x 4 mm Body, 1.45 mm Thick Quad
(CP-16-14)
Dimensions shown in millimeters

ORDERING GUIDE

Model	Measurement Range	Specified Voltage	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL335BCPZ ¹	±3 g	3 V	-40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
ADXL335BCPZ-RL ¹	±3 g	3 V	-40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
ADXL335BCPZ-RL7 ¹	±3 g	3 V	-40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
EVAL-ADXL335Z ¹				Evaluation Board	

¹ Z = RoHS Compliant Part.

L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

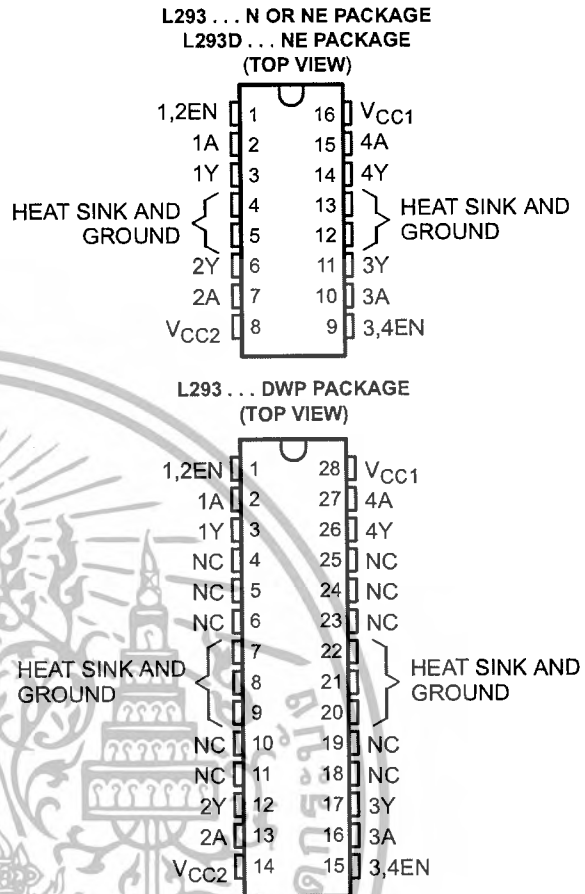
SLRS008C – SEPTEMBER 1986 – REVISED NOVEMBER 2004

- Featuring Unitrode L293 and L293D Products Now From Texas Instruments
- Wide Supply-Voltage Range: 4.5 V to 36 V
- Separate Input-Logic Supply
- Internal ESD Protection
- Thermal Shutdown
- High-Noise-Immunity Inputs
- Functionally Similar to SGS L293 and SGS L293D
- Output Current 1 A Per Channel (600 mA for L293D)
- Peak Output Current 2 A Per Channel (1.2 A for L293D)
- Output Clamp Diodes for Inductive Transient Suppression (L293D)

description/ordering information

The L293 and L293D are quadruple high-current half-H drivers. The L293 is designed to provide bidirectional drive currents of up to 1 A at voltages from 4.5 V to 36 V. The L293D is designed to provide bidirectional drive currents of up to 600-mA at voltages from 4.5 V to 36 V. Both devices are designed to drive inductive loads such as relays, solenoids, dc and bipolar stepping motors, as well as other high-current/high-voltage loads in positive-supply applications.

All inputs are TTL compatible. Each output is a complete totem-pole drive circuit, with a Darlington transistor sink and a pseudo-Darlington source. Drivers are enabled in pairs, with drivers 1 and 2 enabled by 1,2EN and drivers 3 and 4 enabled by 3,4EN. When an enable input is high, the associated drivers are enabled, and their outputs are active and in phase with their inputs. When the enable input is low, those drivers are disabled, and their outputs are off and in the high-impedance state. With the proper data inputs, each pair of drivers forms a full-H (or bridge) reversible drive suitable for solenoid or motor applications.



ORDERING INFORMATION

T _A	PACKAGE†		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
0°C to 70°C	HSOP (DWP)	Tube of 20	L293DWP	L293DWP
	PDIP (N)	Tube of 25	L293N	L293N
	PDIP (NE)	Tube of 25	L293NE	L293NE
		Tube of 25	L293DNE	L293DNE

† Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

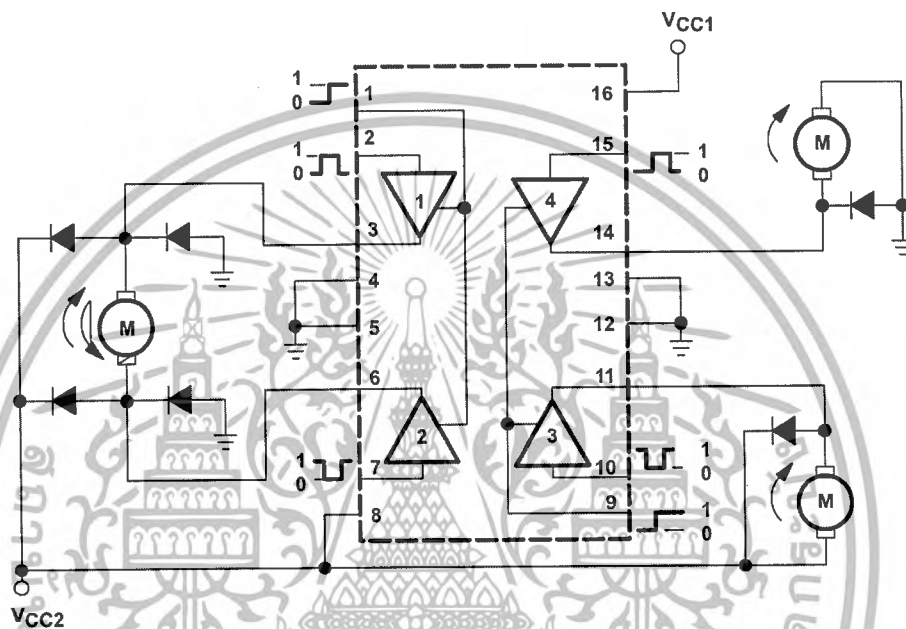
293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

RS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

Description/ordering information (continued)

On the L293, external high-speed output clamp diodes should be used for inductive transient suppression. A V_{CC1} terminal, separate from V_{CC2} , is provided for the logic inputs to minimize device power dissipation. The L293 and L293D are characterized for operation from 0°C to 70°C.

Block diagram



NOTE: Output diodes are internal in L293D.

FUNCTION TABLE
(each driver)

INPUTS†		OUTPUT
A	EN	Y
H	H	H
L	H	L
X	L	Z

H = high level, L = low level, X = irrelevant, Z = high impedance (off)

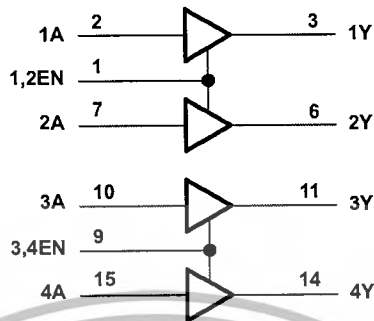
† In the thermal shutdown mode, the output is in the high-impedance state, regardless of the input levels.



