

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**หุ่นยนต์สองล้อควบคุมการทรงตัว  
TWO-WHEELED BALANCING ROBOT**



โดย  
นางสาวพลทรัพย์ ปิณโสภา  
นายศุภวัชร สุขสวัสดิ์

รพ.  
ทว86628  
2550

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**82476**  
วันเดือนปี.....**11 ก.ค. 2551**

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

**11 ก.ค. 2551**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หุ่นยนต์สองล้อควบคุมการทรงตัว  
**TWO-WHEELED BALANCING ROBOT**



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ้ยนต์สองล้อควบคุมการทรงตัว

จัดทำโดย

1. นางสาวพุลทรัพย์ ปัญโสภา เลขประจำตัว 47010540
2. นายศุภวัชร สุขสวัสดิ์ เลขประจำตัว 47010786



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หุ่นยนต์สองล้อควบคุมการทรงตัว

นางสาวพุลทรัพย์ ปัญโสภารหัส 47010540  
 นายศุภวัชร สุขสวัสดิ์ รหัส 47010786  
 ผศ.ดร.บุษยามา ทิดใจเด็ยว อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับการทรงตัวได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในหุ่นยนต์ เครื่องบิน เรือดำน้ำ เป็นต้น ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดในการทรงตัวของ หุ่นยนต์สองล้อ ซึ่งได้นำเอาหลักการทำงานของอินเวอร์ทเพนคูล์มมาใช้ในการศึกษาการทำงานและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นอกจากนี้ได้นำเอาทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือมาช่วยในการรักษาการทรงตัว เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทรงตัวอยู่ได้ สัญญาณอินพุทที่จะนำไปใช้ในการประมวลผลของตัวควบคุมนั้นจะมีสามตัวด้วยกัน ได้แก่ มุมของแขนเพนคูล์ม อัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนคูล์ม และความเร็วในการเคลื่อนที่ตามระนาบพื้นดิน ซึ่งจะได้นำไปใช้ในการประมวลผลเพื่อขับสัญญาณเอาต์พุทเป็นสัญญาณพัลส์วิดมอดดูเลชั่นเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้สามารถปรับความเร็วและทิศทางได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## TWO-WHEEL BALANCING ROBOT

Miss Poosup Pansopha ID. 47010540

Mr. Suphawat Suksawat ID. 47010786

Assist.Prof.Dr.Yuttana Kidchaidiew Advisor

Educational Year 2007

### Abstract

Nowadays, technology related to self-balancing becomes widely important, such as robot, aerospace and sub-marine. In this thesis, a concept of stabilizing a two-wheel balancing robot is introduced utilizing a principle of inverted pendulum to explain a physical activity of the robot. A fuzzy logic controller is applied to balance the robot body. The input parameters, pendulum angle, pendulum angular velocity and robot velocity, are fed to the controller in order to process and create an appropriate output signal which is able to control the DC motor in the decided direction and velocity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา และแนวคิดในการออกแบบ หุ่นยนต์สองล้อ จาก ผศ.ดร.บุษยามา คิดใจเดียว ผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่านและบุคคลที่ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ที่ได้ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆ เรื่อยมา ซึ่งช่วยสนับสนุนให้ผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจจนสามารถจัดทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากทุกท่าน และกราบขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำเมื่อมีปัญหา จนทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงด้วยดี และคอยให้กำลังใจผู้จัดทำอย่างใกล้ชิดตลอดมา คุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับในการทำโครงการนี้ ผู้จัดทำขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

.....  
(นางสาวพุลทรัพย์ ปัญโสภา)

.....  
(นายศุภวัชร สุขสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
ABSTRACT	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	vi
สารบัญตาราง	xii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีอินเวิร์ทเพนดูลัม	2
2.1 ระบบอินเวิร์ทเพนดูลัม	2
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางและไจโรสโคป	5
3.1 เซนเซอร์วัดระยะทาง	5
3.2 ไจโรสโคป	7
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง	10
4.1 มอเตอร์กระแสตรง	10
4.2 กล้องเฟือง	15
4.3 เซ็นเซอร์และเอ็นโคดเดอร์ในระบบการควบคุมมอเตอร์	16
บทที่ 5 ทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือ	19
5.1 บทนำ	19
5.2 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซีลอจิก	19
5.3 ฟัซซีเซต	21
5.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	23
5.5 กฎฟัซซี	26
5.6 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8 กระบวนการหาเหตุผลแบบพีชชี	39
บทที่ 6 การออกแบบภาคควบคุม	42
6.1 บล็อกการทำงานของระบบ	42
6.2 การออกแบบตัวควบคุมพีชชี	42
บทที่ 7 การจำลองการทำงานของระบบ	46
7.1 บล็อกไดอะแกรมจำลองการทำงานของระบบ	46
7.2 ผลการจำลองการทำงาน	48
7.3 ตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งาน	63
บทที่ 8 การสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์	69
8.1 โครงสร้างของระบบ	69
8.2 ภาคเซนเซอร์	70
8.3 ภาคควบคุม	74
8.4 ภาคเอาต์พุตขับเคลื่อนมอเตอร์	78
8.5 โครงสร้างของหุ่นยนต์	79
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง	81
9.1 น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์	81
9.2 วัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดระยะทาง	81
9.3 วัดการตอบสนองของมอเตอร์	83
9.4 วัดเวลาในการตกอิสระของแขนเพนดูลัม	84
บทที่ 10 สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา	86
10.1 สรุปผลการทดลอง	86
10.2 แนวทางในการพัฒนาปรับปรุง	87
10.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	88
บรรณานุกรม	89
ภาคผนวก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีอินเวอร์ทเพนคูล์ม	
รูปที่ 2.1 แสดงแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนรถที่จะต้องใช้พิจารณา	2
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางและไจโรสโคป	
รูปที่ 3.1 การทำงานของโซนาร์เซนเซอร์	5
รูปที่ 3.2 การทำงานของอินฟราเรดเซนเซอร์	6
รูปที่ 3.3 ลักษณะของเซนเซอร์ SHARP GP2D12 และเซนเซอร์ไคอะแกรม	7
รูปที่ 3.4 ไจโรสโคปเชิงกล	7
รูปที่ 3.5 ไจโรสโคปแบบเข็มคอนดักเตอร์	8
รูปที่ 3.6 ไจโรสโคปแบบใยแก้วนำแสง	9
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง	
รูปที่ 4.1 ไคอะแกรมระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐาน	10
รูปที่ 4.2 วงจรแฮบริคและลักษณะการทำงาน	12
รูปที่ 4.3 การนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็นวงจรแฮบริค	12
รูปที่ 4.4 วงจรขับมอเตอร์ด้วยไอซีไครเวอร์เบอร์ L298	13
รูปที่ 4.5 สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PMF	14
รูปที่ 4.6 สัญญาณควบคุมมอเตอร์แบบ PWM	15
รูปที่ 4.7 ระบบการขับปลิงของเกียร์	15
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการทำงานพื้นฐานของตัวเข้ารหัสแบบควอดร่าเจอร์	17
บทที่ 5 ทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือ	
รูปที่ 5.1 ตรรกะแบบจริงเท็จ (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก)	19
รูปที่ 5.2 ความไม่แน่นอน (Uncertainty)	20
รูปที่ 5.3 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของเซตทวินัยและเซตแบบฟัซซี	21
รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบวิยัค A	22
รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบต่อเนื่อง A	23
รูปที่ 5.6 กราฟของฟังก์ชันเกาส์เซียน	26
รูปที่ 5.7 กราฟของฟังก์ชันระฆังคว่ำ	26
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างปริภูมิรูปแบบการจคกลุ่มด้วยฟัซซี	27

รูปที่ 5.9	กลุ่มของระบบกฎพีชชี	29
รูปที่ 5.10	วิธีการอนุมานแบบแมมคานีและใช้การจัดองค์ประกอบ แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด	32
รูปที่ 5.11	วิธีการอนุมานแบบแมมคานีและใช้การจัดองค์ประกอบ แบบค่าสูงสุด-ผลคูณ	33
รูปที่ 5.12	โมเดลพีชชีแบบซุกาโมโต	35
รูปที่ 5.13	โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบพีชชี	35
รูปที่ 5.14	ขั้นตอนการประมวลผลแบบพีชชีลอจิก	36
รูปที่ 5.15	ขั้นตอนที่ 1 ของการประมวลผลแบบพีชชีลอจิก	37
รูปที่ 5.16	ขั้นตอนที่ 2 ของการประมวลผลแบบพีชชีลอจิก	37
รูปที่ 5.17	ขั้นตอนที่ 3 ของการประมวลผลแบบพีชชีลอจิก	37
รูปที่ 5.18	ขั้นตอนที่ 4 ของการประมวลผลแบบพีชชีลอจิก	38
รูปที่ 5.19	การอนุมานผลระบบพีชชีแบบแมมคานี	41
บทที่ 6	การออกแบบภาคควบคุม	
รูปที่ 6.1	แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ	42
รูปที่ 6.2	แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมของแขนเพนดูลัม	43
รูปที่ 6.3	แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วเชิงมุมของแขนเพน- ดูลัม	43
รูปที่ 6.4	แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแรงเอาต์พุตที่กระทำกับตัวรถ	43
รูปที่ 6.5	พื้นผิวแสดงกฎเกณฑ์พีชชี	44
บทที่ 7	การจำลองการทำงานของระบบ	
รูปที่ 7.1	บล็อกจำลองการทำงานของอินเวอร์ทเพนดูลัม	46
รูปที่ 7.2	บล็อกอินเวอร์ทเพนดูลัม	47
รูปที่ 7.3	บล็อกไดอะแกรมจำลองการทำงานของระบบ	47
รูปที่ 7.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) จากการใช้ตัวควบคุมเริ่มต้น	48
รูปที่ 7.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) จากการใช้ตัวควบคุมเริ่มต้น	49
รูปที่ 7.6	แสดงการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม	50
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม	51
รูปที่ 7.9 แสดงการปรับฟัซซี่เซตของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท	52
รูปที่ 7.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับฟัซซี่เซตของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท	52
รูปที่ 7.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับฟัซซี่เซตของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท	52
รูปที่ 7.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 80 เเรเดียนต่อวินาที	53
รูปที่ 7.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 60 เเรเดียนต่อวินาที	54
รูปที่ 7.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 50 เเรเดียนต่อวินาที	54
รูปที่ 7.15 แสดงการปรับฟัซซี่เซตของมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท	55
รูปที่ 7.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 50 เเรเดียนต่อวินาที เมื่อมีการปรับฟัซซี่เซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุม	56
รูปที่ 7.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 30 เเรเดียนต่อวินาที เมื่อมีการปรับฟัซซี่เซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุม	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 50 เรเดียนต่อวินาที อัตราขยายที่เอาท์พุทเป็น 1 เท่า	58
รูปที่ 7.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 50 เรเดียนต่อวินาที อัตราขยายที่เอาท์พุทเป็น 1 เท่า	58
รูปที่ 7.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปล่อยให้แขนเพนคูล์มคกอย่างอิสระและแขนเพนคูล์มมีความยาว 20 เซนติเมตร	59
รูปที่ 7.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปล่อยให้แขนเพนคูล์มคกอย่างอิสระและแขนเพนคูล์มมีความยาว 40 เซนติเมตร	60
รูปที่ 7.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ความยาวแขนเพนคูล์มเท่ากับ 20 เซนติเมตร	60
รูปที่ 7.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ความยาวแขนเพนคูล์มเท่ากับ 40 เซนติเมตร	61
รูปที่ 7.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อตัวรถมีน้ำหนัก 0.77 กิโลกรัม	62
รูปที่ 7.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อตัวรถมีน้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	62
รูปที่ 7.26 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมของแขนเพนคูล์มของตัวควบคุมฟuzzyที่จะนำไปใช้งาน	63
รูปที่ 7.27 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนคูล์มของตัวควบคุมฟuzzyที่จะนำไปใช้งาน	63
รูปที่ 7.28 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแรงเอาท์พุทของตัวควบคุมฟuzzyที่จะนำไปใช้งาน	64
รูปที่ 7.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมฟuzzyที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คัทออฟ 60 เรเดียนต่อวินาที	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 60 เเรเดียนต่อวินาที	65
รูปที่ 7.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่รถเคลื่อนที่ (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 60 เเรเดียนต่อวินาที	66
รูปที่ 7.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่รถเคลื่อนที่ (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 60 เเรเดียนต่อวินาที	66
รูปที่ 7.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 30 เเรเดียนต่อวินาที	67
รูปที่ 7.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 30 เเรเดียนต่อวินาที	67
รูปที่ 7.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่รถเคลื่อนที่ (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 30 เเรเดียนต่อวินาที	68
รูปที่ 7.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่รถเคลื่อนที่ (แกนนั่ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งานที่ความถี่คutoff 30 เเรเดียนต่อวินาที	68
<b>บทที่ 8 การสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์</b>	
รูปที่ 8.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบ	69
รูปที่ 8.2 ไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทาง	70
รูปที่ 8.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางเอาต์พุตกับแรงดันที่วัด	71
รูปที่ 8.4 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์	72
รูปที่ 8.5 ใจโรสโคปี่ห้อมูราตะ เบอร์ MA624	73
รูปที่ 8.6 วงจรขยายสัญญาณเอาต์พุตจากใจโรสโคป	73
รูปที่ 8.7 ชุดอุปกรณ์ NI cRIO	74
รูปที่ 8.8 แผนผังโปรแกรมการทำงาน	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.9	แผนผัง โปรแกรมในส่วนสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดคูเลชั่น	76
รูปที่ 8.10	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมที่นำมาใช้งานจริง	77
รูปที่ 8.11	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุมที่นำมาใช้งานจริง	77
รูปที่ 8.12	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความกว้างพัลส์ของสัญญาณพัลส์ วิดมอดคูเลชั่นที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่นำมาใช้งานจริง	77
รูปที่ 8.13	มอเตอร์	78
รูปที่ 8.14	ตัวถังของหุ่นยนต์	79
รูปที่ 8.15	ล้อของหุ่นยนต์	79
รูปที่ 8.16	เสาและค้ำเพนคูล์ม	79
รูปที่ 8.17	รูปตัวรถที่ประกอบสำเร็จ	80
บทที่ 9	การทดลองและผลการทดลอง	
รูปที่ 9.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง	83

## สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง	
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการหมุนของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุท	14
บทที่ 6 การออกแบบภาคควบคุม	
ตารางที่ 6.1 เมทริกซ์เปลี่ยนหมู่พีชชี	44
บทที่ 7 การจำลองการทำงานของระบบ	
ตารางที่ 7.1 ตารางแสดงเมทริกซ์เปลี่ยนหมู่พีชชีของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งาน	64
บทที่ 8 การสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์	
ตารางที่ 8.1 ตารางแสดงเมทริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของตัวควบคุมพีชชีที่นำมาใช้งานจริง	78
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง	
ตารางที่ 9.1 แสดงน้ำหนักของหุ่นยนต์	81
ตารางที่ 9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุทของเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง	82
ตารางที่ 9.3 ผลการตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ในการกลับทิศทาง	84
ตารางที่ 9.4 แสดงเวลาในการตกอย่างอิสระของแขนเพนดูลัมเมื่อมีความแขนค่าต่างๆ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเกี่ยวกับการควบคุมการทรงตัวถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น หุ่นยนต์ เครื่องบิน เรือดำน้ำ เป็นต้น จึงได้ศึกษาการควบคุมการทรงตัวโดยการสร้างหุ่นยนต์สองล้อที่สามารถรักษาสมดุลของตัวเองได้ หลักการควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์นี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการควบคุมการทรงตัวของอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจในการศึกษาค้นคว้าทางด้านระบบควบคุม ซึ่งการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมการทรงตัวนี้จะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทรงตัวการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และแขนกลได้ในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือ และสามารถนำทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์สองล้อให้สามารถทรงตัวอยู่ได้โดยไม่ล้ม

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาณิพนธ์

ศึกษาการควบคุมการทำงานของระบบโดยใช้ทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือ และนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์สองล้อ โดยจะจำลองการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมเมทแลป 7.0 และนำหลักการทำงานของอินเวอร์ทเพนดูลัมมาใช้ในการจำลองการตอบสนองของหุ่นยนต์สองล้อ เพื่อศึกษารูปแบบการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่และสร้างตัวควบคุมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้งานต่อไป

สัญญาณอินพุทที่จะนำไปใช้ในการประมวลผลของตัวควบคุมฟัซซี่นั้นจะพิจารณาสองตัวแปรด้วยกัน อันได้แก่ มุมของแขนเพนดูลัมที่กระทำแกนตั้งฉากกับพื้นโลกและอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม

จากนั้น นำตัวควบคุมที่ได้นี้ไปโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์สองล้อโดยใช้โปรแกรมแลปวิว 8.2 และใช้ชุดอุปกรณ์ NI cRIO เป็นหน่วยประมวลผลกลางซึ่งจะมีอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างตัวหุ่นกับหน่วยประมวลผลในตัว

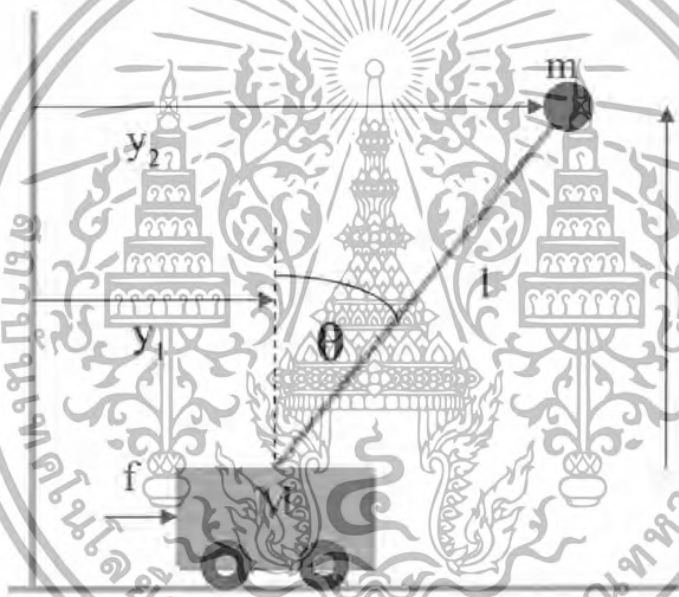
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีอินเวอร์ทเพนดูลัม

#### 2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม (Inverted pendulum System)

ทฤษฎีอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นกรณีศึกษาของวิธีการทรงตัวที่ไม่เป็นระบบเชิงเส้น อีกทั้งยังมีความเกี่ยวข้องเสถียรภาพของระบบ ในระบบดังกล่าวจะประกอบด้วย ก้านถ่วงน้ำหนัก อยู่บนราง ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยสะดวกบนแกนระนาบ



รูปที่ 2.1 แสดงแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนรถและองค์ประกอบที่จะต้องใช้พิจารณา

สามารถอธิบายทฤษฎีพลังงานรวมของแรงที่เกิดขึ้นบนรถที่ใช้เลี้ยงก้านถ่วงน้ำหนัก เมื่อแตกส่วนประกอบย่อยของแรงทั้งหมดแล้วจะได้ดังรูปที่ 2.1

เมื่อ  $M$  คือ มวลของรถ

$m$  คือ มวลก้านถ่วงน้ำหนัก

$\theta$  คือ มุมอันเนื่องมาจากแรง  $F$

$f$  คือ แรงที่ทำให้เกิดองค์ประกอบต่าง ประกอบด้วย คือ มุมของก้านถ่วงน้ำหนัก

และ ระยะทาง  $x$  ที่รถเคลื่อนที่ไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า จากรูปที่ 2.1 เมื่อรวมแรง และคิดพลังงานรวมที่ตัวรถแล้วจะได้พลังงานของแต่ละส่วน ดังนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

ดังนั้น พลังงานรวมคือ

$$T = T_1 + T_2 \quad (2.7)$$

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

ให้พลังงานศักย์ (V) ของระบบจะเก็บไว้ที่แกนเหล็กเพนดูลัม ดังนั้น

$$V = mgl z_1 = mgl \cos \theta \quad (2.8)$$

จากสมการของลากรองจ์ (Lagrange's Equation) คือ

$$L = T - V \quad (2.9)$$

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

แทนค่าตามสมการ 2.4 และ 2.6 ได้ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} [M + m] (\dot{y}_1)^2 + mly_1 \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} ml^2 \dot{\theta}^2 - mgl \cos \theta \quad (2.10)$$

สำหรับตัวแปรสถานะ (State Space Variable) ของระบบมีสองตัว คือ  $y_1$  และ  $\theta$  ดังนั้นจะ

ได้ สมการของลากรองจ์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

สมการที่ 2.17 และ สมการที่ 2.18 สามารถที่จะประมาณให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ โดยการประมาณให้ มุม  $\theta$  มีค่าเข้าใกล้ 0 มาก ๆ คั้งนั้น จะได้  $\cos \theta = 1$  และ  $\sin \theta = 0$  นั่นคือประมาณให้แกนเหล็กของเพนดูลัมมีการเปลี่ยนแปลงมุนน้อยมาก 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

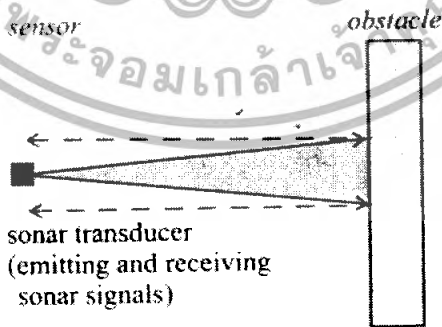
## ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางและไจโรสโคป

### 3.1 เซนเซอร์วัดระยะทาง

เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดระยะทางนั้นเป็นที่นิยมในการสร้างหุ่นยนต์ โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับวัตถุและสิ่งกีดขวางต่างๆ ได้ เซนเซอร์วัดระยะทางมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น

#### 3.1.1 โซนาเซนเซอร์

เซนเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กัน ในอดีตเนื่องจากมีขอบเขตการส่งสัญญาณเป็นรูปกรวย ทำให้สามารถตรวจจับวัตถุและสิ่งกีดขวางได้ในบริเวณกว้างและครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ การทำงานของโซนาเซนเซอร์จะอาศัยหลักการการส่งคลื่นอัลตราโซนิคด้วยความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 250 กิโลเฮิร์ตซ์ออกไป ถ้ามีวัตถุหรือสิ่งกีดขวางอยู่ระหว่างทางเดินของคลื่นจะทำให้คลื่นสะท้อนกลับ เซนเซอร์จะจับเวลาที่ใช้ตั้งแต่ส่งจนได้รับสัญญาณสะท้อนกลับนี้ โดยเวลาที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสองเท่าของระยะทางของสิ่งกีดขวางที่ใกล้ที่สุดที่อยู่ในขอบเขตการตรวจจับสัญญาณ แต่ถ้าหากไม่มีสะท้อนกลับมาในเวลาที่กำหนดก็แสดงว่าไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ ภายในระยะทางที่เซนเซอร์สามารถตรวจจับได้



รูปที่ 3.1 การทำงานของโซนาเซนเซอร์

เซนเซอร์ชนิดนี้จะมีข้อเสียคือ การที่ขอบเขตในการตรวจจับกว้าง ทำให้อาจเกิดการผิดพลาดในการตรวจจับวัตถุได้ในกรณีที่ใช้เซนเซอร์หลายๆ ตัวตรวจจับในบริเวณใกล้เคียงกัน อาจเกิดการเหลื่อมล้ำของการรับส่งสัญญาณและรับสัญญาณจากเซนเซอร์ตัวอื่นแทนได้

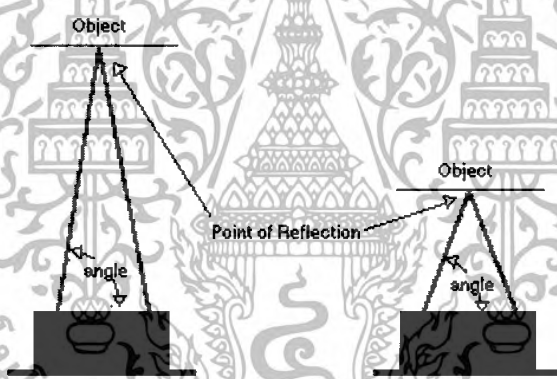
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 เลเซอร์เซนเซอร์

ในปัจจุบันโซนาเซนเซอร์ได้ถูกแทนที่ด้วยเลเซอร์เซนเซอร์และอินฟราเรดเซนเซอร์ สำหรับเลเซอร์เซนเซอร์นั้นสามารถตรวจจับวัตถุและให้ข้อมูลออกมาเป็น 2 มิติ หรือ 3 มิติเลยก็ได้ แต่มีข้อเสียคือ เซนเซอร์ชนิดนี้ยังมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก และมีราคาแพง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสร้างหุ่นยนต์ขนาดเล็ก จึงทำให้อินฟราเรดเซนเซอร์เป็นที่นิยมมากกว่า

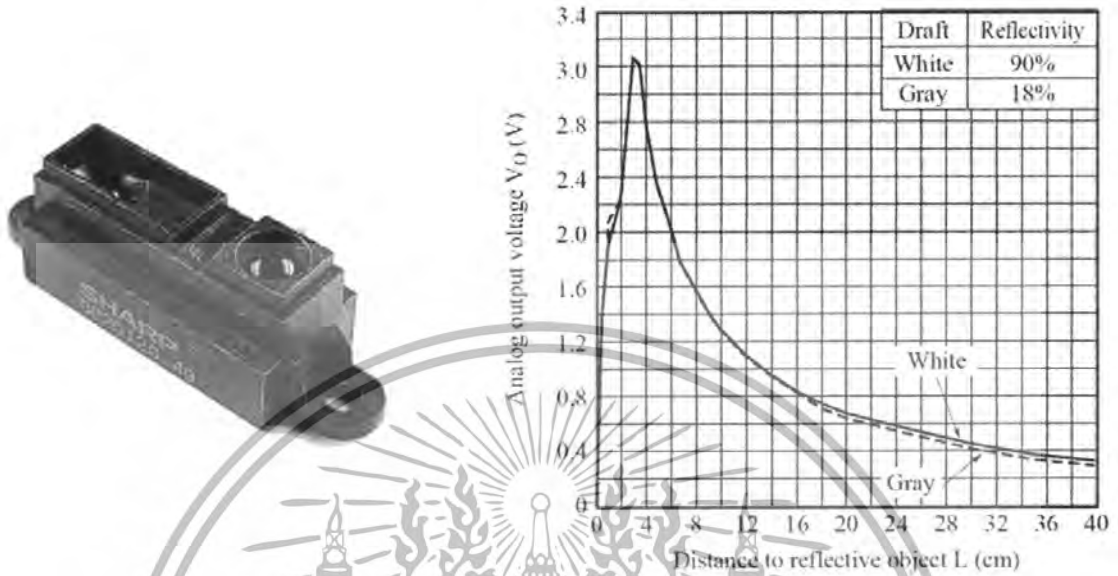
### 3.1.3 อินฟราเรดเซนเซอร์

โครงสร้างของเซนเซอร์ชนิดนี้จะประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด(pulsed infrared LED) และตัวรับแสง(detection array) โดยไดโอดจะปล่อยสัญญาณอินฟราเรดด้วยความถี่ประมาณ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อคลื่นกระทบวัตถุจะสะท้อนกลับโดยทำมุมสะท้อนสอดคล้องกับระยะทางที่ตกกระทบทำให้เซนเซอร์สามารถตรวจจับระยะทางได้



รูปที่ 3.2 การทำงานของอินฟราเรดเซนเซอร์

ตัวอย่างอินฟราเรดเซนเซอร์ที่นิยมใช้งานได้แก่ Sharp GP2D12 ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นอนาล็อก และ Sharp GP2D02 ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นดิจิตอล การทำงานของเซนเซอร์ชนิดอนาล็อกจะให้เอาต์พุตที่มีระดับแรงดันขึ้นอยู่กักระยะทางที่วัด ลักษณะตัวเซนเซอร์และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ส่วนเซนเซอร์ชนิดดิจิตอลจะให้เอาต์พุตเป็นข้อมูล 8 บิต



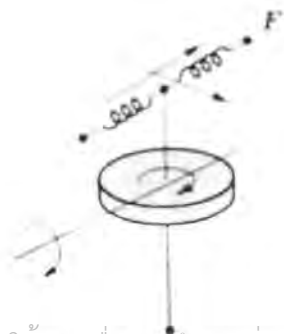
รูปที่ 3.3 ลักษณะของเซนเซอร์ Sharp GP2D12 และเซนเซอร์ไดอะแกรม

### 3.2 ไซโรสโคป

ไซโรสโคปเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราเร็วเชิงมุม โดยอาศัยปรากฏการณ์ของแรงคอริออลิสซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกกระทำด้วยแรงให้เกิดการหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ไซโรสโคปที่ใช้งานกันทั่วไปแบ่งเป็นสามประเภทด้วยกัน ได้แก่

#### 3.2.1 ไซโรสโคปเชิงกล

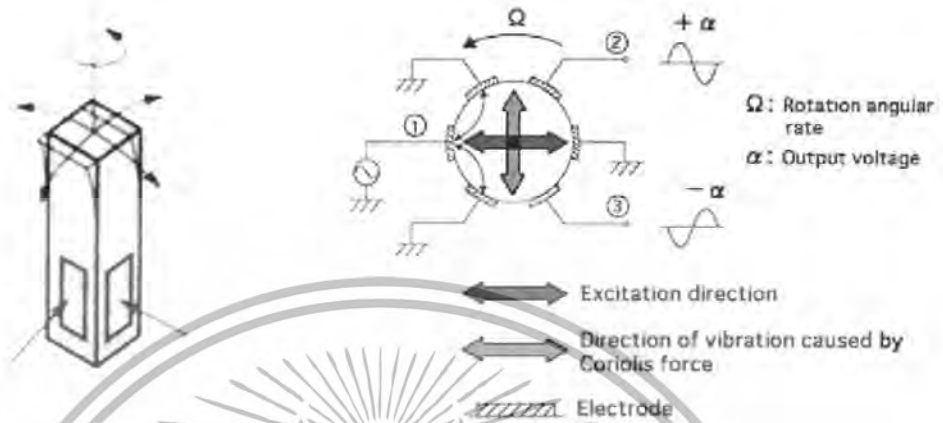
การทำงานของไซโรสโคปเชิงกลจะมีหลักการคล้ายกับการหมุนของลูกข่าง เมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดการหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมจะทำให้เกิดแรงคอริออลิสขึ้น ซึ่งจะทำให้ความยาวของสปริงเปลี่ยนแปลงเป็นอัตราส่วนกับอัตราเร็วเชิงมุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.4 ไซโรสโคปเชิงกล

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ไจโรสโคปแบบเซมิคอนดักเตอร์



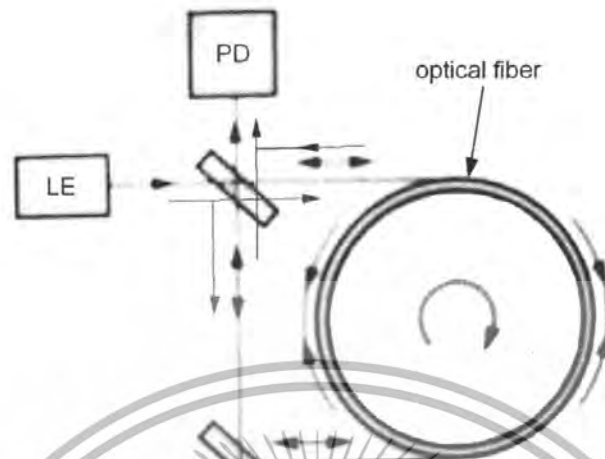
รูปที่ 3.5 ไจโรสโคปแบบเซมิคอนดักเตอร์

ไจโรสโคปประเภทนี้จะประกอบด้วยแผ่นพีโซอิเล็กทริกสองคู่ เมื่อป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับแผ่นพีโซอิเล็กทริกคู่หนึ่ง จะทำให้วัตถุถูกเหวี่ยงในทิศทางที่จ่ายแรงดันให้กับวัตถุ จากนั้นแผ่นพีโซอิเล็กทริกอีกคู่จะตรวจจับการเหวี่ยงได้จากแรงคอริโอลิสที่เกิดขึ้น แล้วจะสร้างสัญญาณแรงดันเอาท์พุทออกมาเป็นสัดส่วนกับแรงคอริโอลิสที่เกิดขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.5

### 3.2.3 ไจโรสโคปแบบใยแก้วนำแสง

หลักการทำงานของไจโรสโคปประเภทนี้คือ จะมีตัวจ่ายแสงเลเซอร์ (Light emitter:LE) เข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสง ลำแสงจะวิ่งไปตามเส้นใยแก้ว ในขณะที่เดียวกันแสงบางส่วนที่ออกมาจากตัวจ่ายจะถูกสะท้อนด้วยแผ่นกระจกและวิ่งเข้าสู่ใยแก้วนำแสง โดยทิศทางในการวิ่งจะสวนทางกับอีกลำแสงที่ไม่ถูกกระจกสะท้อน ในสภาวะที่เซนเซอร์อยู่นิ่งกับที่ลำแสงทั้งสองจะวิ่งเข้าสู่ตัวตรวจจับแสง(Photo Detector:PD)ในเวลาเดียวกัน แต่ถ้าเซนเซอร์ถูกหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ลำแสงที่วิ่งทวนเข็มนาฬิกาจะวิ่งเข้าสู่ตัวตรวจจับแสงก่อนอีกลำแสงหนึ่ง ในทางกลับกันถ้าหากเซนเซอร์ถูกหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ลำแสงที่หมุนตามเข็มนาฬิกาจะวิ่งเข้าสู่ตัวตรวจจับแสงก่อนอีกลำแสงซึ่งหมุนทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ไจโรสโคปแบบใยแก้วนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

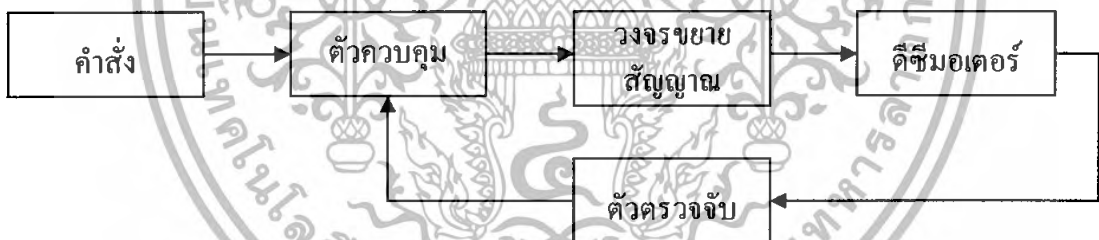
## บทที่ 4

### ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการทำงานและการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

#### 4.1 มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) เป็นเครื่องกลทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลผ่านทางแกนหมุนหรือเพลลา ในการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงนั้นจะใช้กระแสไฟตรงจ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้า หรือขดลวดผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า (motor armature) ภายใน สำหรับมอเตอร์กระแสตรงที่นิยมใช้งานทั่วไปนั้นจะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร และที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟกระแสตรงเข้าไปที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) สนามแม่เหล็กทั้งสองแหล่งกระทำต่อกันจะทำให้เกิดแรงบิดที่โรเตอร์ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนนั่นเอง

สำหรับแรงบิดของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าหากเส้นแรงแม่เหล็กมากจะทำให้มีแรงบิดสูง มอเตอร์กระแสตรงส่วนใหญ่ถ้าหมุนด้วยความเร็วสูงจะมีแรงบิดต่ำ ถ้าหมุนด้วยความเร็วต่ำจะมีแรงบิดสูง ระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐานสามารถแสดงได้ดังไดอะแกรมรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมระบบควบคุมมอเตอร์พื้นฐาน

**คำสั่ง (Command)** จะเป็นตัวสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์

**ตัวควบคุม (Controller)** เป็นตัวกำเนิดสัญญาณควบคุมที่จ่ายให้กับมอเตอร์

**วงจรมายขยายสัญญาณ (Amplifier)** จะขยายสัญญาณจากตัวขยายให้แรงขึ้นเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์แต่ละรุ่น

**ตัวตรวจจับ (Encoder)** จะประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์เพื่อตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์แล้วป้อนกลับมาให้ตัวควบคุมอีกทีหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ แรงบิดของเพลลาของดีซีมอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ กระแสที่ไหลในขดลวดจะสร้างสนามที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก  $\phi$  และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ  $r$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

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

เมื่อ  $T$  คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร

$\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

$I$  คือ กระแส มีหน่วยเป็นแอมแปร์

$K$  คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลคูณของเส้นแม่เหล็กและกระแสเมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวมันเอง แรงดันนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และต้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันย้อนกลับนี้กับความเร็วของเพลลามอเตอร์คือ

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

เมื่อ  $E$  คือ แรงดันย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็นโวลต์

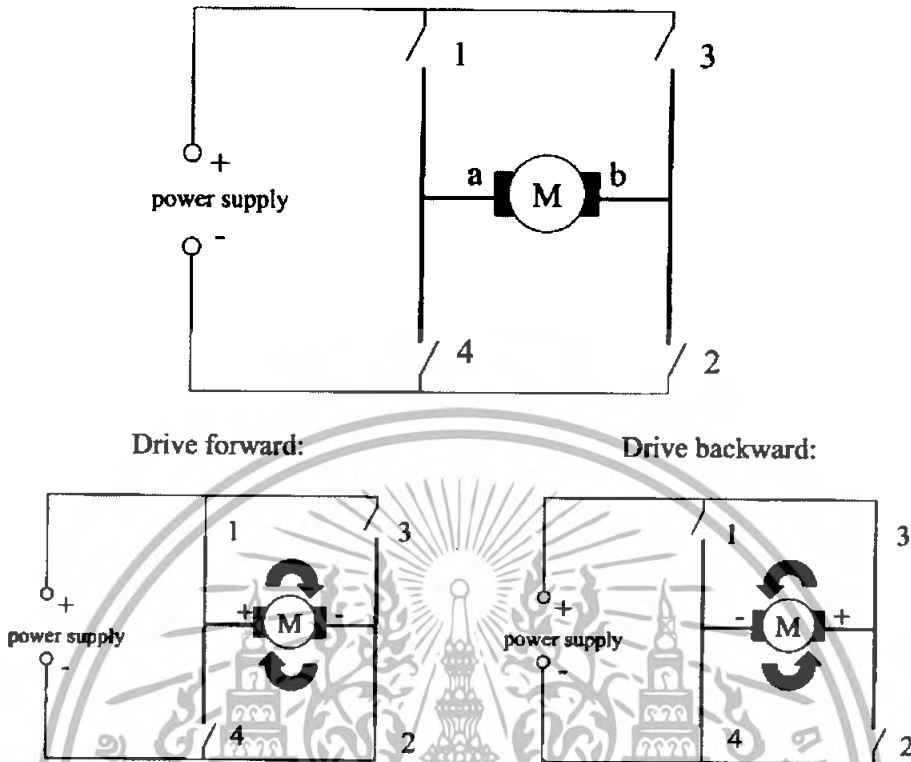
$\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์

$\omega$  คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

#### 4.1.2 การควบคุมทิศทาง การหมุนของมอเตอร์กระแสตรง

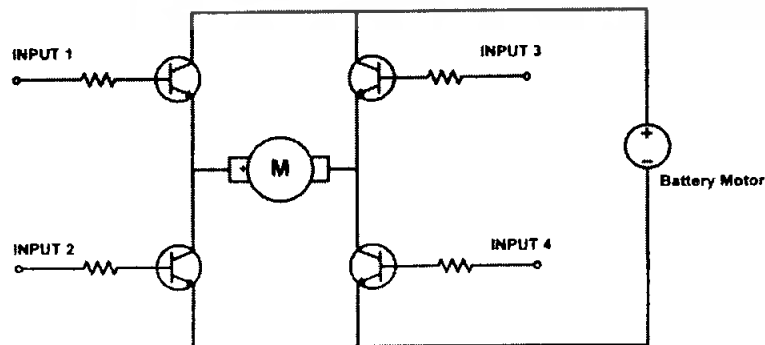
การควบคุมทิศทาง การหมุนของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการควบคุมทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ อาจทำได้โดยใช้วงจรเอชบริดจ์ (H-Bridge) เข้ากับมอเตอร์ ซึ่งมีหลักการทำงานดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรเฮชบริดและลักษณะการทำงาน

หลักการการทำงานคือ ถ้าสวิตช์หมายเลข 1 (SW1) และสวิตช์หมายเลข 4 (SW 4) ทำงานพร้อมกันจะทำให้มอเตอร์หมุน ในทางกลับกันถ้าทำให้สวิตช์หมายเลข 2 (SW2) และสวิตช์หมายเลข 3 (SW3) ทำงานพร้อมกันมอเตอร์จะกลับทางหมุน ถ้าต้องการให้มอเตอร์หยุดหมุนก็กดสวิตช์หมายเลข 1 พร้อมกับสวิตช์หมายเลข 3 หรือกดสวิตช์หมายเลข 2 พร้อมกับสวิตช์หมายเลข 4 หรือไม่กดสวิตช์อะไรเลยก็ได้ การนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็นวงจรเฮชบริดนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



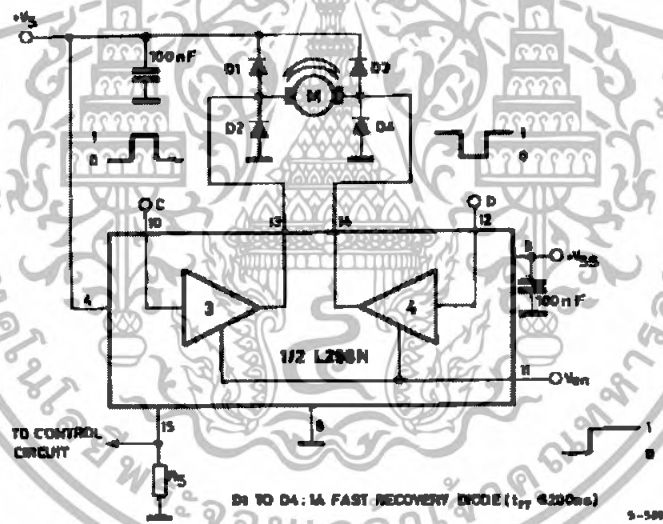
รูปที่ 4.3 การนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็นวงจรเฮชบริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการหมุนของมอเตอร์นั้นก็ใช้หลักการเดียวกัน แต่เราควบคุมการเปิด-ปิดของทรานซิสเตอร์โดยควบคุมการไหลของกระแส ถ้าให้กระแสไหลเข้าอินพุท 1 (INPUT 1) พร้อมกับอินพุท 4 (INPUT 4) จะทำให้มอเตอร์หมุนและเมื่อต้องการกลับทางหมุนก็ให้หยุดจ่ายกระแสที่อินพุท 1 และอินพุท 4 แล้วจ่ายกระแสเข้าที่อินพุท 2 (INPUT 2) และอินพุท 3 (INPUT 3) แทน

