

อภินิพนธ์นาการ

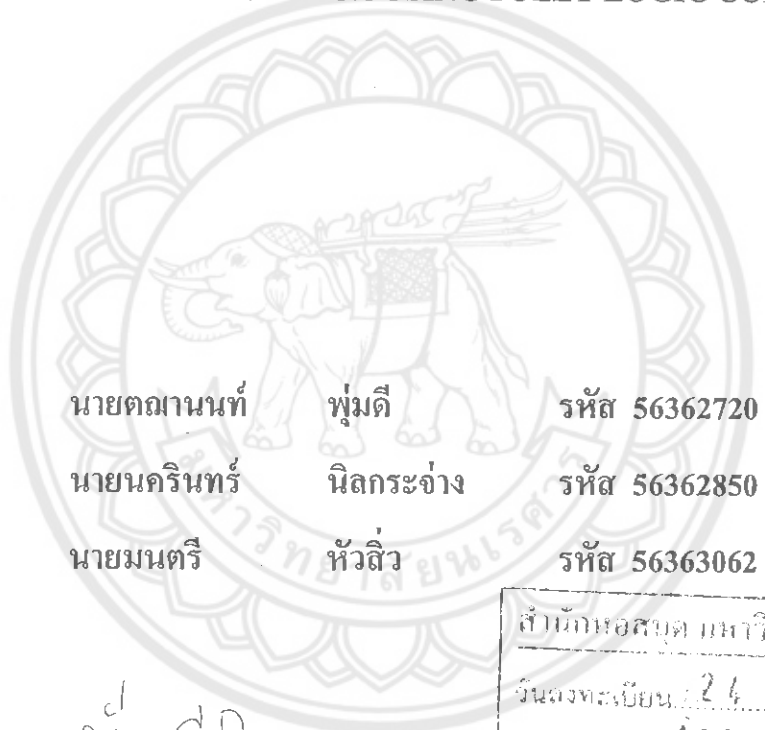


สำนักหอสมุด



การควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้ฟัซซี่ลอจิก

ROBOT DISTANCE CONTROL USING FUZZY LOGIC CONTROLLER



นายตถานนท์	พุ่มดี	รหัส 56362720
นายนครินทร์	นิลกระจ่าง	รหัส 56362850
นายมนตรี	หัวลิว	รหัส 56363062

มี CD

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันลงทะเบียน 24 ส.ค. 2559
เลขทะเบียน 17220352
เลขเรียกหนังสือ ปร

๓ 114 ก  
2559

CD-SPL 86

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา 2559

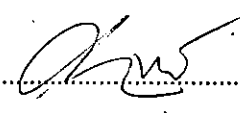


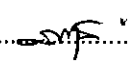
## ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้พีซีลอคจิก  
ผู้ดำเนินโครงการ นายตมมานนท์ พุ่มดี รหัส 56362720  
นายนครินทร์ นิลกระจ่าง รหัส 56362850  
นายมนตรี หัวสัว รหัส 56363062  
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

  
.....กรรมการ  
(ดร.สราวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้พีซีล่อจิก  
ผู้ดำเนินโครงการ นายตณานนท์ พุ่มดี รหัส 56362720  
นายนครินทร์ นิลกระจ่าง รหัส 56362850  
นายมนตรี หัวสัว รหัส 56363062  
ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
ปีการศึกษา 2559

---

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้การควบคุมแบบพีซีเป็น การอนุমানแบบแมมดานิ เพื่อให้ระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีค่าตามที่กำหนด (30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร) โดยค่าอินพุตของพีซีคือค่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของ หุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่ส่งค่ามาจากตัวรับรู้อัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ตัวหลัง และค่าเอาต์พุตของ พีซีคือค่าความเร็วของมอเตอร์หุ่นยนต์ตัวหลัง โดยใช้ตัวรับรู้อัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ทั้งสองตัว และใช้จอแสดงผลแอลซีดีแสดงค่าระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวและใช้ไดโอดเปล่งแสงแสดง สถานะไฟติดเมื่อระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีค่าตามที่กำหนด จากผลการทดลองเห็นได้ว่า การใช้ตัวควบคุมแบบพีซีในการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อระยะห่างมีการ เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ให้มีค่าตามที่กำหนดได้ และเมื่อหุ่นยนต์ตัว หนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วลดลงจะทำให้หุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมามีค่าระยะห่างระหว่าง หุ่นยนต์สองตัวตามที่กำหนดใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อหุ่นยนต์ตัวหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเพิ่มขึ้น