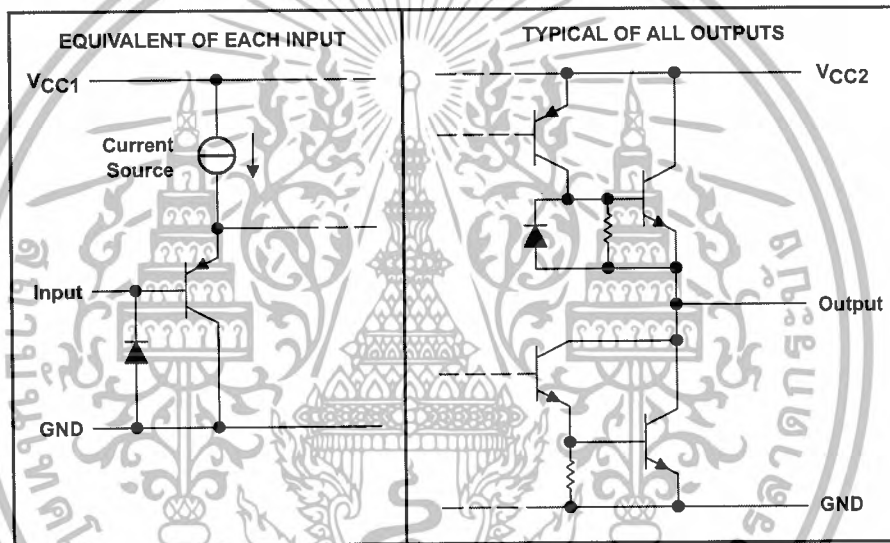
L293, L293D QUADRUPLER HALF-H DRIVERS

SLRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

logic diagram



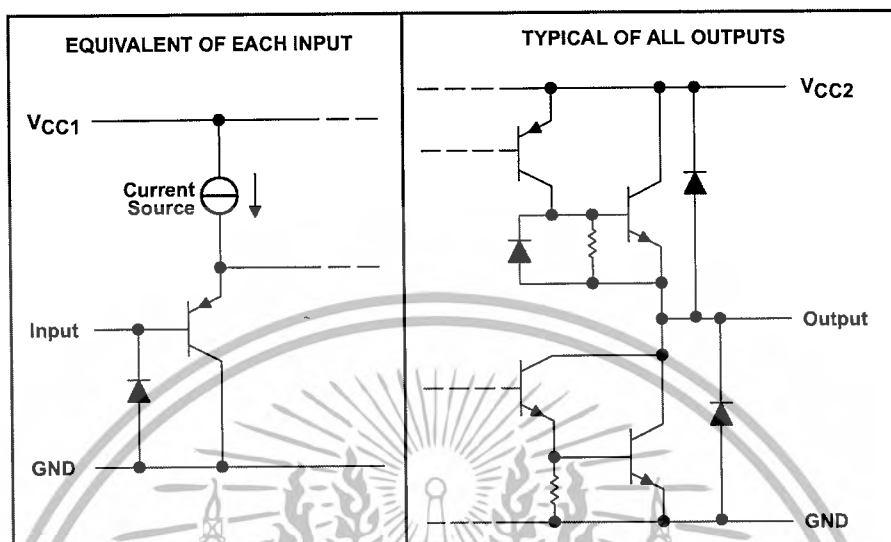
schematics of inputs and outputs (L293)



L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

schematics of inputs and outputs (L293D)



absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)[†]

Supply voltage, V_{CC1} (see Note 1)	36 V
Output supply voltage, V_{CC2}	36 V
Input voltage, V_I	7 V
Output voltage range, V_O	-3 V to $V_{CC2} + 3$ V
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 5$ ms): L293	± 2 A
Peak output current, I_O (nonrepetitive, $t \leq 100$ μ s): L293D	± 1.2 A
Continuous output current, I_O : L293	± 1 A
Continuous output current, I_O : L293D	± 600 mA
Package thermal impedance, θ_{JA} (see Notes 2 and 3): DWP package	TBD $^{\circ}$ C/W
N package	67 $^{\circ}$ C/W
NE package	TBD $^{\circ}$ C/W
Maximum junction temperature, T_J	150 $^{\circ}$ C
Storage temperature range, T_{stg}	-65 $^{\circ}$ C to 150 $^{\circ}$ C

[†] Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. All voltage values are with respect to the network ground terminal.
2. Maximum power dissipation is a function of $T_J(\max)$, θ_{JA} , and T_A . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_J(\max) - T_A)/\theta_{JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150 $^{\circ}$ C can affect reliability.
3. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

recommended operating conditions

		MIN	MAX	UNIT
Supply voltage	V _{CC1}	4.5	7	V
	V _{CC2}	V _{CC1}	36	
V _{IH} High-level input voltage	V _{CC1} ≤ 7 V	2.3	V _{CC1}	V
	V _{CC1} ≥ 7 V	2.3	7	V
V _{IL} Low-level output voltage		-0.3†	1.5	V
T _A Operating free-air temperature		0	70	°C

† The algebraic convention, in which the least positive (most negative) designated minimum, is used in this data sheet for logic voltage levels.

electrical characteristics, V_{CC1} = 5 V, V_{CC2} = 24 V, T_A = 25°C

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{OH} High-level output voltage		L293: I _{OH} = -1 A L293D: I _{OH} = -0.6 A		V _{CC2} - 1.8	V _{CC2} - 1.4		V
V _{OL} Low-level output voltage		L293: I _{OL} = 1 A L293D: I _{OL} = 0.6 A			1.2	1.8	V
V _{OKH} High-level output clamp voltage		L293D: I _{OK} = -0.6 A			V _{CC2} + 1.3		V
V _{OKL} Low-level output clamp voltage		L293D: I _{OK} = 0.6 A			1.3		V
I _{IH} High-level input current	A	V _I = 7 V			0.2	100	μA
	EN				0.2	10	
I _{IL} Low-level input current	A	V _I = 0			-3	-10	μA
	EN				-2	-100	
I _{CC1} Logic supply current		I _O = 0	All outputs at high level		13	22	mA
			All outputs at low level		35	60	
			All outputs at high impedance		8	24	
I _{CC2} Output supply current		I _O = 0	All outputs at high level		14	24	mA
			All outputs at low level		2	6	
			All outputs at high impedance		2	4	

switching characteristics, V_{CC1} = 5 V, V_{CC2} = 24 V, T_A = 25°C

PARAMETER		TEST CONDITIONS		L293NE, L293DNE			UNIT
				MIN	TYP	MAX	
t _{PLH} Propagation delay time, low-to-high-level output from A input		C _L = 30 pF, See Figure 1			800		ns
t _{PHL} Propagation delay time, high-to-low-level output from A input					400		ns
t _{TLH} Transition time, low-to-high-level output					300		ns
t _{THL} Transition time, high-to-low-level output					300		ns

switching characteristics, V_{CC1} = 5 V, V_{CC2} = 24 V, T_A = 25°C

PARAMETER		TEST CONDITIONS		L293DWP, L293N L293DN			UNIT
				MIN	TYP	MAX	
t _{PLH} Propagation delay time, low-to-high-level output from A input		C _L = 30 pF, See Figure 1			750		ns
t _{PHL} Propagation delay time, high-to-low-level output from A input					200		ns
t _{TLH} Transition time, low-to-high-level output					100		ns
t _{THL} Transition time, high-to-low-level output					350		ns