#### 4.1.3 วงจรขับมอเตอร์โดยใช้ไอซีไครเวอร์

ไอซีไครเวอร์ที่นิยมนำมาควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์คือ ไอซีไครเวอร์เบอร์ L298 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถใช้ขับมอเตอร์ได้ 2 ตัวในเวลาเดียวกัน มอเตอร์แต่ละตัวใช้แรงดันไม่เกิน 40 โวลต์ กระแสไม่เกินประมาณ 4 แอมป์ โดยไอซีไครเวอร์เบอร์นี้ใช้หลักการเอชบริดในการขับมอเตอร์



รูปที่ 4.4 วงจรขับมอเตอร์ด้วยไอซีไครเวอร์เบอร์ L298

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าการจ่ายแรงดันให้แก่ไอซีขับมอเตอร์อยู่ใน 2 ลักษณะ คือ

1. แรงดันที่จ่ายให้กับไอซีเพื่อให้ไอซีนั่นทำงานได้แก่  $V_s$  เป็นแรงดันที่จ่ายเข้ามาเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์โดยจะมีค่าตั้งแต่ 2.5 ถึง 46 โวลต์ และ  $V_{ss}$  เป็นแรงดันที่จ่ายเข้ามาเพื่อเลี้ยงไอซีให้ทำงาน โดยมีค่าตั้งแต่ 4.5 ถึง 7 โวลต์

2. แรงดันที่จ่ายให้กับไอซีเพื่อควบคุมการทำงานของไอซี ซึ่งจะมีอยู่ 3 จุด คือ จุดที่ C D และ  $V_{en}$  เป็นส่วนที่รับสัญญาณลอจิก “0” กับ ลอจิก “1” เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์

เอกสารกระแสตรงซึ่งจะได้ผลดังตารางข้างงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

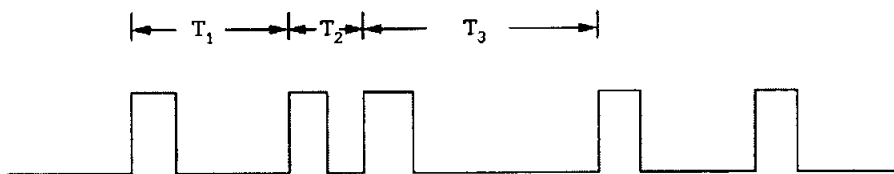
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการหมุนของมอเตอร์เมื่อเปลี่ยนแรงดันอินพุท

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

#### 4.1.4 การควบคุมความเร็วมอเตอร์

โดยทั่วไปแล้วเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์กระแสตรงจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงสุดที่สามารถหมุนได้ด้วยแรงดันค่านั้น การควบคุมความเร็วจะสามารถทำได้โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ แต่การทำงานแบบนี้จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้ามืดร้อนเกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วงๆ ให้กับมอเตอร์แทน ถ้าหากช่วงการจ่ายแรงดันและหยุดจ่ายแรงดันแต่ต่างกันไปก็จะทำให้ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ต่างกันไปด้วย การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้มีการใช้งานอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบมอดคูเลชันทางความถี่พัลส์ (pulse-frequency modulation : PFM) และแบบมอดคูเลชันทางความกว้างพัลส์ (pulse-width modulation : PWM)

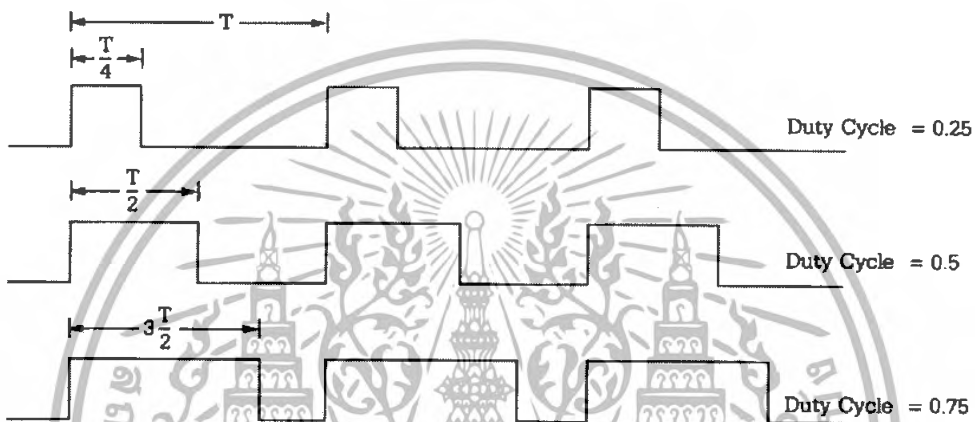
1. แบบมอดคูเลชันทางความถี่พัลส์ การทำงานแบบนี้จะควบคุมการจ่ายแรงดันและหยุดจ่ายแรงดันเพื่อเปิดปิดมอเตอร์เป็นช่วงๆ ดังรูปที่ 4.5 การทำงานแบบนี้จะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับมีค่าแตกต่างกันไป ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์จะขึ้นกับอัตราการปิดเปิดมอเตอร์นี้



รูปที่ 4.5 สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้วยวิธี PMF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

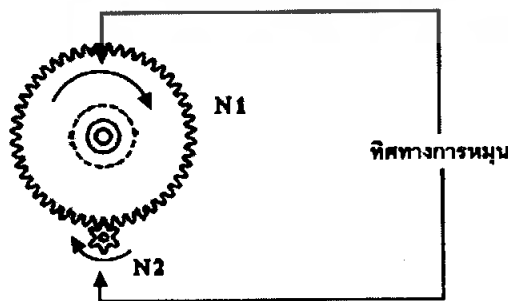
2. แบบมอดคูเลชันทางความกว้างพัลส์ การควบคุมมอเตอร์ในแบบ PFM ค่าความถี่ของสัญญาณควบคุมจะไม่แน่นอน แต่การควบคุมแบบ PWM นี้จะใช้ความถี่ในการควบคุมที่คงที่ แต่จะปรับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยวิธีการปรับค่าความถี่ไซเคิล (Duty cycle) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แต่วิธีนี้จะใช้ความถี่สูงมากๆ ไม่ได้



รูปที่ 4.6 สัญญาณควบคุมมอเตอร์แบบ PWM

**4.2 กล่องเฟือง**

กล่องเฟือง(gearbox) เป็นอุปกรณ์ในการทดรอบการหมุนเพื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุน และสามารถเปลี่ยนแรงบิดในการหมุนได้ โดยในกล่องเฟืองจะประกอบด้วยเฟืองจำนวนหลายตัวต่อกันเป็นระบบ



รูปที่ 4.7 ระบบการคัปปลิงของเกียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- 1) จำนวนซี่ฟันของเกียร์จะเป็นสัดส่วนกับรัศมี และ ของเกียร์ นั่นคือ

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

- 2) ระยะทางการเคลื่อนที่ไปของเกียร์แต่ละตัวจะมีค่าเท่ากันดังนั้น

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

- 3) แรงงานที่ได้จากเกียร์ตัวหนึ่งจะเท่ากับแรงงานที่ได้จากเกียร์อีกตัวหนึ่ง เนื่องจากสมมติให้ว่าไม่มีการสูญเสียแรงงาน ดังนั้น

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

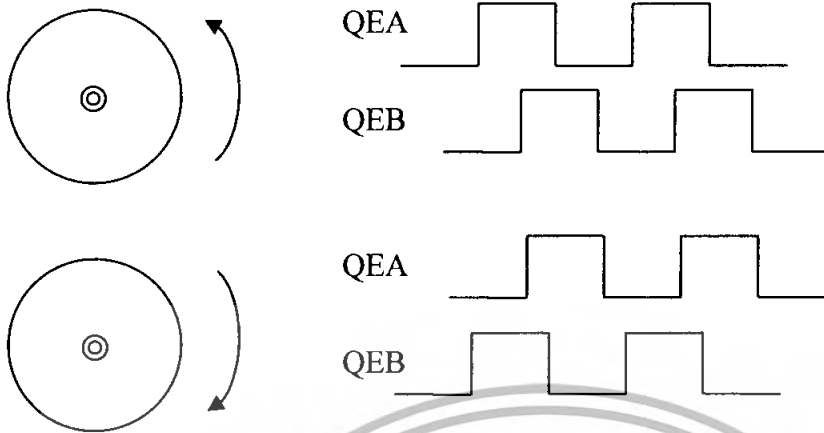
ถ้าความเร็วเชิงมุมของเกียร์ทั้งสองคือ  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (3.6)$$

#### 4.3 เซ็นเซอร์และเอ็นโค้ดเดอร์ในระบบการควบคุมมอเตอร์

เซ็นเซอร์และเอ็นโค้ดเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งในระบบคอนโทรล ซึ่งจะใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณกลับเพื่อควบคุมตัวแปรในระบบ เซ็นเซอร์และเอ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้กันมากในระบบควบคุมนั้นได้แก่ แมกนิติกพิกอัฟทรานสดิวเซอร์ ออปติคคอลลเอ็นโค้ดเดอร์ รีโซลเวอร์ โปเทนทิโอมิเตอร์ เป็นต้น ซึ่งในโครงการนี้จะใช้ ควอดราเจอร์ เอ็นโค้ดเดอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแบบหนึ่งที่ใช้ในการระบุตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบควบคุม วงจรเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์จะให้ผลการทำงานเป็นสัญญาณสองเส้น คือ สัญญาณเฟส A และ B โดยสัญญาณทั้งสองมีเฟสต่างกัน 90 องศา แสดงการทำงานดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการทำงานพื้นฐานของตัวเข้ารหัสแบบควอดราราเจอร์

จากรูปที่ 4.8 เมื่อเราทำการวัดโดยใช้ฮอสซิโลสโคปจับสัญญาณ A และ B พร้อมกันโดยเอ็นโค้ดเดอร์หมุนในทิศทางเดียวด้วยความเร็วคงที่ สังเกตตามลักษณะของสัญญาณ A และ B จะเห็นว่า ประกอบด้วยสองบิตที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ละบิตเท่านั้น ลักษณะแบบนี้เรียกว่ารหัสเกรย์ กล่าวคือการนับจะไม่ใช่ 00-01-10-11 เหมือนกับเลขไบนารี แต่จะเป็น 00-01-11-10 โดยให้ A คือบิตบน และ B คือบิตล่าง

- ในทิศตามเข็มนาฬิกา Clock Wise (CW)

เมื่อหมุนเอ็นโค้ดเดอร์สัญญาณ A และ B จะเป็น 00-10-11-01-00-10-11-... คล้ายกับนับเลขฐานสิบจาก 0 ถึง 3 เป็น 0-1-2-3-0-1-2-3-...

- ในทิศทวนเข็มนาฬิกา Counter Clock Wise (CCW)

เมื่อหมุนเอ็นโค้ดเดอร์สัญญาณ A และ B จะเป็น 00-01-11-10-00-01-11-... คล้ายกับนับเลขฐานสิบจาก 3 ถึง 0 เป็น 0-3-2-1-0-3-2-1-...

- เมื่อมีการกลับทิศทาง

การหมุนกลับทางกลับไปกลับมา ก็คือการสลับลำดับการนับเป็น 0-1-2-3-0-1-2-1-0-3-2-1-0-1-2-3-0 จะเห็นว่าช่วงแรกคือนับขึ้นจนถึงตัวหนาชุดแรก (2-1) เป็นการนับลงจากตัวอย่างเลขฐานสิบนี้ถ้าเป็นรหัสเกรย์ จะได้เป็น 00-10-11-01-00-10-11-10-00-01-11-10-00-10-11-01-00 ตามลำดับ

ซึ่งโครงสร้างของตัวเข้ารหัสแบบนี้ ประกอบด้วย “จานเข้ารหัส” (Encoder wheel) และ “อุปกรณ์ตรวจจับ” (detector) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งแบบตรวจจับแสง และแบบตรวจจับสนามแม่เหล็ก ในกรณีตรวจจับแสงนั้นยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบสะท้อนแสงและแบบตัดแสง แต่ถึง

ที่สำคัญหลักๆ นั้นคืองานเข้ารหัส โดยปกติงานเข้ารหัสจะต่อกับแกนของมอเตอร์เพื่อให้สามารถหมุนไปตัดลำแสงหรือสะท้อนกับแสงของตัวตรวจจับ ทำให้ได้สัญญาณพัลส์ออกมา

สิ่งที่เป็นข้อกำหนดหลักของการเข้ารหัสแบบควอดราเจอร์นั้น ก็คือ เฟสของสัญญาณตรวจจับทั้งสองต้องต่างกัน 90 องศา นั้นหมายความว่า ที่จานรหัสต้องมีการกำหนดแถบสะท้อนแสงหรือขอบตัดแสงที่ทำให้จังหวะการตรวจจับมีเฟสต่างกัน 90 องศาด้วย

ถ้าหากทราบถึงขนาดของล้อ ก็จะทำให้สามารถวัดระยะทาง ความเร็ว ตลอดจนทิศทางการหมุนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

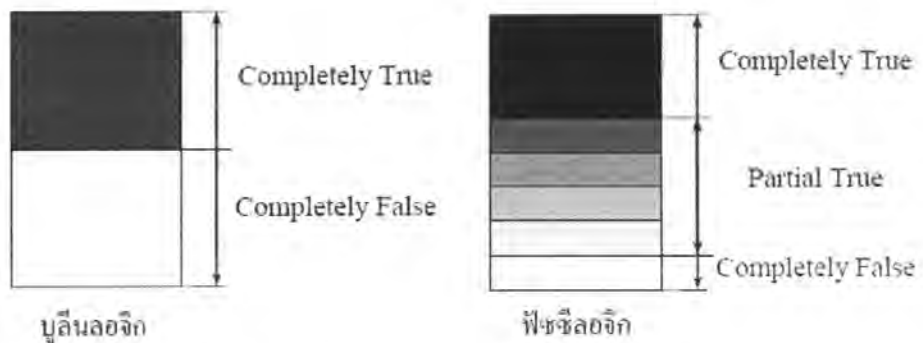
### ทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

#### 5.1 บทนำ

ทฤษฎีฟัซซี่เซตถูกนำเสนอโดยซีดาร์ (Zedah) ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งกล่าวถึงความไม่แน่นอน และความไม่ชัดเจนของนิยามสิ่งของหนึ่งๆ เนื่องจากความไม่ชัดเจนดังกล่าวซีดาร์จึงนิยามสิ่งของเหล่านั้นในรูปของฟัซซี่เซต โดยฟัซซี่เซตก็จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งจะทำการแบ่งระดับความเป็นสมาชิกให้มีความอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 จากนั้นฟัซซี่เซตต่างๆ ก็จะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์และแปลความหมายออกมาอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากฟัซซี่เซตนั้นจะกล่าวถึงความไม่แน่นอนและไม่ชัดเจน จึงได้มีการนำทฤษฎีฟัซซี่เซตมาใช้ในการควบคุมแบบดั้งเดิมซึ่งสามารถควบคุมได้เฉพาะในกรณีที่มีค่าพารามิเตอร์ของระบบอย่างถูกต้องและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำงาน

#### 5.2 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับฟัซซี่ลอจิก

ตรรกะแบบฟัซซี่ (Fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ และมีการใช้หลักเหตุผลและผลที่คล้ายกับการเลียนแบบวิถีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซี่ลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงแท้ (Boolean logic) โดยเป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (partial true) ซึ่งค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (completely true) กับเท็จ (completely false) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตรรกะแบบจริงแท้ (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟัซซี่ (ฟัซซี่ลอจิก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยหน่วยงานราชการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นฟัซซี (fuzziness) มีชื่อเรียกว่า มัลติวาเลนซ์ (multivalent) ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่า 2 ค่า และแตกต่างกับไบวาเลนซ์ (bivalent) ที่มีความเป็นสมาชิกเพียง 2 ค่าเท่านั้น ฟัซซีเซต (Fuzzy set) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อถึง “ความไม่แน่นอน (uncertainty)” ไม่ใช่เป็นเพียง 2 กรณี ตัวอย่างเช่น หากกำหนดว่าคนที่อ้วนคือคนที่มีน้ำหนักมากกว่า 75 กิโลกรัม คอมพิวเตอร์จะให้ผลว่าคนที่มีน้ำหนัก 74.50 กิโลกรัมไม่จัดเป็นคนที่อ้วน ทฤษฎีของฟัซซีเซตจะใช้ลักษณะความหมายตัวแปร (linguistic) มากกว่าปริมาณ (quantitative) ของตัวแปร เช่น การหาความหมายของ “คนที่อ้วน” เราไม่สามารถนิยามค่าความอ้วนที่ตรงกันและระบุเป็นหนึ่งเดียว (identical) สำหรับคนที่อ้วนได้ เช่น นาย ก. จะให้ความหมายของ “คนอ้วน” หมายถึงคนที่มีน้ำหนักมากกว่า 70 กิโลกรัม นาย ข. อาจให้ความหมายว่าคนอ้วนคือคนที่มีน้ำหนักมากกว่า 75 กิโลกรัม ซึ่งทั้งสองคนต่างแสดงความหมายของคำว่าคนที่อ้วนโดยเปรียบเทียบในมุมมองของตนเอง ในการทำงานในมุมมองแบบฐานสอง (Binary sense) จะได้ผลเป็น “ใช่” หรือ “ไม่ใช่” แต่จะเห็นว่าบุคคลนี้เป็นคนอ้วนน้ำหนักเกือบจะ 75 กิโลกรัม และถึงแม้ว่าบุคคลนี้จะมีน้ำหนัก 75 กิโลกรัม แต่หากพิจารณาจากกลุ่มคนที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 90 กิโลกรัม บุคคลนี้ก็ยังไม่จัดอยู่ในกลุ่มคนที่อ้วน แสดงให้เห็นว่า ความอ้วนไม่ได้มีลักษณะความไม่แน่นอนแบบสุ่ม จากกรณีศึกษาปัญหาต่างๆ ไปจะแสดงถึงรูปแบบลักษณะการกระจายของปัญหา

รูปที่ 5.2 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการตัดสินใจของปัญหาทั้งหมดมีเพียงส่วนน้อยที่เป็นสิ่งที่แน่นอน (certainty) ที่เหลือคือสิ่งที่ไม่แน่นอนซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนที่มีลักษณะแบบสุ่ม และความไม่แน่นอนที่มีลักษณะเป็นฟัซซีหรือคลุมเครือ ซึ่งมีมากกว่าร้อยละ 40 เพราะปัญหาส่วนมากเกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของมนุษย์ ซึ่งจะตัดสินใจตามพื้นฐานความคิดและมุมมองของคนเป็นหลัก



รูปที่ 5.2 ความไม่แน่นอน (Uncertainty)

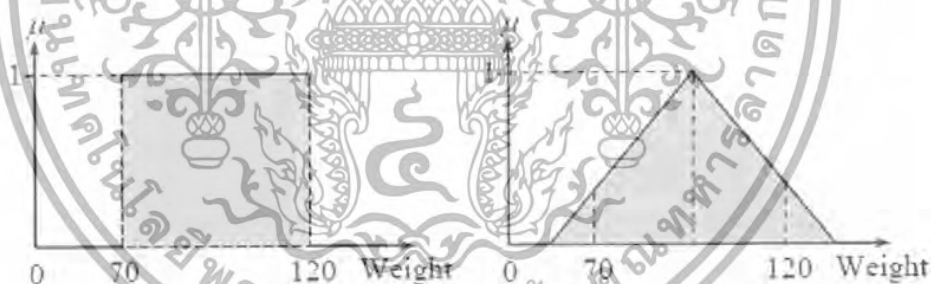
ฟัซซีจะสร้างวิธีทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความคลุมเครือ ความไม่แน่นอนของระบบที่เกี่ยวข้องกับความคลุมเครือของมนุษย์ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบต่างๆ ในความไม่แน่นอนเพื่อเฝ้าระวังการเกิดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดเงื่อนไขในการตัดสินใจ (Decision making) โดยอาศัยเซตของความไม่เป็นสมาชิก (Set membership)

### 5.3 ฟัซซีเซต

ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัซซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ในโลกแห่งความเป็นจริงเซตไม่ใช่มีเฉพาะเซตแบบฉบับเท่านั้นแต่จะมีเซตแบบฟัซซีด้วย ฟัซซีเซตจะมีขอบเขตแบบฟัซซีไม่ใช่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากขาวเป็นดำ ตัวอย่างเช่น เซตของกลุ่มงานที่มีความสุข จะเห็นได้ว่าสมาชิกในเซตนี้จะไม่มีเฉพาะกลุ่มงานที่มีความสุขระดับเดียวกันหมด บางกลุ่มมีความสุขมาก บางกลุ่มมีความสุขน้อย แตกต่างกันไป การใช้เซตแบบดั้งเดิมจึงไม่เหมาะสม

ยกตัวอย่างเกี่ยวกับความอ้วน นิยามคำว่าคนอ้วนในเซตวันนี้ อาจกำหนดให้คนอ้วนเป็นคนที่น้ำหนักตั้งแต่ 70 ถึง 120 กิโลกรัม แต่นิยามแบบฟัซซีเซตอาจกำหนดเป็นคนที่มีความอ้วนประมาณ 80 กิโลกรัม ซึ่งเป็นถาวรให้นิยามที่ไม่แสดงถึงขอบเขตที่แน่นอน



รูปที่ 5.3 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของเซตทวินัยและเซตแบบฟัซซี

นิยามของฟัซซีเซต กำหนดให้  $X$  เป็นเซตที่ไม่ว่าง ฟัซซีเซต  $A$  สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (5.1)$$

เมื่อ  $\mu_A(x)$  สามารถตีความเป็นค่าของความเป็นสมาชิกภาพของตัวประกอบ  $x$  ในฟัซซีเซต  $A$  สำหรับแต่ละ (อ่านว่า “ $x$  เป็นสมาชิกของ  $X$ ”) ฟัซซีเซต สามารถเขียนเป็นเซตของคู่ลำดับ (tuples) เอกสารนี้จึงเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

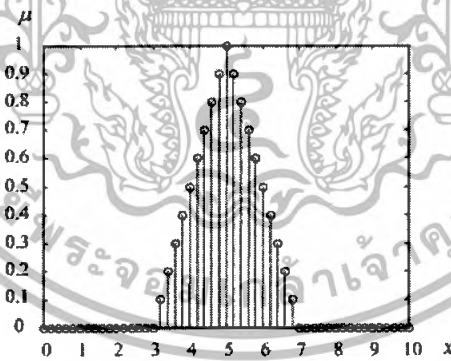
$$\underline{A} = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (5.2)$$

เมื่อ  $\underline{A}$  หมายถึงฟัซซีเซต  $\underline{A}$ ,  $x$  หมายถึงสมาชิกของเซต (set membership) และ  $\mu_A(x)$  หมายถึงฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) ซึ่งบางครั้งอาจแทนได้ด้วย  $\underline{A}(x)$  โดย  $X$  หมายถึงเอกภพสัมพัทธ์

ถ้า  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  เป็นเซตจำกัด และ  $\underline{A}$  เป็นฟัซซีเซตใน  $X$  ซึ่งเป็นชนิดวิฤต (discrete) และจำกัด สัญลักษณ์ (notation) ของฟัซซีเซต เขียนได้เป็น

$$\underline{A} = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\} = \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \right\} \quad (5.3)$$

เมื่อพจน์  $\mu_A(x_i)/x_i, i=1,2,3,\dots,n$  หมายถึงค่าความเป็นสมาชิก  $\mu_A(x_i)$  ของ  $(x_i)$  ในเซต  $\underline{A}$  และ เครื่องหมาย “+” หมายถึงยูเนียน (Union)

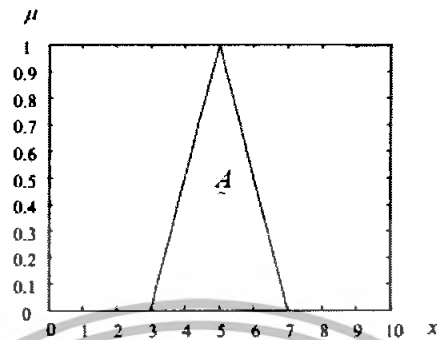


รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซีแบบวิฤต A

ถ้าเอกภพสัมพัทธ์  $X$  เป็นต่อเนื่อง (continuous) สัญลักษณ์ (notation) ของฟัซซีเซต  $\underline{A}$  เขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\}$$



รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟuzzy แบบต่อเนื่อง A

ทฤษฎีฟuzzy เซตสามารถแก้ปัญหาค่าของเซตแบบดั้งเดิมได้ โดยฟuzzy เซตยอมให้มีค่าหรือดีกรีของความเป็นสมาชิก (Degree of membership) ซึ่งแสดงด้วยค่าตัวเลขระหว่าง 0 และ 1 หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์  $[0, 1]$ , โดย 0 หมายถึง ไม่เป็นสมาชิกในเซต 1 หมายถึง เป็นสมาชิกในเซต และค่าระหว่าง 0 กับ 1 เป็นสมาชิกบางส่วนในเซต ซึ่งจะทำให้เกิดความราบเรียบในการเปลี่ยนจากพื้นที่นอกเซตไปอยู่ในเซตของสมาชิกต่างๆ โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) เป็นฟังก์ชันจัดเทียบ (mapping function) วัตถุในโดเมนใด ๆ ให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกในฟuzzy เซต

ความเป็นสมาชิกสำหรับฟuzzy เซตมีจำนวนระดับความเป็นสมาชิกเป็นอนันต์ กล่าวคือค่าต่อเนื่องในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งครอบคลุมการกำหนดสมาชิกแบบฉบับ และเซตแบบฉบับหรือเซตทวินัย (crisp set) จะกำหนดตามดังสมการ (5.4)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (5.4)$$

เมื่อ  $A$  เป็นเซตแบบฉบับหรือเซตแบบทวินัย  $x$  เป็นสมาชิกในเซต  $\mu_A$  เป็นค่าความเป็นสมาชิกในเซตและ  $\mu_A(x)$  เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในเซต  $A$

#### 5.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันเวสสำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษานาน เมื่ออนุญาตให้เข้าเว็บไซต์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและการแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอาจจะไม่สมมาตรกันหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้

#### 5.4.1 ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงบาง 6 ชนิดดังนี้

##### 1. ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular membership function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ  $\{a, b, c\}$

$$\text{triangular}(x : a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (5.5)$$

##### 2. ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ  $\{a, b, c, d\}$

$$\text{trapezoidal}(x : a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ (d - x)/(d - c) & c \leq x < d \\ 0 & x \geq d \end{cases} \quad (5.6)$$

##### 3. ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์คือ  $\{m, \sigma\}$  ซึ่ง  $m$  หมายถึงค่าเฉลี่ย และ  $\sigma$  หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{gaussian}(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{\sigma^2}\right) \quad (5.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped membership function)

ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ  $\{a, b, c\}$

$$\text{bell-shaped}(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.8)$$

#### 5. ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

ฟังก์ชันรูปตัวเอสมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ  $\{a, b\}$

$$S(x : a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-x} \right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (5.9)$$

#### 6. ฟังก์ชันตัวซี (Z-membership function)

ฟังก์ชันรูปตัวซีมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ  $\{a, b\}$

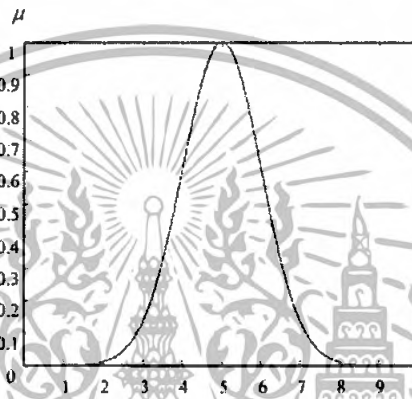
$$Z(x : a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 1 - 2 \left( \frac{x-b}{b-a} \right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left( \frac{x-b}{b-x} \right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (5.10)$$

การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก จะต้องเลือกตามความเหมาะสมและต้องครอบคลุมค่าของข้อมูลที่จะรับเข้ามา โดยสามารถที่ทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะกับงานที่กำลังปฏิบัติ หรือตามความต้องการ

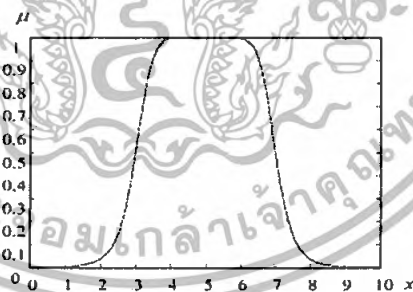
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 กฎฟัซซี่ (fuzzy rules)

วิทยาการเกี่ยวกับฟัซซี่ลอจิกมีจำนวนมาก แต่ที่นิยมและการประยุกต์ใช้งานมากที่สุดเห็นจะได้แก่ กฎฟัซซี่แบบถ้า-แล้ว (fuzzy if-then rule) ตัวอย่างการใช้กฎในการแยกกลุ่มดังรูปที่ 5.6 ในรูปที่ 5.7 แสดงปริภูมิรูปแบบ (pattern space) การจัดกลุ่มด้วยกฎฟัซซี่

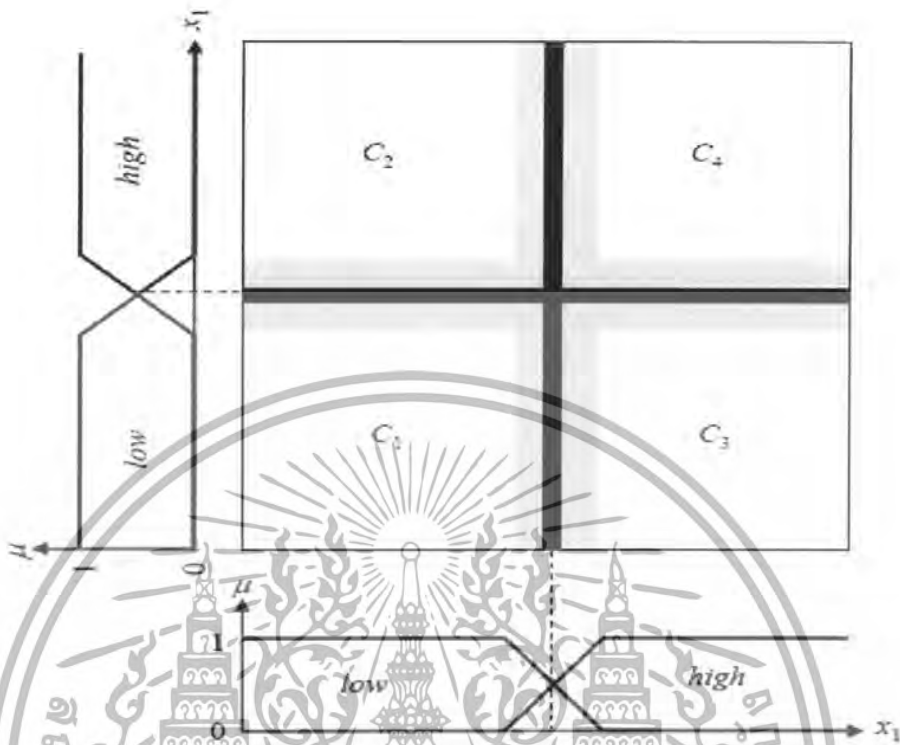


รูปที่ 5.6 กราฟของฟังก์ชันเกาส์เซียน



รูปที่ 5.7 กราฟของฟังก์ชันระฆังคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างปริภูมิรูปแบบการจัดกลุ่มด้วยฟัซซี

จากรูปที่ 5.8 สามารถเขียนเป็นกฎในรูปประโยคภาษาได้ดังนี้

กฎข้อ 1: ถ้า  $x_1$  มีค่า *low* และ  $x_2$  มีค่า *low* แล้ว ข้อมูล  $(x_1, x_2)$  เป็นกลุ่ม  $C_1$

กฎข้อ 2: ถ้า  $x_1$  มีค่า *low* และ  $x_2$  มีค่า *high* แล้ว ข้อมูล  $(x_1, x_2)$  เป็นกลุ่ม  $C_2$

กฎข้อ 3: ถ้า  $x_1$  มีค่า *high* และ  $x_2$  มีค่า *low* แล้ว ข้อมูล  $(x_1, x_2)$  เป็นกลุ่ม  $C_3$

กฎข้อ 4: ถ้า  $x_1$  มีค่า *high* และ  $x_2$  มีค่า *high* แล้ว ข้อมูล  $(x_1, x_2)$  เป็นกลุ่ม  $C_4$

เมื่อ  $x_1$  เป็นตัวแปรภาษาในมิติที่ 1,  $x_2$  เป็นตัวแปรภาษาในมิติที่ 2, *low* และ *high* เป็นพจน์ภาษา (linguistic terms), ข้อมูล  $(x_1, x_2)$  เป็นคู่ลำดับของวัตถุที่ต้องการจัดกลุ่ม และ  $C_1, C_2, C_3$  และ  $C_4$  เป็นกลุ่มข้อมูล 1, 2, 3 และ 4

สมมุติให้กฎข้อ  $l, l = 1, 2, \dots, L$  เป็นลำดับของกฎ ให้ข้อมูลเป็น  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนมิติของข้อมูล ให้  $A_l$  เป็นพจน์ภาษาในกฎข้อที่  $l$  มิติที่  $l$  และให้กลุ่มข้อมูลเป็น  $C_k, k = 1, 2, \dots, K$  รูปแบบทั่วไปของกฎฟัซซีสามารถเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎข้อ 1: ถ้า  $x_1$  มีค่า  $A_{11}$  และ  $x_2$  มีค่า  $A_{12}$  และ ... และ  $x_n$  มีค่า  $A_{1n}$  แล้ว ข้อมูล  $x$  เป็นกลุ่ม  $C_1$   
 กฎข้อ 2: ถ้า  $x_1$  มีค่า  $A_{21}$  และ  $x_2$  มีค่า  $A_{22}$  และ ... และ  $x_n$  มีค่า  $A_{2n}$  แล้ว ข้อมูล  $x$  เป็นกลุ่ม  $C_2$   
 ...  
 ...  
 กฎข้อ  $l$ : ถ้า  $x_1$  มีค่า  $A_{l1}$  และ  $x_2$  มีค่า  $A_{l2}$  และ ... และ  $x_n$  มีค่า  $A_{ln}$  แล้ว ข้อมูล  $x$  เป็นกลุ่ม  $C_k$

### 5.5.1 ระบบกฎแบบพีชชี

ในระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) หรือเครื่องจักรอัจฉริยะ (machine intelligence) มีวิธีการหลายวิธีในการที่จะแสดงองค์ความรู้ของมนุษย์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ตรรกะ (logic) เฟรม (frames) โครงข่ายความหมาย (semantic nets) ภาววิทยา (ontology) และกฎ (rules) ซึ่งแบบหลังสุดเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในระบบพีชชี

### 5.5.2 รูปแบบกฎพีชชี

ในระบบพีชชีองค์ความรู้สามารถแสดงในรูปแบบประโยค

ถ้า ข้อตั้ง (ข้อนำ) ดังนั้น ข้อยุติ (ข้อตาม)

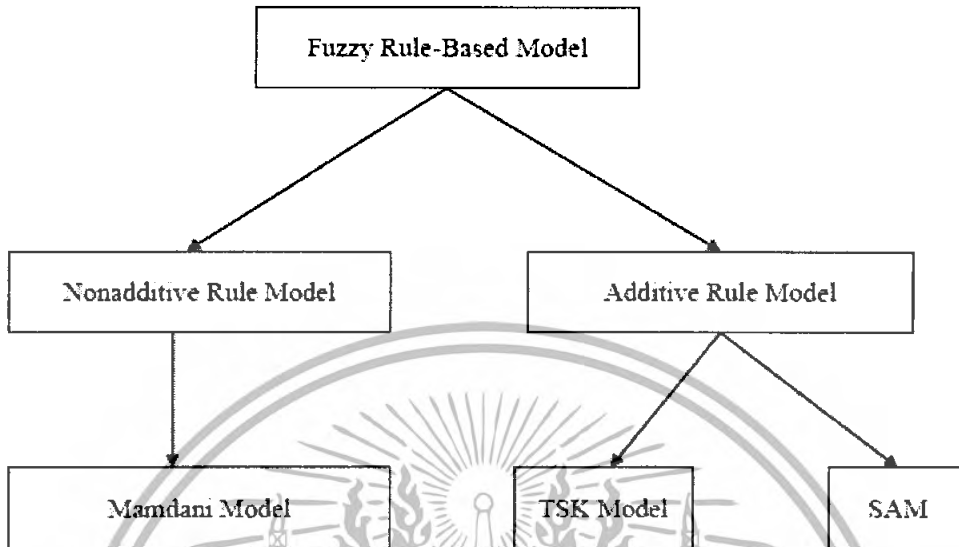
IF *premise (antecedent)*, THEN *conclusion (consequent)*

ข้อความข้างต้นเป็นที่รู้จักกันดีในนาม “รูปแบบฐานกฎถ้า-แล้ว” (IF-THEN rule-based form) หรือ รูปแบบนิรนัย (deductive form) ในรูปแบบการแสดงอนุมาน หากเราทราบความจริง (ข้อตั้ง ข้อสมมุติฐาน หรือข้อนำ) แล้วเราสามารถอนุมานหรือหาข้อสรุปความจริงอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่าข้อยุติหรือข้อตาม การแสดงรูปแบบขององค์ความรู้นี้เรียกว่า องค์ความรู้ตื้น (shallow knowledge) ซึ่งค่อนข้างมีความเหมาะสมในบริบทของภาษา เนื่องจากการแสดงประสบการณ์ของมนุษย์ และองค์ความรู้เชิงศึกษาสำนัก (heuristics) ในรูปแบบประโยคภาษามนุษย์ที่ใช้ในการสื่อสารทั่วไป แต่ไม่เป็นรูปแบบขององค์ความรู้ที่ลึกล้ำ แบบที่เป็นการรู้เอง เป็นโครงสร้าง เป็นฟังก์ชัน หรือเป็นพฤติกรรมของวัตถุรอบ ๆ ตัวเรา อย่างที่เรียกว่า อุปนัย (inductive)

ระบบกฎพีชชีเป็นสิ่งที่มีความประโยชน์ในการจัดรูปแบบของระบบที่ซับซ้อนที่สามารถสังเกตได้โดยมนุษย์ เพราะระบบเหล่านี้สามารถแสดงด้วยตัวแปรภาษาในข้อนำและข้อตามของกฎได้ ตัวแปรภาษาสามารถนำเสนอแสดงเชิงธรรมชาติด้วยพีชชีเซตและตัวเชื่อมตรรกะของเซตเหล่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3 ชนิดของระบบกฎฟัซซี่



รูปที่ 5.9 กลุ่มของระบบกฎฟัซซี่

ในการประมาณค่าฟังก์ชัน (function approximation) ระบบกฎฟัซซี่ที่ใช้มี 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ (1) รูปแบบ Mamdani (2) รูปแบบ Takagi-Sugeno-Kang (TSK) และ (3) รูปแบบ Standard Additive Model (SAM) รูปแบบ Mamdani รวมผลการอนุมาน (inference) ของกฎ โดยวิธีการซ้อนทับ (superimposition) จากกฎหลาย ๆ ข้อ ซึ่งไม่เป็นแบบบวกกัน จึงเรียกระบบแบบนี้ว่าเป็นโมเดลกฎแบบไม่บวกกัน (nonadditive rule model) แต่สำหรับ TSK และ SAM มีการอนนามแบบรวมค่าน้ำหนัก (weighted sum) จากหลาย ๆ กฎ เพื่อรวมเป็นข้อสรุปสุดท้าย จึงเรียกระบบแบบนี้ว่าโมเดลกฎแบบบวกกัน (additive rule model) การจัดกลุ่มของระบบกฎแบบฟัซซี่แสดงในภาพ

5.5.3.1 ระบบกฎฟัซซี่ของแมมดานี (Mamdani)

ระบบกฎฟัซซี่แบบแมมดานี เป็นระบบที่มีความนิยมใช้มากที่สุดระบบหนึ่งในทางปฏิบัติ เป็นระบบที่ใช้ตัวแปรภาษาทั้งในข้อตั้งและข้อตามเพื่อจัดเทียบฟังก์ชันจาก เป็น  $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  เป็น  $W$

กฎข้อที่ 1: IF ( $x_1$  is  $A_{11}$ ) AND IF ( $x_2$  is  $A_{12}$ ) AND ... AND IF ( $x_n$  is  $A_{1n}$ ) THEN  $y$  is  $C_{-1}$

กฎข้อที่ 2: IF ( $x_2$  is  $A_{21}$ ) AND IF ( $x_2$  is  $A_{22}$ ) AND ... AND IF ( $x_n$  is  $A_{2n}$ ) THEN  $y$  is  $C_{-2}$

...