**Project title** Robot Distance Control using Fuzzy Logic Controller

**Name** Mr.Tachanon Phumdee ID. 56362720  
Mr.Nakharin Ninkrajang ID. 56362850  
Mr.Montri Huasiu ID. 56363062

**Project adviser** Asst. Prof. Mutita Songjun, Ph.D.

**Major** Electrical Engineering

**Department** Electrical and Computer Engineering

**Academic year** 2016

---

#### Abstract

This project presents the robot distance control using fuzzy logic controller. The mamdani inference method is chosen in the fuzzy design. The process is to control the distance between two robots at the desired constant; 30, 40 and 50 centimeters. The input of the fuzzy controller is the change of distance between two robots measured by the ultrasonic sensor from the second robot. The output of the fuzzy controller is the speed of the second robot. The distance between two robots measured by the sensor on the second robot will display on the LCD screen. The LED on the second robot is also used to indicate that the robot reach the desired constant. The results show that the robot distance control using fuzzy logic controller is able to control the distance between two robots at the desired constant with the acceptable error.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งมีส่วนช่วยในด้านกำลังใจและส่วนช่วยในด้านกำลังใจที่ทำให้ฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ให้ผ่านไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูทิตา สงฆ์จันทร์ สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สรารุณี วัฒนวงศ์พิทักษ์ สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณผู้ที่มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวถึงทุกท่าน ที่ต่างมีส่วนร่วมในการชี้แนะ ให้ข้อมูลและให้ความรู้เกี่ยวกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงออกมาตามวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยต้องการมา ณ ที่นี้ด้วย

ตมานนท์ พุ่มดี

นครินทร์ นิลกระจ่าง

มนตรี หัวสัว

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท ..... ก	ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค	ค
กิตติกรรมประกาศ..... ง	ง
สารบัญ ..... จ	จ
สารบัญตาราง ..... ข	ข
สารบัญรูป ..... ช	ช
บทที่ 1 บทนำ ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ ..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ ..... 1	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ ..... 2	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน ..... 2	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 3	3
1.6 งบประมาณ ..... 3	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ..... 4	4
2.1 ทฤษฎีฟิสิกส์ ..... 4	4
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ..... 17	17
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ..... 20	20
2.4 ตัวรับรู้ ..... 27	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ ..... 29	29
3.1 ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลัง ..... 29	29
3.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง ..... 32	32
3.3 อุปกรณ์เพิ่มเติม ..... 35	35
3.4 แสงวงจที่ใช้ในหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง ..... 37	37
3.5 ออกแบบตัวควบคุมแบบฟิสิกส์ ..... 40	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	54
4.1 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิก.....	54
4.2 การทดลองควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์เมื่อตั้งค่าระยะห่างตามที่กำหนด .....	57
4.3 การทดลองหาเวลาของหุ่นยนต์ตัวหลังที่สามารถกลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด เมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว .....	63
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....	69
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	69
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา.....	70
5.3 การนำไปพัฒนาและประยุกต์การใช้งาน.....	70
เอกสารอ้างอิง .....	71
ภาคผนวก ก รายละเอียดข้อมูลของ AVR ATMEGA2560 .....	72
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลของ L298N.....	82
ภาคผนวก ค รายละเอียดข้อมูลของ L324.....	86
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	91

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
3.1 การทำงานมอเตอร์ A .....	39
3.2 ตัวแปรและค่าเชิงภาษา .....	40
4.1 แสดงค่าระยะห่างที่ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดได้ในช่วงทางตรง .....	55
4.2 แสดงค่าระยะห่างที่ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดได้ในช่วงทางโค้ง .....	56
4.3 แสดงค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร .....	59
4.4 แสดงค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร .....	60
4.5 แสดงค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร .....	61
4.6 เวลาที่หุ่นยนต์กลับมาที่ค่าระยะห่างตามที่กำหนด โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร .....	65
4.7 เวลาที่หุ่นยนต์กลับมาที่ค่าระยะห่างตามที่กำหนด โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร .....	66
4.8 เวลาที่หุ่นยนต์กลับมาที่ค่าระยะห่างตามที่กำหนด โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร .....	67