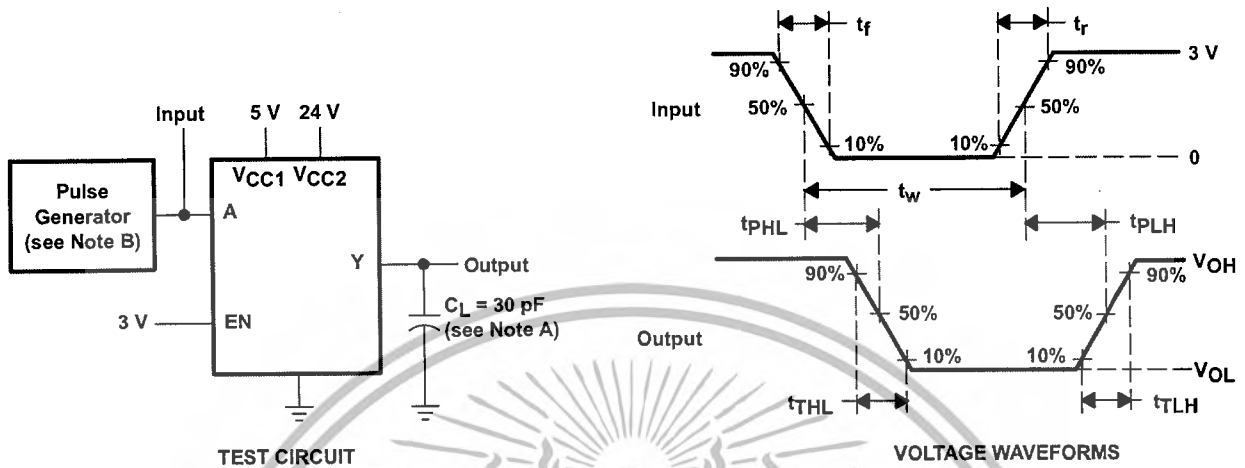
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

.293, L293D QUADRUPLER HALF-H DRIVERS

LRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



- NOTES: A. C_L includes probe and jig capacitance.
B. The pulse generator has the following characteristics: $t_r \leq 10 \text{ ns}$, $t_f \leq 10 \text{ ns}$, $t_W = 10 \mu\text{s}$, $\text{PRR} = 5 \text{ kHz}$, $Z_O = 50 \Omega$.

Figure 1. Test Circuit and Voltage Waveforms

APPLICATION INFORMATION

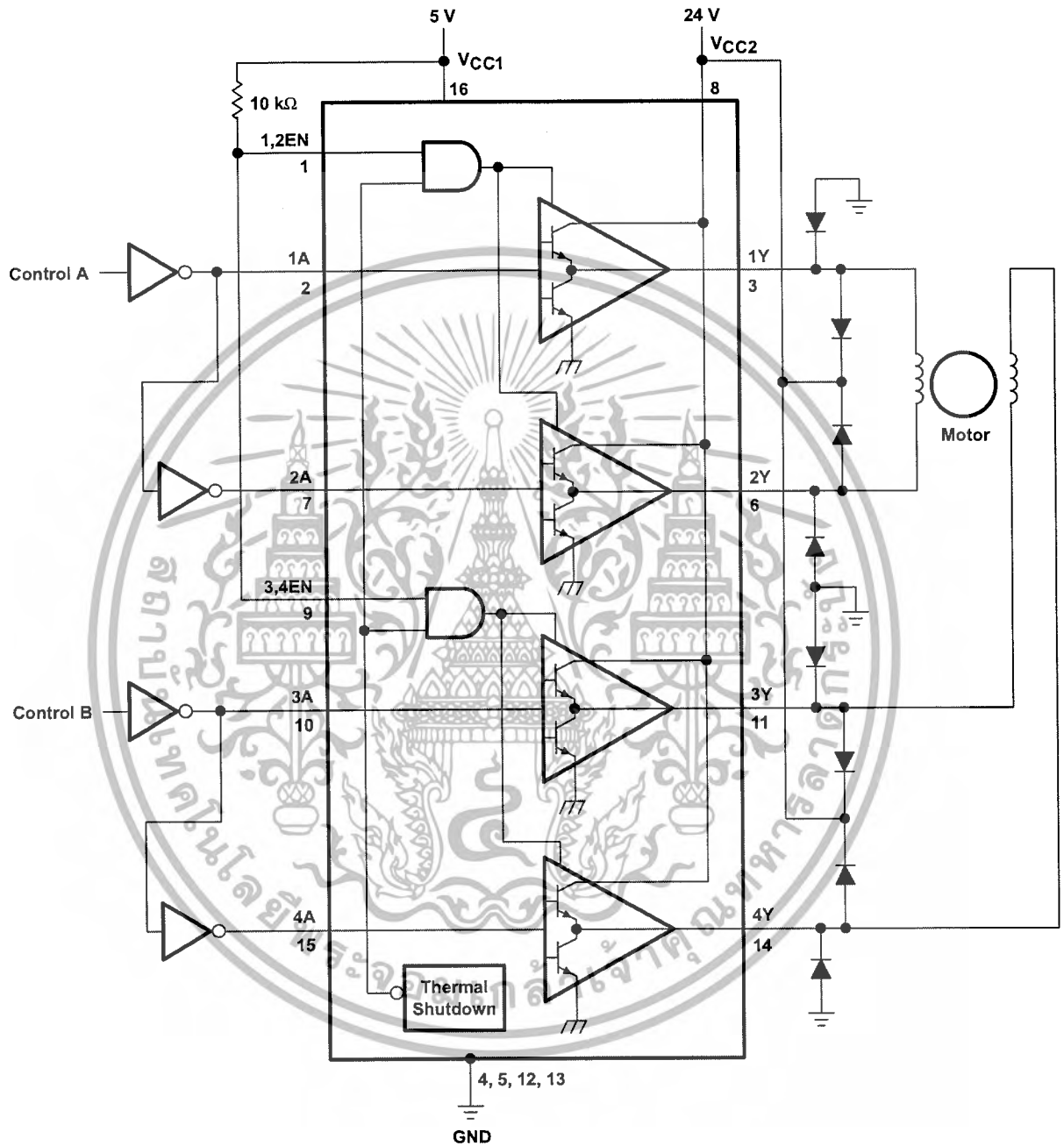


Figure 2. Two-Phase Motor Driver (L293)