กฎข้อที่ L: IF ( $x_1$  is  $A_{L1}$ ) AND IF ( $x_2$  is  $A_{L2}$ ) AND ... AND IF ( $x_n$  is  $A_{Ln}$ ) THEN  $y$  is  $C_{-L}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านใด ๆ ภายใต้อาณัติของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $x_j, j = 1, \dots, n$ , เป็นตัวประกอบที่  $j$  ของตัวแปรอินพุต  $x, y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุต,  $A_{ij}$  เป็นพจน์ภาษาของข้อตั้ง (consequence linguistic term) หรือเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตั้ง (antecedent membership function) ในกฎที่  $I, I = 1, \dots, L, C_i$  เป็นพจน์ภาษาของข้อตามหรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตาม (consequent membership function) ของกฎที่  $I$

กำหนดให้  $A^s$  เป็นฟัซซีเซตใหม่ สำหรับกฎข้อที่  $i, i = 1, \dots, L$

$$A^s = A_{i1} \cap A_{i2} \cap \dots \cap A_{in} \quad (5.11)$$

แสดงในรูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้เป็น

$$\mu_{A^s}(x) = \min(\mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), \dots, \mu_{A_{in}}(x_n)) \quad (5.12)$$

ถ้าหากมีอินพุตเข้ามาในรูป

$$(x_1 = x'_1), (x_2 = x'_2), \dots, (x_n = x'_n) \quad (5.13)$$

โดยที่  $x'_1, x'_2, \dots, x'_n$  เป็นค่าอินพุตใดๆ จะได้ค่าฟัซซี ในส่วนของข้อตั้งเป็น

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_{i1}}(x'_1), \mu_{A_{i2}}(x'_2), \dots, \mu_{A_{in}}(x'_n)) \quad (5.14)$$

ค่าเอาต์พุตของกฎแต่ละข้อของระบบฟัซซีแบบแมมดานีที่เป็นค่าฟัซซีสามารถหาได้จากสมการ

$$\mu_{C_i}(y) = \alpha_i \wedge \mu_{C_i}(y) \quad (5.15)$$

ค่าเอาต์พุตของระบบเป็นผลรวมจากเอาต์พุตจากกฎแต่ละข้อโดยใช้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{\tilde{C}_i}(y) = \max\left(\mu_{\tilde{C}'_1}(y), \mu_{\tilde{C}'_2}(y), \dots, \mu_{\tilde{C}'_L}(y)\right) \quad (5.16)$$

ฟuzzyเซตเอ้าท์พุท สามารถแปลงเป็นค่าปกติได้โดยวิธีการกำจัดความคลุมเครือแบบเฉลี่ยน้ำหนัก

$$y^* = \frac{\sum \mu_{\tilde{C}}(\bar{y}) \times \bar{y}}{\sum \mu_{\tilde{C}}(\bar{y})} \quad (5.17)$$

เมื่อ  $\bar{y}$  เป็นค่าจุดศูนย์กลาง (centroid) ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่สมมาตร

**วิธีการอนุมานแบบแมมดานี**

กำหนดให้ ระบบฟuzzyแบบแมมดานีมี 2 อินพุท  $x_1$  และ  $x_2$  และ 1 เอ้าท์พุท  $y$  ซึ่งมีกฎฟuzzy

เป็น

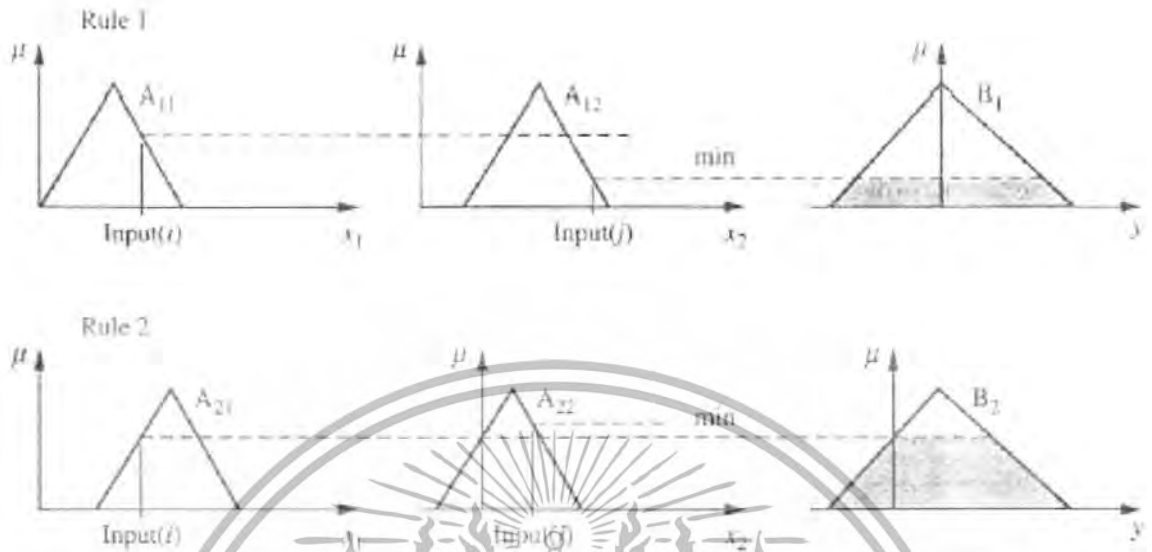
$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_{\sim k1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{\sim k2} \text{ THEN } y \text{ is } B_{\sim k} \text{ สำหรับ } k=1,2,\dots,r \quad (5.18)$$

ผลรวมเอ้าท์พุทหาได้ โดยการใช้วิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (max-min composition) และวิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ (max-product composition)

**วิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด**

$$\mu_{\sim Bk}(y) = \max\left[\min(\mu_{A_{\sim k1}}(\text{Input}(i)), \mu_{A_{\sim k2}}(\text{Input}(j)))\right] \text{ สำหรับ } k=1,2,\dots,r \quad (5.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

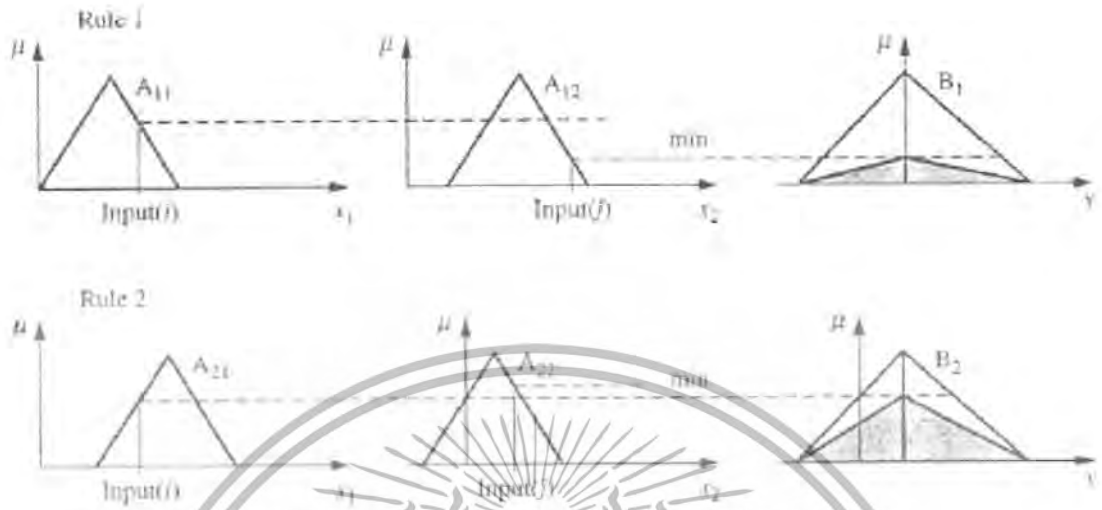


รูปที่ 5.10 วิธีการอนุมานแบบเมมดามิและใช้การจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด

**วิธีการจัดองค์ประกอบแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ**

$$\mu_{-Bk}(y) = \max \left[ \text{product}(\mu_{-k1}^A(\text{Input}(i)), \mu_{-k2}^A(\text{Input}(j))) \right] \text{ สำหรับ } k = 1, 2, \dots, r \quad (5.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟิกวิธีการอนุมานแบบเมมเบรนและใช้การจัดองค์ประกอบแบบเอาสูงสุด-ผลคูณ

5.5.3.2 ระบบกฎฟuzzy แบบทีเอสเค (Takagi-Sugeno-Kang : TSK)

ระบบกฎฟuzzy แบบทีเอสเค ซึ่งนำเสนอ โดยทาตากิ (Takagi) และซึกะโนะ (Sugeno) ในปี ค.ศ. 1984 และต่อมาซึกะโนะและกังก (Kang) ได้วิจัยต่อมา ระบบกฎฟuzzy แบบทีเอสเคจะอยู่ในรูป

กฎข้อที่ 1 : IF  $(x_1 \text{ is } A_{-11}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } A_{-12}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } A_{-1n})$

THEN  $y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_{10} + b_{11}x_1 + \dots + b_{1n}x_n$

กฎข้อที่ 2 : IF  $(x_1 \text{ is } A_{-21}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } A_{-22}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } A_{-2n})$

THEN  $y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_{20} + b_{21}x_1 + \dots + b_{2n}x_n$

...

กฎข้อที่ L : IF  $(x_1 \text{ is } A_{-L1}) \text{ AND } (x_2 \text{ is } A_{-L2}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ is } A_{-Ln})$

THEN  $y_L = f_L(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_{L0} + b_{L1}x_1 + \dots + b_{Ln}x_n$  (5.21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $x_j, j=1, \dots, n$  เป็นตัวประกอบที่  $j$  ของตัวแปรอินพุท  $x, y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุท,  $A_j$  เป็นพจน์ภาษาของข้อตั้ง (consequence linguistic term) หรือเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของข้อตั้ง (antecedent membership function) ในกฎที่  $i, i=1, \dots, L$  และ  $f_i$  เป็นสมการเชิงเส้นของ (consequent linear function) ของกฎข้อที่  $i$

ถ้าหากมีอินพุทเข้ามาในรูป

$$(x_1 = x'_1), (x_2 = x'_2), \dots, (x_n = x'_n) \tag{5.22}$$

โดยที่  $x'_1, x'_2, \dots, x'_n$  เป็นค่าอินพุทใดๆ จะได้ค่าฟัซซี่ในส่วนของข้อตั้งเป็น

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_1}(x'_1), \mu_{A_2}(x'_2), \dots, \mu_{A_n}(x'_n)) \tag{5.23}$$

ค่าเอาต์พุทของกฎแต่ละข้อของระบบฟัซซี่แบบทีเอสเคสามารถหาได้จากสมการ

$$y_i = b_{i0} + b_{i1}x_1 + \dots + b_{in}x_n \tag{5.24}$$

ค่าเอาต์พุทของระบบเป็นผลรวมจากเอาต์พุทจากกฎแต่ละข้อโดยใช้สมการ

$$y = \frac{\sum_{i=1}^L \alpha_i \times y_i}{\sum_{i=1}^L \alpha_i} \tag{5.25}$$

**5.5.3.3 ระบบฟัซซี่แบบบวกมาตรฐาน (Standard Additive Model: SAM)**

ระบบฟัซซี่แบบบวกมาตรฐาน เช่น ระบบฟัซซี่แบบซุกาโมโต (Tsukamoto's Fuzzy System) ในระบบนี้ส่วนข้อตั้งและข้อตามจะเป็นพจน์ภาษาคล้ายกับ ระบบฟัซซี่ของแมมดานี แต่ ส่วนของข้อตาม (consequent) ของกฎฟัซซี่จะถูกแสดงเป็นฟัซซี่เซตซึ่งมีฟังก์ชันสมาชิกแบบทางเดียว (monotonic membership function) ดังรูปที่ 5.12 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบทางเดียว (shoulder function) เป็นค่าอนุমানเอาต์พุทของแต่ละกฎที่เป็นค่าธรรมดาทั่วไป (crisp value) ผลเอาต์พุททั้งหมด (ดังรูปที่ 5.12) สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยน้ำหนักของเอาต์พุทจากแต่ละกฎ ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$z = \frac{\sum_{i=1}^L w_i \times z_i}{\sum_{i=1}^L w_i} \tag{5.26}$$

เนื่องจากกฎแต่ละข้อมีค่าเอาท์พุทเป็นค่าใช้งานทั่วไปแล้ว ระบบจะรวมเอาท์พุททั้งหมดได้  
อย่างรวดเร็วไม่ต้องอาศัยวิธีการกำจัดความคลุมเครือ ดังนั้นจึงช่วยให้ประหยัดเวลามากขึ้น

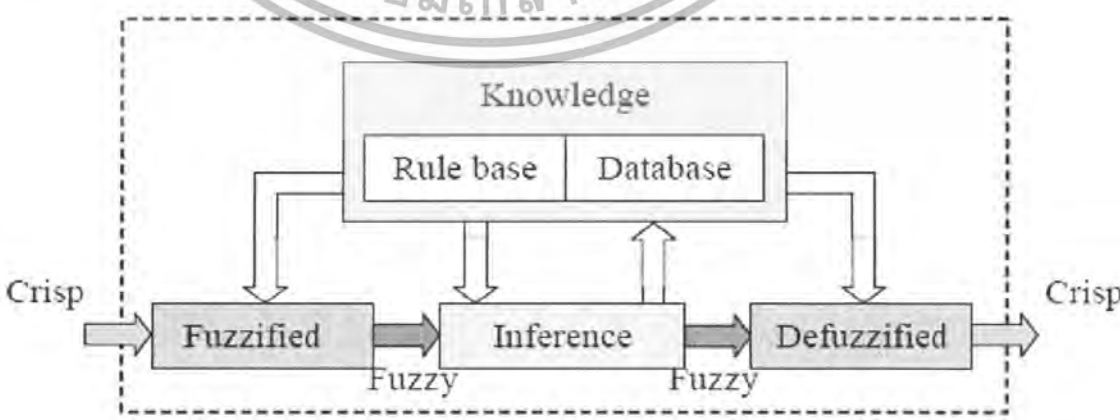


รูปที่ 5.12 โมเดลฟัซซีแบบซุกาโมโต

**5.6 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซีลอจิก**

โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วนดังนี้

ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการทำให้คลุมเครือ (Fuzzification) หรือในรูปแบบเซตฟัซซี่หรือเรียกว่าเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic Variable)

ฐานความรู้ (Knowledge base) เป็นส่วนที่จัดเก็บรวบรวมข้อมูลในการควบคุมประกอบ 2 ส่วนคือ ฐานกฎ (Rule base) และฐานข้อมูล (Database)

ฐานกฎ (Rule base) ส่วนของการกำหนดวิธีการควบคุม ซึ่งได้จากผู้เชี่ยวชาญในรูปแบบของชุดข้อมูลแบบกฎของภาษา (Linguistic rule)

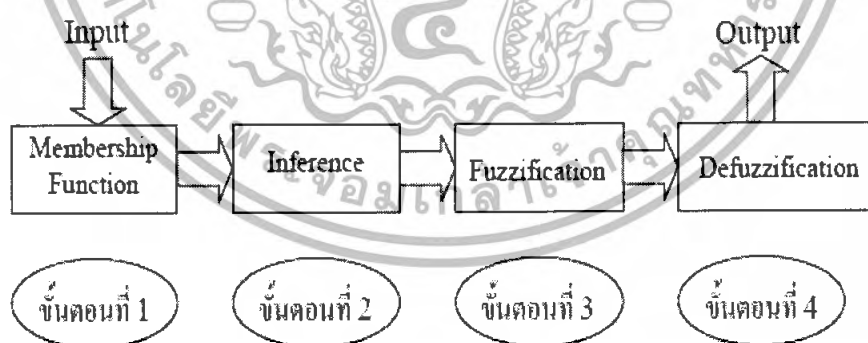
ฐานข้อมูล (Database) เป็นการจัดเตรียมส่วนที่จำเป็นเพื่อที่จะใช้ในการกำหนดกฎการควบคุม และการจัดการข้อมูลของตรรกศาสตร์ฟัซซี่

เครื่องอนุมานหรือการตีความ (Inference) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตรวจสอบข้อเท็จจริงและกฎเพื่อใช้ในการตีความหาเหตุผล เหมือนกลไกสำหรับควบคุมการใช้ความรู้ในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งการกำหนดวิธีการของการตีความเพื่อหาคำตอบ

ส่วนการกำจัดความคลุมเครือเป็นการทำการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบฟัซซี่ให้เป็นค่าที่สรุปผลหรือค่าการควบคุมระบบ

## 5.7 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก

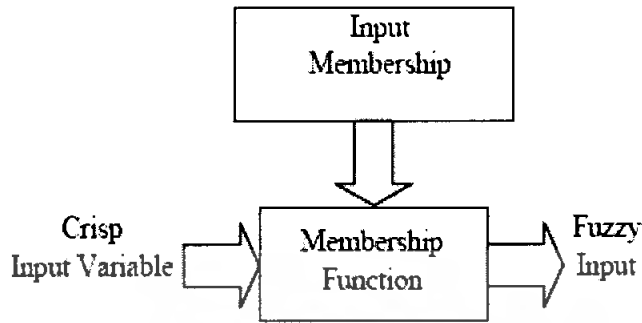
ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิกมีรูปแบบการทำงานเป็น 4 ส่วนจะแสดงดัง รูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก

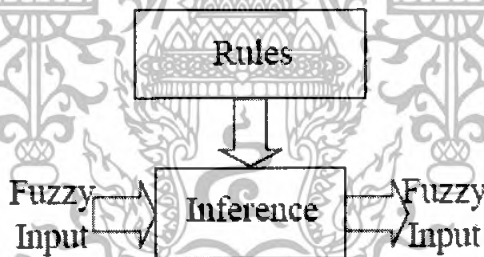
ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี่ โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นกับคุณลักษณะของแต่ละการอินพุตและความสำคัญต่อการเอาท์พุทที่น่าสนใจ โดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษาสามัญเพื่อให้เป็นฟัซซี่การอินพุต ดังรูปที่ 5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



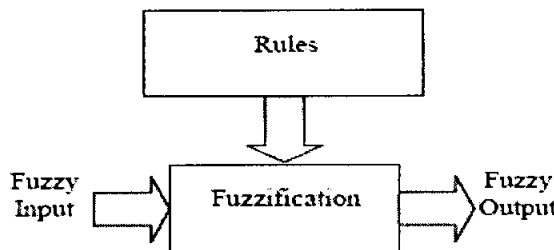
รูปที่ 5.15 ขั้นตอนที่ 1 ของการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการของการหาเหตุและผล อาจจะมีการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนเป็นกฎการควบคุมระบบ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ “ถ้า” (If) “และ” (And) “หรือ” (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการหาตัดสินใจที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ขั้นตอนที่ 2 ของการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก

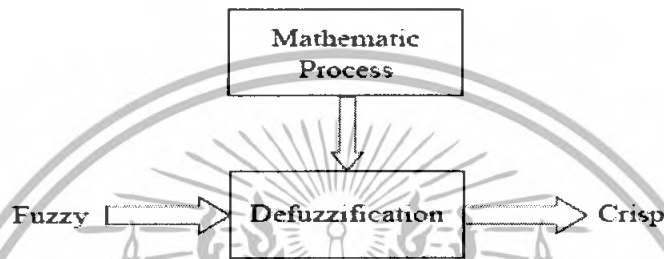
ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาฟัซซี่เอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซี่อินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล ดังรูปที่ 5.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำให้คลุมเครือ (Fuzzification) วิธีการที่นิยมใช้ในการตีความหาเหตุผลคือวิธีค่าสูงสุด-ต่ำสุดและค่าสูงสุด-ผลคูณ

ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซี่ โดยจะเปลี่ยนฟัซซี่เอ๊าท์พุทให้เป็นทวินัยเอ๊าท์พุทตามรูปที่ 5.18 และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วงเพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบในสถานการณ์นั้นๆ



รูปที่ 5.18 ขั้นตอนที่ 4 ของการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิก

วิธีการกำจัดความคลุมเครือ (Defuzzification) เป็นเทคนิคในการเลือกค่าสูงสุดหรือสรุปหาเหตุผลจากหลายๆ เซตมาเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นการใช้ค่าสูงสุดของค่าระดับการเป็นสมาชิกจากการกระทำหลายๆ แบบและเลือกกระทำเพียงรูปแบบเดียว

วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity : COG) เป็นวิธีการเฉลี่ยผลที่ได้จากการตีความหาเหตุที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ค่าที่ได้จะคำนวณจุดศูนย์กลางถ่วงโดยรวมจะหาได้จากการประมาณค่าจากสมการ

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \tag{5.27}$$

โดยสมการ ได้กำหนดค่าของสมการดังนี้

- COG แทน ค่าของจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity)
- N แทน ค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ i
- $\alpha_i$  แทน ค่าฟัซซี่ของเอ๊าท์พุทในเซตฟัซซี่ตำแหน่งที่ i
- $w_i$  แทน พื้นที่ใต้โค้งของเซตฟัซซี่ตำแหน่งที่ i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.8 กระบวนการหาเหตุผลแบบฟัซซี่

### 5.8.1 การหาเหตุผลแบบฟัซซี่ทั่วไป

กำหนดให้ระบบฟัซซี่หนึ่งมี  $n$  อินพุต และ 1 เอาต์พุต ประกอบด้วยกฎดังนี้

$Rule_1$ : IF  $x_1$  is  $A_{11}$  AND  $x_2$  is  $A_{12}$  AND...AND  $x_n$  is  $A_{1n}$  THEN  $y$  is  $B_1$

$Rule_j$ : IF  $x_1$  is  $A_{21}$  AND  $x_2$  is  $A_{22}$  AND...AND  $x_n$  is  $A_{2n}$  THEN  $y$  is  $B_2$

...

$Rule_L$ : IF  $x_1$  is  $A_{L1}$  AND  $x_2$  is  $A_{L2}$  AND...AND  $x_n$  is  $A_{Ln}$  THEN  $y$  is  $B_L$  (5.28)

เมื่อ  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  เป็นตัวแปรอินพุต และ  $y$  เป็นตัวแปรเอาต์พุตของระบบ เป็นพจน์ภาษา (linguistic terms) ของข้อตั้ง (antecedent) เมื่อ  $I$  เป็นกฎที่  $I, I = 1, \dots, L$ , และ  $j$  เป็นมิติที่  $j, j = 1, \dots, n$ , และให้ เป็นพจน์ภาษา (linguistic terms) ของข้อตาม (consequent)

จากรูปประโยคถ้า-แล้วสามารถตีความโดยแยกเป็นส่วนๆ ซึ่งประกอบด้วย ตัวเชื่อมตรรกะ “และ”, “หรือ” และตัวอนุমান “แล้ว” ตัวจัดองค์ประกอบอินพุตใดๆ สามารถสรุปผลได้จากระบบฟัซซี่ดังกล่าว ตัวอย่างเช่น ถ้ามีอินพุตที่ต้องการหาข้อสรุปผล

$$x_1 = x'_1, x_2 = x'_2, \dots, x_n = x'_n \quad (5.29)$$

จากกฎฟัซซี่ข้างต้น สามารถสรุปผลได้ว่า

$$Y = B \quad (5.30)$$

กฎข้อที่  $I$  จากระบบฟัซซี่นี้

$$Rule_i: \text{IF } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ AND...AND } x_n \text{ is } A_{in} \text{ THEN } y \text{ is } B_i \quad (5.31)$$

มีความสัมพันธ์ฟัซซี่  $R_i$  ตามสมการ

$$\begin{aligned} R_i(x_1, x_2, \dots, x_n, y) &= (A_{i1} \times A_{i2} \times \dots \times A_{in} \rightarrow B_i)(x_1, x_2, \dots, x_n, y) \\ &= (A_{i1}(x_1) \wedge A_{i2}(x_2) \wedge \dots \wedge A_{in}(x_n)) \rightarrow B_i(y) \quad (5.32) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอินพุต  $x_1 = x'_1, x_2 = x'_2, \dots, x_n = x'_n$  สามารถสรุปหา  $y = B$  โดยหาเอาที่พุทของกฎแต่ละข้อ

$$B'_i = (\mu(x'_1) \times \mu(x'_2) \times \dots \times \mu(x'_n)) \circ R_i$$

$$B'_i(y) = (A_{i1}(x'_1) \wedge A_{i2}(x'_2) \wedge \dots \wedge A_{in}(x'_n)) \rightarrow B_i(y) \quad (5.33)$$

จากนั้นรวม  $B'_i$  จากกฎแต่ละข้อเข้าด้วยกัน ด้วยการยูเนียน ดังสมการ

$$B(y) = \bigcup_{i=1}^L B_i(y) = B'_1(y) \vee B'_2(y) \vee \dots \vee B'_L(y) \quad (5.34)$$

ดังนั้นฟuzzyเซตเอาที่พุท จะหาได้จาก

$$B(y) = [(A_{11}(x'_1) \wedge A_{12}(x'_2) \wedge \dots \wedge A_{1n}(x'_n)) \rightarrow B_1(y)] \vee$$

$$[(A_{21}(x'_1) \wedge A_{22}(x'_2) \wedge \dots \wedge A_{2n}(x'_n)) \rightarrow B_2(y)] \vee$$

$$\dots \vee [(A_{L1}(x'_1) \wedge A_{L2}(x'_2) \wedge \dots \wedge A_{Ln}(x'_n)) \rightarrow B_L(y)] \quad (5.35)$$

สรุปขั้นตอนการประมวลผลเพื่อหาเหตุแบบฟuzzy

1. รับข้อมูลอินพุต  $x_1 = x'_1, x_2 = x'_2, \dots, x_n = x'_n$
2. ทำการแปลงค่าอินพุต เป็นค่าฟuzzy  $\mu(x'_1), \mu(x'_2), \dots, \mu(x'_n)$
3. หาค่าฟuzzy (Firing Strength) จากข้อตั้ง ของกฎแต่ละข้อ

$$A_{i1}(x'_1) \wedge A_{i2}(x'_2) \wedge \dots \wedge A_{in}(x'_n)$$

4. คำนวณค่าฟuzzyเอาที่พุทจากกฎแต่ละข้อ

$$B'_i(y) = (A_{i1}(x'_1) \wedge A_{i2}(x'_2) \wedge \dots \wedge A_{in}(x'_n)) \rightarrow B_i(y)$$

5. คำนวณค่าฟuzzyเอาที่พุทรวมจากทุกกฎในระบบ

$$B(y) = B'_1(y) \vee B'_2(y) \vee \dots \vee B'_L(y)$$

#### 4.8.2 การหาเหตุผลแบบฟuzzyตามวิธีแมมคานี

เพื่อความเข้าใจง่าย จะยกตัวอย่างกฎฟuzzyถ้า-แล้ว สองกฎที่อยู่ในรูป

$$\text{Rule } 1: \text{ if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } z \text{ is } C_1 \quad (5.36)$$

$$\text{Rule } 2: \text{ if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } z \text{ is } C_2 \quad (5.37)$$

สำหรับอินพุตใดๆ  $x$  is  $x$  and  $y$  is  $y$  ดังนั้นผลสรุป  $z$  is  $C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาผลสรุปฟัซซี่ในรูปแบบเมมดानीเป็นการใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุดสำหรับการเชื่อม  
 ประโยคแบบ “และ” และใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุดสำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “หรือ”

ระดับค่าฟัซซี่ของกฎแต่ละข้อในส่วนข้อตั้ง หาได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) \tag{5.38}$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0) \tag{5.39}$$

เอาที่พหุของกฎแต่ละข้อ สามารถคำนวณได้จาก

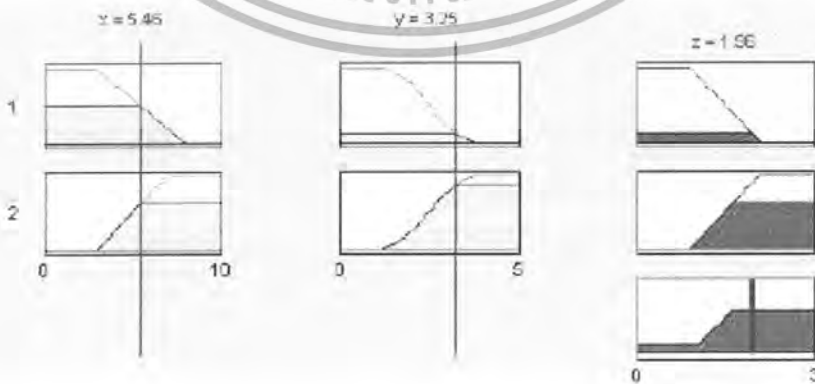
$$C'_1(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) \tag{5.40}$$

$$C'_2(w) = (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \tag{5.41}$$

ผลรวมของเอาที่พหุฟัซซี่ทั้งหมดทำได้จากการยูเนียนผลลัพธ์จากแต่ละกฎ

$$C(w) = C'_1(w) \vee C'_2(w) = (\alpha_1 \wedge C_1(w)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(w)) \tag{5.42}$$

สุดท้าย หากต้องการผลเอาที่พหุที่เป็นค่าทั่วไป สามารถหาโดยวิธีการกำจัดความคลุมเครือ  
 (Defuzzification)



รูปที่ 5.19 การอนุมานผลระบบฟัซซี่แบบเมมดानी

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การออกแบบภาคควบคุม

#### 6.1 บล็อกการทำงานของระบบ

ในการควบคุมทำงานของระบบจะอาศัยการป้อนกลับข้อมูลระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้และขนาดมุมที่แขนเพนคูลัมทำกับแกนตั้งฉากกับพื้นโลก และนำข้อมูลที่ได้นี้ไปผ่านส่วนบล็อกควบคุมซึ่งใช้หลักการตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซี่ในการควบคุมการทำงานในส่วนนี้ โดยภาคควบคุมจะประมวลผลข้อมูลเพื่อสร้างสัญญาณเอาพุทในการขับมอเตอร์อีกที ดังแสดงได้ดังรูป

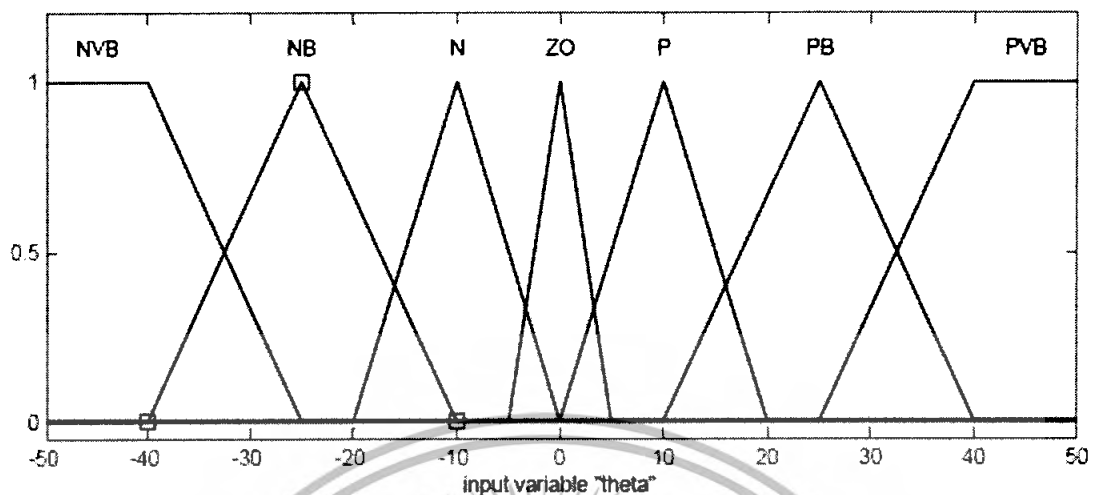


รูปที่ 6.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ

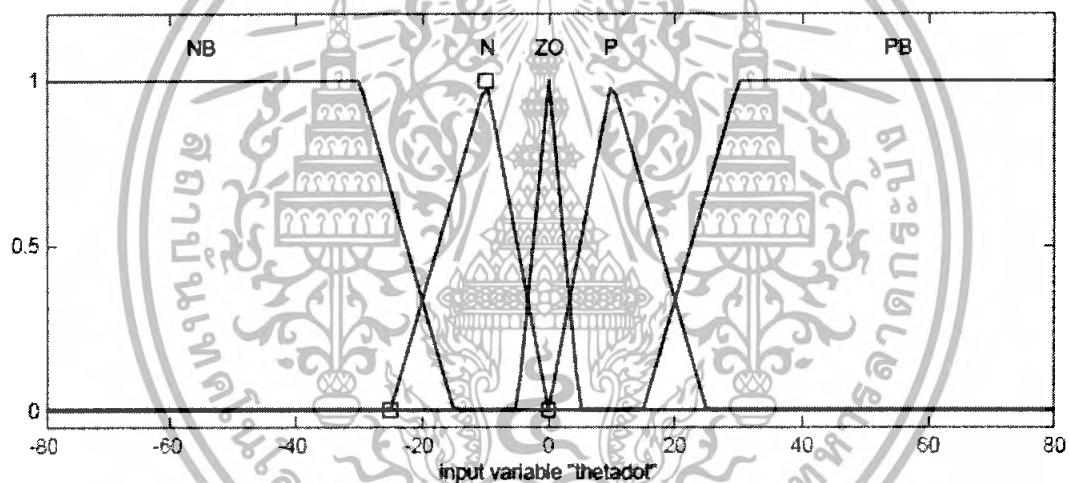
#### 6.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่

ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่นั้น จะอาศัยการสังเกตพฤติกรรมและกลไกการทำงานของระบบอินเวอร์ทเพนคูลัมเพื่อนำมาสร้างระบบกฎเกณฑ์แบบ IF-THEN ( IF-THEN rule-based system) ซึ่งจากการสังเกตและศึกษาข้อมูลพฤติกรรมและกลไกการทำงานต่างๆ สามารถสร้างตัวควบคุมฟัซซี่เริ่มต้นซึ่งมีคุณสมบัติของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านเอาท์พุท และเมทริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟัซซี่(fuzzy associative matrices:FAMs)เบื้องต้น แสดงได้ดังกราฟและตารางต่อไปนี้

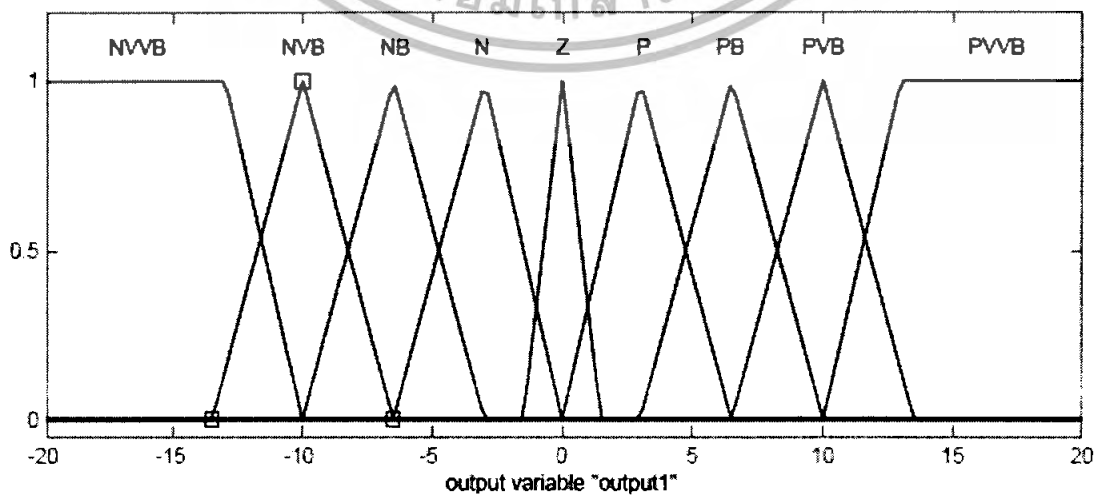
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมของแขนเพนดูลัม



รูปที่ 6.3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม

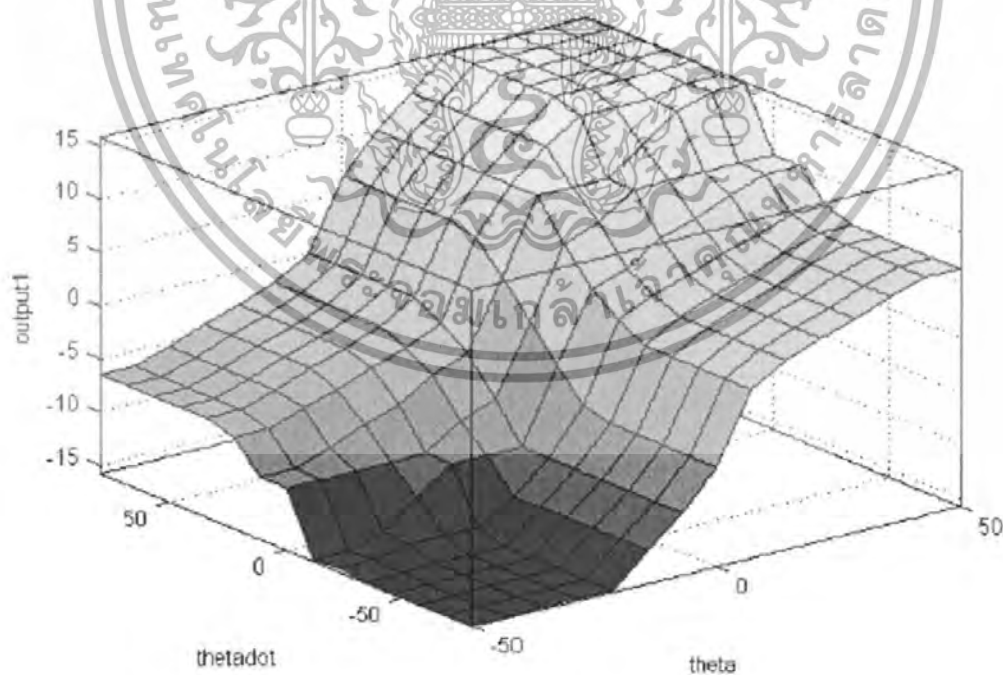


รูปที่ 6.4 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแรงเอาต์พุตที่กระทำกับตัวรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 เมทริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟิซซี

$\theta \backslash \dot{\theta}$	PB	P	Z	N	NB
PVB	PVVB	PVVB	PVB	PVB	PB
PB	PVVB	PVB	PVB	PB	P
P	PVB	PVB	PB	P	Z
Z	PB	P	Z	N	NB
N	Z	N	NB	NVB	NVB
NB	N	NB	NVB	NVB	NVVB
NVB	NB	NVB	NVB	NVVB	NVVB



รูปที่ 6.5 พื้นผิวแสดงกฎเกณฑ์ฟิซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในส่วนของตัวควบคุมฟัซซี่นี้ จะเลือกใช้การอนุมานฟัซซี่(Fuzzy inference) ด้วยเทคนิคแมมดานิ (Mamdani) และรวมกฎด้วยกระทำแบบ 'OR' (OR Operation) ซึ่งแสดงได้ดังสูตรต่อไปนี้จะเห็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\min[\mu_{A_1^k}(input(i)), \mu_{A_2^k}(input(j))]] \quad (6.1)$$

ในการกำจัดความคลุมเครือ(Defuzzification) นั้น จะใช้วิธีการเซนทรอยด์ (Centroid Method) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$Z^* = \frac{\int \mu_c(z) \cdot z dz}{\int \mu_c(z) dz} \quad (6.2)$$

จากนั้นนำตัวควบคุมฟัซซี่ที่ออกแบบได้นี้ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมแมทแลป 7.0 ดังที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

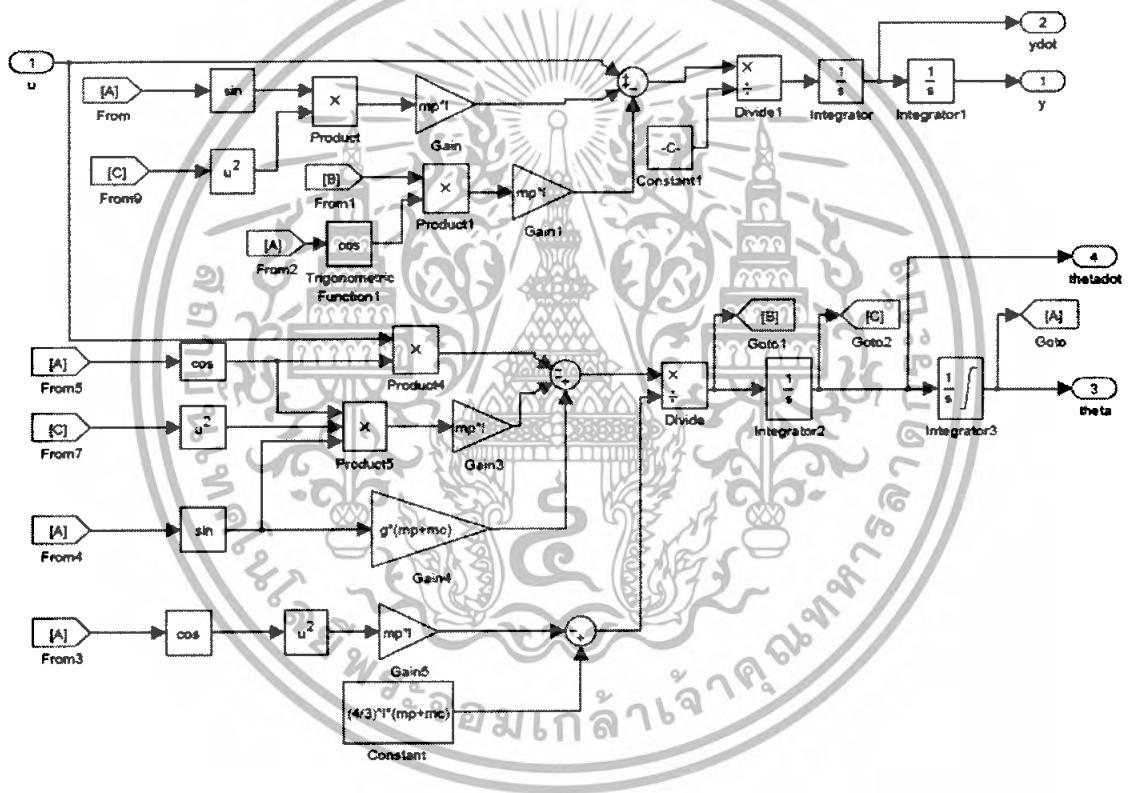
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### การจำลองการทำงานของระบบ

#### 7.1 บล็อกไดอะแกรมจำลองการทำงานของระบบ

จากตัวควบคุมพีซซีที่ได้ นำมาจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมแมทแล็บ โดยเริ่มจากการสร้างบล็อกจำลองการทำงานของอินเวอร์ทเพนดูลัมขึ้นมาจากสมการการเคลื่อนที่ จะได้บล็อกของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังรูป



รูปที่ 7.1 บล็อกจำลองการทำงานของอินเวอร์ทเพนดูลัม

จากนั้นทำการรวมบล็อก(Mask Subsystem) จะได้เป็นบล็อกอินเวอร์ทเพนดูลัมที่จะนำไปใช้งานต่อไป ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



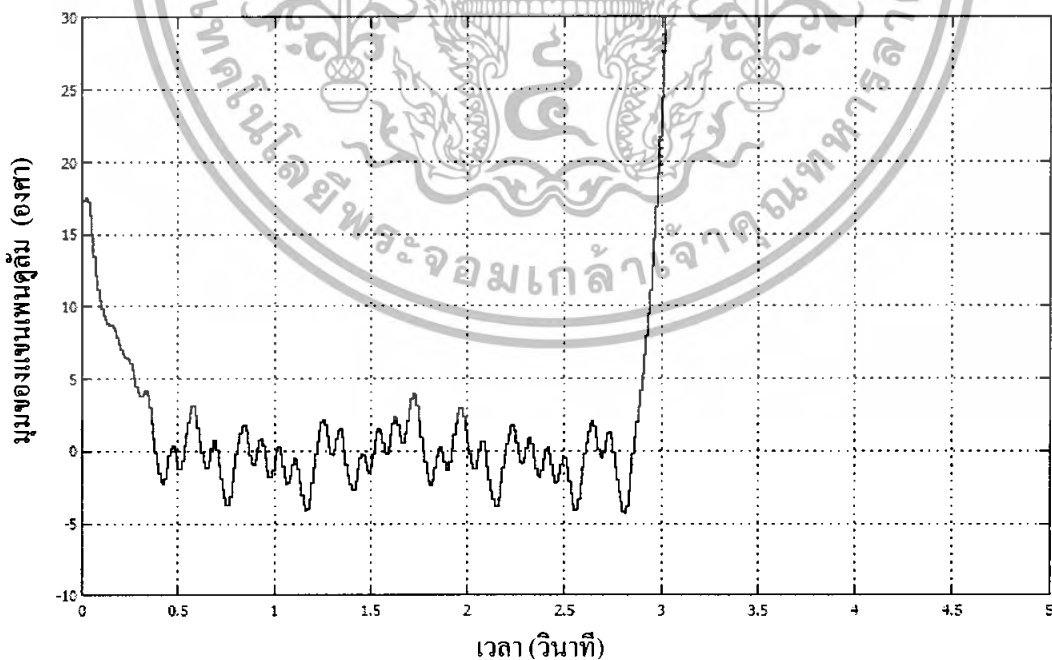
ในการสุ่มค่าของเซนเซอร์ (Sampling time) และส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เพื่อหน่วงการตอบสนองของตัวควบคุมซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของส่วนมอเตอร์นั่นเอง