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การควบคุมโดยตรง.....	5
2.2 การควบคุมแบบไปข้างหน้า.....	5
2.3 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว.....	6
2.4 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีชชี.....	6
2.5 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62.....	10
2.6 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64.....	10
2.7 การอนุมานพีชชีแบบแมมดानी.....	14
2.8 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด.....	15
2.9 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ .....	15
2.10 การทำดีพีชชีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิต.....	16
2.11 ตำแหน่งขาของชิป ATmega2560.....	19
2.12 วงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	20
2.13 วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์.....	22
2.14 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม.....	23
2.15 กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม.....	23
2.16 กราฟคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงโดยการเปลี่ยนค่าแรงดัน.....	24
2.17 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดีวีไอซีเกิล ของช่วงพัลส์ที่มีความคงที่.....	24
2.18 วงจรควบคุมมอเตอร์ PWM กลับทิศการหมุนได้.....	25
2.19 การตรวจจับระยะห่างของหุ่นยนต์.....	27
3.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลัง.....	29
3.2 แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้า.....	30
3.3 แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ตัวหลัง.....	31
3.4 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ตัวหน้า.....	32
3.5 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ตัวหลัง.....	32
3.6 โครงสร้างของหุ่นยนต์ตัวหน้า.....	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 โครงสร้างของหุ่นยนต์ตัวหลัง.....	34
3.8 ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก รุ่น US-015 .....	35
3.9 จอแสดงผลแอลซีดี .....	36
3.10 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 .....	37
3.11 แผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ L298N .....	38
3.12 รูปแบบการอนุมานอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี่.....	41
3.13 ฟัซซี่เซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์.....	42
3.14 ฟัซซี่เซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ .....	42
3.15 มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมระยะห่างและความเร็วของหุ่นยนต์ .....	43
3.16 การประมวลผลค่าเอาต์พุตด้วยวิธีแมมดानी .....	44
3.17 ระดับความเป็นสมาชิกของระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงที่ 0 เซนติเมตร จะให้ค่าระดับความ เป็นสมาชิก เท่ากับ 0.20 และ 0.22 .....	45
3.18 การอนุมานฟัซซี่แบบแมมดानी .....	45
3.19 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด .....	46
3.20 การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางของระบบควบคุมมอเตอร์ .....	47
3.21 ระดับความเป็นสมาชิกของระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงที่ 3 เซนติเมตร จะให้ค่าระดับความ เป็นสมาชิก เท่ากับ 0.14 และ 0.83 .....	48
3.22 การอนุมานฟัซซี่แบบแมมดानी .....	48
3.23 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด .....	49
3.24 การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางของระบบควบคุมมอเตอร์ .....	50
3.25 ระดับความเป็นสมาชิกของระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงที่ -4 เซนติเมตร จะให้ค่าระดับความ เป็นสมาชิก เท่ากับ 0.17 และ 0.85 .....	51
3.26 การอนุมานฟัซซี่แบบแมมดानी .....	51
3.27 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด .....	52
3.28 การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางของระบบควบคุมมอเตอร์ .....	53
4.1 รางที่ใช้ในการทดลอง.....	54
4.2 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกในช่วงทางตรง.....	55
4.3 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกในช่วงทางโค้ง.....	56
4.4 รางที่ใช้ในการทดลอง.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	วางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่จุดเริ่มต้น .....58
4.6	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่ออยู่บนราง โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร .....59
4.7	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่ออยู่บนราง โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร .....60
4.8	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่ออยู่บนราง โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร .....61
4.9	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่การตั้งค่าระยะห่างต่างๆ .....62
4.10	รูปที่ใช้ในการทดลอง.....64
4.11	วางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่จุดเริ่มต้น .....64
4.12	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร .....65
4.13	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร .....65
4.14	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร .....66
4.15	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร .....66
4.16	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร .....67
4.17	การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร .....67
4.18	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีระยะห่างตามที่กำหนด ระหว่างการเพิ่มความเร็วและการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า .....68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันระบบขนส่งภายใน โรงงานมีความสำคัญมากในการขนส่งสินค้า ซึ่งแน่นอนว่าต้องมีการนำเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มาพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อนำมาใช้ในการขนส่งสินค้าเพื่อลดต้นทุนแรงงาน เวลา และรักษามาตรฐานในการขนส่งสินค้า อีกทั้งยังทำให้การผลิตสินค้าในแต่ละวันมีจำนวนในการส่งออกไปจำหน่ายได้มากขึ้น ส่งผลให้โรงงานมีผลกำไรที่มากกว่าเดิมแต่ระยะเวลาเท่าเดิม จึงสามารถทำให้โรงงานมีโอกาสที่จะเติบโตต่อไป ดังนั้นทางโรงงานอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีหุ่นยนต์จำนวนหลายๆ ตัวเพื่อขนส่งสินค้าจำนวนมากในเวลาจำกัด การที่มีหุ่นยนต์จำนวนมากในโรงงานส่งผลให้เกิดปัญหาตามมา เช่น หุ่นยนต์ตัวหน้าเกิดการขัดข้องภายในระบบ ทำให้หุ่นยนต์ตัวที่อยู่ด้านหลังเคลื่อนที่มาชนหุ่นยนต์ตัวหน้าจึงส่งผลให้เกิดความเสียหายของหุ่นยนต์รวมถึงอุปกรณ์หรือสินค้าของโรงงาน การที่มีหุ่นยนต์จำนวนหลายๆ ตัวในโรงงานนั้นจะต้องมีการจัดการวางระบบการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ให้ชัดเจนเป็นการป้องกันก่อนจะเกิดปัญหาในขั้นตอนการผลิตสินค้าของ โรงงาน เพื่อไม่ให้เกิดความล่าช้าและความเสียหายแก่หุ่นยนต์ สินค้า รวมถึงอุปกรณ์ใน โรงงานในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้าอย่างมากซึ่งช่วยในการทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพื่อลดค่าใช้จ่ายรวมถึงลดเวลาในการปฏิบัติงานได้เป็นอย่างมาก การนำเทคโนโลยีมาใช้นั้นเพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ และสามารถควบคุมโดยใช้อุปกรณ์จากภายนอกได้