L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

APPLICATION INFORMATION

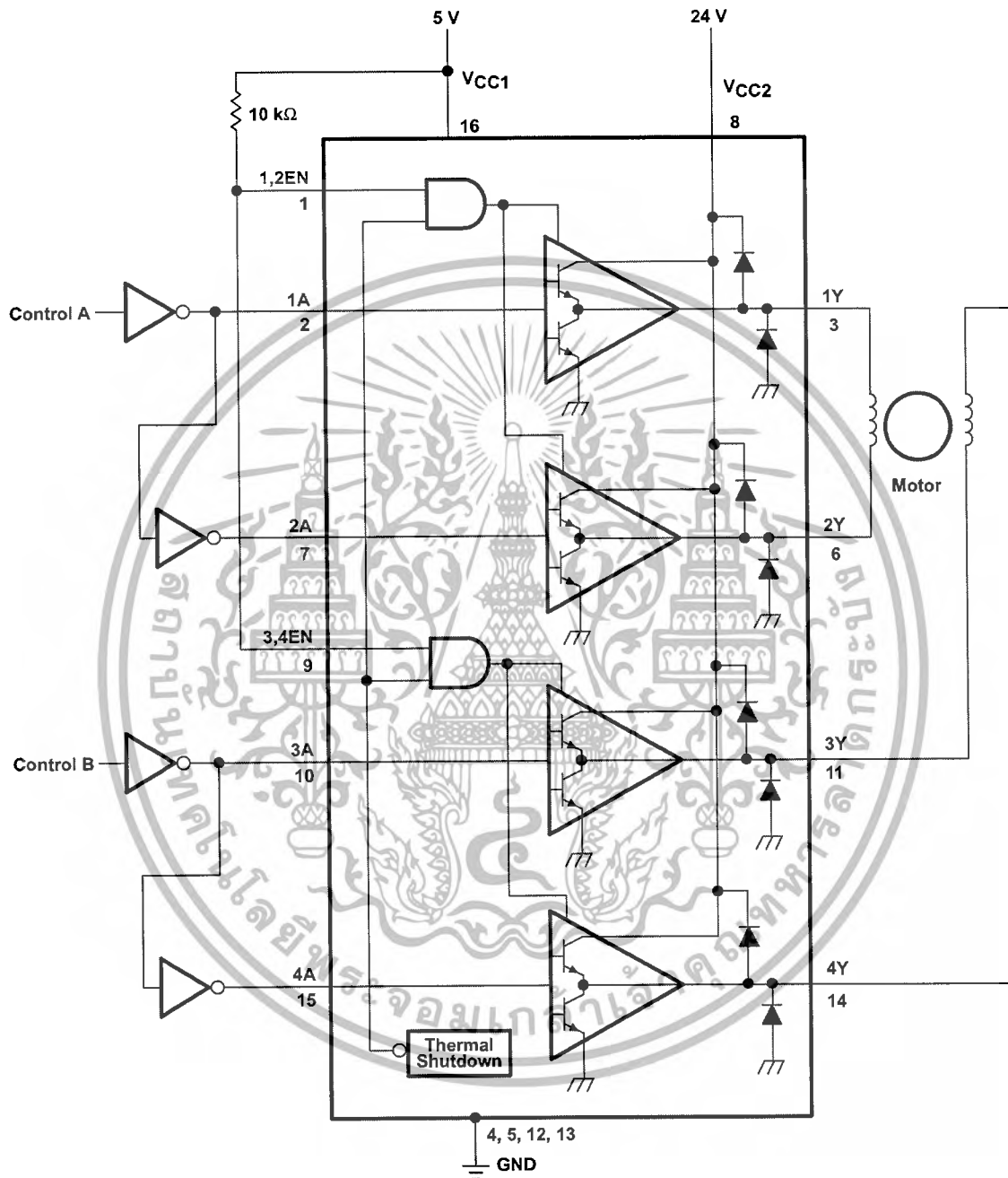


Figure 3. Two-Phase Motor Driver (L293D)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION INFORMATION

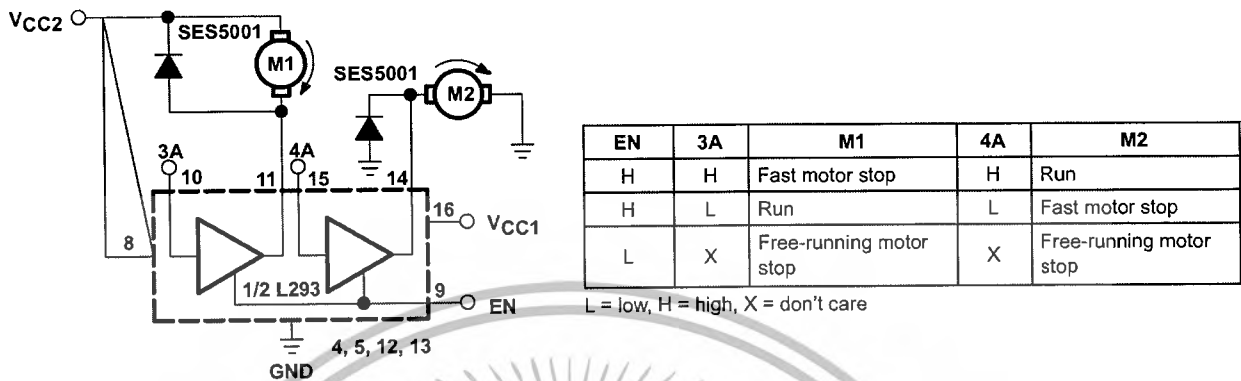


Figure 4. DC Motor Controls
(connections to ground and to
supply voltage)