## 7.2 ผลการจำลองการทำงาน

จากบล็อกไดอะแกรมที่ได้ นำตัวควบคุมพีซซีที่ออกแบบไว้ไปบดที่แล้วมาจำลองการทำงานกับบล็อกไดอะแกรมของระบบที่สร้างขึ้นนี้ จากนั้นจะพัฒนาปรับปรุงตัวควบคุมพีซซีเพื่อให้ช่วงการแกว่งของมุมของแขนเพนดูลัมที่สภาวะสมดุลค่าที่สุด และความถี่ในการแกว่งของแขนหรือความถี่ในการออกแรงผลักตัวรถต่ำ เนื่องจากต้องคำนึงถึงการตอบสนองของมอเตอร์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในขั้นตอนต่อไป โดยในการจำลองการทำงานนี้จะกำหนดให้ตัวรถมีน้ำหนัก 0.35 กิโลกรัม แขนเพนดูลัมมีน้ำหนัก 0.77 กิโลกรัม จุดศูนย์กลางของรถอยู่สูงจากจุดหมุน 10 เซนติเมตร และแรงโน้มถ่วงของโลกมีขนาด 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

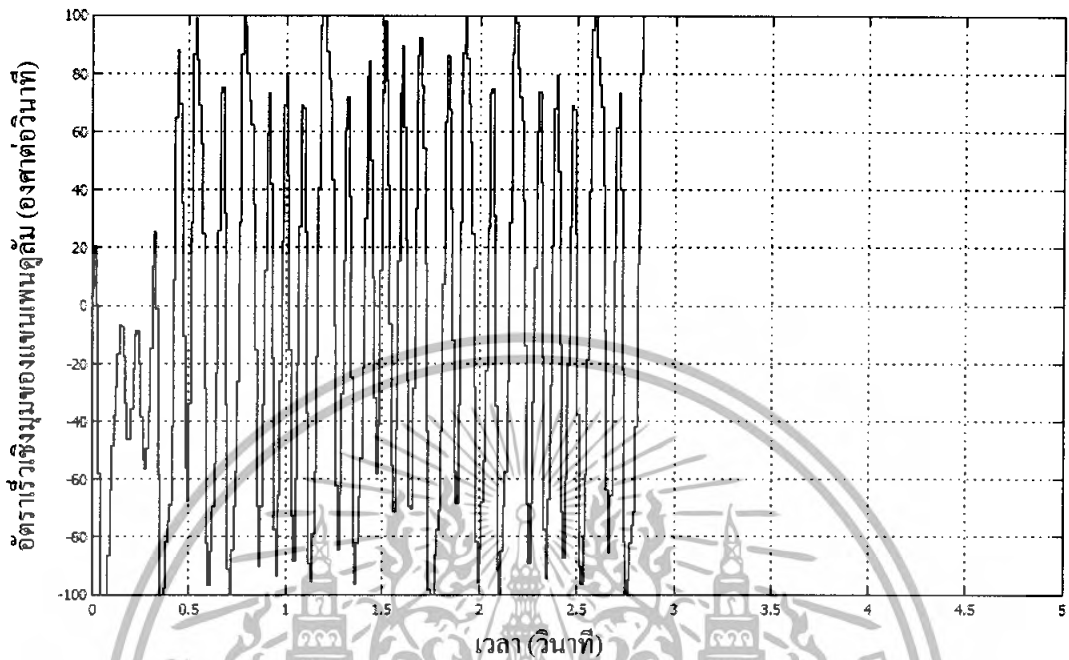
### 7.2.1 ตัวควบคุมพีซซีเริ่มต้น

ตัวควบคุมพีซซีเริ่มต้นเป็นตัวค้นแบบที่ออกแบบจากการสังเกตและศึกษาข้อมูลดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทก่อนหน้านี้ จากการจำลองการทำงานจะได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 7.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) จากการใช้ตัวควบคุมเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแวนเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา(แกนนอน)จากการใช้ตัวควบคุมเริ่มต้น

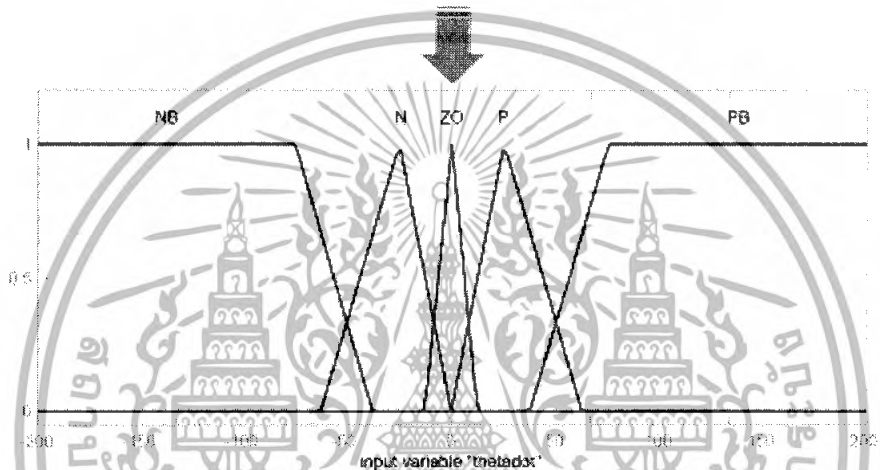
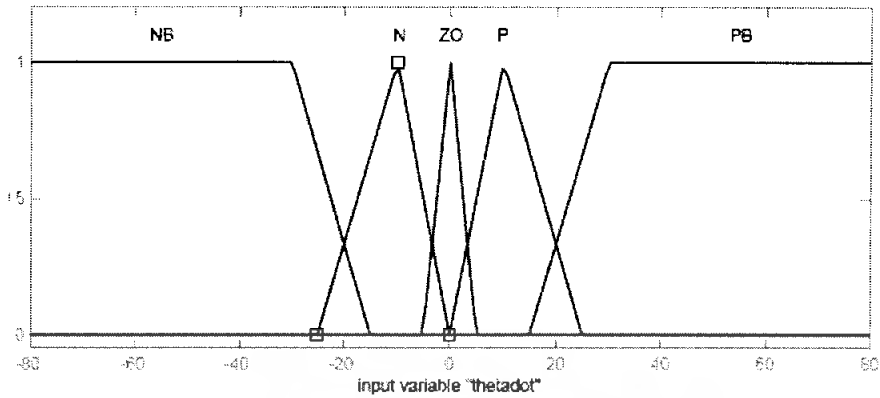
ผลการทดสอบจะเห็นว่า ระบบไม่สามารถรักษาเสถียรภาพได้อันเนื่องมาจากช่วงอัตราเร็วเชิงมุมของแวนเพนคูล์มที่กำหนดไว้ในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุทของตัวควบคุมไม่ครอบคลุมพฤติกรรมการทำงานของระบบ เมื่ออัตราเร็วเชิงมุมของแวนเพนคูล์มมีค่ามากกว่าช่วงดังกล่าวระบบจึงไม่สามารถตอบสนองได้

จากนั้น จึงได้ทดลองปรับคุณสมบัติต่างๆ ของตัวควบคุมฟัซซี่ แล้วสังเกตเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

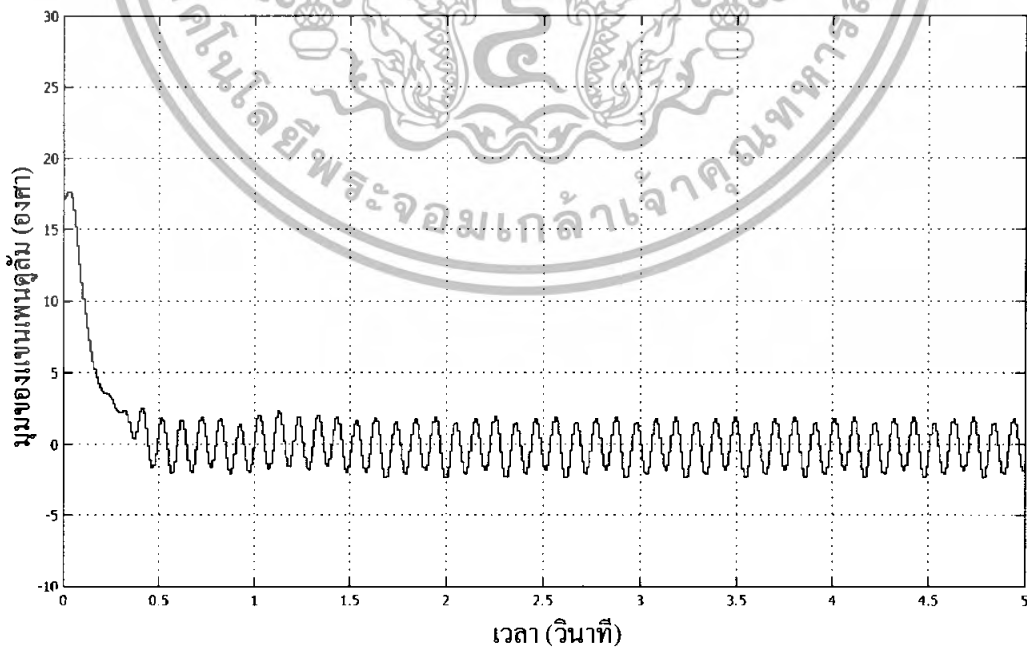
### 7.2.2 ผลจากการปรับสเกลช่วงของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท

เมื่อขยายสเกลช่วงของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุทให้ครอบคลุมช่วงการทำงานของระบบ จากเดิมที่รับอินพุทในช่วง -80 ถึง 80 องศาต่อวินาทีเป็น -200 ถึง 200 องศาต่อวินาที ดังรูปที่ 7.6 จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการควบคุมการทรงตัวในสถานะสมดุลให้ดีขึ้นดังรูปที่ 7.7 และ 7.8 ซึ่งจำลองการทำงานที่ความถี่คัทออฟทางด้านเอาต์พุทเท่ากับ 80 เรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



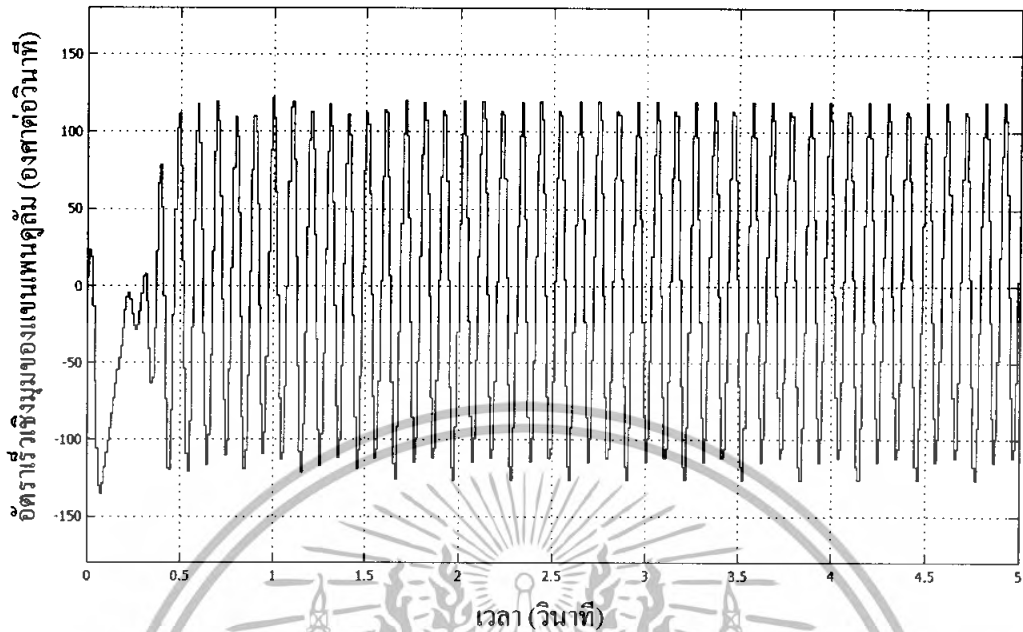
รูปที่ 7.6 แสดงการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม



รูปที่ 7.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแกนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน)

เมื่อปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม

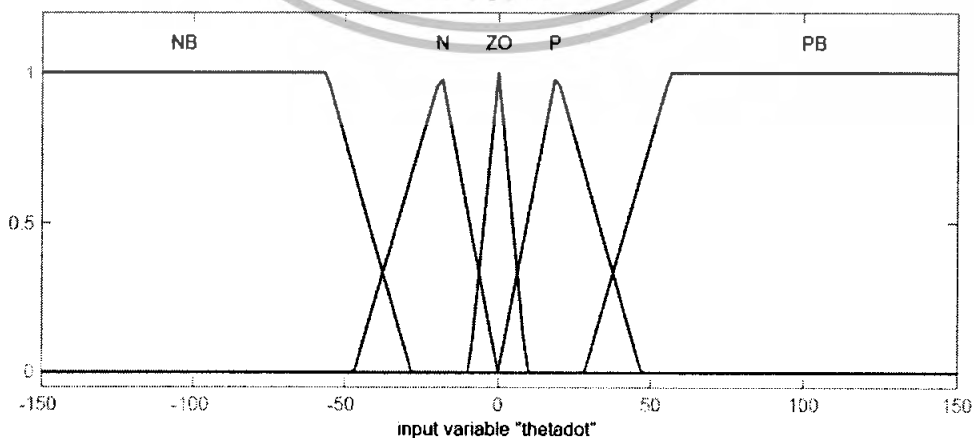
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



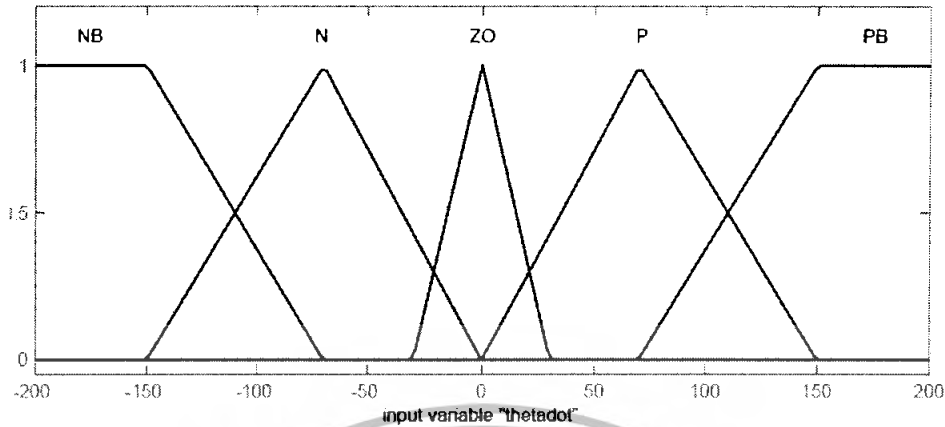
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม

### 7.2.3 การปรับพีชคณิตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม

เมื่อทดลองปรับพีชคณิตต่างๆ ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุม โดยปรับให้ช่วงของอินพุตที่พีชคณิต N ZO และ P ครอบคลุมช่วงอัตราเร็วเชิงมุมกว้างขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การปรับให้ช่วงอัตราเร็วเชิงมุมที่ถือว่าอยู่ในพีชคณิต ZO หรือถือว่าแขนเพนดูลัมไม่หมุนนั้น ครอบคลุมขอบเขตมุมที่กว้างขึ้น และช่วงของอัตราเร็วเชิงมุมที่ถือว่ามีความต่ำทั้งทางด้านบวกและด้านลบหรือช่วงพีชคณิต P และ N ครอบคลุมอัตราเร็วเชิงมุมในช่วงที่มีค่ามากกว่าเดิม ดังรูป

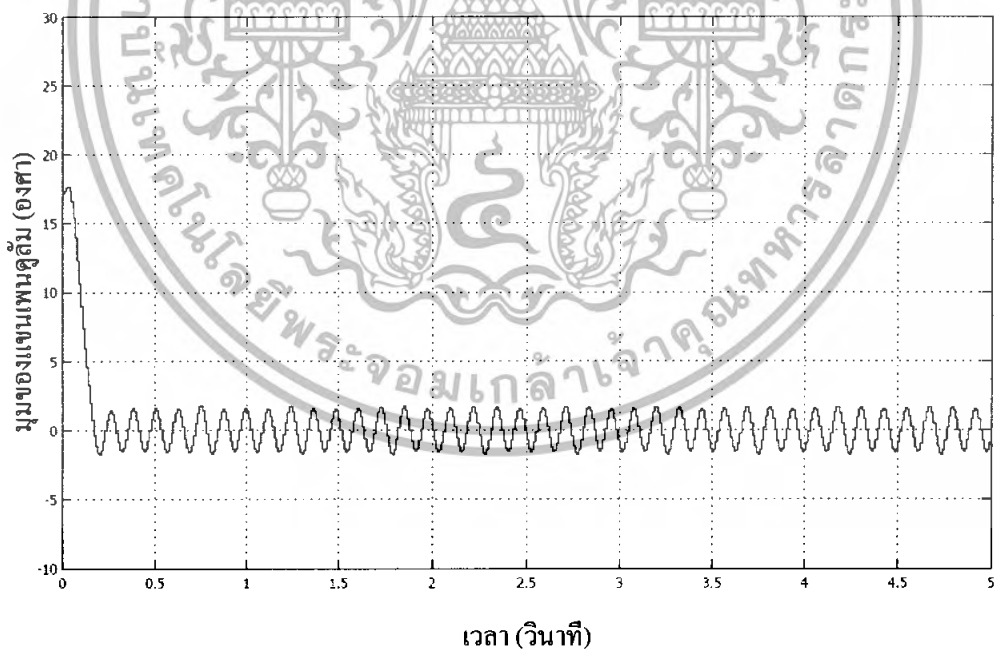


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



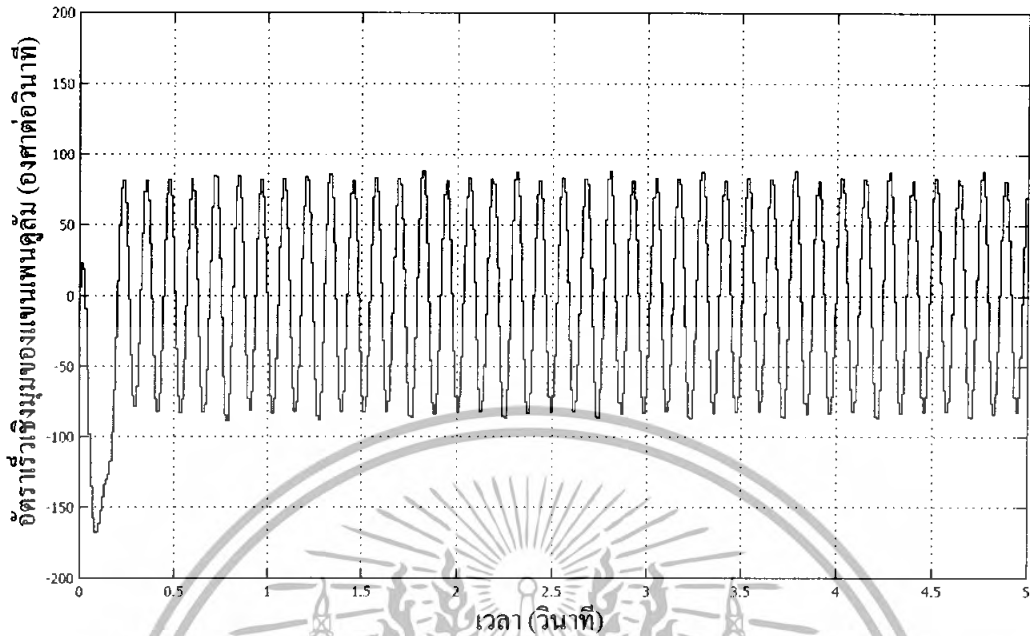
รูปที่ 7.9 แสดงการปรับพีชชีเซตของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท

จากผลการจำลองการทำงานจะเห็นว่า การปรับช่วงพีชชีเซตดังกล่าว จะช่วยปรับปรุงการตอบสนองของตัวควบคุมในช่วงเข้าสู่สมดุลให้ดีขึ้น กล่าวคือ ระบบจะเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.10 และ 7.11 โดยทำการจำลองการทำงานที่ความถี่คัทออฟทางด้านเอาต์พุทเท่ากับ 80 เรเดียนต่อวินาที



รูปที่ 7.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแกนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับพีชชีเซตของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท

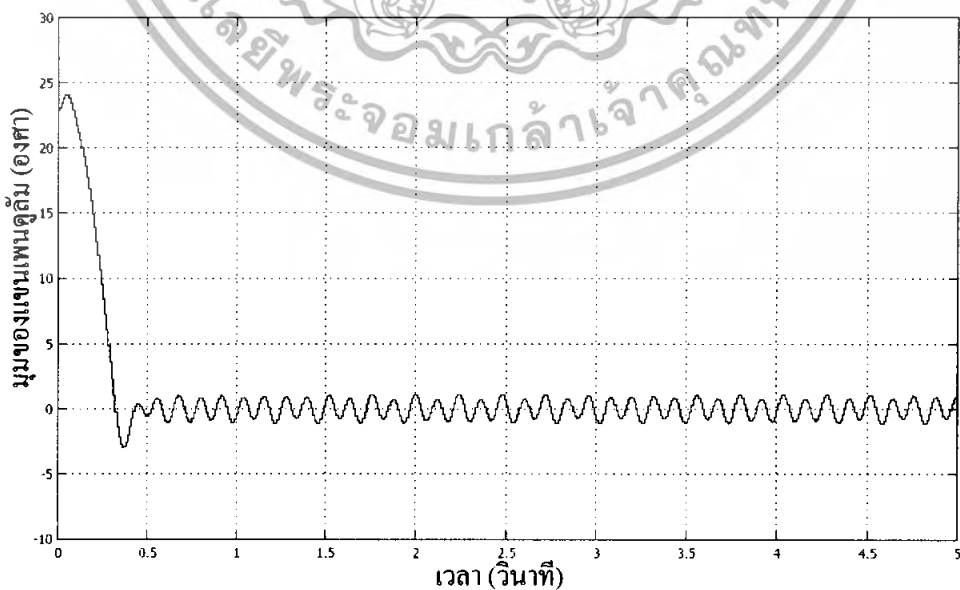
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแกนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปรับพีชี่เซตของอัตราเร็วเชิงมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุท

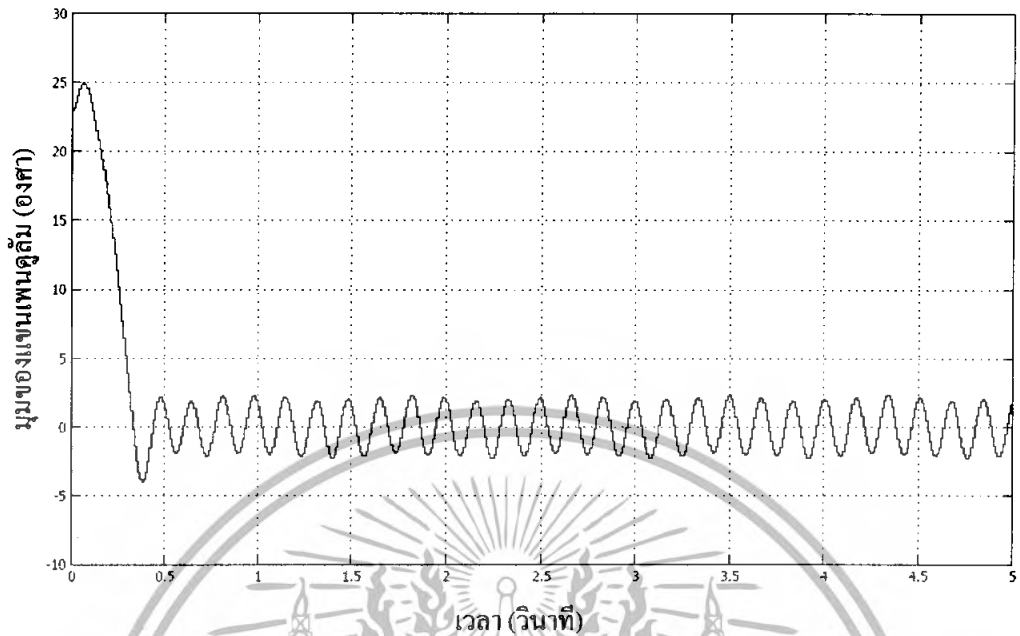
#### 7.2.4 ผลจากการหน่วงเวลาทางด้านเอาต์พุท

เมื่อทดลองเพิ่มการหน่วงเวลาในการตอบสนองของตัวควบคุมที่เอาต์พุท โดยการปรับค่าความถี่คัทออฟของตัวกรองความถี่สูงให้ต่ำลง จะทำให้ช่วงการแกว่งของแกนเพนดูลัมที่สภาวะจะกว้างขึ้น และอาจทำให้การเข้าสู่สมดุลช้าลง ดังรูปที่ 7.12 และ 7.13 ซึ่งการลดช่วงการแกว่งของแกนเพนดูลัมอาจทำได้โดยการลดแรงเอาต์พุทคงจะกล่าวต่อไป

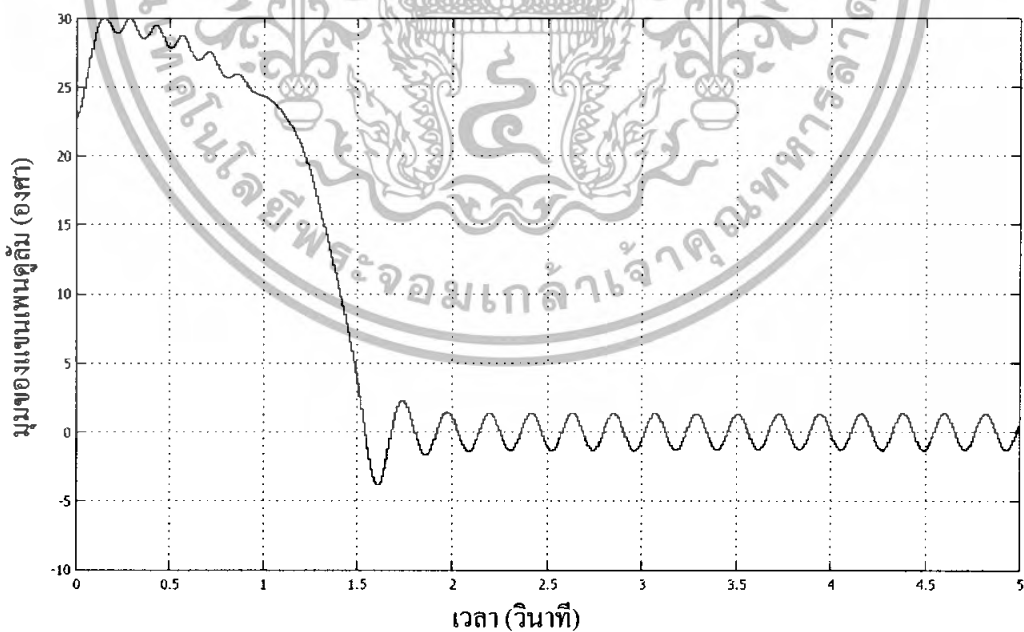


รูปที่ 7.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแกนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับที่ความถี่คัทออฟ 80 เเรเคียนต่อวินาที ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 60 เเรเดียนต่อวินาที

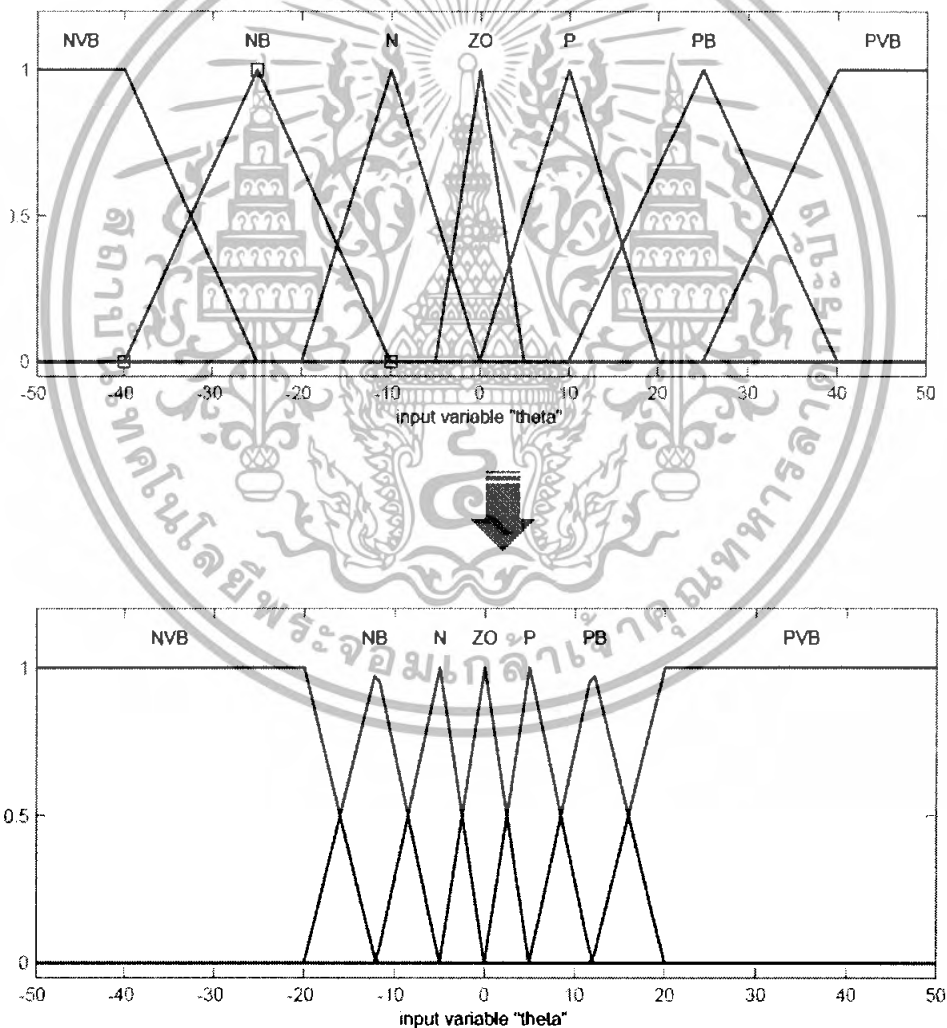


รูปที่ 7.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 50 เเรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.2.5 ผลจากการปรับพีชชีเซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมของแขนเพนดูลัม

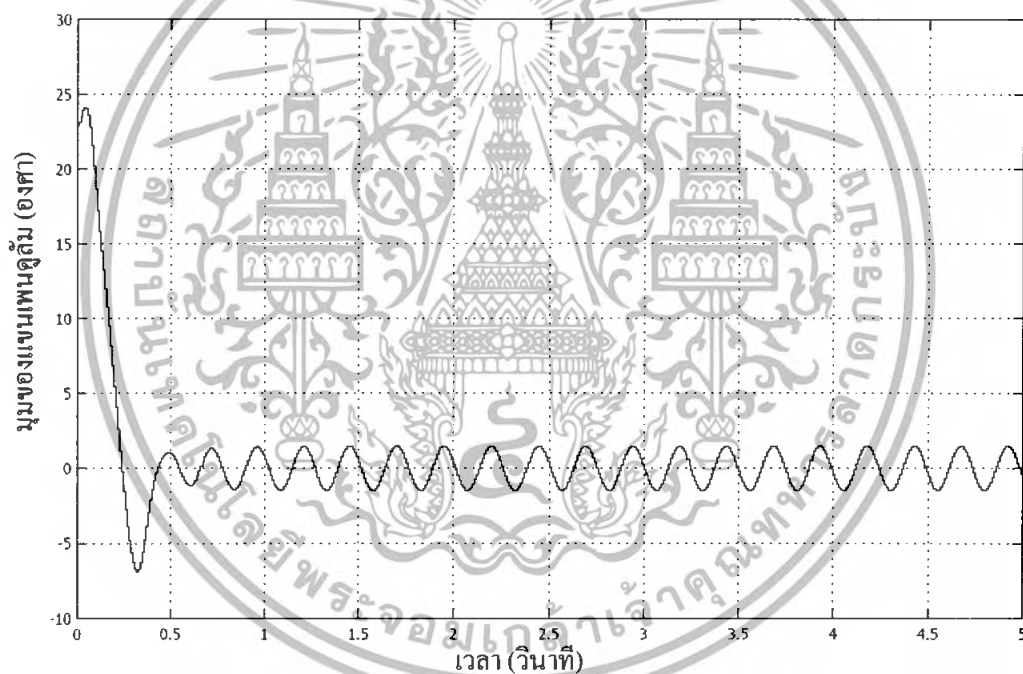
จากการปรับพีชชีเซตเพื่อให้ช่วงขนาดของมุมที่อยู่ในขอบเขตของพีชชีเซตต่างๆ มีขนาดเล็กกว่าเดิม หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าขนาดของมุมจะเข้าไปอยู่ในขอบเขตของพีชชีเซตต่างๆ นั้น จะต้องอยู่ในช่วงของมุมที่เล็กกว่าเดิม อย่างเช่น จากเดิมมุมที่อยู่ในช่วงพีชชีเซต P จะต้องมีความคอยู่ในช่วง 0 ถึง 20 องศา ก็ปรับให้ช่วงของมุมแคบและมึขนาดเล็กกว่าเดิม กลายเป็นว่ามุมที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 12 องศา จึงจะถือว่าอยู่ในพีชชีเซต P ดังแสดงการปรับพีชชีเซตดังรูป



รูปที่ 7.15 แสดงการปรับพีชชีเซตของมุมในฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุต

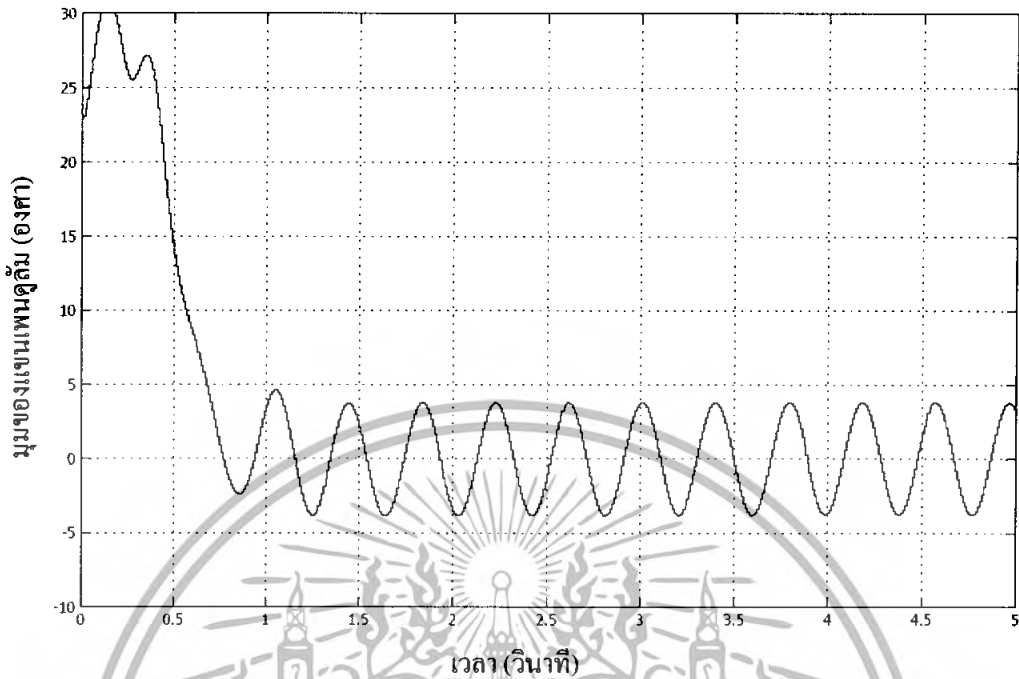
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า การปรับพีซีซีเซตดังกล่าวทำให้ตัวควบคุมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับระบบมากยิ่งขึ้น โดยจะช่วยปรับปรุงการตอบสนองของระบบให้ดีขึ้นในสองประการด้วยกัน ประการแรกก็คือ จะช่วงลดปัญหาการเข้าสู่สมมูลซ้ำเมื่อมีการหน่วงเวลาการตอบสนองที่เอาต์พุตหรือที่ความถี่ออฟที่เอาต์พุตต่ำ โดยจะทำให้ระบบเข้าสู่สมมูลได้เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7.16 (เปรียบเทียบกับรูป 7.14) และประการที่สองก็คือจะทำให้ระบบยังคงสามารถควบคุมการทรงตัวได้เมื่อมีการหน่วงเวลาในการตอบสนองที่เอาต์พุตมากยิ่งขึ้น โดยจะทำให้ระบบยังสามารถรักษาการทรงตัวอยู่ได้ที่มีความถี่ออฟทางเอาต์พุตต่ำสุดเท่ากับ 30 เรเดียนต่อวินาที ดังแสดงได้ดังรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแชนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่ออฟ 50 เรเดียนต่อวินาที เมื่อมีการปรับพีซีซีเซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

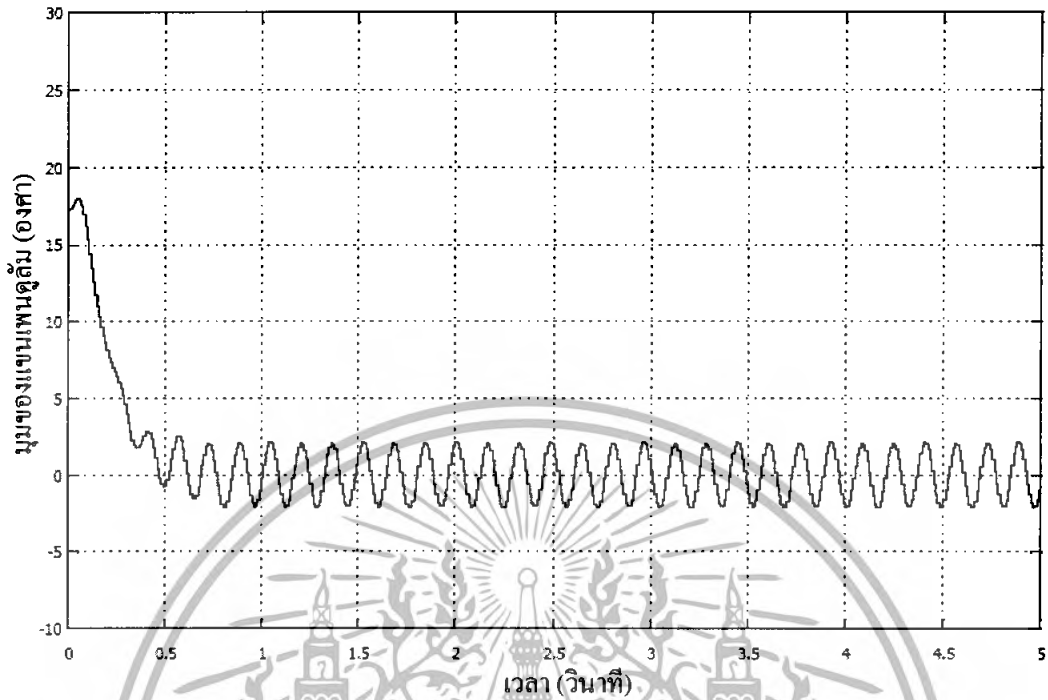


รูปที่ 7.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 30 เรเดียนต่อวินาที เมื่อมีการปรับพีชซีเซตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุม

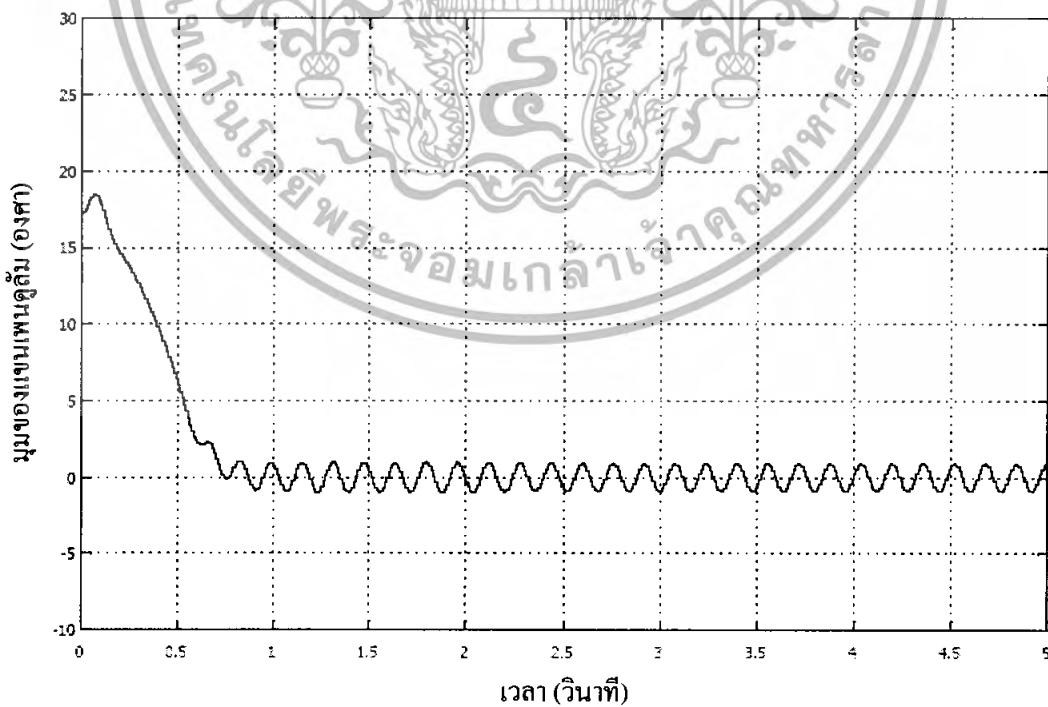
#### 7.2.6 ผลจากการลดขนาดแรงเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีชซี

จากการทดลองลดขนาดแรงเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีชซี โดยการปรับขนาดของอัตราขยายที่เอาต์พุต จะเห็นว่า การลดขนาดของแรงที่เอาต์พุตจะส่งผลให้ช่วงมุมในการแกว่งของแขนเพนดูลัมในสภาวะสมดุลมีขนาดแคบลง การรักษาการทรงตัวในสภาวะสมดุลจึงดีขึ้น ในขณะเดียวกัน การลดขนาดของแรงเอาต์พุตยังส่งผลให้ระบบเข้าสู่สมดุลช้าลงอีกด้วย ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 7.18 และ 7.19 ดังนั้น ในการปรับขนาดของแรงเอาต์พุตจึงต้องปรับขนาดให้อยู่ในช่วงที่พอเหมาะ ไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองที่ดีทั้งในช่วงก่อนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลเรียบร้อยแล้ว