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงจัดทำโครงการการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า หุ่นยนต์ตัวหลังจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วด้วยเช่นกันเพื่อให้มีระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ตามที่วางไว้ในระบบและสร้างหุ่นยนต์จำลองจำนวน 2 ตัวที่สามารถควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์เพื่อให้มีความเร็วคงที่ตามค่าที่กำหนด และปรับระดับความเร็วของหุ่นยนต์ได้ รวมถึงรักษาระยะห่างของหุ่นยนต์ด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

สร้างหุ่นยนต์สองตัว ซึ่งหุ่นยนต์ตัวหน้าสามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ และสร้างหุ่นยนต์ตัวหลังที่สามารถควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีเมื่อระยะห่างของหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) สร้างหุ่นยนต์ 2 ตัวที่มีขนาดความกว้าง 18.5 เซนติเมตร และความยาว 25 เซนติเมตร
- 2) สร้างหุ่นยนต์ 2 ตัวที่มีความเร็วไม่เกิน 1 เมตร/วินาที โดยใช้มอเตอร์กระแสตรง
- 3) สร้างหุ่นยนต์ตัวหน้าที่สามารถควบคุมความเร็ว
- 4) สร้างหุ่นยนต์ตัวหลังที่สามารถควบคุมระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ตัวหน้าเท่ากับ 30 เซนติเมตร 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร
- 5) ใช้วิธีควบคุมแบบพีซีลจิกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

### 1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รายละเอียด	พ.ศ. 2559						พ.ศ. 2560			
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1) รวบรวมข้อมูล ทฤษฎีพีซีลจิก										
2) ศึกษาการทำงานของ หุ่นยนต์โดยใช้ตัว ควบคุมแบบ พีซีลจิก										
3) สร้างหุ่นยนต์ 2 ตัว										
4) เขียนโปรแกรม ควบคุมหุ่นยนต์และ ทำการทดสอบ										
5) ปรับปรุงแก้ไข โปรแกรมควบคุม การทำงาน										
6) สรุปผลการ ดำเนินงาน										
7) จัดทำปฏิญานพนธ์										

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำการทำงานของหุ่นยนต์ไปใช้พัฒนาและประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งภายในโรงงานอุตสาหกรรมและระบบควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายของหุ่นยนต์สินค้ารวมทั้งอุปกรณ์ในโรงงาน ในกรณีที่หุ่นยนต์ตัวหน้าเกิดข้อผิดพลาดในระบบ