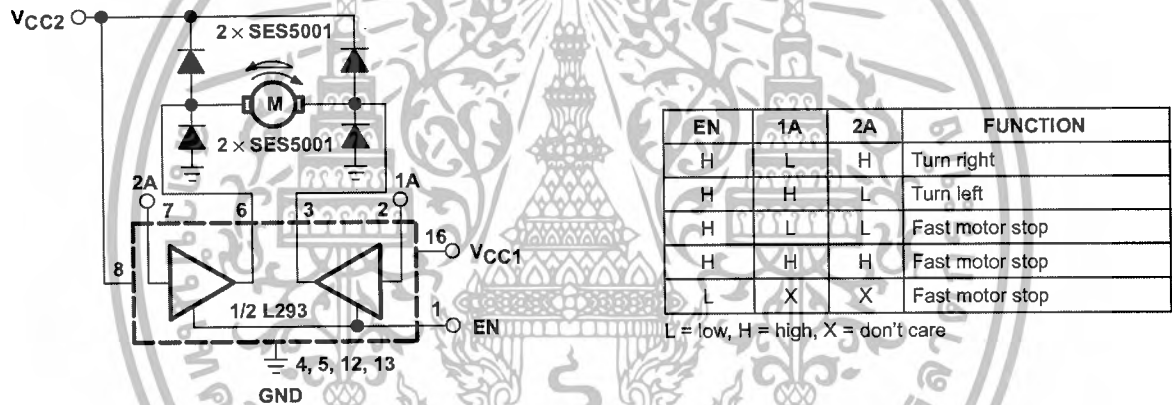


Figure 5. Bidirectional DC Motor Control



L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

APPLICATION INFORMATION

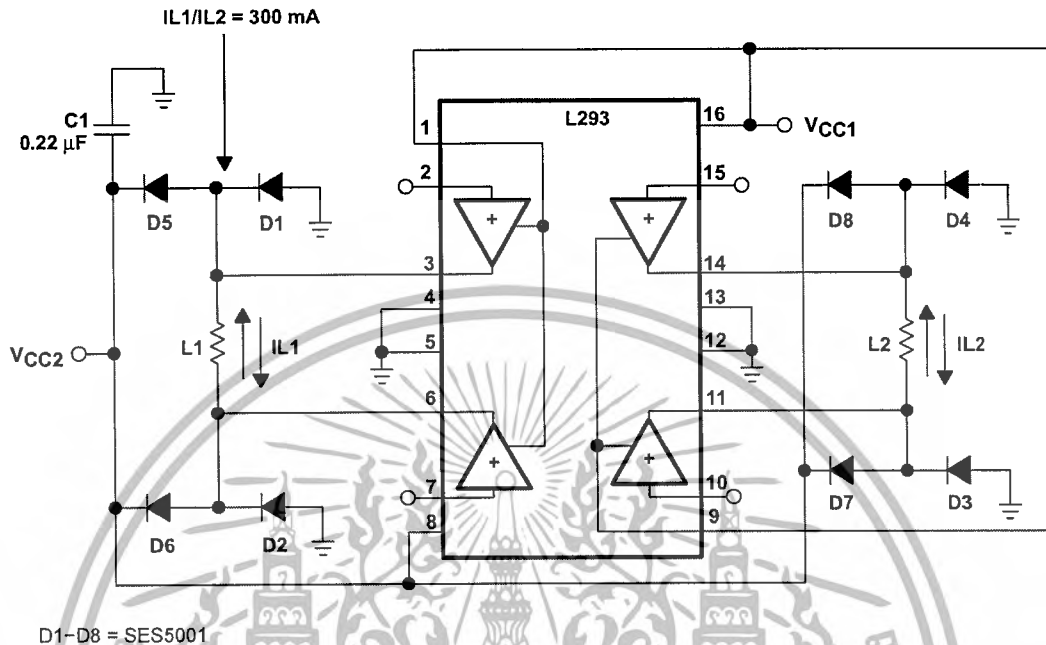


Figure 6. Bipolar Stepping-Motor Control

mounting instructions

The Rthj-amp of the L293 can be reduced by soldering the GND pins to a suitable copper area of the printed circuit board or to an external heat sink.

Figure 9 shows the maximum package power P_{TOT} and the θ_{JA} as a function of the side l of two equal square copper areas having a thickness of 35 μ m (see Figure 7). In addition, an external heat sink can be used (see Figure 8).

During soldering, the pin temperature must not exceed 260°C, and the soldering time must not exceed 12 seconds.

The external heatsink or printed circuit copper area must be connected to electrical ground.



APPLICATION INFORMATION

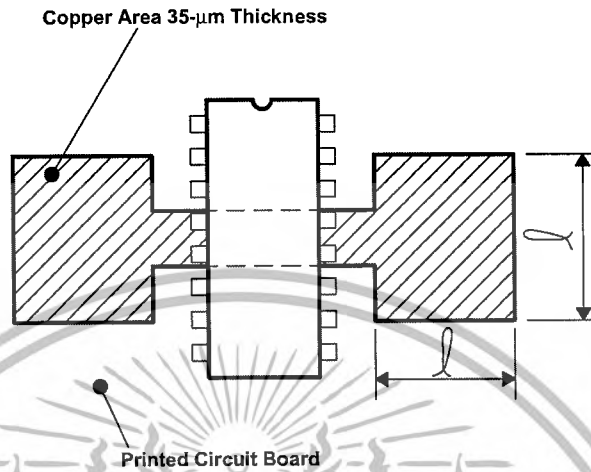


Figure 7. Example of Printed Circuit Board Copper Area (used as heat sink)

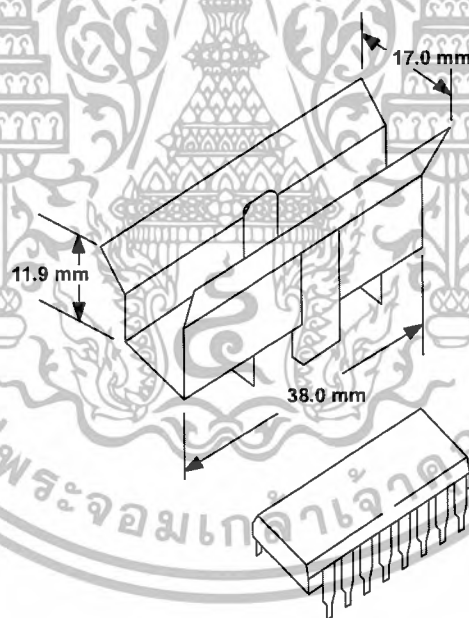


Figure 8. External Heat Sink Mounting Example
($\theta_{JA} = 25^{\circ}\text{C/W}$)

L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLRS008C - SEPTEMBER 1986 - REVISED NOVEMBER 2004