นอกจากนี้ ยังจะได้ว่าการลดแรงเอาต์พุตจากตัวควบคุมพีชซีจะช่วยให้ระบบยังคงสามารถรักษาสมดุลได้เมื่อมีการหน่วงเวลาในการตอบสนองที่เอาต์พุตมากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 7.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแฉงเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่ความถี่คัทออฟ 50 เเรเดียนต่อวินาที อัตราขยายที่เอาท์พุทเป็น 1 เท่า



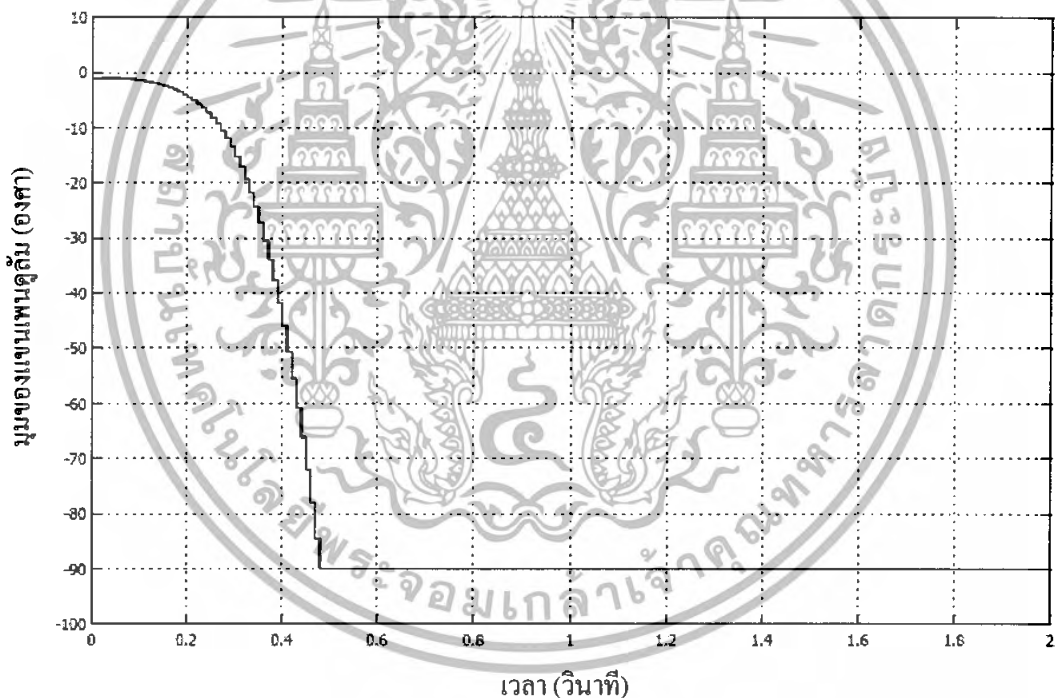
รูปที่ 7.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแฉงเพนคูล์ม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน)

ที่ความถี่คัทออฟ 50 เเรเดียนต่อวินาที อัตราขยายที่เอาท์พุทเป็น 0.7 เท่า

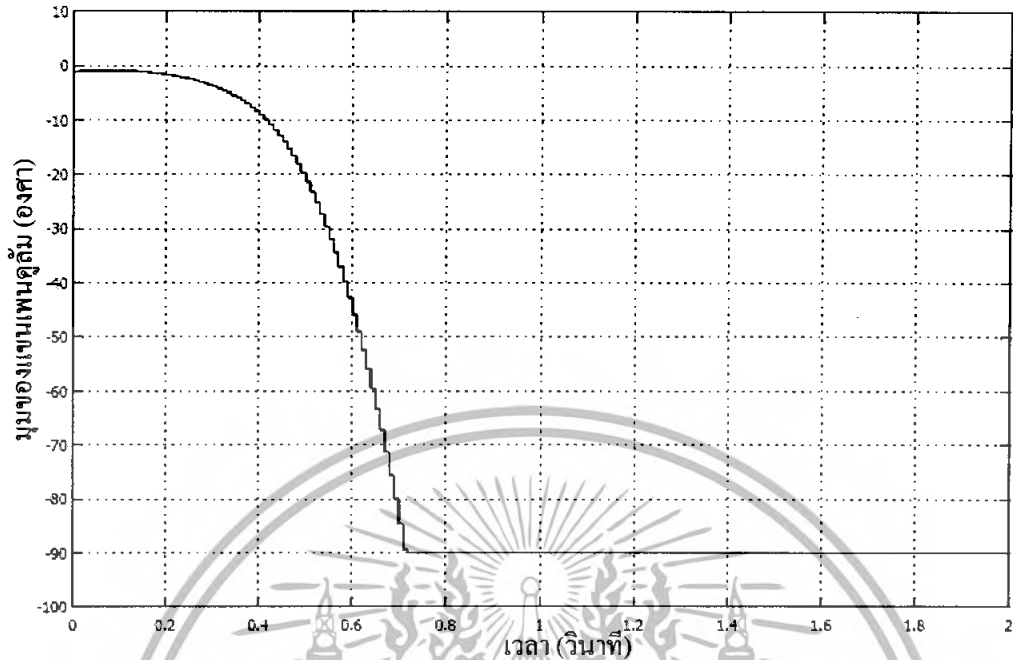
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.2.7 ผลจากการเพิ่มความยาวของแขนเพนดูลัม

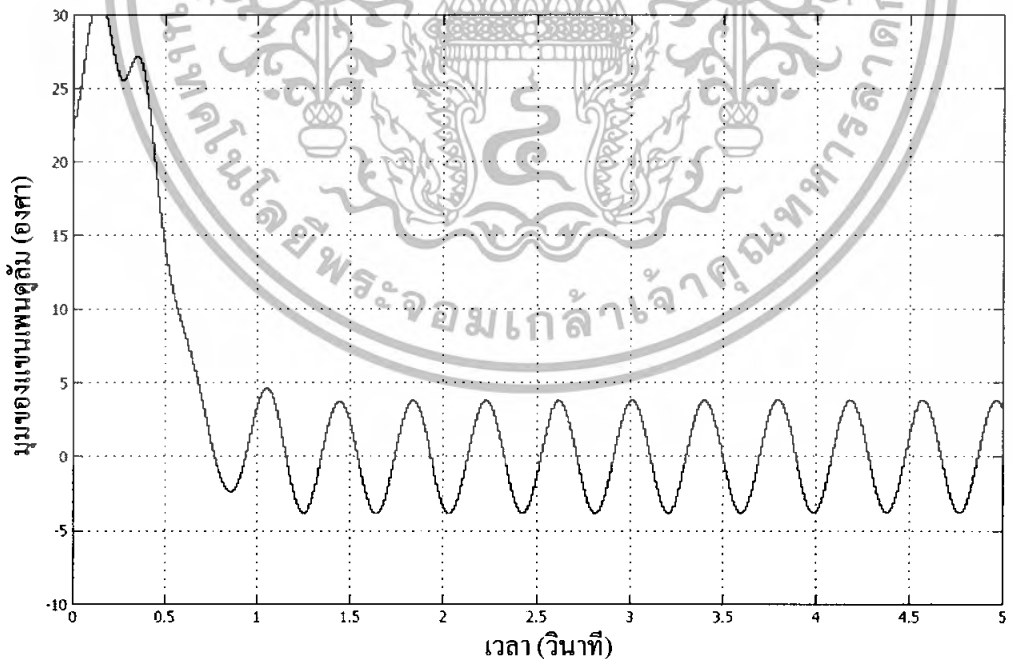
เมื่อทดลองปรับความยาวของแขนเพนดูลัมให้ยาวมากยิ่งขึ้น จะเห็นว่าแขนเพนดูลัมจะเคลื่อนที่ช้าลงกว่าเดิม โดยในกรณีที่ไม่มีแรงป้อนแรงให้กับตัวรถ แขนเพนดูลัมที่มีความยาว 40 เซนติเมตรจะล้าช้ากว่าแขนเพนดูลัมที่มีความยาว 20 เซนติเมตร ดังแสดงการเปรียบเทียบได้ในรูปที่ 7.20 และ 7.21 และในกรณีที่มีการป้อนแรงให้กับตัวรถด้วยตัวควบคุมพีซี จะเห็นว่าการแกว่งของแขนเพนดูลัมที่มีความยาว 40 เซนติเมตรจะช้ากว่าการแกว่งของแขนเพนดูลัมที่มีความยาว 20 เซนติเมตร ดังแสดงการเปรียบเทียบได้ในรูปที่ 7.22 และ 7.23 นอกจากนี้การเพิ่มความยาวแขนเพนดูลัม จะตรงผลต่อการทรงตัวโดยเพิ่มแรงเอาท์พุทเมื่อมีการเพิ่มความยาวแขนเพื่อให้แขนเพนดูลัมยังคงสามารถควบคุมการทรงตัวได้ดี



รูปที่ 7.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อปล่อยให้แขนเพนดูลัมตกอย่างอิสระและแขนเพนดูลัมมีความยาว 20 เซนติเมตร

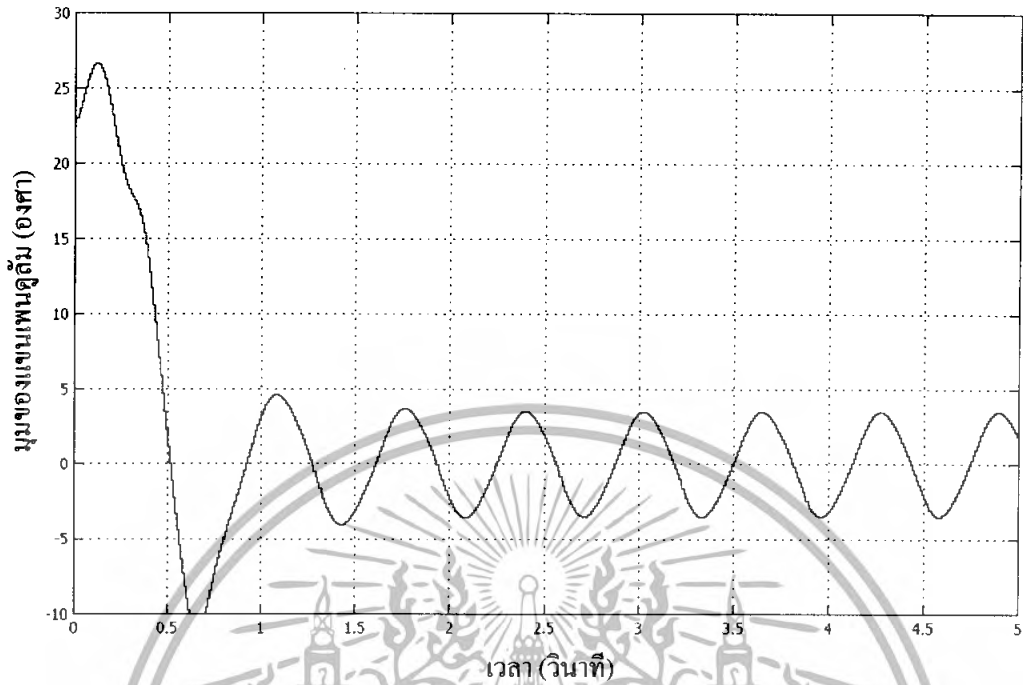


รูปที่ 7.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ที่เมื่อปล่อยให้แขนเพนดูลัมตกอย่างอิสระและแขนเพนดูลัมมีความยาว 40 เซนติเมตร



รูปที่ 7.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ความยาวแขนเพนดูลัมเท่ากับ 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

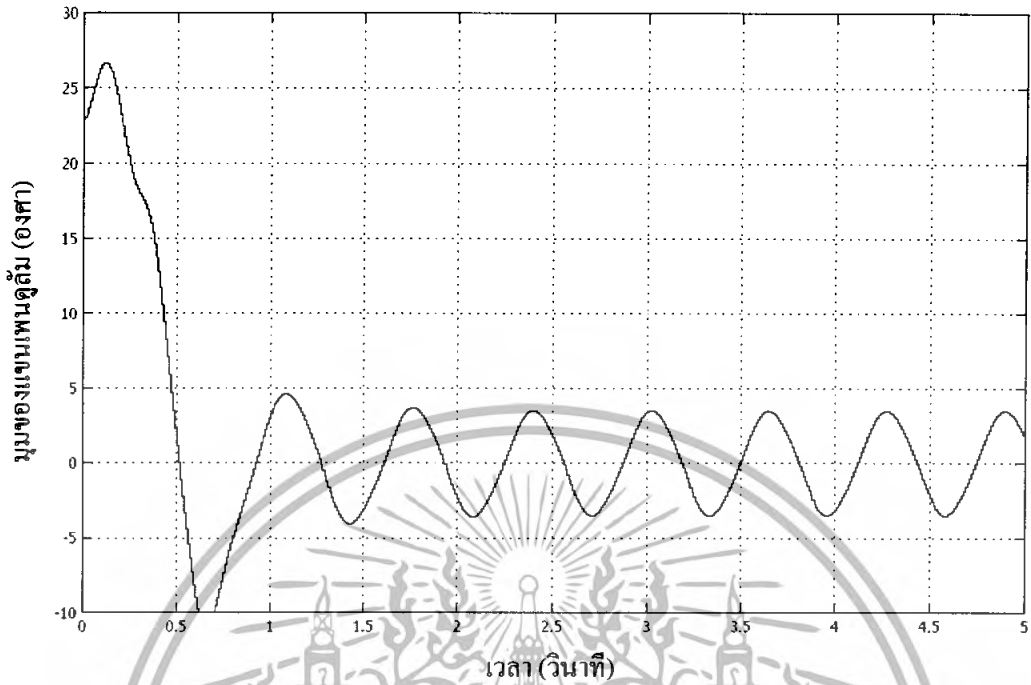


รูปที่ 7.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแอมพลิจูด (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ความยาวแอมพลิจูดเท่ากับ 40 เซนติเมตร

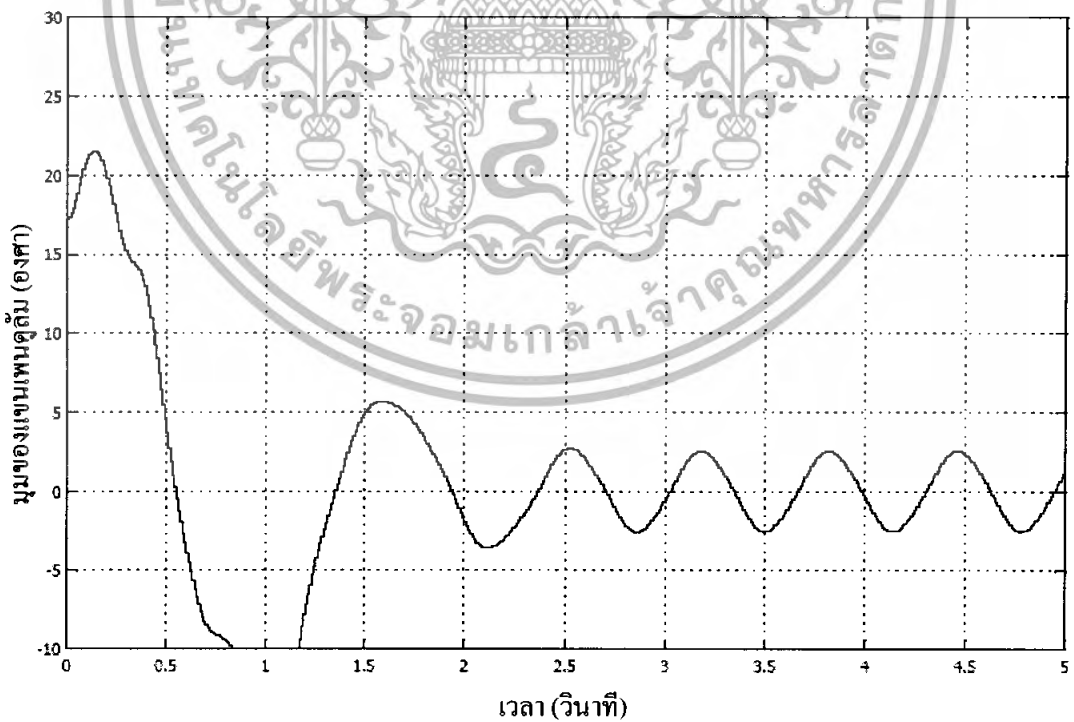
### 7.2.8 ผลจากการเพิ่มน้ำหนัก

จากผลการทดลองเพิ่มน้ำหนักตุ้มขึ้นเท่าตัว จาก 0.77 กิโลกรัมเป็น 1.5 กิโลกรัม แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักตุ้มจะทำให้การเข้าสู่สมดุลช้าลง แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มน้ำหนักตุ้มขึ้นเกือบเท่าตัวแต่ระบบก็ยังสามารถรักษาการทรงตัวอยู่ได้ ดังแสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแฉงเพนดูลัม (แกนนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อตัวรตมีน้ำหนัก 0.77 กิโลกรัม

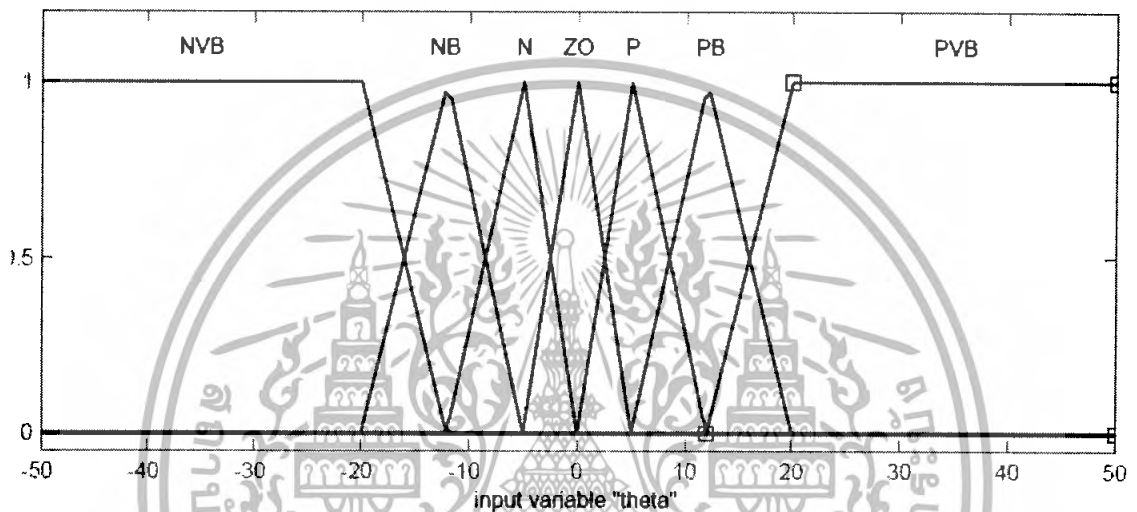


รูปที่ 7.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแฉงเพนดูลัม (แกนนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) เมื่อตัวรตมีน้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม

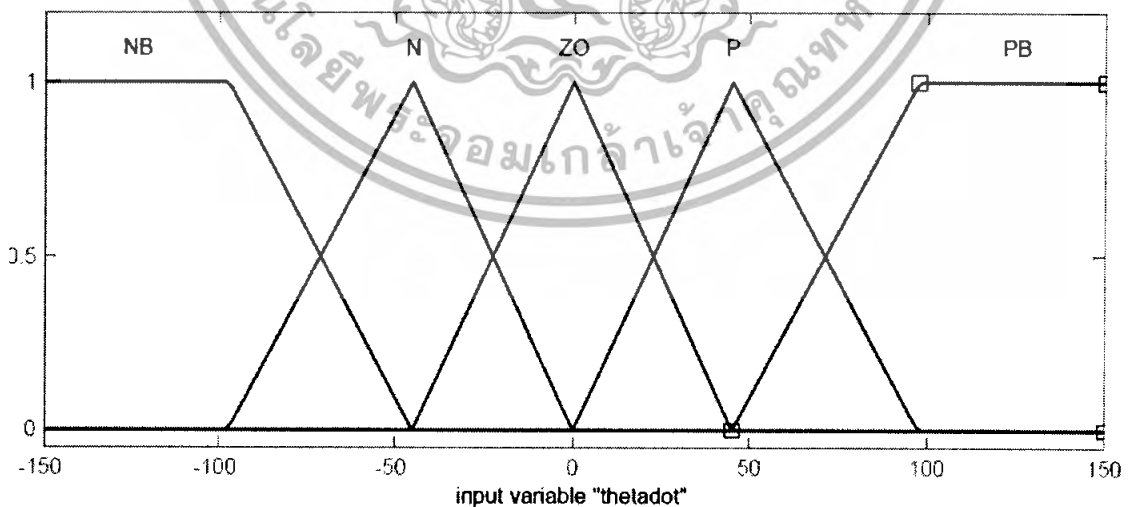
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7.3 ตัวควบคุมฟัซซีที่จะนำไปใช้งาน

จากการจำลองการทำงานและพัฒนาปรับปรุงตัวควบคุมฟัซซีตามแนวทางดังกล่าว ในที่สุดจะได้ตัวควบคุมฟัซซีที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านอินพุต ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านเอาต์พุตและเมทริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันก่แสดงได้ดังรูป

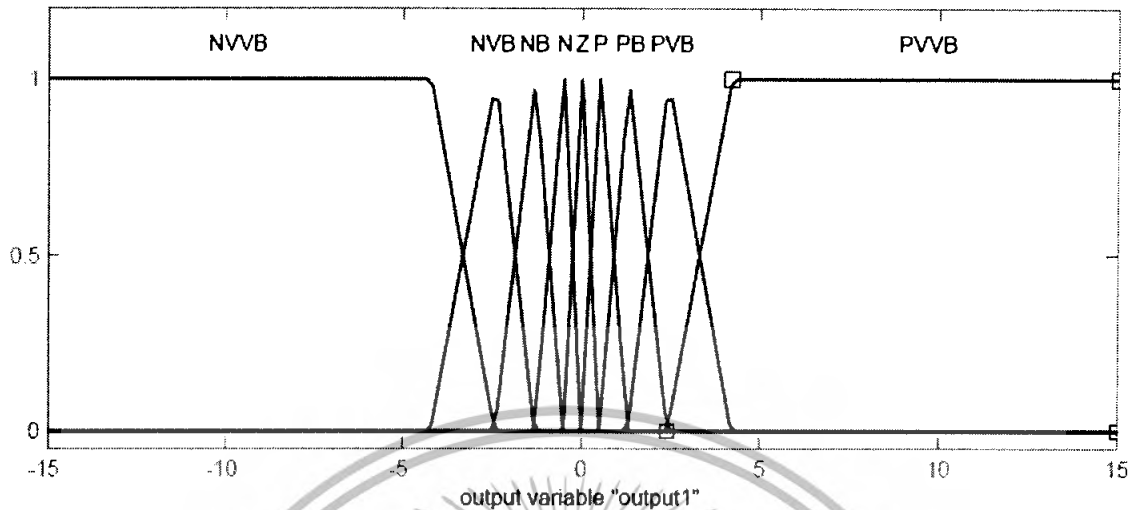


รูปที่ 7.26 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมของแกนเพนดูลัมของตัวควบคุมฟัซซีที่จะนำไปใช้งาน



รูปที่ 7.27 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุมของแกนเพนดูลัมของตัวควบคุมฟัซซีที่จะนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



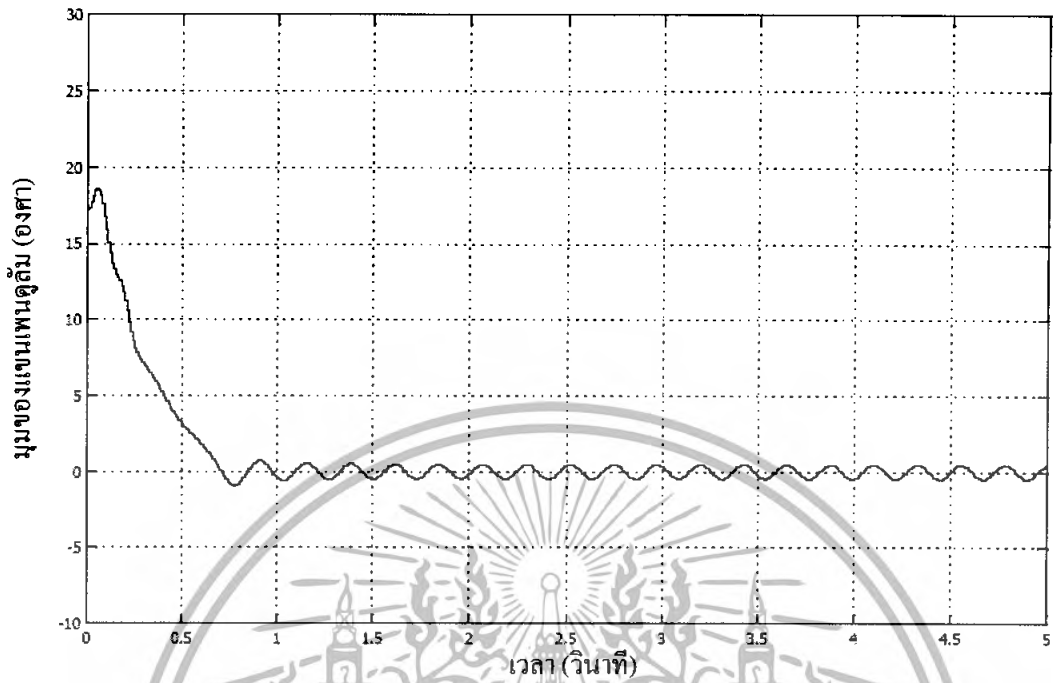
รูปที่ 7.28 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแรงเอาต์พุทของตัวควบคุมฟัซซี่ที่จะนำไปใช้งาน

ตารางที่ 7.1 ตารางแสดงเมทริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของตัวควบคุมฟัซซี่ที่จะนำไปใช้งาน

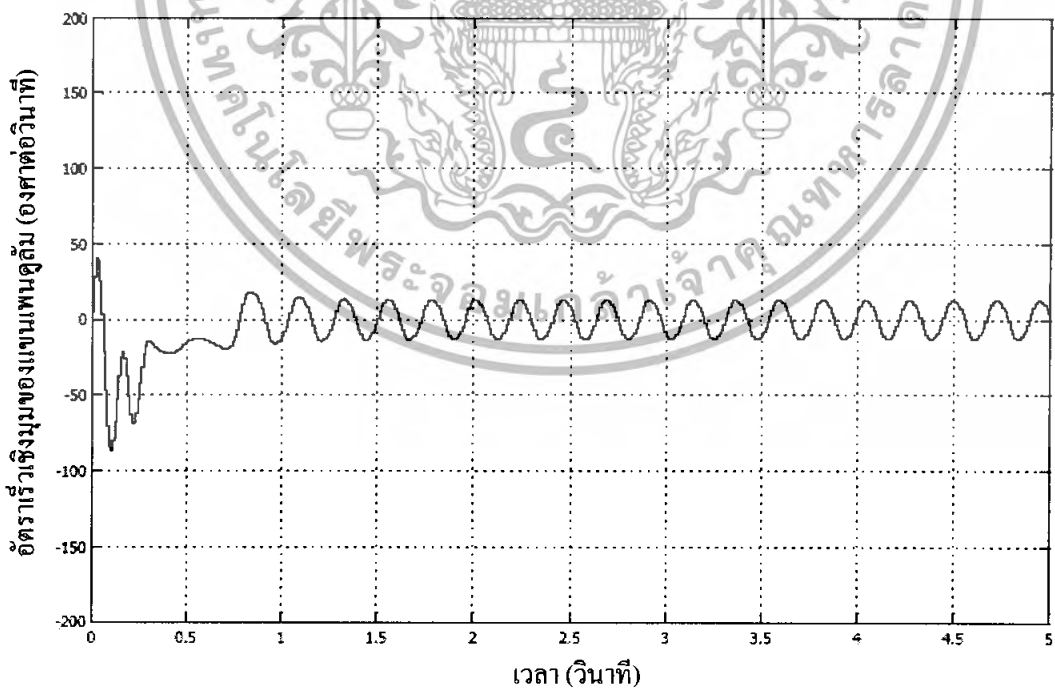
$\theta$ \ $\dot{\theta}$	PB	P	Z	N	NB
PVB	PVVB	PVVB	PVVB	PVB	PVB
PB	PVVB	PVB	PVB	PB	PB
P	PVB	PVB	PB	P	Z
Z	PB	P	Z	N	NB
N	Z	N	NB	NVB	NVB
NB	NB	NB	NVB	NVB	NVVB
NVB	NVB	NVB	NVVB	NVVB	NVVB

จากผลการจำลองการทำงานของระบบ จะได้ว่า การหน่วงเวลาทางด้านเอาต์พุทมากที่สุดเท่าที่ระบบจะยังคงสามารถควบคุมการทรงตัวอยู่ได้นั้นอยู่ที่ความถี่คัทออฟ 30 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งผลการจำลองการทำงานเมื่อกำหนดให้ความยาวแขนเพนดูลัมเป็น 20 เซนติเมตร อัตราขยายเอาต์พุทเท่ากับ 0.8 เท่า และจำลองการทำงานที่ความถี่ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

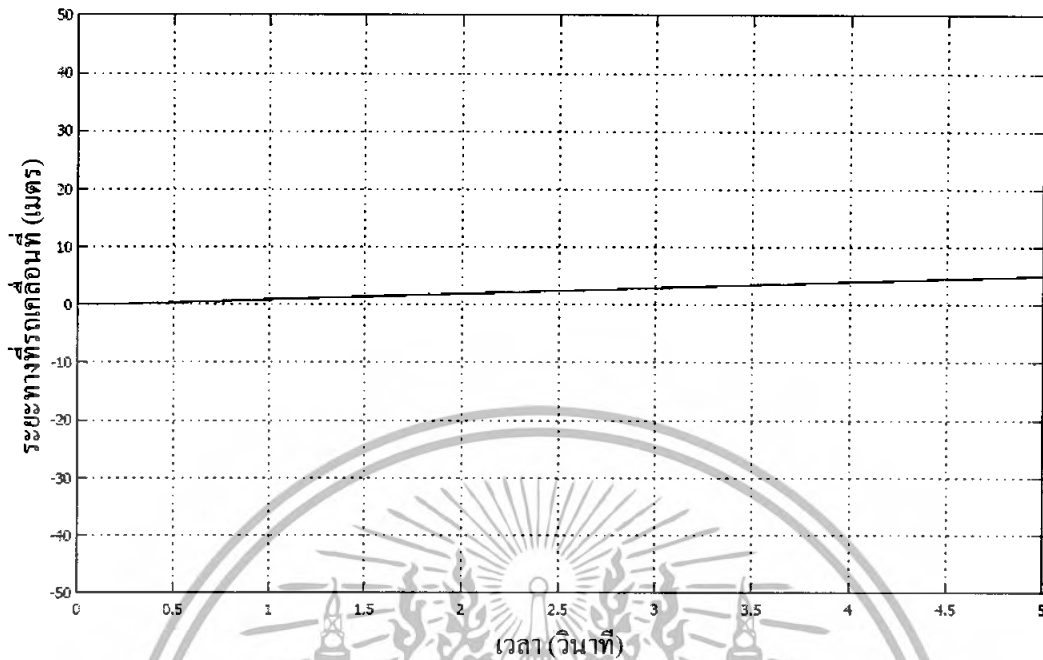


รูปที่ 7.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแชนพินดูลิ้ม (แกนนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่คัทออฟ 60 เเรเดียนต่อวินาที

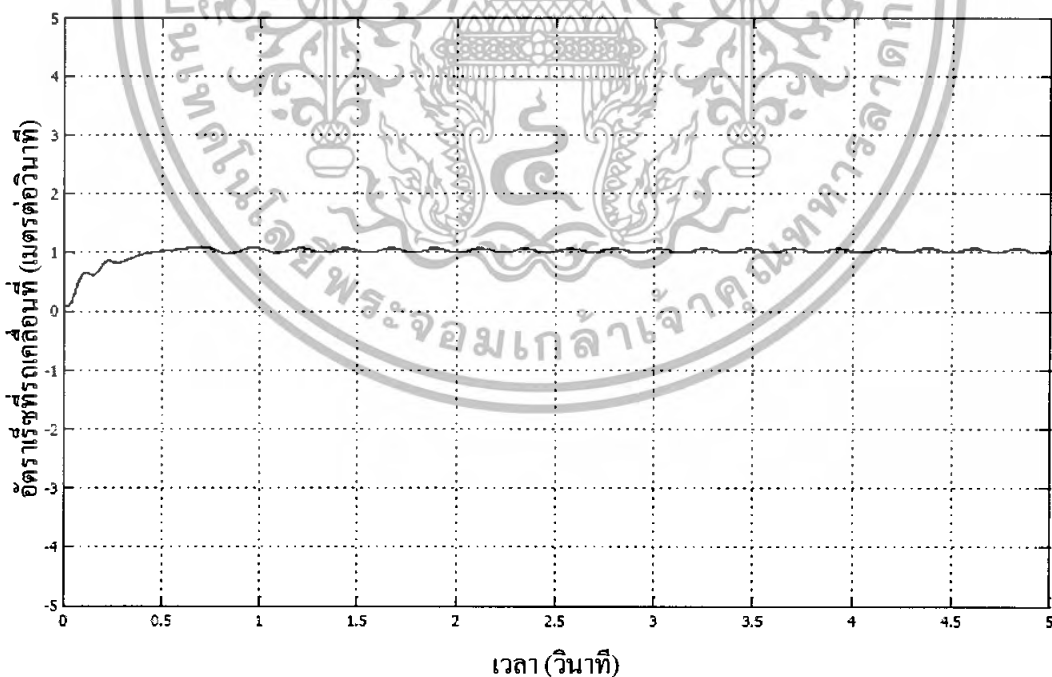


รูปที่ 7.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของแชนพินดูลิ้ม (แกนนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชชีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่คัทออฟ 60 เเรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

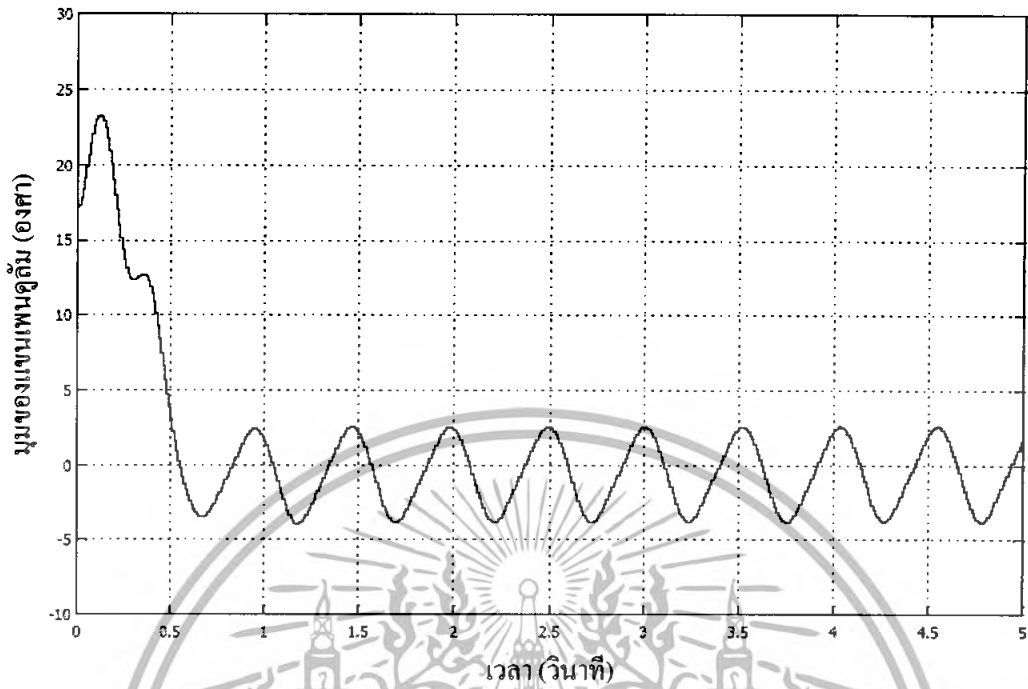


รูปที่ 7.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่รถเคลื่อนที่ (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชซีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่ทอพอ 60 เเรเคียนต่อวินาที

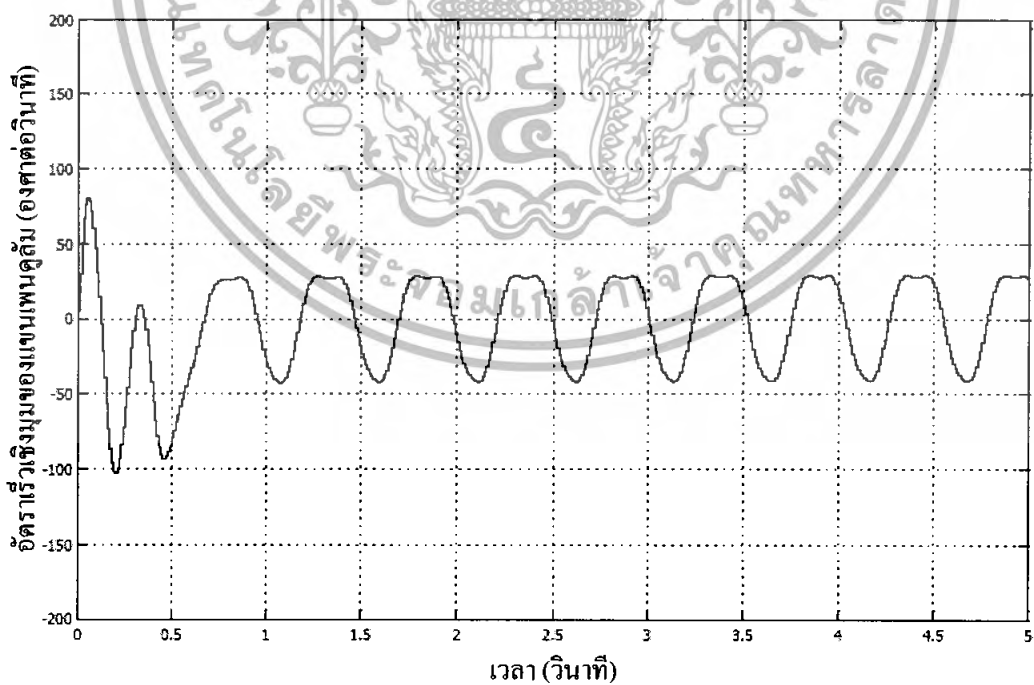


รูปที่ 7.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่รถเคลื่อนที่ (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชซีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่ทอพอ 60 เเรเคียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

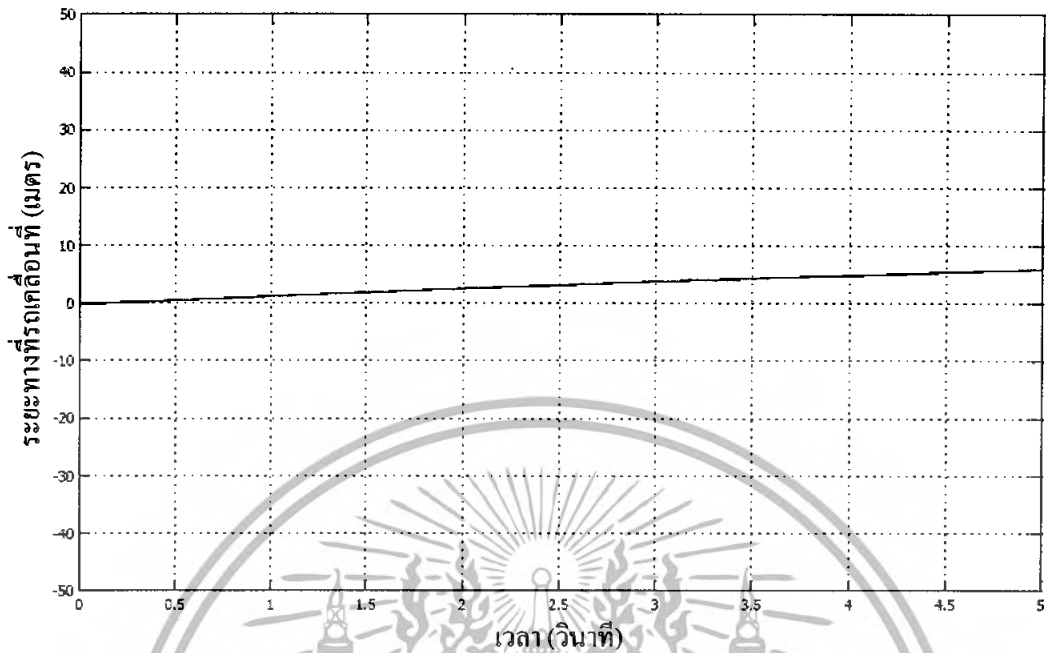


รูปที่ 7.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีซซีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่คัทออฟ 30 เเรเดียนต่อวินาที

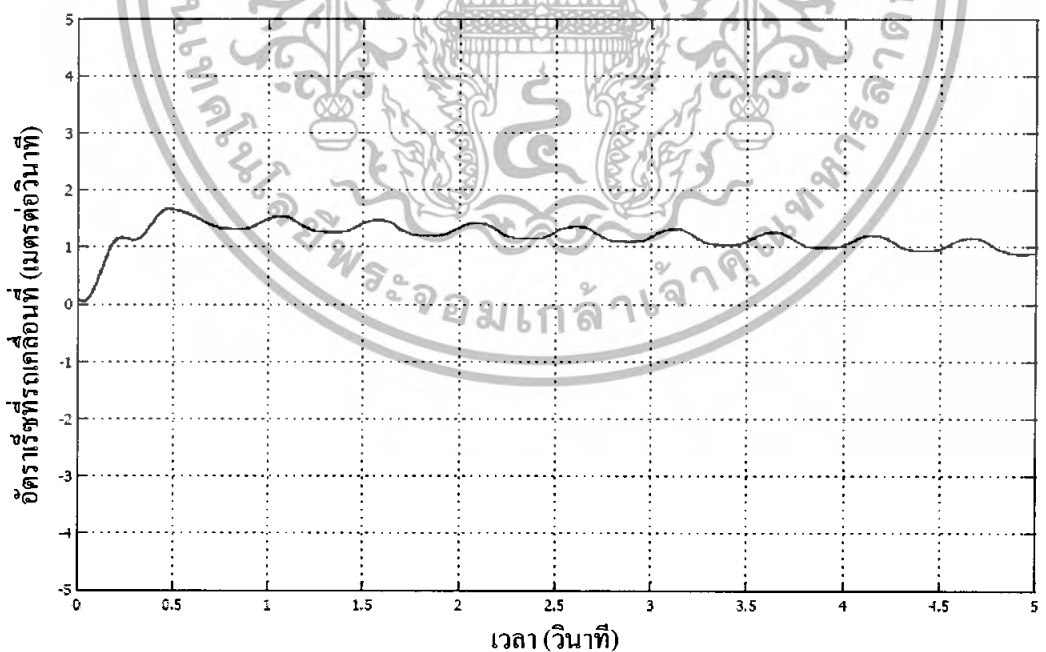


รูปที่ 7.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของแขนเพนดูลัม (แกนนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีซซีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่คัทออฟ 30 เเรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่รถเคลื่อนที่ (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชซีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่ทอพอ 30 เเรเคียนต่อวินาที