## 1.6 งบประมาณ

1) แสงวงจรต่างๆ	1,500 บาท
2) ล้อและมอเตอร์	1,490 บาท
3) วัสดุอุปกรณ์โครงสร้าง	500 บาท
4) แบตเตอรี่	600 บาท
5) เอกสาร	500 บาท
6) วัสดุอื่นๆ	500 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (ห้าพันเก้าสิบบาทถ้วน)	<u>5,090 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	



## บทที่ 2

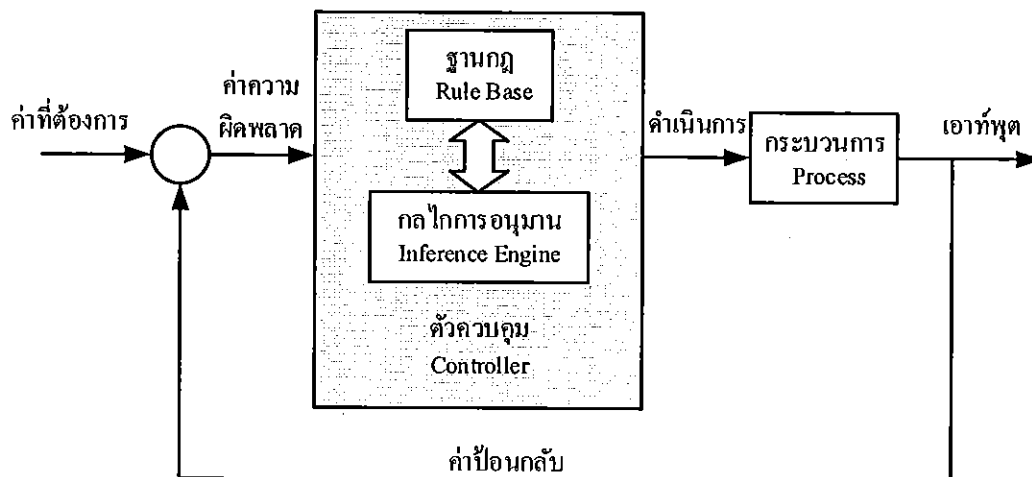
### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะรวบรวมหลักการงานและทฤษฎีขององค์ประกอบที่มีความจำเป็นต่อการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีชชี ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันของโครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง ทั้งระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และระบบควบคุมความเร็ว

#### 2.1 ทฤษฎีพีชชี

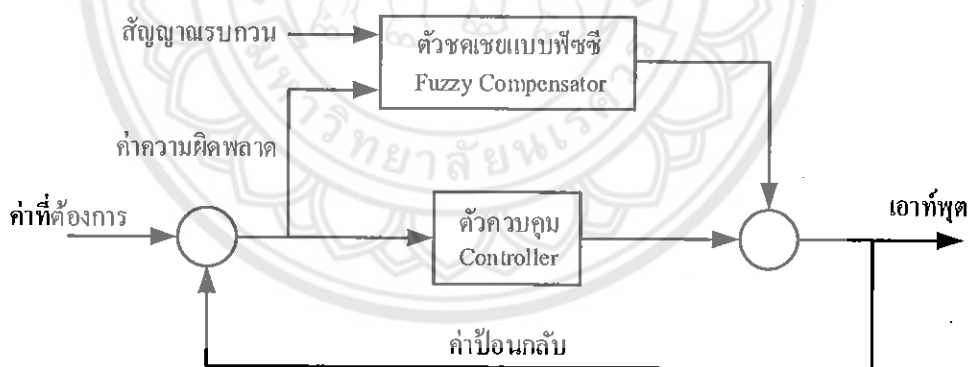
ตัวควบคุมแบบพีชชีได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องซักผ้า กล้องวิดีโอ หม้อหุงข้าว ตู้เย็น รวมไปถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ตัวควบคุมแบบพีชชีใช้หลักของพีชชีลอจิกในการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ โดยที่ตัวของพีชชีลอจิกเองสามารถคำนวณด้วยคำพูดแทนตัวเลข เช่น “มากขึ้นนิด” หรือ “ลดลงหน่อย” ไม่ใช่ “มากขึ้น 10” หรือ “ลดลง 5.2” เป็นต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวควบคุมแบบพีชชีสามารถควบคุมด้วยประโยคแทนที่จะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น “อินพุตกำลังลดลงให้รับเอาต์พุตให้มากขึ้นหน่อย” ไม่ใช่ “อินพุตมีค่าเท่ากับ 2 ให้รับเอาต์พุตเท่ากับ 7” จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีชชีมีลักษณะของการใช้ฐานกฎ (rule base) ที่มาจากการควบคุมด้วยคนจริงๆ ได้ ตัวควบคุมแบบนี้จึงมีประโยชน์มากในการประยุกต์ใช้กับงานเชิงปฏิบัติการจริงด้วยผู้เชี่ยวชาญ กลยุทธ์ในการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบภาษาธรรมชาติ เหมือนที่ผู้ควบคุมใช้พูดสั่งงาน กฎต่างๆ ที่ใช้จึงต้องถูกคัดแยกออกจากส่วนที่เป็นสมการคณิตศาสตร์ ตัวควบคุมแบบพีชชีมีรูปแบบการใช้งานหลายรูปแบบดังนี้