APPLICATION INFORMATION

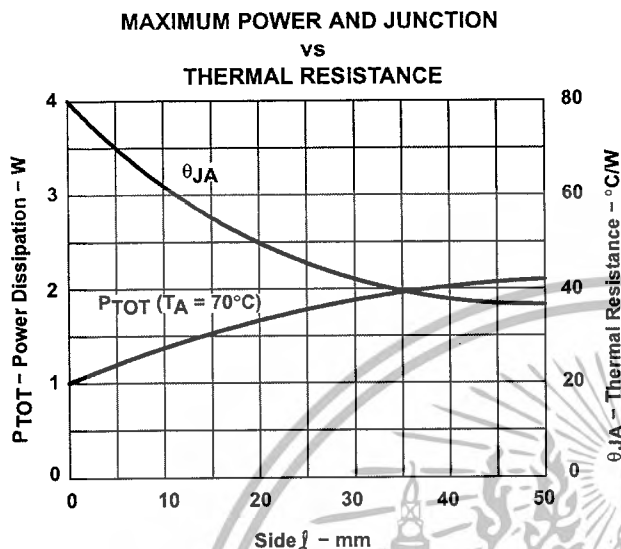


Figure 9

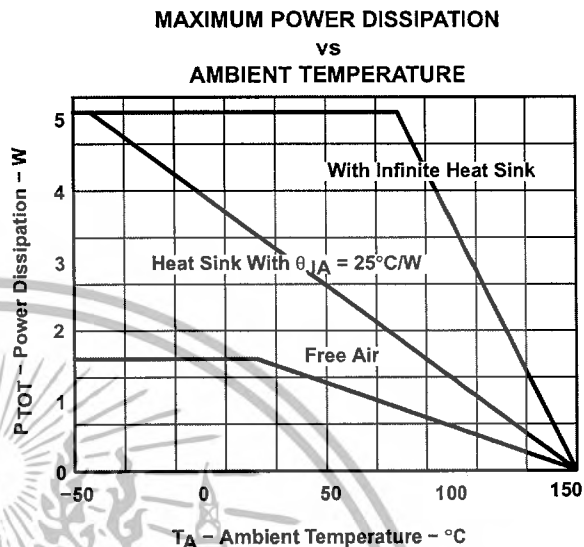


Figure 10



PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status ⁽¹⁾	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan ⁽²⁾	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp ⁽³⁾
L293DDWP	OBSOLETE	SOIC	DW	28		TBD	Call TI	Call TI
L293DDWPTR	OBSOLETE	SOIC	DW	28		TBD	Call TI	Call TI
L293DN	OBSOLETE	PDIP	N	16		TBD	Call TI	Call TI
L293DNE	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	Level-NC-NC-NC
L293DNEE4	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	Level-NC-NC-NC
L293DSP	OBSOLETE			16		TBD	Call TI	Call TI
L293DSP883B	OBSOLETE			16		TBD	Call TI	Call TI
L293DSP883C	OBSOLETE		UTR			TBD	Call TI	Call TI
L293DWP	ACTIVE	SO Power PAD	DWP	28	20	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR
L293DWPG4	ACTIVE	SO Power PAD	DWP	28	20	TBD	Call TI	Call TI
L293DWPTR	OBSOLETE	SO Power PAD	DWP	28		TBD	Call TI	Call TI
L293N	ACTIVE	PDIP	N	16	25	Green (RoHS & no Sb/Br)	Call TI	Level-NC-NC-NC
L293NE	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	Level-NC-NC-NC
L293NEE4	ACTIVE	PDIP	NE	16	25	Pb-Free (RoHS)	CU NIPDAU	Level-NC-NC-NC

⁽¹⁾ The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

⁽²⁾ Eco Plan - The planned eco-friendly classification: Pb-Free (RoHS) or Green (RoHS & no Sb/Br) - please check <http://www.ti.com/productcontent> for the latest availability information and additional product content details.

TBD: The Pb-Free/Green conversion plan has not been defined.

Pb-Free (RoHS): TI's terms "Lead-Free" or "Pb-Free" mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TI Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

Green (RoHS & no Sb/Br): TI defines "Green" to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous material)

⁽³⁾ MSL, Peak Temp. -- The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

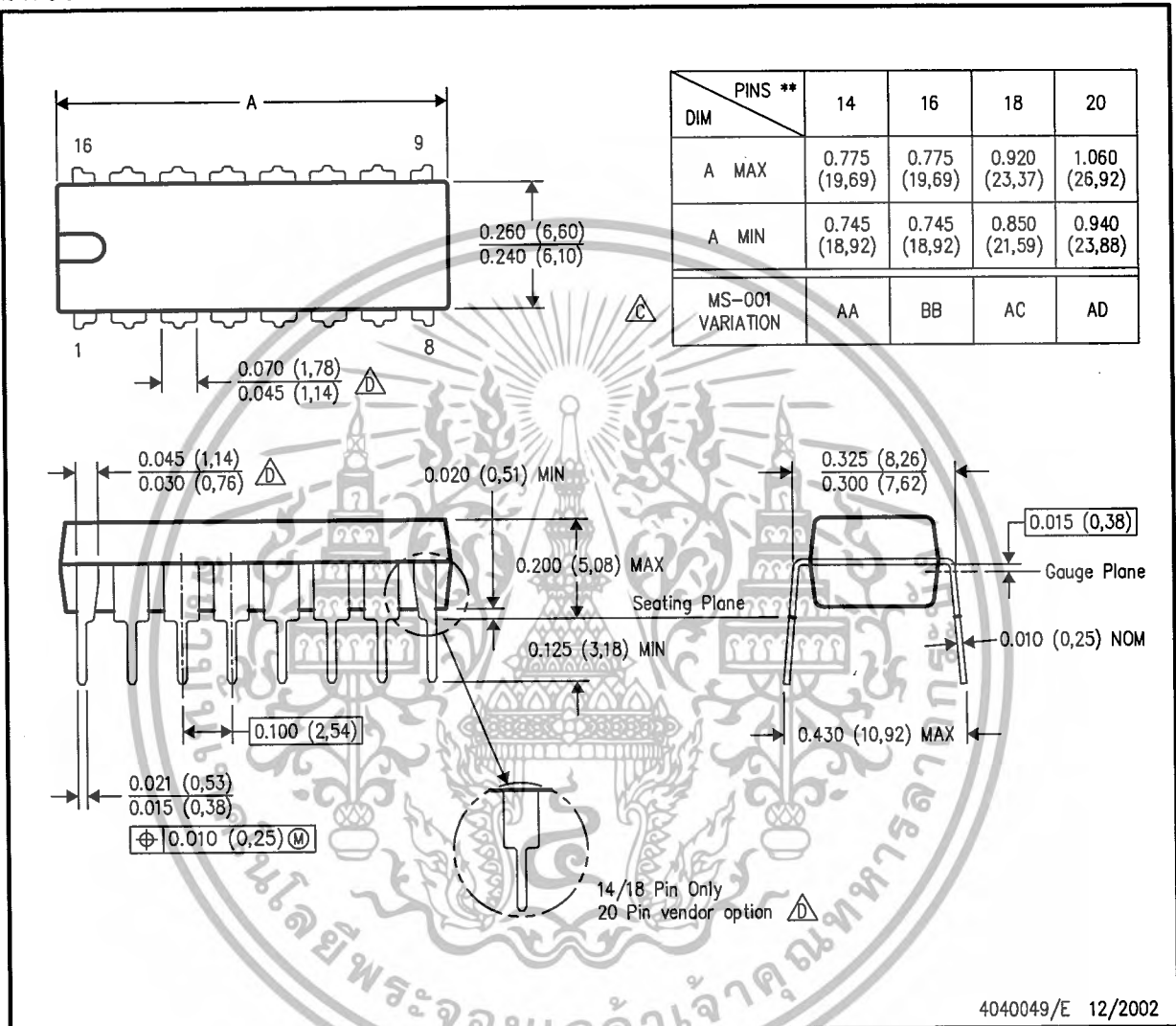


MECHANICAL DATA

N (R-PDIP-T**)