รูปที่ 7.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่รถเคลื่อนที่ (แกนตั้ง) กับเวลา (แกนนอน) ของตัวควบคุมพีชซีที่จะนำไปใช้งาน ที่ความถี่ทอพอ 30 เเรเคียนต่อวินาที

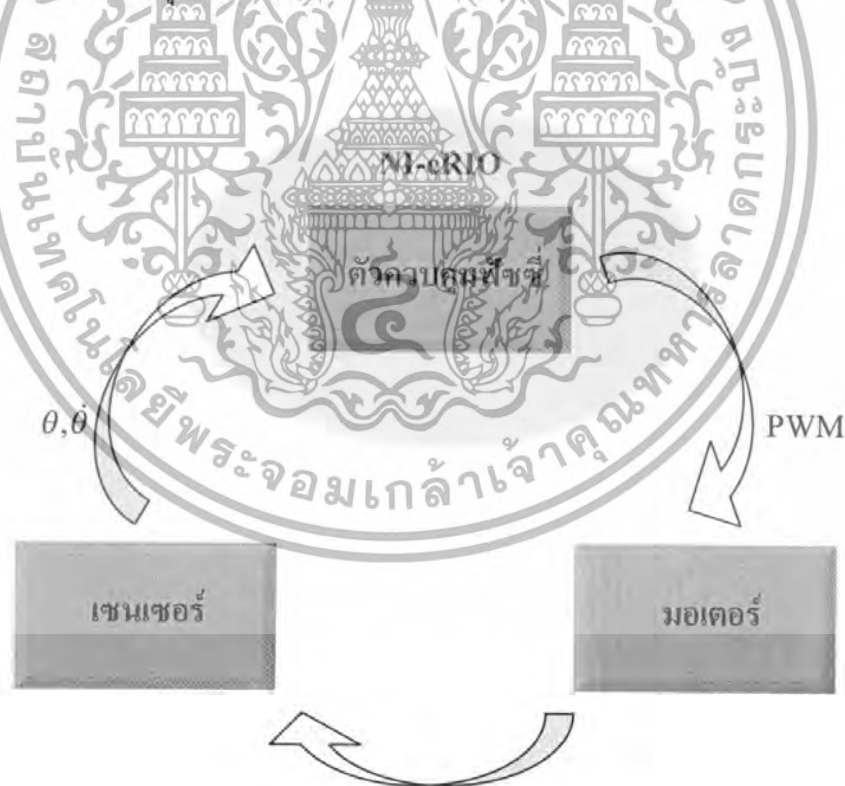
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### การสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์

#### 8.1 โครงสร้างของระบบ

โครงสร้างของระบบจะแบ่งออกเป็นสามภาคหลักด้วยกัน ได้แก่ ภาคเซนเซอร์ ภาคควบคุม และภาคเอาพุทขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 8.1 ในส่วนของภาคเซนเซอร์จะทำหน้าที่รับข้อมูลพฤติกรรมการทำงานของตัวรถซึ่งได้แก่ มุมของแขนเพนดูลัมและอัตราเร็วเชิงมุมของแขนเพนดูลัม แล้วป้อนข้อมูลที่ได้อีกแก่ภาคควบคุมหรือตัวควบคุมพีซี ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณอินพุทเพื่อสร้างสัญญาณเอาพุทที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์อีกที สัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะประกอบด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชันในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์และสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 8.1 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบ

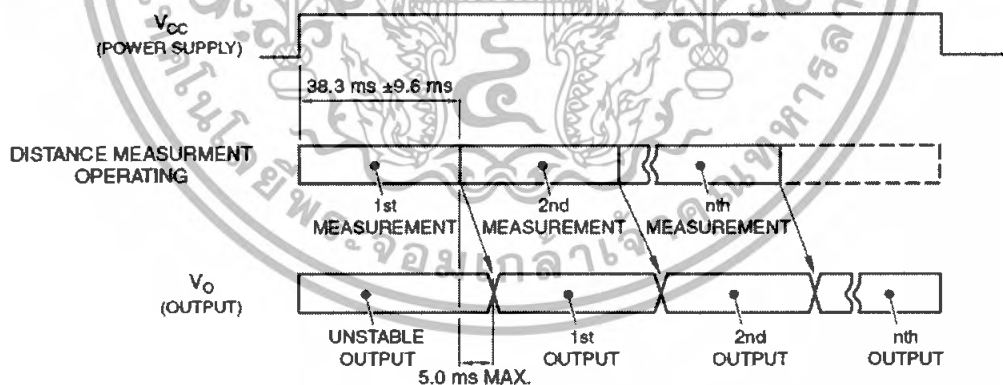
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.2 ภาคเซนเซอร์

ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ จะอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 2 ประเภทด้วยกัน อันได้แก่ มุมเอียงของแขนเพนคูลัมและอัตราเร็วเชิงมุม เพื่อใช้ในการควบคุมการทรงตัว โดยในที่นี้จะใช้เซนเซอร์สองประเภทด้วยกัน ได้แก่ เซนเซอร์วัดระยะทางเพื่อใช้ในการวัดมุมเอียงของแขนเพนคูลัมและไจโรสโคปเพื่อวัดอัตราเร็วเชิงมุม โดยสัญญาณจากเซนเซอร์ทั้งสองจะถูกปรับแต่งด้วยวงจรปรับแต่งสัญญาณเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการป้อนให้กับภาคควบคุมต่อไป

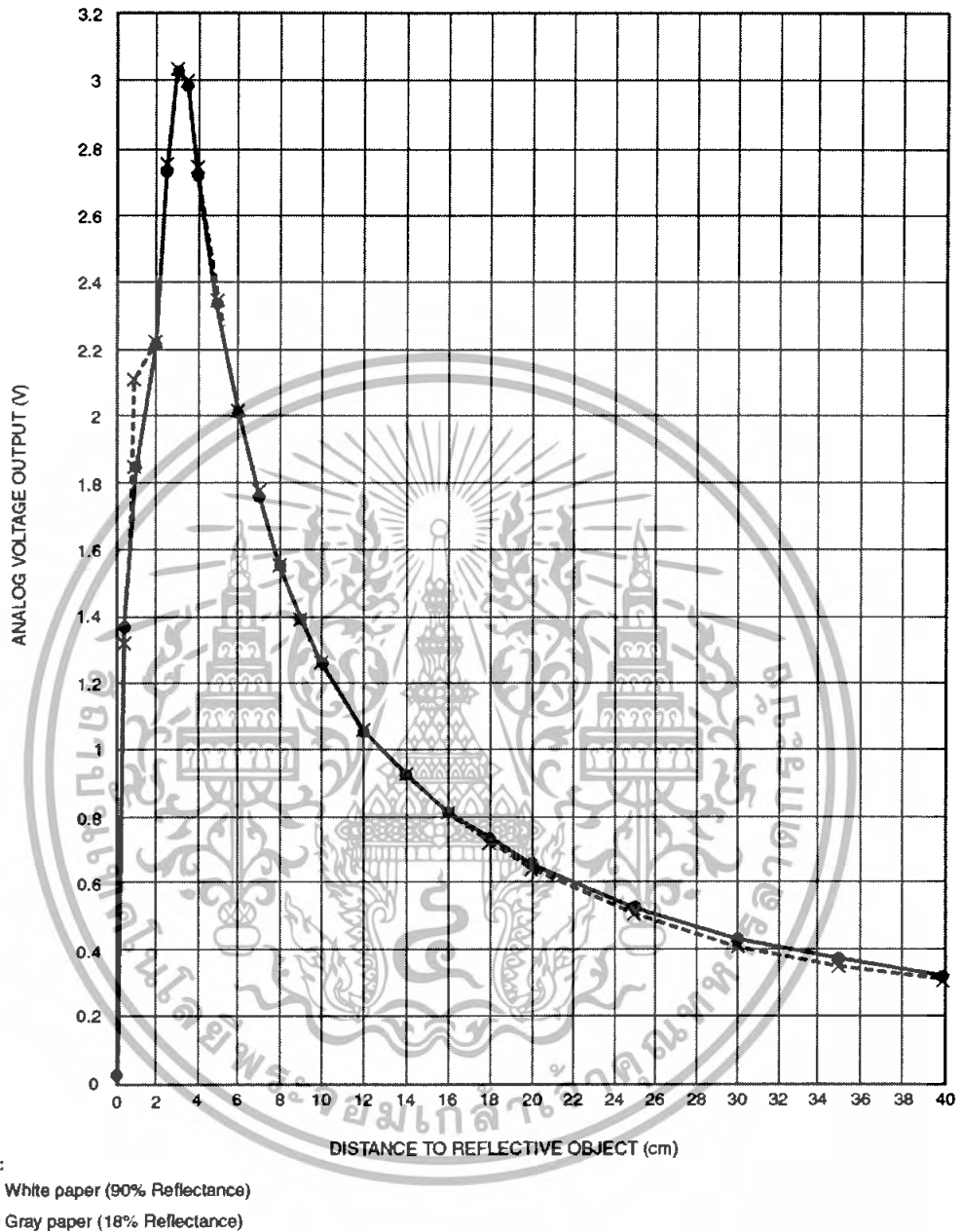
### 8.2.1 เซนเซอร์วัดระยะทาง

เลือกใช้เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรดเบอร์ GP2D120 วัดระยะทางได้ตั้งแต่ 4 ถึง 30 เซนติเมตร ให้เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟตรงที่มีขนาดขึ้นอยู่กับระยะทางที่วัด ใช้เวลาในการตอบสนอง 39 มิลลิวินาที (คิดเป็นความถี่ 25.64 เฮิรตซ์) โดยไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของเซนเซอร์และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาท์พุทกับระยะทางที่วัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.2 และรูปที่ 8.3 ตามลำดับ



รูปที่ 8.2 ไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทาง

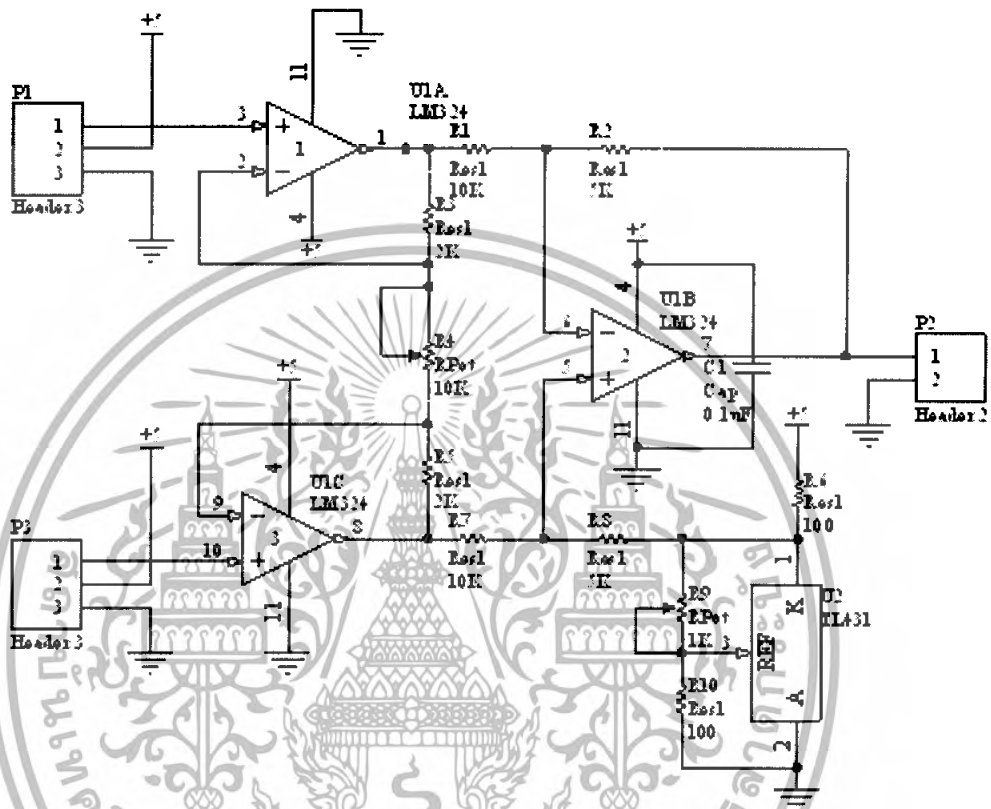
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับระยะทางที่วัด

ในการออกแบบตัวหุ่นยนต์ จะติดตั้งเซนเซอร์ที่ด้านหน้าและด้านหลังของหุ่นยนต์ไว้ด้านละตัว แล้วเปรียบเทียบแรงดันที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสองเพื่อให้ทราบว่าหุ่นยนต์เอนไปด้านหน้าหรือด้านหลัง และเอนมากน้อยเท่าไร ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณที่ได้มาหาผลต่างและเพิ่มแรงดันออฟเซตเข้าไปเพื่อป้อนข้อมูลให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากผลต่างที่ได้นั้นจะมีค่าทั้งบวกและลบขึ้นอยู่กับว่าหุ่นยนต์เอนไปทิศทางใด ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งรับข้อมูลเพื่อนำไปเข้าตัวแปลงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลนั้น จะรับแรงดันได้ในช่วง 0 – 5 โวลต์ ในการออกแบบวงจรจะใช้ วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8.4



รูปที่ 8.4 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์

จากรูปที่ 8.4 กำหนดให้  $R_1 = R_3$ ,  $R_5 = R_6$  และ  $R_2 = R_4 + R_8/R_9$  จากสมการอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์สามารถคำนวณอัตราขยายของวงจรได้ดังนี้

$$V_o = \left(1 + \frac{2R_5}{R_G}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) (V_{IN2} - V_{IN1}) \quad (8.1)$$

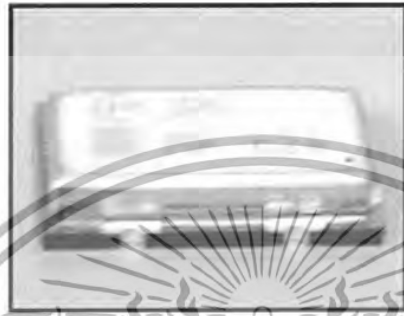
$$\frac{V_o}{(V_{IN2} - V_{IN1})} = \left(1 + \frac{2(2K)}{R_G}\right) \left(\frac{5K}{10K}\right) = 0.7 \rightarrow \infty$$

ในการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ จะปรับ  $R_G$  เพื่อให้ได้ขนาดแรงดันที่นำไปใช้งาน อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และปรับ VR 10K เพื่อเป็นการปรับค่าแรงดันออฟเซต โดยจะปรับให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 2.5 โวลต์ในขณะที่ผลต่างแรงดันทางอินพุตเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

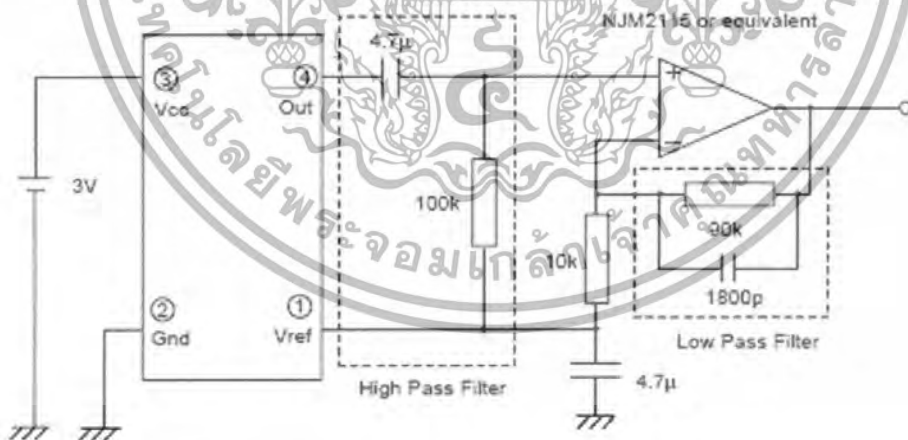
## 8.2.2) ใจโรสโคป

เลือกใช้ใจโรสโคปประเภทฟิโซอิลิกทริกซ์ ยี่ห้อมูราตะ เบอร์ MA624 ซึ่งสามารถวัดอัตราเร็วเชิงมุมได้ในช่วง  $\pm 300$  องศาต่อวินาที และมีความถี่ในการตอบสนอง 50 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 8.5 ใจโรสโคปยี่ห้อมูราตะ เบอร์ MA624

วงจรปรับแต่งสัญญาณที่ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณเอาต์พุตจากใจโรสโคปเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้สามารถแสดงได้ดังรูป



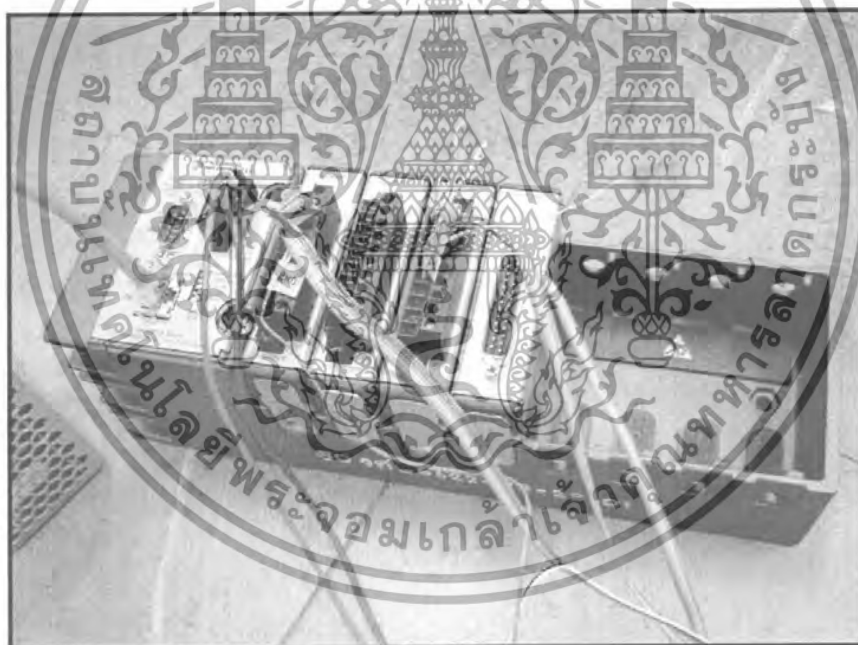
รูปที่ 8.6 วงจรขยายสัญญาณเอาต์พุตจากใจโรสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.3 ภาคควบคุม

### 8.3.1 ส่วนประมวลผลกลาง

ในส่วนของภาคควบคุมจะใช้โปรแกรมแลปวิว 8.2 (LabVIEW 8.2) ในการประมวลผล โดยส่วนฮาร์ดแวร์ที่จะใช้เป็นหน่วยประมวลผลกลางคือชุดอุปกรณ์ Compact cRIO ซึ่งประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลางสองส่วนเชื่อมต่อกัน ได้แก่ ชุดตัวควบคุม Ni cRIO-9004 มีความเร็วในการทำงาน 512 เมกะเฮิร์ตซ์และชุดอุปกรณ์ Ni cRIO-9104 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ FPGA มีความเร็วในการทำงาน 40 เมกะเฮิร์ตซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 8.7 ในการเชื่อมต่อกับหุ่นยนต์สามารถเชื่อมต่อผ่านทางอุปกรณ์แปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลในการรับสัญญาณอินพุทเบอร์ NI 9201 ซึ่งมีความละเอียดในการแปลง 12 บิต และอุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกในการขับสัญญาณเอาต์พุท เบอร์ NI 9263 ซึ่งมีความละเอียดในการแปลง 16 บิต

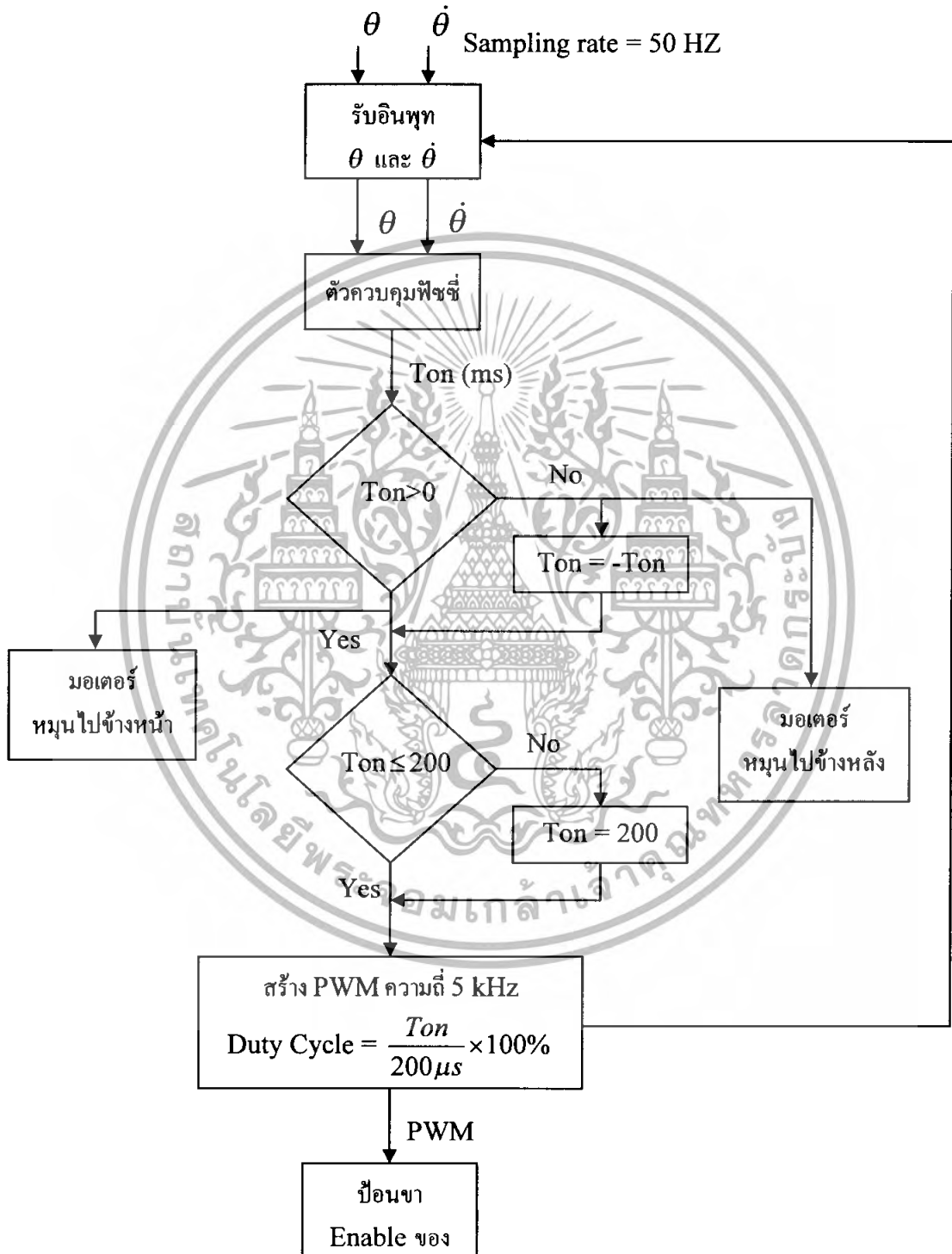


รูปที่ 8.7 ชุดอุปกรณ์ NI cRIO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8.3.2 แผนผังโปรแกรมการทำงาน

แผนผังโปรแกรมการทำงานของหุ่นยนต์ที่จะใช้ส่วนของภาคควบคุมสามารถแสดงได้ดังนี้

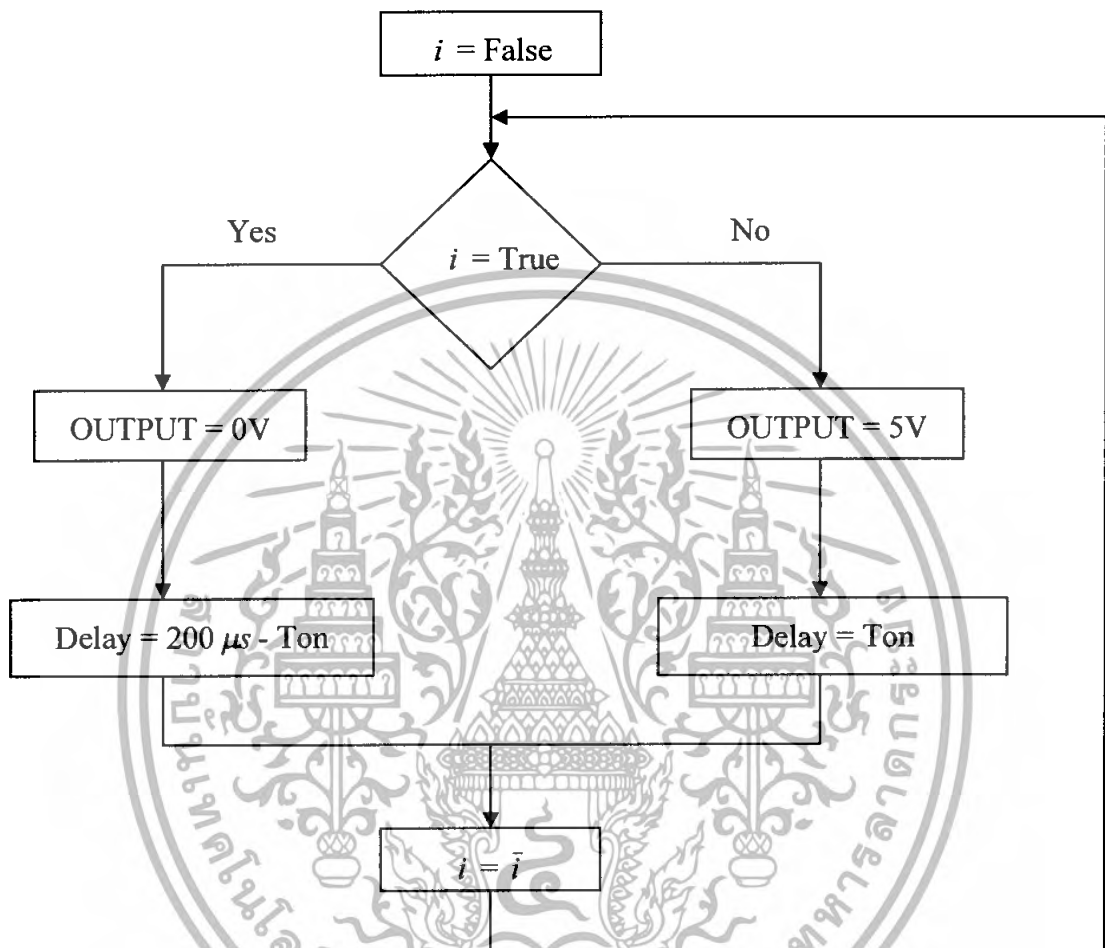


รูปที่ 8.8 แผนผังโปรแกรมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแผนผังโปรแกรมในส่วนของ การสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดคูเลชันสามารถแสดงได้ดัง

รูป



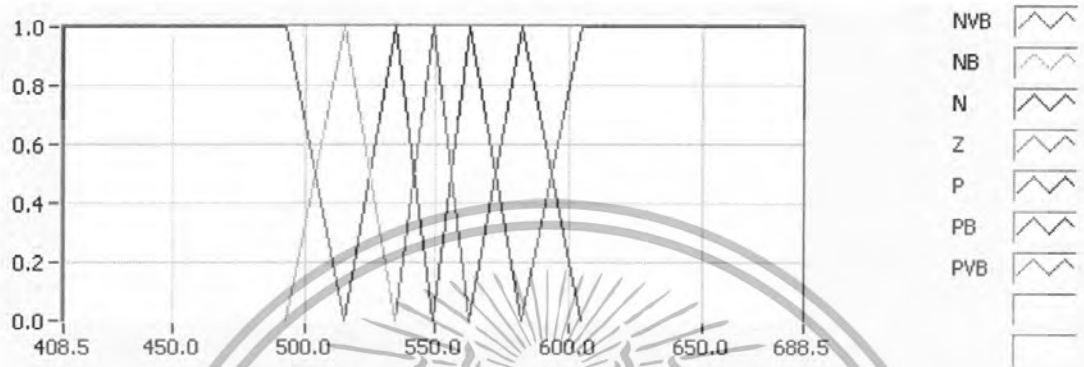
รูปที่ 8.9 แผนผังโปรแกรมในส่วนสร้างสัญญาณพัลส์วิดมอดคูเลชัน

### 8.3.3 คุณสมบัติของตัวควบคุมพีชซีที่ใช้งานจริง

จากตัวควบคุมพีชซีที่ได้จากการจำลองการทำงานในบทที่ 7 จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน ได้แก่ ปรับค่าสเกลของมุมให้สอดคล้องกับแรงดันวัดได้จากเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดระยะทาง ปรับค่าสเกลของอัตราเร็วเชิงมุมให้อยู่ในช่วงแรงดันที่วัดได้จริงจากเอาต์พุตของไจโรสโคป และปรับจูนค่าแรงดันเอาต์พุตให้เหมาะสมกับระบบ โดยจากเดิมตัวควบคุมจะให้เอาต์พุตเป็นแรงที่กระทำกับตัวรถ ในการโปรแกรมจะเปลี่ยนให้อาต์พุตเป็นความกว้างของพัลส์ของสัญญาณพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

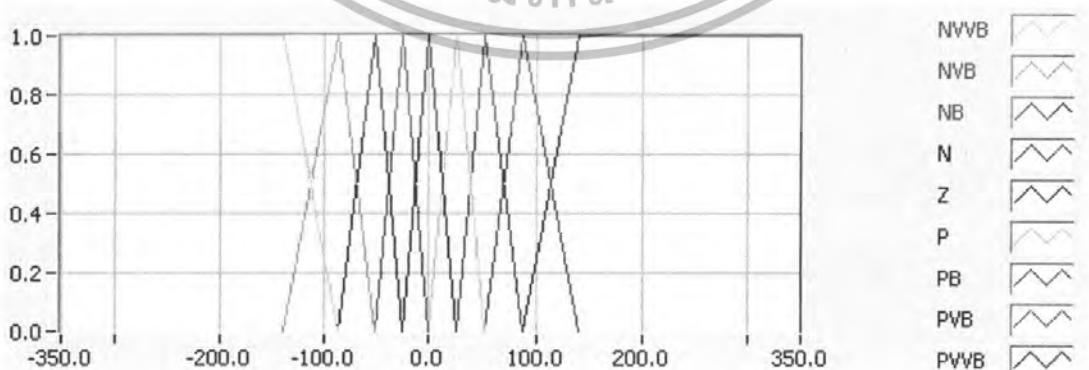
วิดมอดคูล์ (Ton) ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ คุณสมบัติต่างๆ ของตัวควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 8.10 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมที่นำมาใช้งานจริง



รูปที่ 8.11 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราเร็วเชิงมุมที่นำมาใช้งานจริง



รูปที่ 8.12 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของความกว้างพัลส์ของสัญญาณพัลส์วิดมอดคูล์ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่นำมาใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1 ตารางแสดงเมทริกซ์เปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของตัวควบคุมพีชชีที่นำมาใช้งานจริง

$\theta \backslash \dot{\theta}$	PB	P	Z	N	NB
PVB	PVVB	PVVB	PVVB	PVB	PVB
PB	PVVB	PVB	PVB	PB	PB
P	PVB	PVB	PB	P	Z
Z	PB	P	Z	N	NB
N	Z	N	NB	NVB	NVB
NB	NB	NB	NVB	NVB	NVVB
NVB	NVB	NVB	NVVB	NVVB	NVVB

#### 8.4 ภาคเอาต์พุตขับเคลื่อนมอเตอร์

ในส่วนของภาคควบคุมจะสร้างสัญญาณเอาต์พุตออกมาเพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ โดยจะใช้หลักการควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณพัลส์วิดมอดดูเลชั่น ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์นั้นจะใช้การขับมอเตอร์ด้วยไอซีไดรเวอร์เบอร์ L298 ขับกระแสได้สูงสุด 2 แอมแปร์ และสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์จะประกอบด้วยสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ สัญญาณลอจิกควบคุมทิศทาง และสัญญาณพัลส์วิดมอดดูเลชั่นความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์

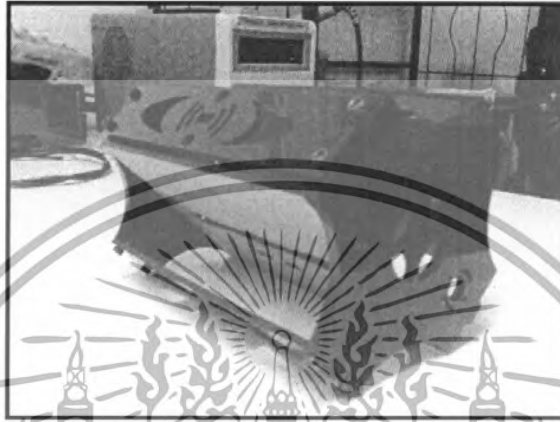
มอเตอร์ที่ใช้คือมอเตอร์ไฟตรงขนาด 12 โวลต์ ยี่ห้อ Namiki โดยที่ตัวมอเตอร์จะมีกล่องเฟืองติดอยู่เพื่อช่วยเพิ่มทอร์กในการหมุน โดยจะมีกล่องเฟืองที่ใช้มีอัตราทด 80:1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 8.13 มอเตอร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8.5 โครงสร้างของหุ่นยนต์

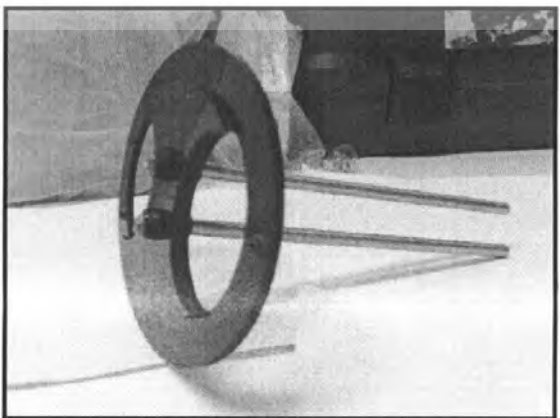
ตัวหุ่นยนต์สร้างจากแผ่นอะคริลิก จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ตัวถัง ล้อ เส้า และ ตั้มเพนคูล์ม ดังรูป



รูปที่ 8.14 ตัวถังของหุ่นยนต์

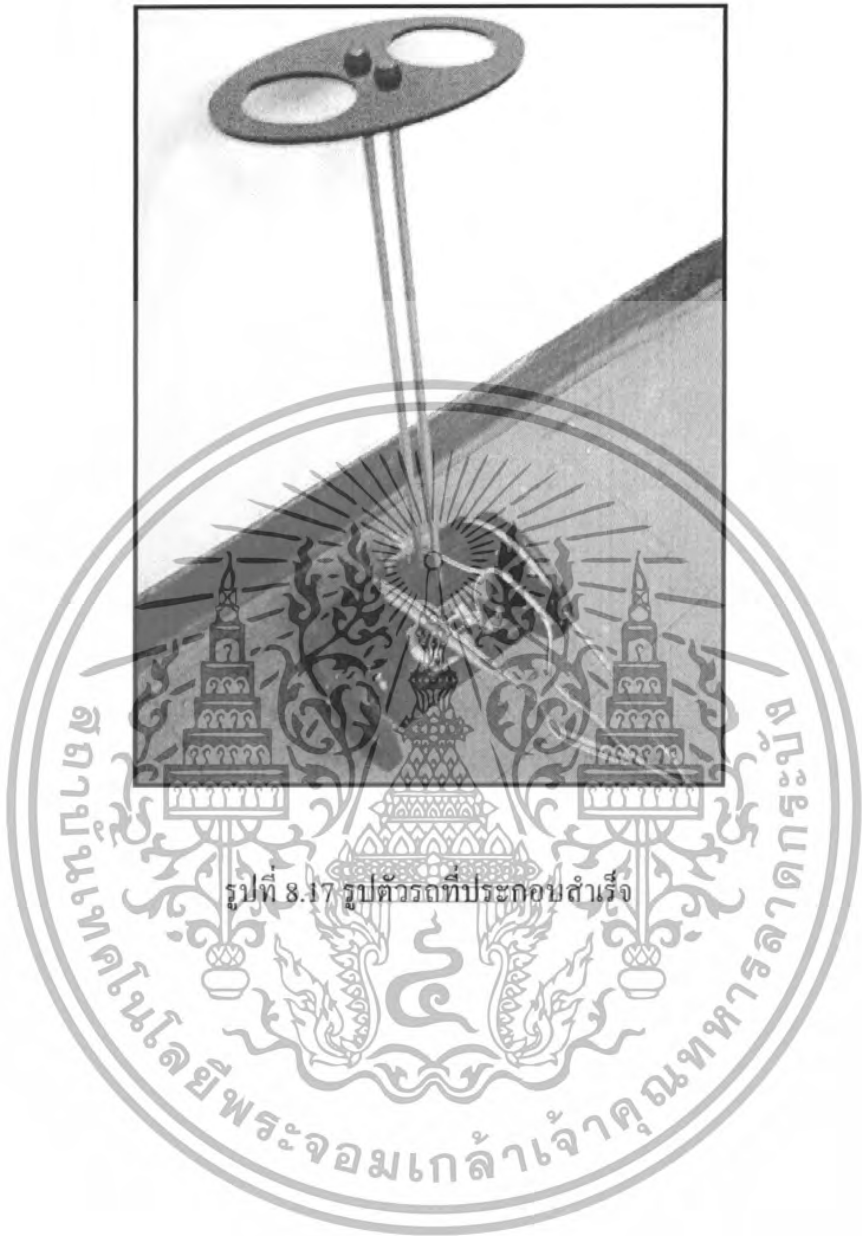


รูปที่ 8.15 ล้อของหุ่นยนต์



รูปที่ 8.16 เส้าและตั้มเพนคูล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 9

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 9.1 น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์

ตารางที่ 9.1 แสดงน้ำหนักของหุ่นยนต์

ส่วนของหุ่นยนต์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
ล้อ	138.564	138.584	138.582	138.577
ตัวถัง	228.196	228.185	228.192	228.191
เสา+คัมแพนคูลัม	90.157	90.153	90.164	90.158
วงจรขับเคลื่อน	146.988	146.980	146.981	146.983
เซ็นเซอร์	1.797	1.799	1.797	1.798
มอเตอร์	208.744	208.840	208.840	208.808

น้ำหนักรวมทั้งหมดของรถคือ 874.515 กรัม

น้ำหนักของส่วนแขนเพนคูลัม (ไม่นับจุดหมุนคือ มอเตอร์ เซ็นเซอร์ และล้อ) คือ 525.332 กรัม

#### 9.2 วัดการตอบสนองของเซนเซอร์วัดระยะทาง

ทำการวัดแรงดันที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์เมื่อหุ่นยนต์เอียงทำมุมต่างๆ กับพื้น แล้วหาผลต่างของแรงดันที่มุมเอียงนั้นๆ เทียบกับค่ากลาง ณ จุดที่หุ่นยนต์สมดุลน้ำหนัก จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเอาต์พุต จากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียงได้ดังกราฟในรูปที่ 9.1

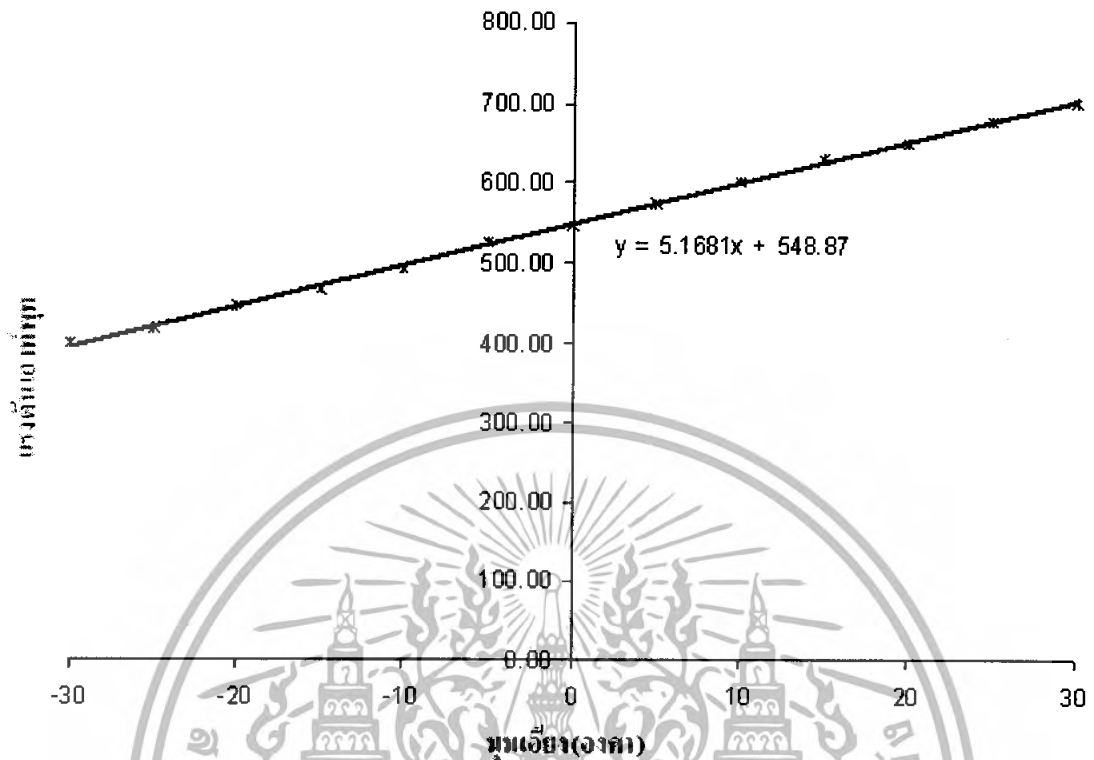
ตารางที่ 9.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตจากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง

มุมเอียง(องศา)	ผลการวัดแรงดันแต่ละครั้ง			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
-30	398.00	401.00	400.00	399.67
-25	421.00	416.00	415.00	417.33
-20	446.00	445.00	444.00	445.00
-15	471.00	467.00	463.00	467.00
-10	496.00	494.00	490.00	493.33
-5	526.00	525.00	529.00	526.67
0	546.00	544.00	549.00	546.33
5	575.00	571.00	577.00	574.33
10	609.00	600.00	601.00	603.33
15	631.00	630.00	633.00	631.33
20	649.00	649.00	652.00	650.00
25	677.00	678.00	682.00	679.00
30	704.00	699.00	703.00	702.00