1) การควบคุมโดยตรง (direct control) ตัวควบคุมแบบพีชชีที่เป็นการควบคุมโดยตรงนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบพีชชีจะอยู่ในส่วนหน้าก่อนที่เอาต์พุตจะถูกป้อนกลับ เอาต์พุตที่ได้จากกระบวนการจะถูกเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ตั้งไว้ ถ้ามีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นคือเอาต์พุตไม่ตรงหรือไม่สอดคล้องกับค่าอินพุตที่ต้องการ ตัวควบคุมจะดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งตามกลวิธีที่กำหนดหรือที่ได้ออกแบบไว้ในตัวควบคุม ตัวควบคุมแบบพีชชีในรูปนี้ถูกใช้แทนตัวควบคุมแบบ PID แบบดั้งเดิม



รูปที่ 2.1 การควบคุมโดยตรง

2) การควบคุมแบบไปข้างหน้า (feedforward control) การนำเอาฟัซซีลอจิกมาเป็นตัวชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมแบบไปข้างหน้าสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.2 ตัวชดเชยแบบฟัซซีใช้สัญญาณรบกวนเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าจะทำการชดเชยให้กับตัวควบคุมขนาดไหน ตัวควบคุมในระบบอาจจะเป็นตัวควบคุม PID แบบเชิงเส้น ในขณะที่ตัวชดเชยแบบฟัซซีจะทำการชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น

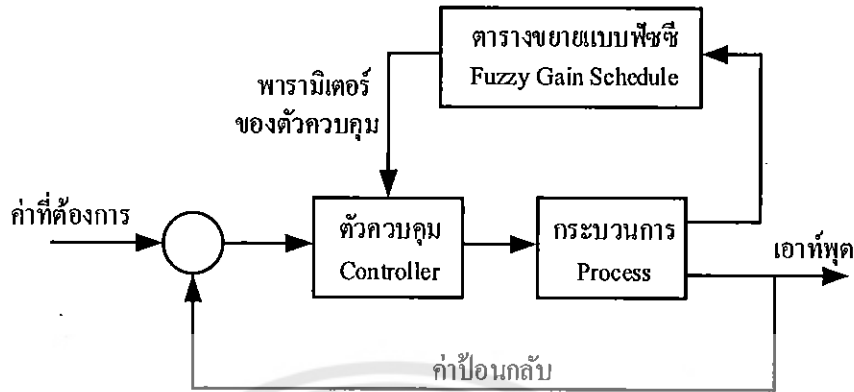


รูปที่ 2.2 การควบคุมแบบไปข้างหน้า

3) การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (parameter adaptive control) ในกรณีที่ระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีจุดทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นที่ตั้งไว้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับจุดทำงานใหม่ได้ด้วยการจัดตารางการขยายแบบฟัซซี (fuzzy gain scheduling) ตัวควบคุมที่มีการจัดตารางการขยายแบบฟัซซีจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ซึ่งมีค่าของพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิม อินพุตที่วัดจากตัวตรวจจับจะถูกใช้เป็นตัวแปรการจัดตาราง (scheduling variable) ที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์