16 PINS SHOWN

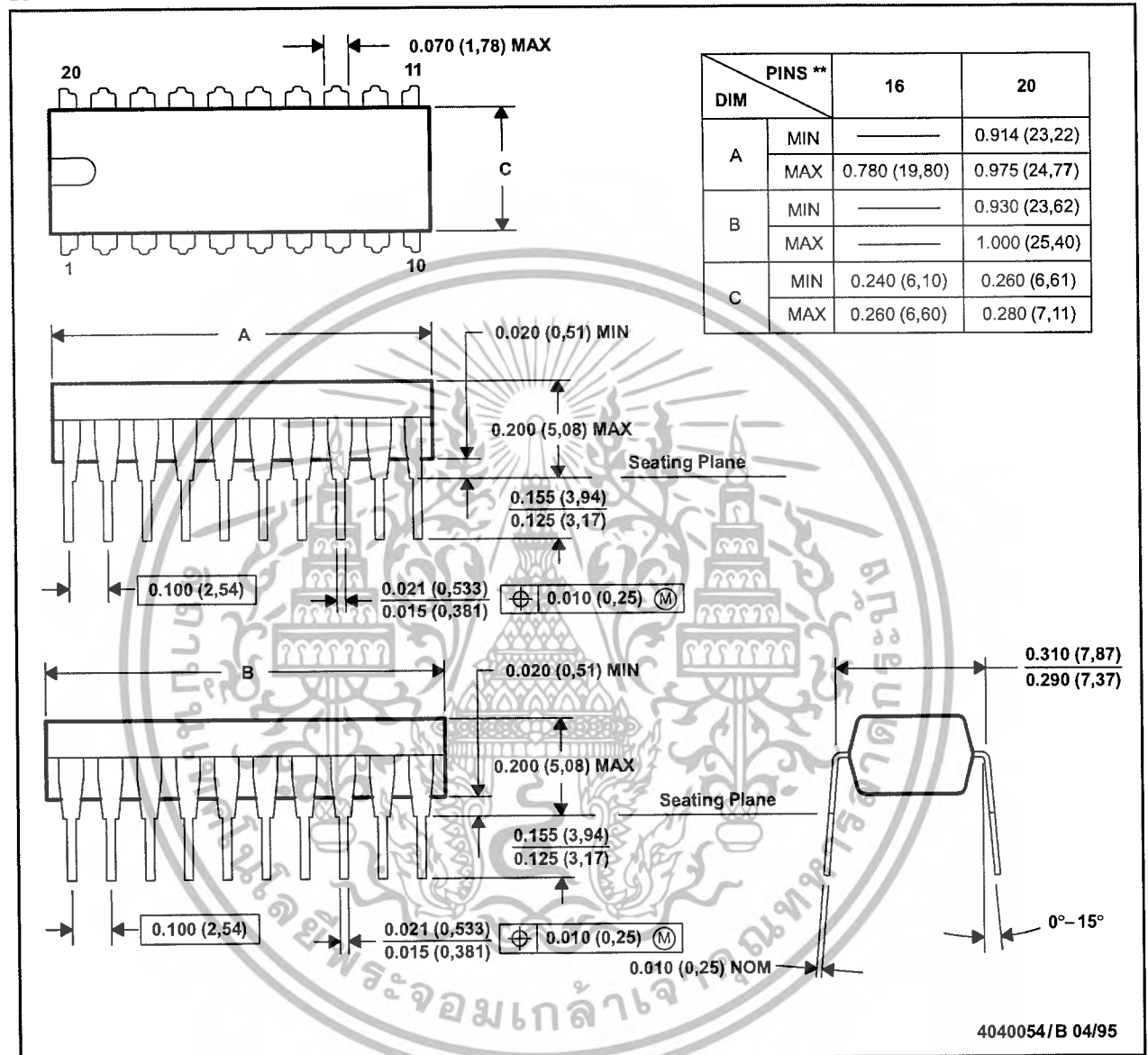
PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE



NE (R-PDIP-T**)

PLASTIC DUAL-IN-LINE PACKAGE

20 PIN SHOWN



- NOTES: A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 B. This drawing is subject to change without notice.
 C. Falls within JEDEC MS-001 (16 pin only)