\* หมายเหตุ: ค่าแรงดันที่อ่านได้เป็นข้อมูลดิจิทัลที่ได้จากการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัลด้วยความละเอียดในการแปลง 12 บิต รับอินพุตในช่วง -10 ถึง 10 โวลต์ ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่าแรงดันในหน่วยโวลต์ได้ดังนี้

$$\text{แรงดัน(โวลต์)} = (\text{ค่าแรงดันที่อ่านได้}/2048) \times 10\text{V} \quad (9.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง

จากกราฟจะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากวงจรเซนเซอร์วัดระยะทางกับมุมเอียง จะได้ว่าภายในขอบเขตของมุมที่เรานำไปใช้งาน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับมุมเอียงจะเป็นแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายขึ้น

### 9.3 วัดการตอบสนองของมอเตอร์

ในการทำงาน มอเตอร์จะมีการหมุนกลับทิศทางตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบความสามารถในการตอบสนองของมอเตอร์ในการกลับทิศทาง โดยป้อนสัญญาณพัลส์ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้กลับทิศตลอดเวลา แล้วหาความถี่สูงสุดที่มอเตอร์จะยังคงตอบสนองและหมุนกลับทิศไปมาได้ ผลการทดลองแสดงได้ดังตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9.3 ผลการตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ในการกลับทิศทาง

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

จากการทดลองจะเห็นว่าความถี่สูงสุดที่มอเตอร์ยังสามารถหมุนกลับทิศทางได้คือที่ความถี่ในช่วง 30 ถึง 40 เฮิรตซ์ แต่เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นมากกว่า 8 โวลต์ ความถี่สูงสุดที่ตอบสนองได้จะลดลง เนื่องจากที่มอเตอร์คั้งกระแสมากเกินกว่าที่แหล่งจ่ายจะจ่ายให้ได้ (ในที่นี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายกระแสได้สูงสุด 1.5 แอมแปร์) เมื่อแรงดันไฟเลี้ยงมากขึ้น มอเตอร์จะคั้งกระแสมากยิ่งขึ้น และยิ่งความถี่ในการกลับทิศเพิ่มสูงขึ้น ก็ยิ่งคั้งกระแสมากยิ่งขึ้นด้วย

#### 9.4 วัคเวลาในการตกอย่างอิสระของแขนเพนดูลัม

ตารางที่ 9.4 แสดงเวลาในการตกอย่างอิสระของแขนเพนดูลัมเมื่อมีความยาวแขนค่าต่างๆ

ครั้งที่	เวลาในการตกที่ความยาวแขนเพนดูลัมค่าต่างๆ (มิลลิวินาที)		
	50 เซนติเมตร	80 เซนติเมตร	100 เซนติเมตร
1	0.69	1.01	1.43
2	0.76	1.11	1.33
3	0.72	1.04	1.41
4	0.77	1.03	1.39
5	0.69	1.02	1.37
ค่าเฉลี่ย	0.726	1.042	1.386

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความยาวแขนจะทำให้เวลาในการตกอิสระของ แขนเพนดูลัมเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวแขนทำให้การเคลื่อนที่หรือการสั่นของ แขนเพนดูลัมช้าลง ซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมการทรงตัวได้ง่ายมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 10

### สรุปผลการทดลองและแนวทางในการพัฒนา

#### 10.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุมพีชชี จะได้ว่า การออกแบบตัวควบคุมพีชชีประเภทที่นำใช้งานนี้ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องสังเกตและศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบที่ต้องการควบคุมและนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมอีกที โดยตัวควบคุมยังไม่มีความสามารถที่จะเรียนรู้ระบบด้วยตัวเองได้ ทำให้ต้องคอยมีการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการควบคุมและตัวควบคุมที่ได้ก็ยังสามารถจำกัด กล่าวคือ ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการทำงานหรือสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปนอกเหนือจากข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบ ระบบจะไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ขอบเขตในการทำงานค่อนข้างแคบ

ในส่วนของชิ้นงานที่ได้จากการนำตัวควบคุมที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้นั้น จะมีความสามารถในการทรงตัวระดับหนึ่ง กล่าวคือ ที่สภาวะเริ่มต้นแขนเพนดูลัมจะต้องอยู่ในตำแหน่งสมดุลหรือตั้งฉากกับพื้นโลก และขีดจำกัดของมุมที่แขนเพนดูลัมเอนไปแล้วระบบยังรักษาสมดุลได้นั้นยังอยู่ในช่วงมุมที่แคบ นอกจากนี้ ยังไม่สามารถควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นได้ และในขณะที่แขนเพนดูลัมอยู่ในสภาวะสมดุล หุ่นยนต์จะยังคงมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งโดยไม่สามารถอยู่นิ่งกับที่ได้

จากการศึกษาการทำงานและการปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพบางประการของหุ่นยนต์แสดงให้เห็นถึงปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ดังนี้

1. ความยาวของแขนเพนดูลัม ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการเหวี่ยงของแขนเพนดูลัม ยิ่งแขนมีความยาวมากความเร็วในการเหวี่ยงของแขนก็จะช้าหรือก็คือแขนเพนดูลัมจะล้มช้าลง ทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายมากยิ่งขึ้น
2. ความถี่ในการทำงานของเซนเซอร์ เซนเซอร์ที่ใช้งานมีความถี่ในการทำงานค่อนข้างต่ำทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมไม่ค่อยดีนัก
3. การตอบสนองความถี่ของมอเตอร์ ในขณะที่หุ่นยนต์ทำงานจำเป็นต้องมีการวิ่งกลับทิศทางไปมาตลอดเวลา ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการที่มอเตอร์ประกอบขึ้นจากขดลวดเหนี่ยวนำทำให้เกิดการหน่วงกระแสและไม่สามารถกลับทิศทางที่ทันใดได้ ความถี่สูงสุดในการกลับทิศของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์จึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมมาก จากการทดลองจะได้ว่ามอเตอร์มีความสามารถในการกลับทิศทางด้วยความถี่ที่ต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานไม่ดีเท่าที่ควร

4. ความสามารถในการจ่ายกระแสของแหล่งจ่ายไฟของมอเตอร์ ปัจจัยที่มีผลต่อการดึงกระแสของมอเตอร์ก็คือแรงดันตกคร่อมแหล่งจ่ายและความถี่ในการกลับทิศทางของมอเตอร์ ยิ่งแรงดันและความถี่ในการกลับทิศทางสูงก็จะยิ่งดึงกระแสมากขึ้น เมื่อแหล่งจ่ายไม่สามารถจ่ายกระแสในการขับมอเตอร์ได้ตามที่ต้องการ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแยกลง

## 10.2 แนวทางในการพัฒนาและปรับปรุง

ควรมีการปรับปรุงตัวรถให้มีขนาดใหญ่และสูงมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมการทรงตัวได้ง่ายมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขนาดของล้อให้ใหญ่ขึ้นก็จะช่วยให้ควบคุมการทรงตัวได้ดีขึ้นด้วย เนื่องจากการลดภาระของมอเตอร์เพราะตัวรถจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลกว่าเมื่อมีการหมุนของมอเตอร์ด้วยจำนวนรอบที่เท่ากัน ซึ่งจะช่วยให้ปริมาณกระแสที่ต้องใช้ในการขับมอเตอร์น้อยลงและการหน่วงการทำงานของมอเตอร์ก็จะน้อยลงด้วย

ในส่วนของภาคเซนเซอร์ก็มีข้อจำกัดคือ การใช้เซนเซอร์ระยะทางนี้จะต้องให้หุ่นยนต์ทำงานบนพื้นที่เรียบเท่านั้น ถ้าเกิดมีสิ่งกีดขวางหรือวิ่งบนทางไม่เรียบก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานได้

ในส่วนของมอเตอร์นั้น ควรเลือกใช้มอเตอร์ที่มีความสามารถในการตอบสนองความถี่ที่ดีกว่านี้ และควรคำนึงถึงทอร์กของมอเตอร์ด้วย เพราะยิ่งหุ่นยนต์มีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักมากยิ่งขึ้น มอเตอร์ที่ใช้งานก็ควรจะมีทอร์กที่มากขึ้นด้วย

ในส่วนของภาคควบคุม ตัวควบคุมพีซีที่ใช้งานยังไม่มีความสามารถในการเรียนรู้เองได้ จำเป็นต้องอาศัยการปรับจูนพารามิเตอร์เอง ซึ่งตัวควบคุมหลายๆ ก็จะสามารถใช้งานได้ในขอบเขตการทำงานที่แคบ อาจแก้ไขได้โดยการเปลี่ยน ไปใช้การควบคุมด้วยพีซีแบบที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเองได้ ทำให้ไม่ต้องคอยปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เมื่อระบบมีสภาพแวดล้อมในการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป

อนึ่ง ในตัวควบคุมพีซีที่ออกแบบไว้นั้นยังไม่ได้นำข้อมูลระยะทางในการเคลื่อนที่ตามแกนอนของตัวรถมาพิจารณาด้วย จึงอาจเพิ่มการพิจารณาส่วนของระยะทางเพื่อที่จะเป็นแนวทางในการควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวรถเป็นการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 10.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของตัวควบคุมพีชชี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เข้าใจถึงข้อดีข้อเสียและขอบเขตการทำงานของตัวควบคุม นอกจากนี้ยังทำให้ได้ตระหนักถึงความสำคัญในการพิจารณาถึงรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ ที่จำเป็นต้องให้ความสนใจในการออกแบบระบบควบคุม อาทิเช่น ลักษณะทางกายภาพต่างๆ ของหุ่นยนต์อันจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของตัวรถ มอเตอร์ และแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้สามารถออกแบบระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. ทีมงานสมาร์ทเลิร์นนิ่ง, “เรียนรู้การสร้างหุ่นยนต์ Step by Step”, สมาร์ทเลิร์นนิ่ง, 2549
2. โยชิน เปรมปราณีรัชต์, “ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์”, ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533
3. Timothy J. Ross, “Fuzzy Logic with Engineering Applications”, McGraw-Hill, 2003
4. Tim Callinan, “Artificial Neural Network identification and control of the inverted pendulum”, 2003
5. Yasar Becerikli, “Fuzzy control of inverted pendulum and concept of stability using Java application”, 2006
6. Wikipedia, “Inverted pendulum” [online]  
Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Inverted\\_pandulum](http://en.wikipedia.org/wiki/Inverted_pandulum)
7. KMINB, “ดร.พยุง มีสัง คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ” [online]  
Available: <http://suanpalm3.kmitnb.ac.th/teacher/phayung/powerpoint.asp?pno=1>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

# CompactRIO

## Contents

Overview .....	366
Configuration Guide.....	371
<b>Reconfigurable Embedded Systems</b>	
NEW! Real-Time Controllers.....	372
NEW! Reconfigurable Chassis.....	373
<b>R Series Expansion Systems</b>	
NEW! R Series Expansion Chassis.....	374
<b>Input/Output Modules</b>	
NEW! Analog Input .....	375
NEW! Analog Output.....	376
NEW! Digital Input .....	377
NEW! Digital Output .....	378
Typical System Specifications .....	379
Accessories.....	380
Ordering Information.....	381

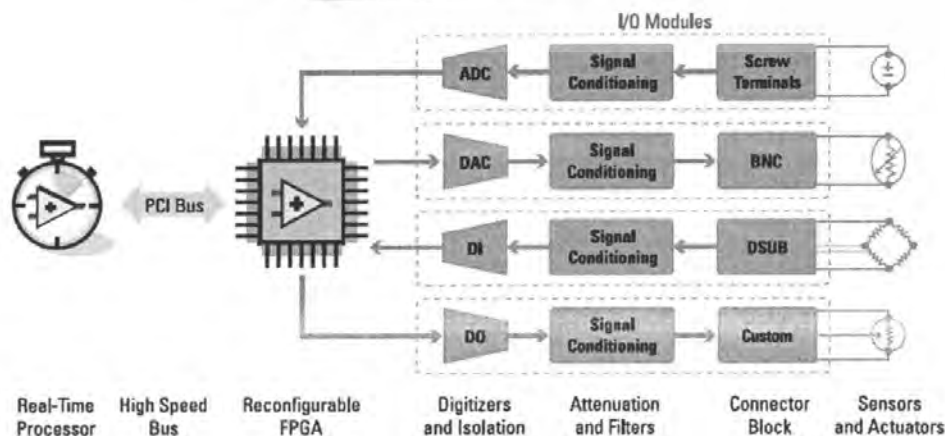
## Features

- Small, rugged, industrial control and acquisition system
- Powered by reconfigurable I/O (RIO) FPGA technology for ultrahigh performance and customization
- Low-cost architecture with open access to low-level hardware resources
- High-productivity LabVIEW graphical programming tools for rapid development
- Real-time processor and reconfigurable FPGA for reliable stand-alone embedded or distributed applications
- Hot-swappable industrial I/O modules with built-in signal conditioning for direct connection to sensors and actuators
- Design your own custom control or acquisition circuitry in silicon with 25 ns timing/triggering resolution
- NI CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings
  - 40 to 70 °C (-40 to 158 °F) operating temperature
  - Up to 2,300 V<sub>rms</sub> isolation (withstand)
  - 50 g shock rating
  - International safety, EMC, and environmental certifications
  - Class I, Division 2 rating for hazardous locations
  - Dual 11-30 VDC supply inputs, low power

## Overview

National Instruments CompactRIO is an advanced reconfigurable embedded control and acquisition system powered by NI RIO technology for ultrahigh performance, user customization, and reconfigurability. It is designed to perform in the harshest industrial environments.

For ordering information, see page 381.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CompactRIO Overview

With NI CompactRIO, you can rapidly build embedded control or acquisition systems that rival the performance and optimization of custom-designed hardware circuitry. Now LabVIEW programmers can take advantage of reconfigurable FPGA technology to automatically synthesize a highly optimized electrical circuit implementation of their input/output, communication, or control applications. Field-programmable gate array (FPGA) devices are widely used by control and acquisition system vendors for their performance, reconfigurability, small size, and low engineering development costs. FPGA-based devices were traditionally vendor defined rather than user defined because of the complexity of the electronic design tools. Now you can take advantage of user-programmable FPGAs to create highly optimized reconfigurable control and acquisition systems with no knowledge of specialized hardware design languages such as VHDL.



### Low-Cost Open Architecture

CompactRIO combines a low-power consumption real-time embedded processor with a high-performance RIO FPGA chipset. The RIO core has built-in data transfer mechanisms to pass data to the embedded processor for real-time analysis, postprocessing, data logging, or communication to a networked host computer. CompactRIO provides direct hardware access to the input/output circuitry of each I/O module using LabVIEW FPGA elemental I/O functions. Each I/O module includes built-in connectivity, signal conditioning, conversion circuitry (ADC or DAC), and an optional isolation barrier. This represents a low-cost architecture with open access to low-level hardware resources.

### I/O Modules

Each CompactRIO I/O module contains built-in signal conditioning and screw terminal, BNC, or D-Sub connectors. By integrating the connector junction box into the modules, the CompactRIO system significantly reduces the space requirements and cost of field wiring. A variety of I/O types are available including  $\pm 80$  mV thermocouple inputs,  $\pm 10$  V simultaneous sampling analog inputs/outputs, 24 V industrial digital I/O with up to 1 A of current



drive, differential/TTL digital inputs with 5 V regulated supply output for encoders, and 250 V<sub>rms</sub> universal digital inputs. Because the modules contain built-in signal conditioning for extended voltage ranges or industrial signal types, you can usually make your wiring connections directly from the CompactRIO module to your sensors/actuators. Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) for the latest information on module availability.

### Real-Time Processor

The CompactRIO embedded system features an industrial 200 MHz Pentium class processor that reliably and deterministically executes your LabVIEW Real-Time applications. Choose from thousands of built-in LabVIEW functions to build your multithreaded embedded system for real-time control, analysis, data logging, and communication. The controller also features a 10/100 Mb/s Ethernet port for programmatic communication over the network (including email) and built-in Web (HTTP) and file (FTP) servers. Using the remote-panel Web server, you can automatically publish the front-panel graphical user interface of your embedded application for multitenant remote monitoring or control. The real-time processor also features dual 11- to 30 VDC supply inputs, a user DIP switch, LED status indicators, a real-time clock, watchdog timers, and other high-reliability features.

### Performance

Using the LabVIEW FPGA Module and reconfigurable hardware technology, you can create ultrahigh performance control and acquisition systems with CompactRIO. The FPGA circuitry is a parallel processing reconfigurable computing engine that executes your LabVIEW application in silicon circuitry on a chip. The LabVIEW FPGA Module features built-in functions for analog closed-loop PID control, fifth-order FIR filters, 1D look-up tables, linear interpolation, zero crossing detection, and direct digital synthesis of sine waves. Using the embedded RIO FPGA hardware, you can implement multiloop analog PID control systems at loop rates exceeding 100 kS/s. Digital control systems can be implemented at loop rates up to 1 MS/s. Multiple rungs of Boolean logic can be evaluated using single-cycle while loops at 40 MHz (25 ns). Because of the parallel nature of the RIO core, adding additional computation does not necessarily reduce the speed of the FPGA application. CompactRIO offers 4 and 8-slot chassis with options for FPGA chips with either 1 million or 3 million gates.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CompactRIO Overview

## Size and Weight

CompactRIO is designed for applications in harsh environments and small places. Size, weight, and I/O channel density are critical design requirements in many such embedded applications. By taking advantage of the extreme performance, small size, and lower power consumption of FPGA devices, CompactRIO is able to deliver unprecedented control and acquisition capabilities in a compact, rugged package.

A 4-slot embedded system measures 179.6 by 88.1 by 88.1 mm (7.07 by 3.47 by 3.47 in.) and weighs just 1.58 kg (3.47 lb). An 8-slot system filled with 32-channel I/O modules delivers a mass channel density of 9.7 g/ch (0.34 oz/ch), and a volumetric channel density of 8.2 cm<sup>3</sup>/ch (0.50 in.<sup>3</sup>/ch).

## NI CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings

CompactRIO is a reconfigurable embedded system that combines reliable stand-alone embedded capability with extreme industrial certifications and ratings for operation in harsh industrial environments. CompactRIO is rated for an -40 to 70 °C (-40 to 158 °F) temperature range, 50 g shock, and hazardous locations or potentially explosive environments (Class I, Div 2). Most I/O modules feature up to 2,300 V<sub>rms</sub> isolation (withstand), and 250 V<sub>rms</sub> isolation (continuous). Each component comes with a variety of international safety, electromagnetic compatibility (EMC), and environmental certifications and ratings.



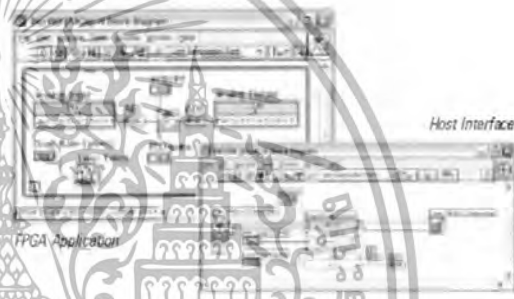
Description	Standard
Electromagnetic Compatibility (EMC)	89/336/EEC EN 55011 Class A at 10 m FCC Part 15A above 1 GHz Industrial levels per EN 61326-1:1997 +A2:2001, Table A.1 CE, C-Tick, and FCC Part 15 (Class A) Compliant 73/23/EEC
Product Safety	EN 61010-1, IEC 61010-1 UL 61810-1 CAN/CSA C22.2 No. 61010-1
Hazardous Locations, Class I, Division 2	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4, Class I, Zone 2, AEx nC IIC T4, EEx nC IIC T4
Shock and Vibration Mean Time Before Failure (MTBF)	IEC 60068-2-64, IEC 60068-2-27/IEC 60068-2-6 Bellcore Issue 6, Method 1, Case 3 MIL-HDBK-217F

Typical Certifications – Actual specifications vary from product to product. Visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification) for details.



## Key Developer Tools

The LabVIEW development environment, including the LabVIEW FPGA Module and LabVIEW Real-Time Module, provides an array of tools and technologies to accelerate the development of reliable reconfigurable embedded systems.



## Embedded Project Manager

- FPGA hardware target configuration and automatic module discovery
- CompactRIO module and I/O channel alias name management
- FPGA application flash memory download and autoload configuration



## LabVIEW FPGA Development Environment

- FPGA device I/O for analog input/output, digital input/output, and I/O property nodes/methods
- Interrupt request (IRQ) generation and synchronization functions
- 40 MHz single-cycle timed loop for LabVIEW code execution in 25 ns timing interval
- Parallel processing with while loop, sequence, case, for loop, and other execution control structures
- FPGA FIFO data buffering and memory read/write
- Boolean logic, comparison, numeric math, saturation arithmetic functions, and bitwise data manipulation functions

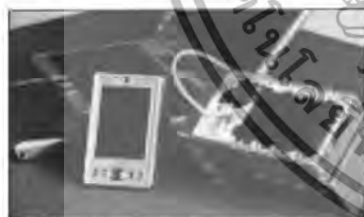
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CompactRIO Overview

- HDL interface node for integration of non-LabVIEW IP cores
- Nonlinear system and discrete linear control functions including PID and fifth-order FIR filter
- 1D look-up table, linear interpolation, zero-crossing detection, and direct digital synthesis sine generator

### LabVIEW Real-Time Development Environment

- Target configuration options including start-up application execution settings and development, Web, remote panel, and file server access
- Open FPGA VI Reference function for programmatic bit-stream download, communication interface reference, and application start
- Deterministic real-time while loop thread synchronization with FPGA-generated IRQ
- FPGA front panel control/indicator read/write for data transfer
- Data scaling/mapping functions for integer to floating-point engineering units conversion
- Real-Time FIFO data buffering for multithread communication
- Timed-loop structure for multirate deterministic control
- Floating-point PID, set-point profiling, gain scheduling, and rate limiter functions
- Point-by-point signal generation, time-domain analysis, frequency-domain transforms and spectrum analysis, filters, statistics, curve fitting/interpolation, linear algebra, array/vector operations
- SMTP E-mail, TCP/IP, UDP, IrDA, DataSocket, and VISA RS232 serial programmatic server/client communication (including 802.11 wireless Ethernet)
- Binary and text file I/O for embedded data logging and retrieval



NMIO Productions Photographer — Douglas J. Nesbit

### Application Modules and Toolkits

- LabVIEW PDA Module, LabVIEW Enterprise Connectivity Toolkit, LabVIEW Remote Panel License
- LabVIEW Execution Trace Toolkit
- LabVIEW Order Analysis Toolkit, LabVIEW Sound and Vibration Toolkit, LabVIEW Signal Processing Toolkit
- LabVIEW Simulation Module, LabVIEW Control Design Toolkit, LabVIEW System Identification Toolkit, LabVIEW Simulation Interface Toolkit, LabVIEW State Diagram Toolkit
- NI SoftMotion Development Module for LabVIEW

### LabVIEW Networked Host Application Development

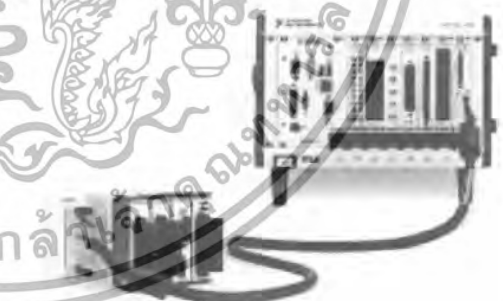
- Web browser remote panel graphical user interface plug-in for remote control/monitoring (Windows, Linux, Mac OS X, Solaris)
- Express spectral signal analysis, distortion/tone, amplitude/level, timing/transition, convolution/correlation, mask/limit, histogram functions
- Local or remote database connectivity, text/HTML/DIAdem report generation
- Handheld mobile/portable PDA user interface/remote control (LabVIEW PDA Module)

### The CompactRIO Platform is available in two configurations:



#### CompactRIO Embedded System

In this configuration, CompactRIO is a complete reconfigurable embedded system for rugged stand-alone or networked control and acquisition applications. The reconfigurable embedded system consists of a real-time controller, a reconfigurable chassis containing the user-programmable RIO FPGA, and a variety of hot-swappable industrial I/O modules.



#### CompactRIO R Series Expansion System

In this configuration, a CompactRIO expansion chassis connects to the digital port on a PCI or PXI R Series FPGA device. The R Series device can be installed in any desktop PC, industrial PC (IPC), or ruggedized PXI/CompactPCI computer system running Windows or one of the LabVIEW Real-Time OSs. The RIO FPGA resides on the R Series device while CompactRIO converts a digital port on the R Series device into a high-performance expansion I/O and signal conditioning system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CompactRIO Reconfigurable Chassis

## NI cRIO-910x **NEW!**

- Design hardware using LabVIEW programming skills
- 4 or 8-slot chassis for any CompactRIO I/O modules
- 1 M or 3 M gate RIO FPGA core for normal or extended RIO processing power
- DIN-rail mounting, 19 in. rack mount, and panel mounting options
- NI CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings<sup>1</sup>
- Program in easy-to-use LabVIEW FPGA graphical development environment to automatically synthesize an optimized high-performance electrical circuit implementation of your application
- RIO FPGA core executes LabVIEW control logic at rates up to 40 MS/s using single-cycle timed loops



Product	Module Slots	FPGA System Gates	RAM (KB)	Default Timebase (MHz)	Maximum Power Consumption (W)	Build-In Panel Mounting Holes
cRIO-9101	4	1 M	52	21	2.3	✓
cRIO-9102	7	1 M	62	41	2.3	✓
cRIO-9103	4	2 M	196	40	3	✓
cRIO-9104	8	3 M	196	40	3	✓

## Overview and Applications

The National Instruments CompactRIO reconfigurable chassis are the heart of the CompactRIO system because they contain the reconfigurable I/O (RIO) core. The RIO FPGA core, which has an individual connection to each I/O module, is programmed with easy-to-use elemental I/O functions to read or write signal information from each module. Because there is no shared communication bus between the RIO FPGA core and the I/O modules, I/O operations on each module can be precisely synchronized with 25 ns resolution. The RIO core can perform local integer-based signal processing and decision-making and directly pass signals from one module to another.

The RIO core is also connected to the CompactRIO real-time controller through a local PCI bus interface. The real-time controller can retrieve data from any control or indicator on the front-panel of the RIO FPGA application through an easy-to-use FPGA Read/Write function. The RIO FPGA can also generate interrupt requests (IRQs) to synchronize the real-time software execution with the RIO FPGA. Typically, the real-time controller is used to convert the integer based I/O data to scaled floating-point numbers. In addition, the real-time controller typically performs single-point control, waveform analysis, data logging, and Ethernet/serial communication.

The reconfigurable chassis, real-time controller, and I/O modules combine to create a complete stand-alone embedded system. Application development consists of three steps:

1. Target the reconfigurable chassis to automatically detect the I/O modules and develop the RIO FPGA application,
2. Compile the RIO application to automatically synthesize an optimized high-performance electrical circuit implementation of your application,
3. Develop the real-time controller application to add floating-point control, signal processing, data logging, and communication.

## Key Features

- Create any local or multichassis timing, triggering, and synchronization scheme with 25 ns resolution
- Use multiple while loops to create a parallel processing application for high-performance signal processing or multirate control systems
- Built-in PID control functions for control system loop rates greater than 100 kHz
- Generate waveforms or implement nonlinear look-up tables (LUTs) using LabVIEW FPGA express VIs
- Integrate widely available third-party HDL cores using the LabVIEW FPGA Module HDL Node
- Enforce critical logic and interlocks in silicon hardware circuitry, or use the parallel RIO architecture to create dual, triple, or quadruple redundant systems

Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) for example programs, application notes, and other developer tools.

For ordering information, see page 381.



<sup>1</sup>See CompactRIO Overview on page 366 for details.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CompactRIO Real-Time Embedded Controllers

## NI cRIO-900x

- Small, rugged, high-reliability embedded real-time processor for intelligent stand-alone operation
- Executes powerful floating-point algorithms with deterministic real-time performance
- Low power consumption with dual DC supply inputs for redundancy
- 10/100BaseT Ethernet port with built-in LabVIEW remote panel Web server and FTP file sharing server
- RS232 serial port for peripheral devices

### Operating System

- LabVIEW Real-Time (ETS)

### Development Environment

- LabVIEW Full or Professional Development System for Windows
- LabVIEW Reconfigurable I/O Software Development Kit (includes LabVIEW Real-Time and LabVIEW FPGA modules and developer toolkits)

### Driver Software

- NI-RIO for reconfigurable embedded systems.



Product	DRAM Memory (MB)	Internal Nonvolatile Storage (MB)	10/100BaseT Ethernet Port	RS232 Serial Port	LEDs	DIP Switches	Power Supply Input Ranges	Power Consumption	Backup Power Input	Remote Panel Web Server	FTP Server
cRIO-9002	32	64	✓	✓	4	5	9 to 36 VDC	7W max	✓	✓	✓
cRIO-9004	64	512	✓	✓	4	5	9 to 35 VDC	7W max	✓	✓	✓

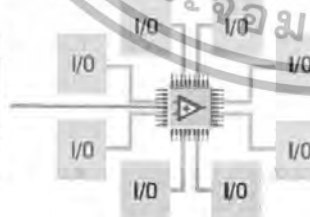
Table 1. cRIO-900x Selection Guide

## Overview and Applications

National Instruments cRIO-900x real-time embedded controllers offer powerful stand-alone embedded execution for deterministic LabVIEW Real-Time applications. The NI cRIO-9002 includes 32 MB of DRAM memory and 64 MB of nonvolatile flash storage for file storage. The cRIO-9004 includes 64 MB of DRAM memory and 512 MB of nonvolatile flash storage for data-logging applications. Both controllers are designed for extreme ruggedness, reliability, and low power consumption with dual 9 to 35 VDC supply inputs that deliver isolated power to the CompactRIO chassis/modules and a -40 to 70 °C temperature range. A 195 MHz industrial processor balances low power consumption with powerful real-time floating-point signal processing and analysis capabilities for deterministic control loops exceeding 1 kHz.



Figure 1. CompactRIO Hardware Architecture



## System Configuration

The CompactRIO real-time controller connects to any 4- or 8-slot CompactRIO reconfigurable chassis. The user-defined FPGA circuitry in the chassis controls each I/O module and passes data to the controller through a local PCI bus, using built-in communication functions.

## Embedded Software

You can synchronize embedded code execution to an FPGA-generated interrupt request (IRQ) or an internal millisecond real-time clock source. The LabVIEW Real-Time ETS OS provides reliability and simplifies the development of complete embedded applications that include time-critical control and acquisition loops in addition to lower-priority loops for postprocessing, data logging, and Ethernet/serial communication. Built-in elemental I/O functions such as the FPGA Read/Write function provide a communication interface to the highly optimized reconfigurable FPGA circuitry. Data values are read from the FPGA in integer format, and then converted to scaled engineering units in the controller.

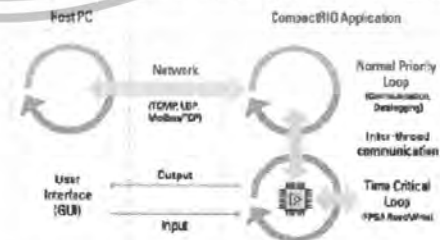


Figure 2. CompactRIO Software Architecture

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CompactRIO Real-Time Embedded Controllers

### Specifications

#### Network

Network interface	10BaseT and 100BaseTX Ethernet
Compatibility	IEEE 802.3
Communication rates	10 Mb/s, 100 Mb/s, autonegotiated
Maximum cabling distance	100 m/segment

#### Memory

cRIO-9002	
Nonvolatile	64 MB
DRAM	32 MB
cRIO-9004	
Nonvolatile	512 MB
DRAM	64 MB

#### Power Requirements

You must use a National Electric Code (NEC) Class 2 power source with the cRIO-900x controllers.

Recommended power supply	48 W secondary, 18 to 24 VDC
Power consumption	
Controller only	7 W max
Controller supplying power to 8 CompactRIO modules	17 W
Power supply	
On power-up	9 to 35 V
After power-up	6 to 35 V

#### Physical Characteristics

Screw-terminal wiring	12 to 24 AWG copper conductor wire with 10 mm (0.39 in.) of insulation stripped from the end
Torque for screw terminals	0.5 to 0.6 N • m (4.4 to 5.3 lb • in.)
Weight	Approx. 488 g (17.2 oz)

#### Safety

##### Safety Voltages

Connect only voltages that are within these limits.

V-to-C	30 V max, Installation Category I
--------	-----------------------------------

##### Safety Standards

cRIO-900x controllers are designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61010-1, IEC 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1

##### Hazardous Locations

U.S. (UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nC IIC T4
Canada (C-UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nC IIC T4
Europe (DEMKO)	EEx nC IIC T4

#### Environmental

cRIO-900x controllers are intended for indoor use only. For outdoor use, mount the CompactRIO system in a suitably rated enclosure.

##### Operating temperature

(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 to 70 °C
--------------------------------	--------------

**Note:** To meet this operating temperature range, follow the guidelines in the installation instructions for your CompactRIO system.

##### Storage temperature

(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 to 85 °C
--------------------------------	--------------

Ingress protection IP 40

##### Operating relative humidity

(IEC 60068-2-56)	10 to 90%, noncondensing
------------------	--------------------------

##### Storage relative humidity

(IEC 60068-2-56)	5 to 95%, noncondensing
------------------	-------------------------

Maximum altitude 2,000 m

Pollution degree (IEC 60664) 2

#### Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the CompactRIO system and affix ferrules to the end of the terminal wires.

##### Operating vibration, random

(IEC 60068-2-64)	5 g <sub>rms</sub> , 10 to 500 Hz
------------------	-----------------------------------

##### Operating shock

(IEC 60068-2-27)	30 g, 11 ms half sine 50 g, 3 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations
------------------	---

##### Operating vibration, sinusoidal

(IEC 60068-2-6)	5 g, 10 to 500 Hz
-----------------	-------------------

#### Electromagnetic Compatibility

Emissions	EN 55011 Group1, Class A at 10 m FCC Part 15A above 1 GHz Industrial levels per EN 61326:1997 + A2:2001, Table A.1
Immunity	CE, C-Tick, ICES, and FCC Part 15 (Class A) Compliant
EMC/EMI	

**Note:** For EMC compliance, operate this device with shielded cabling.

#### FCC Compliance

Go to [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter [rdcrfoc](http://rdcrfoc) for information on using this product in compliance with FCC regulations.

#### CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European directives, as amended for CE marking, as follows:

Low-voltage directive (safety)	73/23/EEC
Electromagnetic compatibility directive (EMC)	89/336/EEC

**Note:** Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, and for UL and other safety certifications, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## C Series Analog Input Modules

### NI 9201, NI 921x, NI 9221, NI 923x

- Signal conditioning for high voltage ( $\pm 60$  V), thermocouples, RTDs, accelerometers, microphones, strain gages, current inputs
- Advanced features such as smart TEDS sensor capability, antialiasing filters, open-thermocouple detection
- $\pm 80$  mV,  $\pm 10$  V, or  $\pm 60$  V analog input ranges
- 12-, 16-, or 24-bit (delta-sigma) resolution
- Up to 800 kS/s multiplexed or up to 100 kS/s simultaneous-sampling analog-to-digital converter (ADC)
- Up to 32 channels per module
- Up to 2,300  $V_{rms}$  isolation (withstand), up to 250  $V_{rms}$  isolation (continuous)
- NIST-traceable calibration certificate for guaranteed accuracy



Model	CompactRIO	NI CompactDAQ	Signal Type	Channels	Resolution (bits)	Max Sampling Rate (S/s)	Signal Input Ranges	Simultaneous Sampling	Antialiasing Filters	Isolation	Connector Options
NI 9201	✓	✓	Voltage	8	12	500 k	$\pm 10$ V			✓	Screw Terminal, D-Sub
NI 9203	✓	✓	Current	8	18	200 k	$\pm 20$ mA, 0 to 20 mA			✓	Screw Terminal
NI 9205	✓	✓	Voltage	32 SE/16 DI	16	250 k	$\pm 10$ , $\pm 5$ , $\pm 1$ , $\pm 0.2$ V			✓	Spring Terminal, D-Sub
NI 9206	✓	✓	CAT I Isolated Voltage	16 DI	16	250 k	$\pm 10$ , $\pm 5$ , $\pm 1$ , $\pm 0.2$ V			✓	Spring Terminal
NI 9211	✓	✓	Thermocouple	4	24	15	$\pm 50$ mV			✓	Screw Terminal
NI 9215	✓	✓	Voltage	4	16	100 k/ch	$\pm 10$ V			✓	Screw Terminal, BNC
NI 9217	✓	✓	RTD	4	24	400	0 to 400 $\Omega$			✓	Screw Terminal
NI 9221	✓	✓	Voltage	8	12	600 k	$\pm 60$ V			✓	Screw Terminal, D-Sub
NI 9233	✓	✓	IEPE	4	24	50 k/ch	$\pm 5$ V			✓	BNC
NI 9237	✓	✓	Bridge	4	24	50 k/ch	$\pm 250$ mV			✓	RJ45

Table 1. C Series Analog Input Modules Selection Guide

### Overview

High-accuracy C Series analog input modules for National Instruments CompactRIO and NI CompactDAQ provide high-performance measurements for a wide variety of industrial, in-vehicle, and laboratory sensors and signal types. Each module includes built-in signal conditioning and an integrated connector with screw terminal or cable options for flexible and low-cost signal wiring. All modules feature NI CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings.

### System Compatibility

You can use NI C Series modules in multiple system types depending on available software. See Table 1 for CompactRIO and NI CompactDAQ module compatibility because not all modules work with both systems. Many of the advanced features described apply only to reconfigurable I/O systems and not to NI CompactDAQ.

### Advanced Features

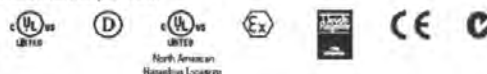
When used with CompactRIO, NI C Series analog input modules connect directly to reconfigurable I/O (RIO) FPGA hardware to create high-performance embedded systems. The reconfigurable FPGA hardware within CompactRIO provides a variety of options for custom timing, triggering, synchronization, filtering, signal processing, and

high-speed decision making for all C Series analog modules. For instance, with CompactRIO, you can implement custom triggering for any analog sensor type on a per-channel basis using the flexibility and performance of the FPGA and the numerous arithmetic and comparison function blocks built into NI LabVIEW FPGA.

### Key Features

- High-accuracy, high-performance analog measurements for any CompactRIO embedded system, R Series expansion chassis, or NI CompactDAQ chassis
- Screw terminals, BNC, D-Sub, spring terminals, strain relief, high-voltage, cable, solder cup backshell, and other connectivity options
- Available channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety, noise immunity, and high common-mode voltage range
- CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings
- Built-in signal conditioning for direct connection to sensors and industrial devices

Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) or [ni.com/compactdaq](http://ni.com/compactdaq) for up-to-date information on module availability, example programs, application notes, and other developer tools.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## C Series Module Accessories

### Connectivity Accessories

CompactRIO and NI CompactDAQ systems are designed to provide flexible options for low-cost field wiring and cabling. Most C Series modules have a unique connector block option that offers secure and safe connections to your C Series system. Table 2 contains all of the connector blocks available for C Series I/O modules.

Accessory	Description
NI 9932	10-position strain relief and high-voltage screw-terminal connector kit
NI 9933	37-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9934	25-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9935	15-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9936	10-position screw-terminal plugs (quantity 10)
NI 9939	16-position connector kit with strain relief

**Note:** To meet shock and vibration requirements, you must affix ferrules to the ends of the wires on all screw-terminal connectors.

Table 2. Connector Blocks for C Series I/O Modules

Table 3 lists the recommended connector block accessories for each C Series analog input module.

C Series Analog Input Module	Recommended Module Accessory
NI 9201	NI 9932, NI 9936
NI 9201 with D-Sub	NI 9934 <sup>1</sup>
NI 9211	NI 9932, NI 9936
NI 9215	NI 9932, NI 9936
NI 9217	NI 9939
NI 9221	NI 9932, NI 9936
NI 9221 with D-Sub	NI 9934 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Requires a 25-pin D-Sub connector such as the NI 9934 accessory kit.

Table 3. Recommended Connector Block Accessories

The NI 9932 kit provides strain relief and operator protection from high-voltage signals for any 10-position screw-terminal module.



Figure 1. NI 9932 10-Position Strain Relief and High-Voltage Screw-Terminal Connector Kit

The NI 9933 includes a screw-terminal connector with strain relief as well as a D-Sub solder cup backshell for creating custom cable assemblies for any module with a 37-pin D-Sub connector.



Figure 2. NI 9933 37-Pin D-Sub Connector Kit with Strain Relief and D-Sub Shell

The NI 9934 includes a screw-terminal connector with strain relief as well as a D-Sub solder cup backshell for creating custom cable assemblies for any module with a 25-pin D-Sub connector.



Figure 3. NI 9934 25-Pin D-Sub Connector Kit with Strain Relief and D-Sub Shell

The NI 9935 includes a screw-terminal connector with strain relief as well as a D-Sub solder cup backshell for creating custom cable assemblies for any module with a 15-pin D-Sub connector.

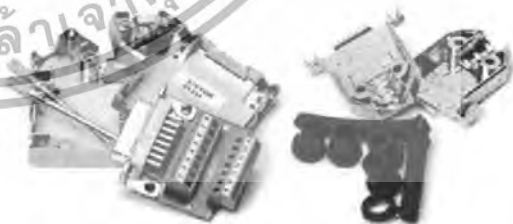


Figure 4. NI 9935 15-Pin D-Sub Connector Kit with Strain Relief and D-Sub Shell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## C Series Module Accessories

---

The NI 9936 consists of 10-position screw-terminal plugs for any 10-position screw-terminal module.



Figure 5. NI 9936 10-Position Screw-Terminal Plugs

Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) or [ni.com/compactdaq](http://ni.com/compactdaq) for up-to-date information on availability of accessories.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## C Series Analog Output Modules

### NI 9263, NI 9265 *NEW!*

- $\pm 10$  V and 0 to 20 mA analog output ranges, 16-bit resolution, 100 kS/s simultaneous update rate
- 4 channels per module
- Isolation up to 2,300 V<sub>iso</sub> (withstand), up to 250 V<sub>iso</sub> (continuous)
- Per-channel digital-to-analog converter (DAC) for simultaneous analog output
- $\pm 30$  V overvoltage protection and short-circuit protection for direct connection to actuators and industrial devices
- Excellent relative accuracy optimized for single-point control applications
- NIST-traceable calibration certificate for guaranteed accuracy



Product	Compatibility		Signal Type	Channels	Resolution (bits)	Max Update Rate (S/s)	Range	Current Drive	Simultaneous Updating	Isolation	Connector Options
	CompactRIO	NI CompactDAQ									
NI 9263	✓	✓	Voltage	4	16	100 k/ch	$\pm 10$ V	1 mA/ch	✓	✓	Screw Terminal
NI 9265	✓	—	Current	4	16	100 k/ch	0 to 20 mA	20 mA/ch	✓	✓	Screw Terminal

Table 1. C Series Analog Output Modules Selection Table

### Overview

High-performance analog output modules for National Instruments CompactRIO embedded systems, R Series expansion chassis, and NI CompactDAQ provide accurate signal generators. Each module features built-in signal conditioning and an integrated connector with screw terminal or cable options for flexible and low-cost signal wiring. All modules feature the NI CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings.