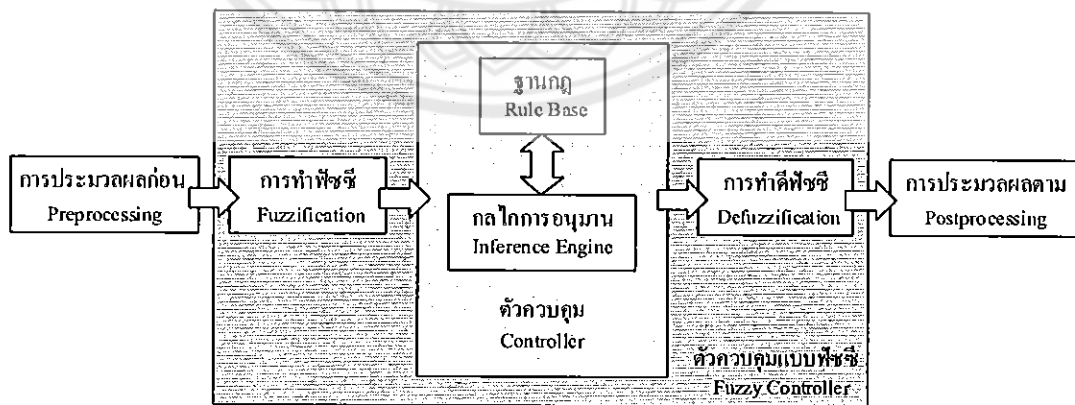
ของตัวควบคุมเดิม การปรับค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปของตารางค้นหา (look-up table) รูปที่ 2.3 แสดงแผนผังทั่วไปของการควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวแบบฟัซซี



รูปที่ 2.3 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว

2.1.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมเชิงเส้นซึ่งมีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นจะต้องทำการคำนวณเหมือนกับเช่นวิธีราก-โลคัส (root locus) วิธีผลตอบสนองความถี่ (frequency response) หรือวิธีวางตำแหน่งโพล (pole placement) กฎที่ใช้ในตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถไม่เป็นเชิงเส้นได้ รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซี องค์ประกอบในการประมวลผลก่อนและหลังเป็นการปรับสภาพอินพุตและเอาต์พุตที่จะใช้กับตัวควบคุมแบบฟัซซีให้มีความเหมาะสม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

1) การประมวลผลก่อน (preprocessing) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการเตรียมอินพุตจากโลกจริงให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับตัวควบคุมในโลกของฟัซซี โดยปกติแล้วอินพุตของระบบจะเป็นค่าเชิงตัวเลขที่วัดหรือออกมาจากเครื่องมือวัดต่างๆ และไม่ได้มีค่าในรูปภาษา จึงจำเป็นต้องมีการประมวลผลก่อนเพื่อปรับค่าอินพุตเหล่านี้ให้มีความเหมาะสม ตัวอย่างของการประมวลผลก่อนเช่น แปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานในย่านเฉพาะที่ต้องการ กรองหรือกำจัดสัญญาณรบกวน ค้นหาค่าอนุพันธ์หรือปริพันธ์

ขั้นตอนการประมวลผลก่อนมีผลต่อประสิทธิภาพหรือการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีโดยตรง ค่าสัญญาณดิจิทัลที่ละเอียดจะทำให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างราบเรียบกว่าค่าที่หยาบ การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานอาจส่งผลต่อการกำหนดตัวแปรในระบบฟัซซีได้

2) การทำฟัซซี (fuzzification) ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตนั้นตามเงื่อนไขที่ถูกต้องแบบไว้

3) ฐานกฎ (rule base) กฎในระบบฟัซซีถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุม กฎดังกล่าวสามารถมาจากเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมไปถึงสามารถให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าหนึ่งผลลัพธ์ได้ ตัวควบคุมที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ในขณะที่ตัวควบคุมที่มีเพียงหนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตจะเรียกว่า SISO (Single-Input Single-Output) ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตจะทำการควบคุมสัญญาณค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว แนวคิดของการใช้ฐานกฎในฟัซซีลอจิกทำให้ระบบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของมนุษย์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง

4) กลไกการอนุมาน (inference engine) กฎต่างๆ ที่กำหนดไว้จะถูกอนุมานเป็นผลลัพธ์ในการตัดสินใจของระบบ เมื่อระบบตัดสินใจได้แล้ว การดำเนินการที่สอดคล้องกับการตัดสินใจนั้นก็จะเป็นต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ระบบตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ที่ 1 กำลัง “ร้อนขึ้น” อย่าง “รวดเร็ว” ระบบจะทำการพิจารณาค่าอินพุตพร้อมกับตรวจสอบกับกฎการทำงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวแล้วทำการอนุมานหรือตัดสินใจว่าจะทำการเปิดเครื่องทำความเย็น “แรงที่สุด” เป็นต้น ผลลัพธ์การตัดสินใจที่ได้ยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษาที่ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าที่ใช้งานจริงด้วยขั้นตอนต่อไป