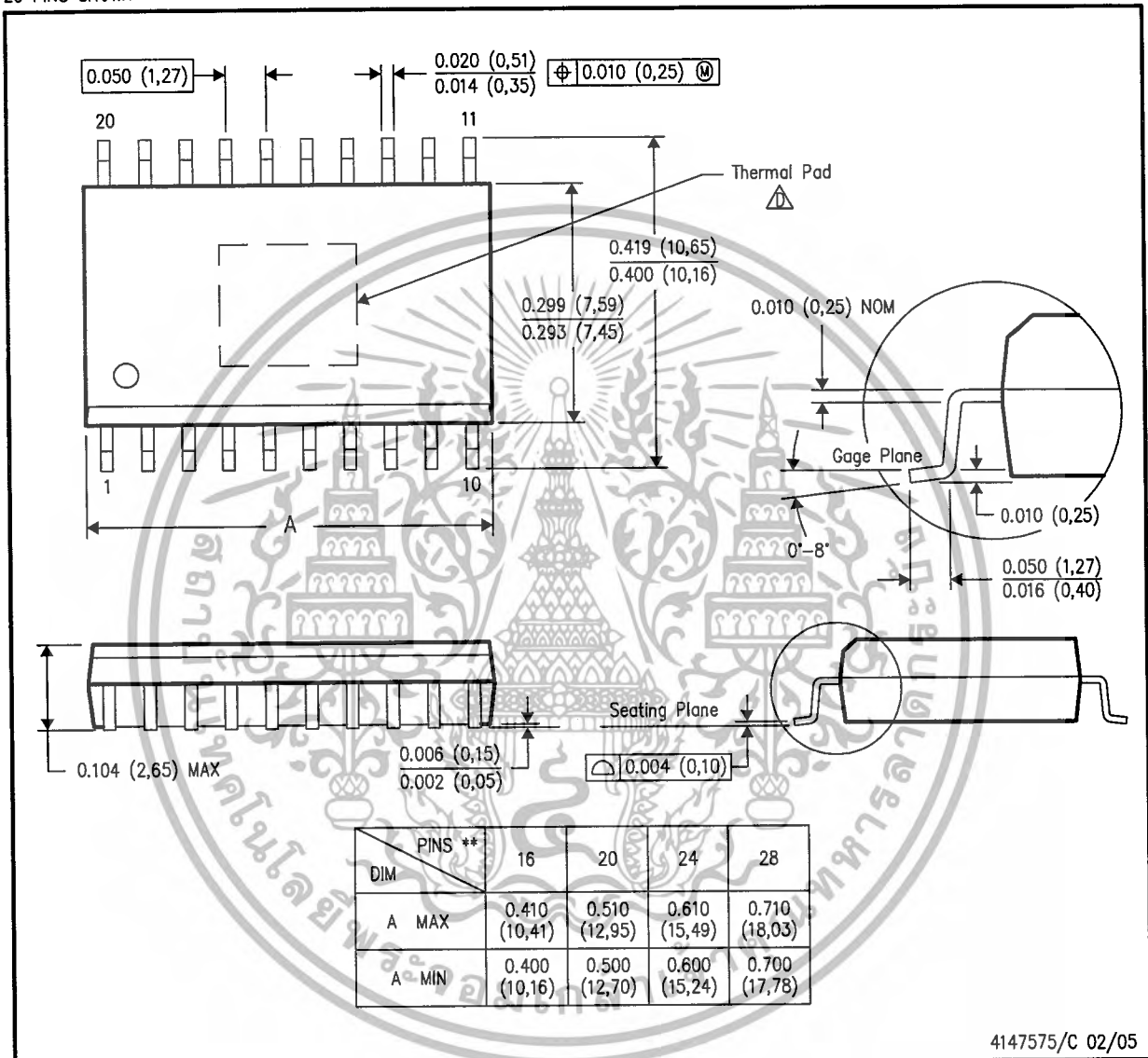


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DWP (R-PDSO-G**)

PowerPAD™ PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE

20 PINS SHOWN



- NOTES:
- All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0.006 (0,15).
- This package is designed to be soldered to a thermal pad on the board. Refer to Technical Brief, PowerPad Thermally Enhanced Package, Texas Instruments Literature No. SLMA002 for information regarding recommended board layout. This document is available at www.ti.com <<http://www.ti.com>>. See the product data sheet for details regarding the exposed thermal pad dimensions.

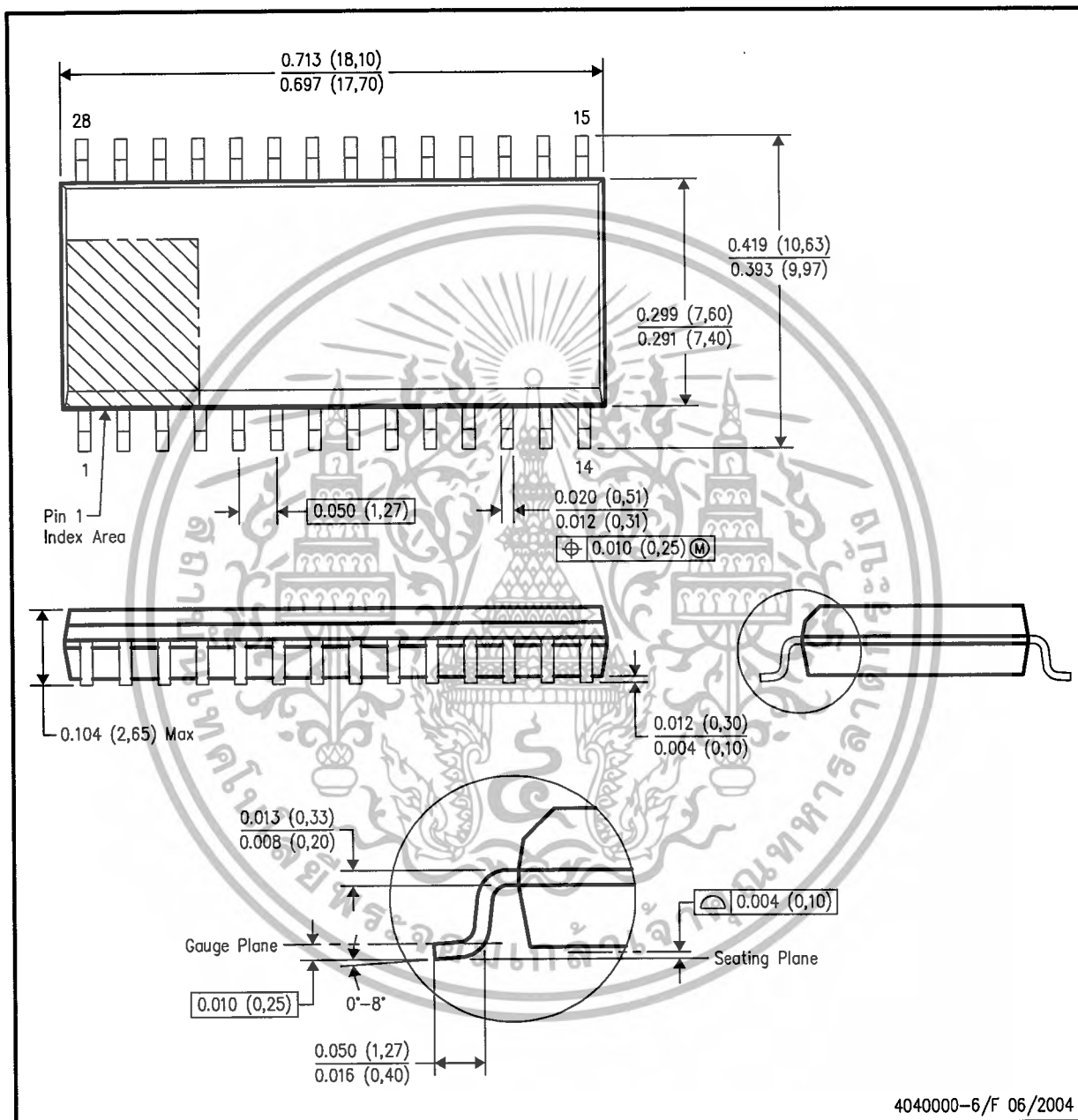
PowerPAD is a trademark of Texas Instruments.

**TEXAS
INSTRUMENTS**
www.ti.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DW (R-PDSO-G28)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE



- NOTES:
- All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Body dimensions do not include mold flash or protrusion not to exceed 0.006 (0,15).
 - Falls within JEDEC MS-013 variation AE.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services at any time and to discontinue any product or service without notice. Customers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All products are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its hardware products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by government requirements, testing of all parameters of each product is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. Customers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with customer products and applications, customers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any TI patent right, copyright, mask work right, or other TI intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license from TI to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. Reproduction of this information with alteration is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for such altered documentation.

Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

Following are URLs where you can obtain information on other Texas Instruments products and application solutions:

Products

Amplifiers	amplifier.ti.com
Data Converters	dataconverter.ti.com
DSP	dsp.ti.com
Interface	interface.ti.com
Logic	logic.ti.com
Power Mgmt	power.ti.com
Microcontrollers	microcontroller.ti.com

Applications

Audio	www.ti.com/audio
Automotive	www.ti.com/automotive
Broadband	www.ti.com/broadband
Digital Control	www.ti.com/digitalcontrol
Military	www.ti.com/military
Optical Networking	www.ti.com/opticalnetwork
Security	www.ti.com/security
Telephony	www.ti.com/telephony
Video & Imaging	www.ti.com/video
Wireless	www.ti.com/wireless

Mailing Address: Texas Instruments
Post Office Box 655303 Dallas, Texas 75265

Copyright © 2005, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้