### System Compatibility

You can use NI C Series modules in multiple system types depending on available software. Please see the table above for CompactRIO and NI CompactDAQ module compatibility because not all modules work with both systems. Many of the advanced features described apply only to reconfigurable I/O systems and not to NI CompactDAQ.

### Advanced Features

Advanced features include  $\pm 30$  V overvoltage protection and short-circuit protection, simultaneous 16-bit per-channel digital-to-analog converters (DACs), high-speed settling, excellent monotonicity and NIST-traceable calibration. The NI 926x modules include a channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety and noise immunity. The NI 9265 provides high-performance, 0 to 20 mA analog outputs ideal for controlling industrial pressure, flow, and position actuators. The NI 9265 requires a 9 to 36 V external power supply for driving the output current of the module.

When used in CompactRIO, C Series analog output modules connect directly to reconfigurable I/O (RIO) FPGA hardware to create high-performance embedded systems that deliver the optimization and

flexibility of a custom electrical circuit completely dedicated to your input/output application. The reconfigurable FPGA hardware within CompactRIO provides a variety of options for timing, triggering, synchronization, change detection, digital pattern matching, or digital communication. For instance, with CompactRIO you can implement a circuit to generate complex arbitrary waveforms, perform filtering or splining to generate a smooth output signal based on a choppy low-speed output command, simulate a nonlinear sensor, or implement amplitude/phase modulation.

### Key Features

- High-performance analog output signal generation for CompactRIO embedded system, R Series expansion chassis, or NI CompactDAQ
- Screw terminals, strain relief, high-voltage, and cable options
- NI CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings
- Channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety and noise immunity

Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) or [ni.com/compactdaq](http://ni.com/compactdaq) for up-to-date information on module availability, example programs, application notes, and other developer tools.



Typical certifications – Actual specifications vary from product to product. Visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification) for details.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Piezoelectric Vibrating Gyroscopes (GYROSTAR®)

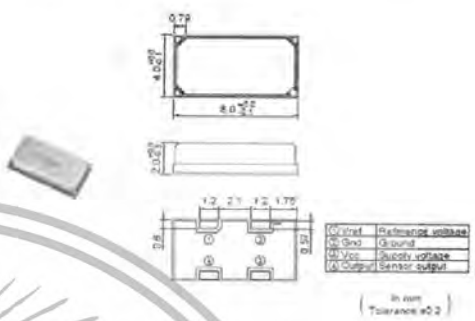


## Piezoelectric Vibrating Gyroscopes (GYROSTAR®)

This product is an angular velocity sensor that uses the phenomenon of Coriolis force, which is generated when a rotational angular velocity is applied to the vibrator.

Murata's original, small ceramic bimorph vibrator and simple Cap-Base structure realize their ultra-small size, under 0.1cc. Their small and lightweight shape increase flexibility of installment and help your apparatuses to be downsized.

They are surface mountable device, can be mounted by automatic surface mounter.



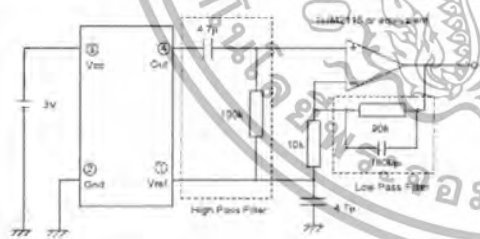
### ■ Features

1. Ultra-small and ultra-lightweight
2. Quick response
3. Low driving voltage, low current consumption
4. Lead type: SMD
5. Reflow soldering (standard peak temp. 245 deg. C)

Part Number	Supply Voltage	Maximum Angular Velocity (deg./sec.)	Output (at Angular Velocity: 6)	Scale Factor (mV/deg./sec.)	Linearity (%F.S)	Response (Hz)	Weight (g)
ENC-03R	2.7 to 5.25 Vdc	+/- 300	1.35	0.67	+/- 5	50	0.2

Operating Temperature Range: -5°C to 75°C      Storage Temp. Range: -30°C to 85°C

### ■ Sample Amplifier Circuit



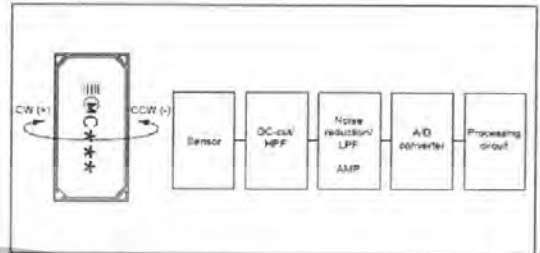
The High-pass Filter's Cut-off frequency in this circuit is approx. 0.3Hz.  
The Low-pass Filter's Cut-off frequency in this circuit is approx. 1kHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

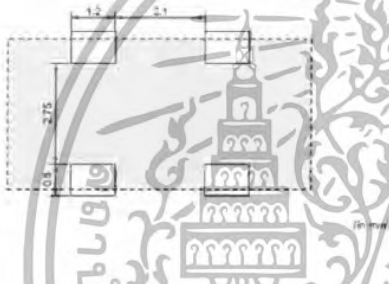
**Application/Packaging**

■ Application

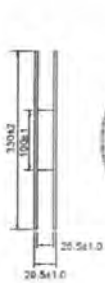
1. One sensor detects rotation on one axis. If two axes are to be detected in the same equipment, two different types of sensors (EMC-03RC and EMC-03RD) should be used.
2. To reduce the effect of temperature drift (due to change of ambient temperature), a high pass filter must be connected to sensor output to eliminate DC component.
3. To suppress output noise component around 30-33kHz (resonant frequency of sensor element), a low pass filter which has higher cut-off frequency than required response frequency must be connected to sensor output.



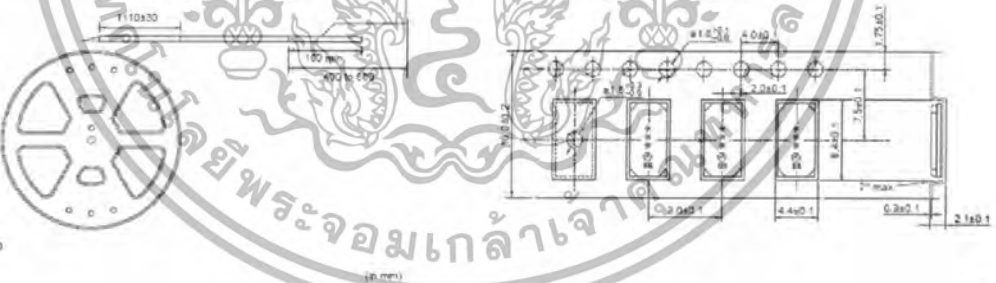
■ Dimensions of Land Pattern



■ Dimensions of Reel



■ Dimensions of Plastic Tape



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SHARP

## GP2D120 Optoelectronic Device

### FEATURES

- Analog output
- Effective range: 4 to 30 cm
- Typical response time: 39 ms
- Typical start up delay: 44 ms
- Average Current Consumption: 33 mA

### DESCRIPTION

The GP2D120 is a distance measuring sensor with integrated signal processing and analog voltage output.

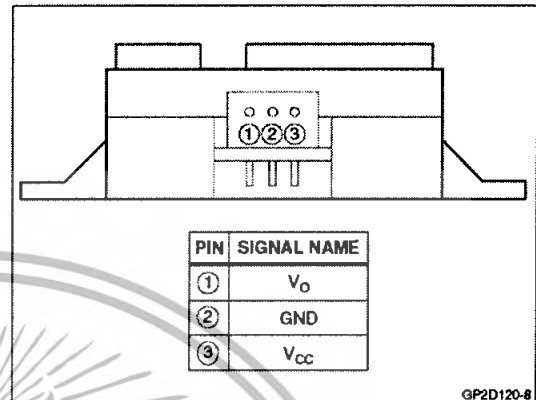


Figure 1. Pinout

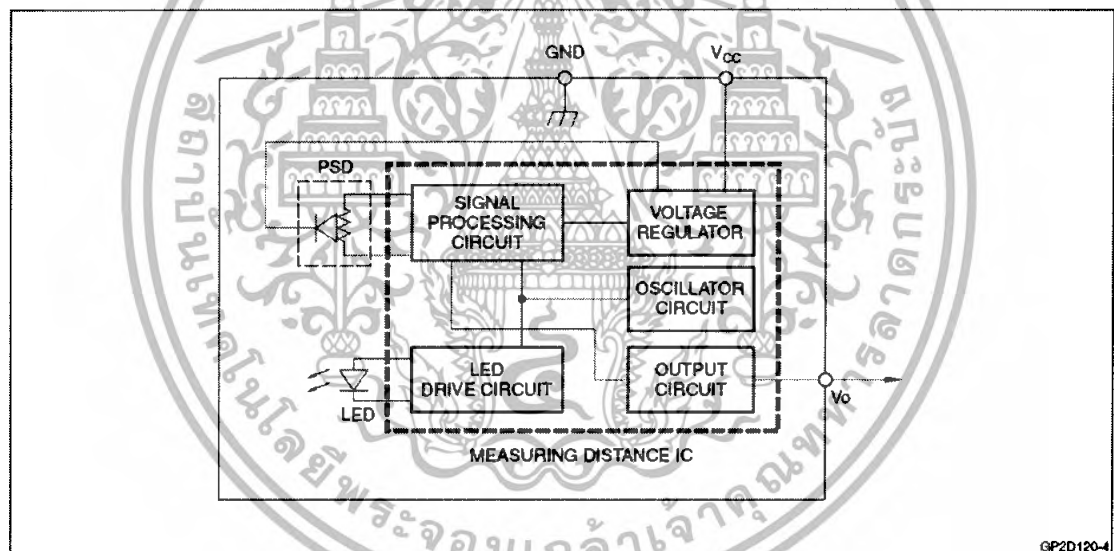


Figure 2. Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS

### Absolute Maximum Ratings

$T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5\text{ VDC}$

PARAMETER	SYMBOL	RATING	UNIT
Supply Voltage	$V_{CC}$	-0.3 to +7	V
Output Terminal Voltage	$V_O$	-0.3 to ( $V_{CC} + 0.3$ )	V
Operating Temperature	$T_{opr}$	-10 to +60	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 to +70	$^\circ\text{C}$

### Operating Supply Voltage

PARAMETER	SYMBOL	RATING	UNIT
Operating Supply Voltage	$V_{CC}$	4.5 to 5.5	V

### Electro-optical Characteristics

$T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5\text{ VDC}$

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	NOTES
Measuring Distance Range	$\Delta L$		4	—	30	cm	1, 2
Output Terminal Voltage	$V_O$	$L = 30\text{ cm}$	0.25	0.4	0.55	V	1, 2
Output Voltage Difference	$\Delta V_O$	Output change at $\Delta L$ (30 cm - 4 cm)	1.95	2.25	2.55	V	1, 2
Average Supply Current	$I_{CC}$	$L = 30\text{ cm}$	—	33	50	mA	1, 2

#### NOTES:

1. Measurements made with Kodak R-27 Gray Card, using the white side, (90% reflectivity).
2. L = Distance to reflective object.

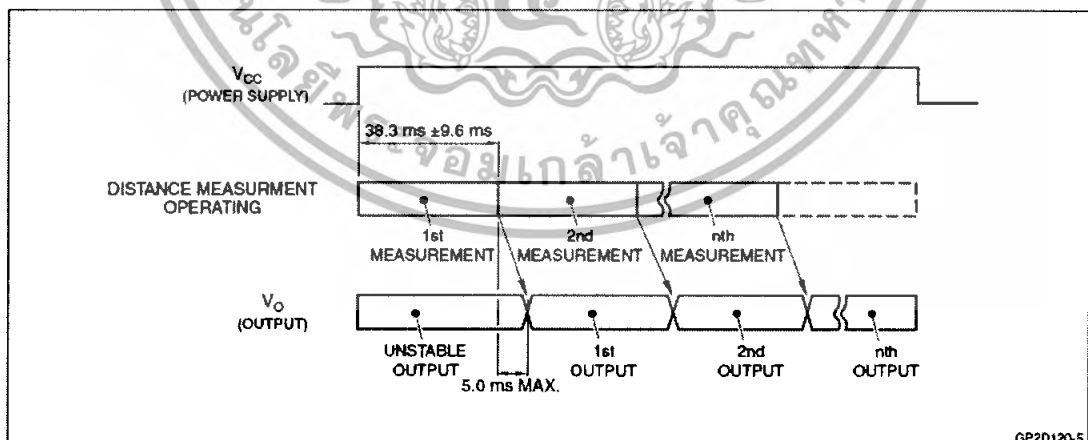


Figure 3. Timing Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## RELIABILITY

The reliability of requirements of this device are listed in Table 1.

Table 1. Reliability

TEST ITEMS	TEST CONDITIONS	FAILURE JUDGEMENT CRITERIA	SAMPLES (n), DEFECTIVE (C)	NOTES
Temperature Cycling	One cycle -40°C (30 min.) to +70°C in 30 minutes, repeated 25 times	Initial $\times 0.8 > V_O$ $V_O > \text{Initial} \times 1.2$	n = 11, C = 0	1
High Temperature and High Humidity Storage	+40°C, 90% RH, 500h		n = 11, C = 0	1
High Temperature Storage	+70°C, 500h		n = 11, C = 0	1
Low Temperature Storage	-40°C, 500h		n = 11, C = 0	1
Operational Life (High Temperature)	+60°C, $V_{CC} = 5\text{ V}$ , 500h		n = 11, C = 0	1
Mechanical Shock	100 m/s <sup>2</sup> , 6.0 ms 3 times/ $\pm X$ , $\pm Y$ , $\pm Z$ direction		n = 6, C = 0	1
Variable Frequency Vibration	10-to-55-to-10 Hz in 1 minute Amplitude: 1.5 mm 2h in each X, Y, Z direction		n = 6, C = 0	1

### NOTES:

- Test conditions are according to Electro-optical Characteristics, shown on page 2.
- At completion of the test, allow device to remain at nominal room temperature and humidity (non-condensing) for two hours.
- Confidence level: 90%, Lot Tolerance Percent Defect (LTPD): 20%/40%.

## MANUFACTURER'S INSPECTION

### Inspection Lot

Inspection shall be carried out per each delivery lot.

### Inspection Method

A single sampling plan, normal inspection level II based on ISO 2859 shall be adopted.

Table 2. Quality Level

DEFECT	INSPECTION ITEM/TEST METHOD	AQL (%)
Major Defect	Electro-optical characteristics defect	0.4
Minor Defect	Defect on appearance and dimension (split, chip, scratch, stain)*	1.0

NOTE: \*Any one of these that affects the Electro-optical Characteristics shall be considered a defect.

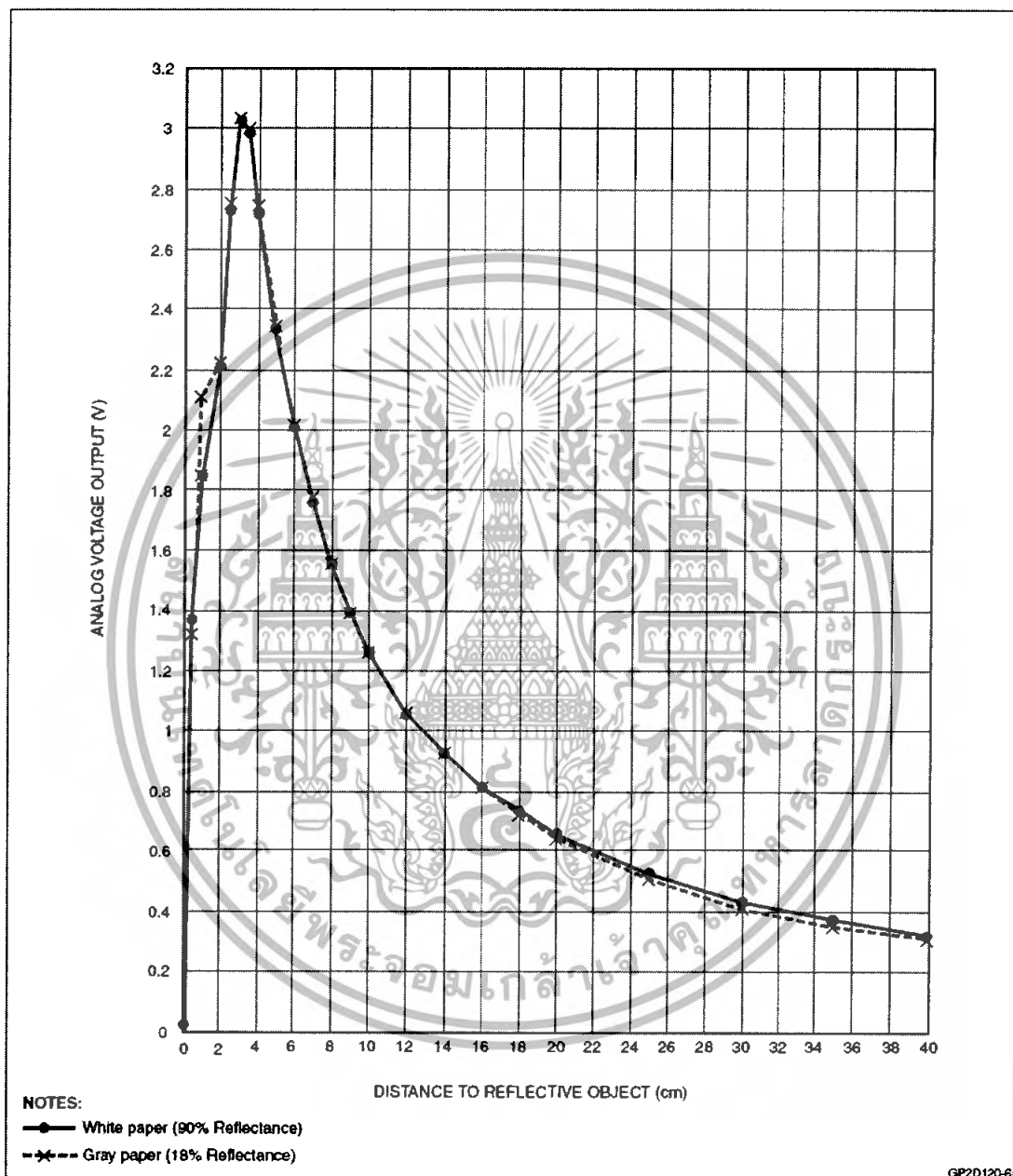


Figure 4. GP2D120 Example of Output Distance Characteristics

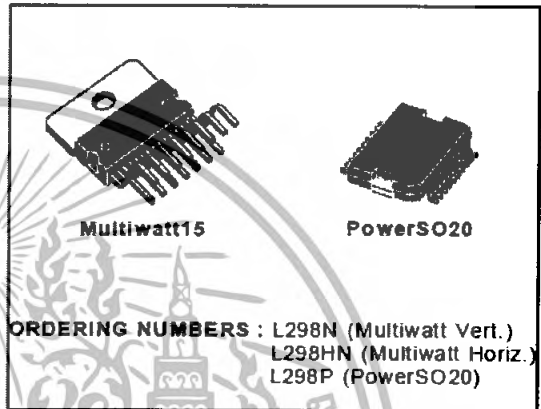
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DUAL FULL-BRIDGE DRIVER**

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

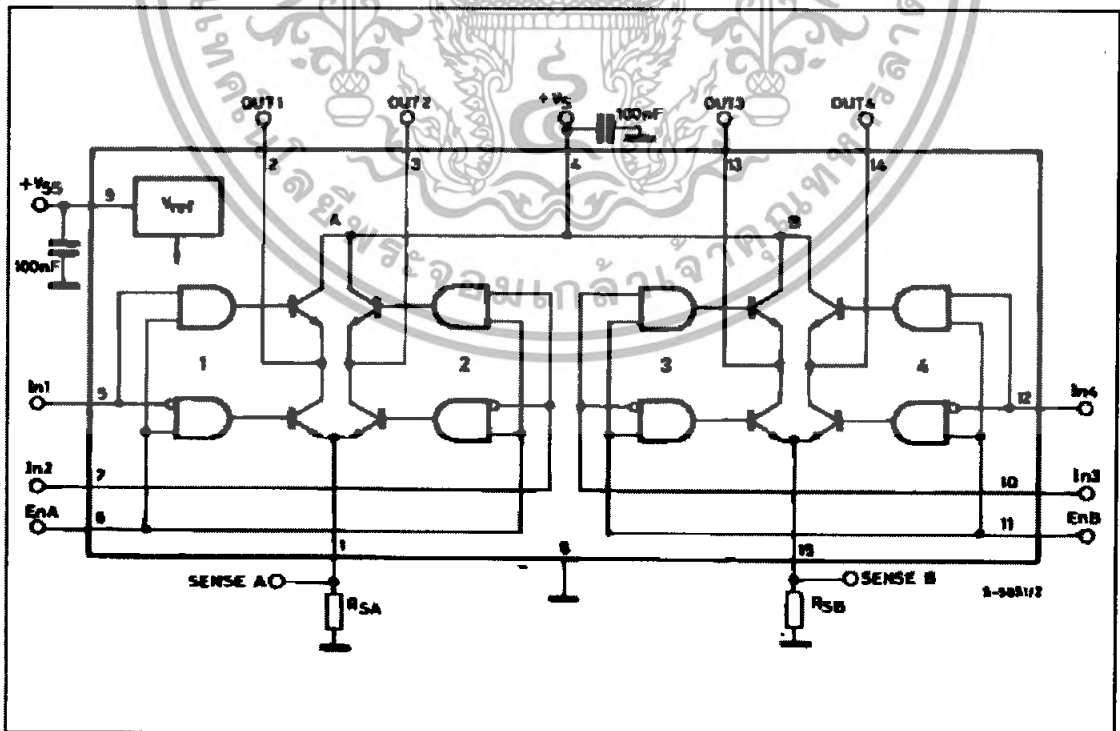
**DESCRIPTION**

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



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

**BLOCK DIAGRAM**

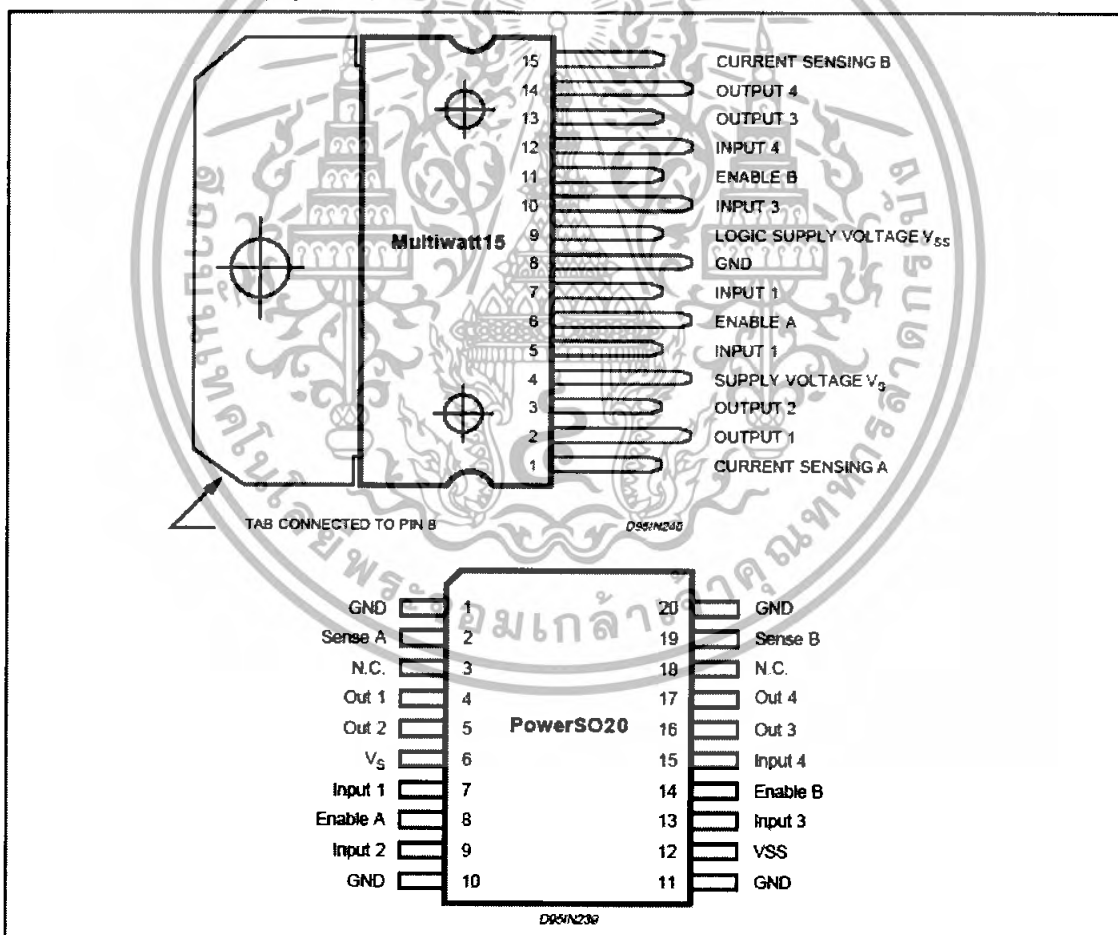


## L298

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

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

## PIN CONNECTIONS (top view)



## THERMAL DATA

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

(\*) Mounted on aluminum substrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V <sub>SS</sub>	Supply Voltage for the Logic Blocks. A100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

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

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

L298

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

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

- 1) Sensing voltage can be -1 V for t ≤ 50 μsec; in steady state V<sub>sens</sub> min ≥ -0.5 V.
- 2) See fig. 2.
- 3) See fig. 4.
- 4) The load must be a pure resistor.
- 5) PIN 1 and PIN 15 connected to GND.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

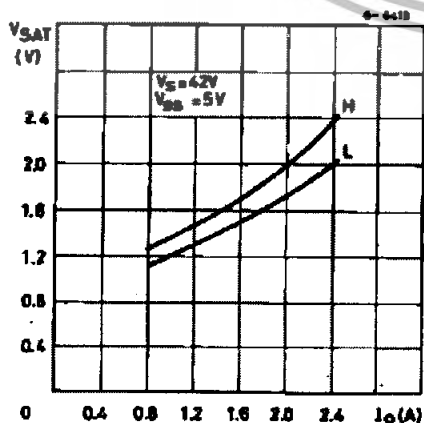
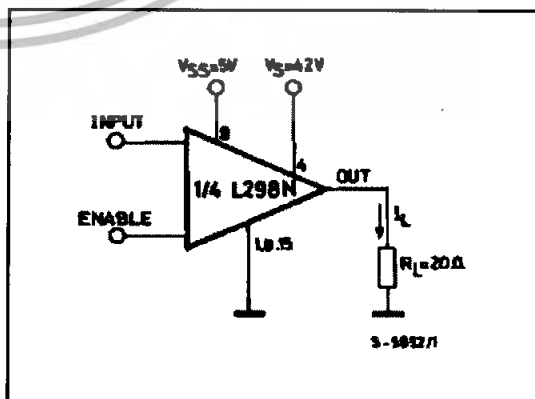


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



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

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

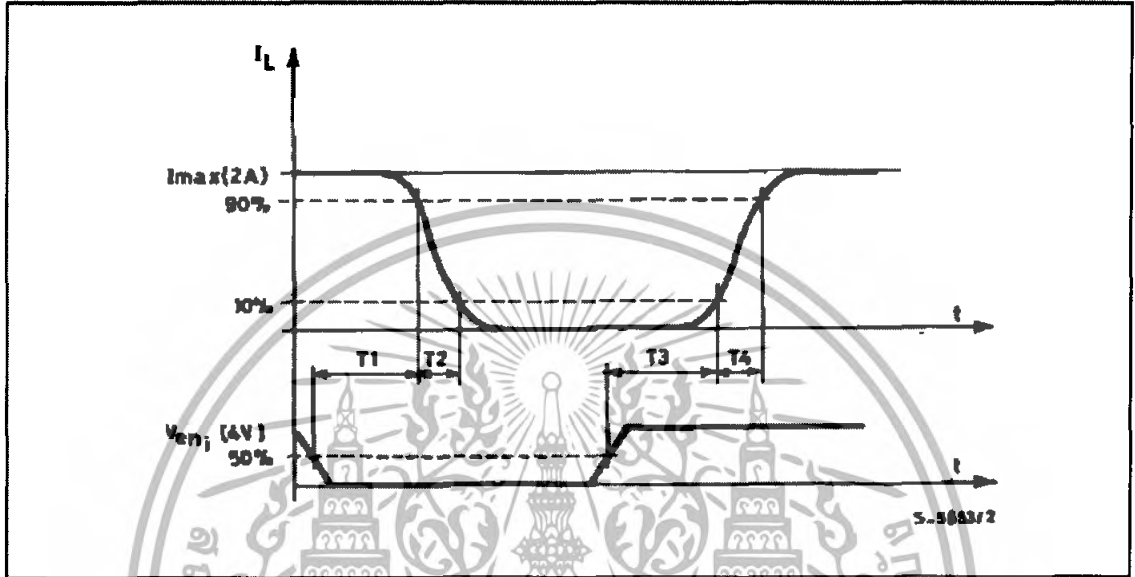
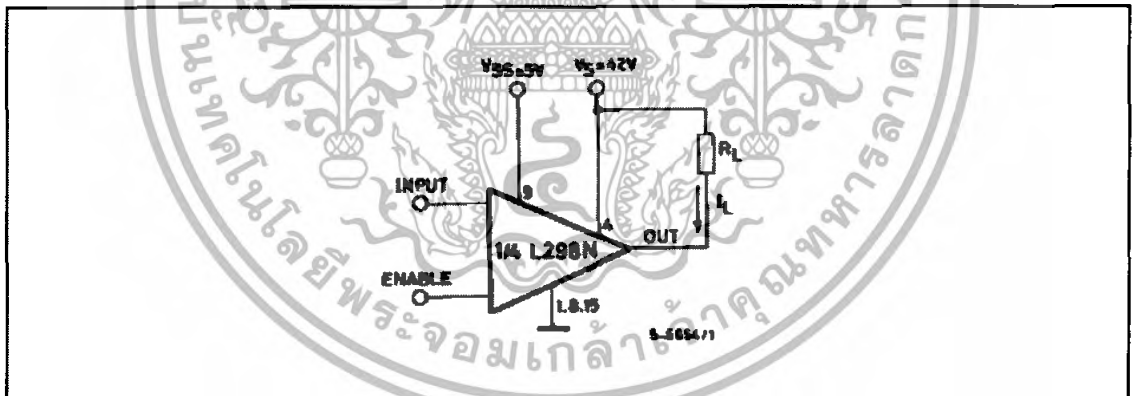


Figure 4 : Switching Times Test Circuits.



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

L298

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

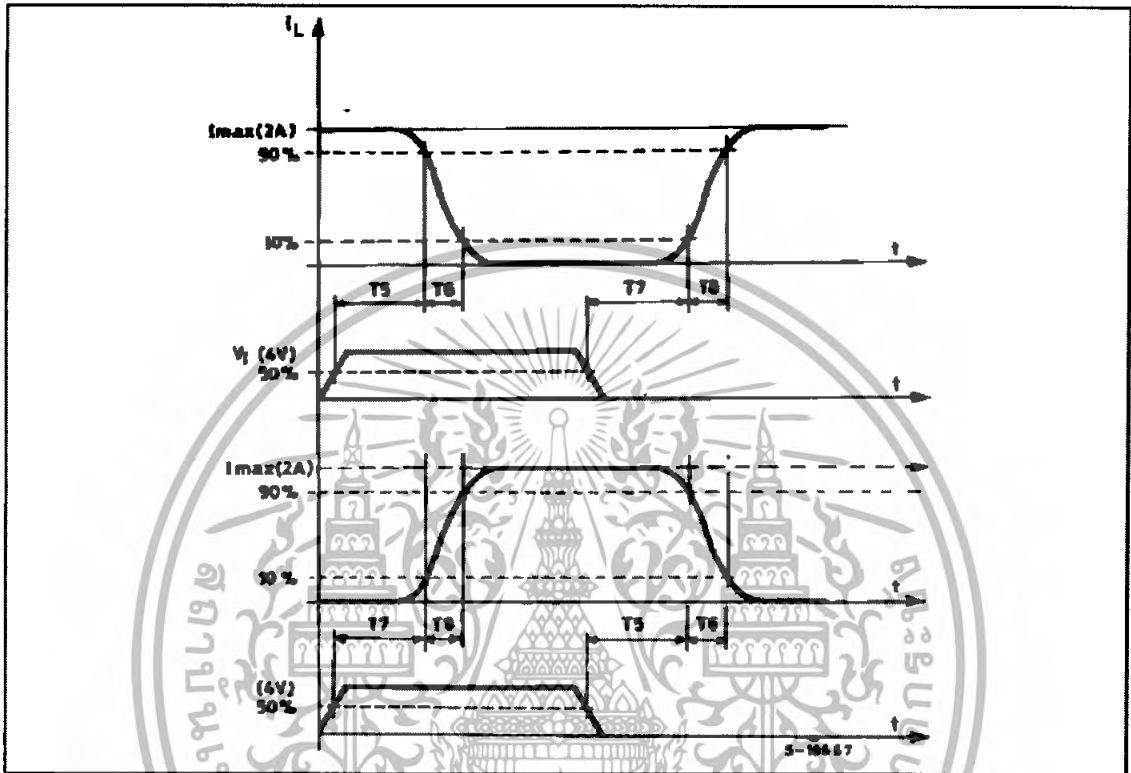
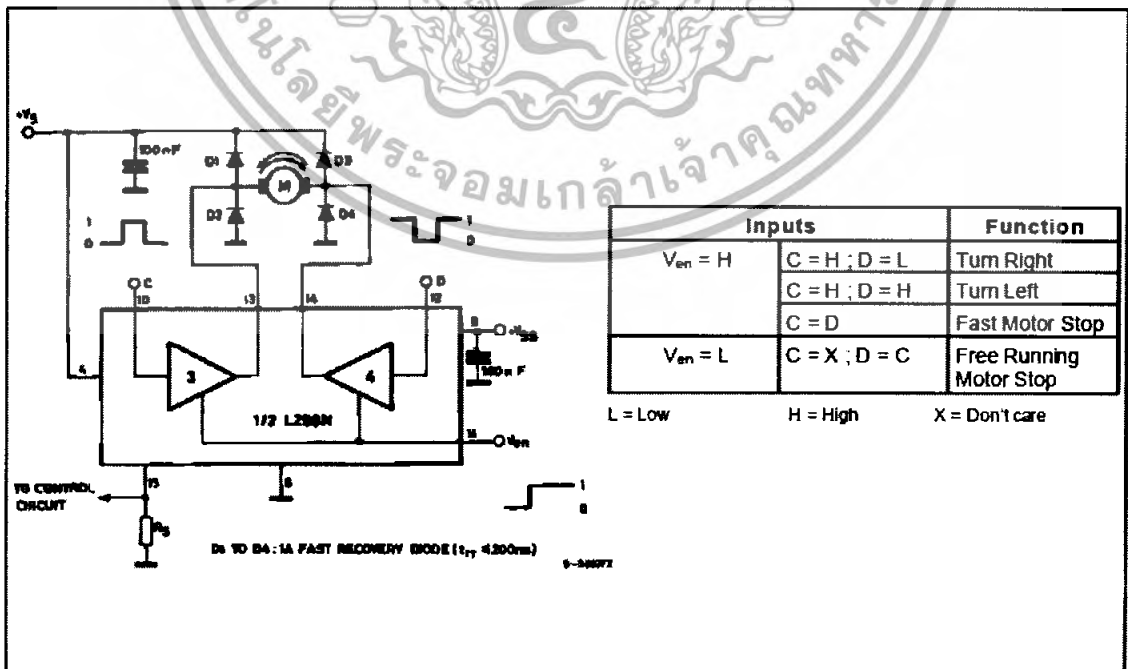
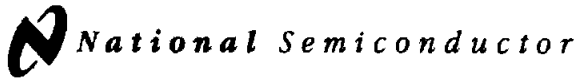


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.





August 2000

# LM111/LM211/LM311 Voltage Comparator

## 1.0 General Description

The LM111, LM211 and LM311 are voltage comparators that have input currents nearly a thousand times lower than devices like the LM106 or LM710. They are also designed to operate over a wider range of supply voltages: from standard  $\pm 15V$  op amp supplies down to the single 5V supply used for IC logic. Their output is compatible with RTL, DTL and TTL as well as MOS circuits. Further, they can drive lamps or relays, switching voltages up to 50V at currents as high as 50 mA.

Both the inputs and the outputs of the LM111, LM211 or the LM311 can be isolated from system ground, and the output can drive loads referred to ground, the positive supply or the negative supply. Offset balancing and strobe capability are provided and outputs can be wire OR'ed. Although slower than the LM106 and LM710 (200 ns response time vs 40 ns)

the devices are also much less prone to spurious oscillations. The LM111 has the same pin configuration as the LM106 and LM710.

The LM211 is identical to the LM111, except that its performance is specified over a  $-25^{\circ}C$  to  $+85^{\circ}C$  temperature range instead of  $-55^{\circ}C$  to  $+125^{\circ}C$ . The LM311 has a temperature range of  $0^{\circ}C$  to  $+70^{\circ}C$ .

## 2.0 Features

- Operates from single 5V supply
- Input current: 150 nA max. over temperature
- Offset current: 20 nA max. over temperature
- Differential input voltage range:  $\pm 30V$
- Power consumption: 135 mW at  $\pm 15V$

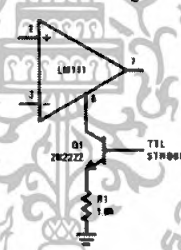
## 3.0 Typical Applications (Note 3)

Offset Balancing



DS005704-38

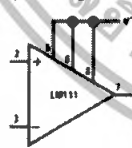
Strobing



DS005704-37

Note: Do Not Ground Strobe Pin. Output is turned off when current is pulled from Strobe Pin.

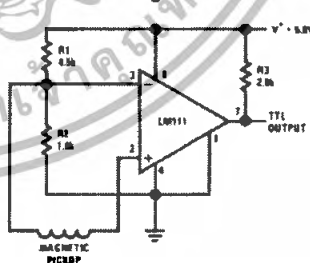
Increasing Input Stage Current (Note 1)



CS005704-38

Note 1: Increases typical common mode slew from 7.0V/ $\mu s$  to 18V/ $\mu s$ .

Detector for Magnetic Transducer



DS005704-39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.0 Absolute Maximum Ratings for the LM311 (Note 12)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/ Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage ( $V_{S4}$ )	36V
Output to Negative Supply Voltage ( $V_{74}$ )	40V
Ground to Negative Supply Voltage ( $V_{14}$ )	30V
Differential Input Voltage	$\pm 30V$
Input Voltage (Note 13)	$\pm 15V$
Power Dissipation (Note 14)	500 mW
ESD Rating (Note 19)	300V
Output Short Circuit Duration	10 sec

Operating Temperature Range	0° to 70°C
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Lead Temperature (soldering, 10 sec)	260°C
Voltage at Strobe Pin	V <sup>-</sup> -5V

### Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

## Electrical Characteristics (Note 15) for the LM311

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Input Offset Voltage (Note 16)	$T_A=25^\circ\text{C}$ , $R_S \leq 50k$		2.0	7.5	mV
Input Offset Current (Note 16)	$T_A=25^\circ\text{C}$		6.0	50	nA
Input Bias Current	$T_A=25^\circ\text{C}$		100	250	nA
Voltage Gain	$T_A=25^\circ\text{C}$	40	200		V/mV
Response Time (Note 17)	$T_A=25^\circ\text{C}$		200		ns
Saturation Voltage	$V_{IN} \leq -10\text{ mV}$ , $I_{OUT} = 50\text{ mA}$ $T_A=25^\circ\text{C}$		0.75	1.5	V
Strobe ON Current (Note 18)	$T_A=25^\circ\text{C}$		2.0	5.0	mA
Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 10\text{ mV}$ , $V_{OUT} = 35V$ $T_A=25^\circ\text{C}$ , $I_{STROBE} = 3\text{ mA}$ $V^- = \text{Pin } 1 = -5V$		0.2	50	nA
Input Offset Voltage (Note 16)	$R_S \leq 50K$			10	mV
Input Offset Current (Note 16)				70	nA
Input Bias Current				300	nA
Input Voltage Range		-14.5	13.8, -14.7	13.0	V
Saturation Voltage	$V^+ \geq 4.5V$ , $V^- = 0$ $V_{IN} \leq -10\text{ mV}$ , $I_{OUT} \leq 8\text{ mA}$		0.23	0.4	V
Positive Supply Current	$T_A=25^\circ\text{C}$		5.1	7.5	mA
Negative Supply Current	$T_A=25^\circ\text{C}$		4.1	5.0	mA

Note 12: "Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits."

Note 13: This rating applies for  $\pm 15V$  supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.

Note 14: The maximum junction temperature of the LM311 is 110°C. For operating at elevated temperature, devices in the H08 package must be derated based on a thermal resistance of 165°C/W, junction to ambient, or 20°C/W, junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W, junction to ambient.

Note 15: These specifications apply for  $V_S = \pm 15V$  and Pin 1 at ground, and  $0^\circ\text{C} < T_A < +70^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified. The offset voltage, offset current and bias current specifications apply for any supply voltage from a single 5V supply up to  $\pm 15V$  supplies.

Note 16: The offset voltages and offset currents given are the maximum values required to drive the output within a volt of either supply with 1 mA load. Thus, these parameters define an error band and take into account the worst-case effects of voltage gain and  $R_S$ .

Note 17: The response time specified (see definitions) is for a 100 mV input step with 5 mV overdrive.

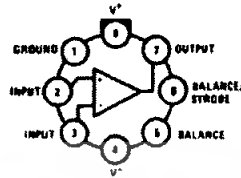
Note 18: This specification gives the range of current which must be drawn from the strobe pin to ensure the output is properly disabled. Do not short the strobe pin to ground; it should be current driven at 3 to 5 mA.

Note 19: Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 11.0 Connection Diagrams

Metal Can Package



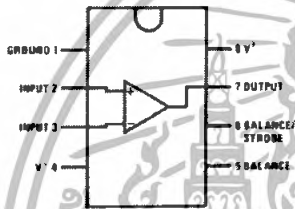
D5005704-4

Note: Pin 4 connected to case

Top View

Order Number LM111H, LM111H/883(Note 21), LM211H or LM311H  
See NS Package Number H08C

Dual-In-Line Package

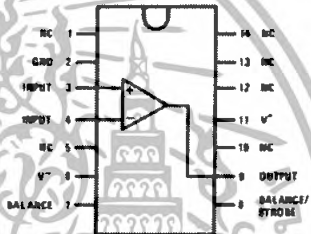


D5005704-34

Top View

Order Number LM111J-8, LM111J-8/883(Note 21),  
LM311M, LM311MX or LM311N  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

Dual-In-Line Package



D5005704-33

Top View

Order Number LM111J/883(Note 21)  
See NS Package Number J14A or N14A



D5005704-35

Order Number LM111W/883(Note 21), LM111WG/883  
See NS Package Number W10A, WG10A

Note 21: Also available per JM38510/10304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้