5) การทำดีฟัซซี (defuzzification) ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานจะอยู่ในรูป เช่น เปิดเครื่องทำความเย็น “แรงที่สุด” หรือลดเครื่องทำความร้อน “ลงพอประมาณ” ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่น เปิดเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

6) การประมวลผลตาม (postprocessing) เอาท์พุทที่ได้จากระบบอาจจะต้องถูกปรับให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐานในย่านที่ใช้งานจริง เช่น แปลงค่า 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงดันขนาด -5 ถึง +5 โวลต์ สำหรับควบคุมให้เครื่องทำความเย็นเปิดปิดตามปริมาณที่ต้องการ

### 2.1.2 กฎของฟัซซี (Fuzzy rule)

กฎของฟัซซีเป็นวิธีการนำเอาความรู้ของมนุษย์มาใส่ในระบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซีคือกลุ่มของประโยคเงื่อนไข ถ้า-แล้ว (IF-THEN) ในรูปแบบต่อไปนี้

IF	x is A
THEN	y is B
หรือ	ถ้า
	x เท่ากับ A
	แล้ว
	y เท่ากับ B

โดยที่ x และ y เป็นตัวแปรภาษาและ A และ B เป็นค่าเชิงภาษา โดยปกติแล้วกฎของฟัซซีจะครอบคลุมค่าของตัวแปรที่อยู่ในส่วนเงื่อนไข IF ยกตัวอย่างเช่นระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าของตัวแปรอุณหภูมิที่เป็นไปได้คือ “เย็น” “กำลังดี” และ “ร้อน” ดังนั้นเงื่อนไขของฟัซซีที่ครอบคลุมค่าดังกล่าวจะเป็น

กฎ 1 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ เย็น

แล้ว เอาท์พุท เป็น ให้ความร้อน

กฎ 2 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ ร้อน

แล้ว เอาท์พุท เป็น ให้ความเย็น

กฎ 3 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ กำลังดี

แล้ว เอาท์พุท เป็น ไม่เปลี่ยนแปลง

กฎของฟัซซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือส่วน “ถ้า” (IF) และส่วน “แล้ว” (THEN) ในทฤษฎีเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขใน “ถ้า” เป็นจริง ส่วน “แล้ว” จะถูกประเมิน แต่ในทฤษฎีฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน “ถ้า” จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน “แล้ว” จะถูกประเมินค่าด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้นๆ และค่าเงื่อนไขในส่วนของ “ถ้า” กับในส่วนของ “แล้ว” สามารถมีได้หลายค่า ดังรูปแบบต่อไปนี้

ถ้า  $x$  เท่ากับ  $A$  และ  $y$  เท่ากับ  $B$  หรือ  $z$  เท่ากับ  $C$   
แล้ว  $p$  เท่ากับ  $D$  และ  $q$  เท่ากับ  $E$

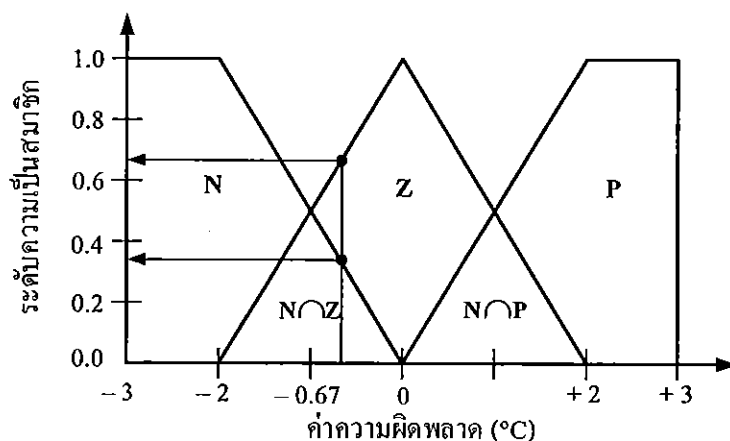
ทุกเงื่อนไขใน “ถ้า” จะถูกประเมินพร้อมๆ กันและรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต เช่น แอนด์ (AND) หรือ ออร์ (OR) โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไป โดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้นเนื่องจากจะทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซี เพราะบางกฎอาจไม่สามารถมีโอกาสเกิดได้ จะสังเกตว่าจำนวนเงื่อนไขจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภาษาภายในระบบ

### 2.1.3 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (Mamdani-style inference)

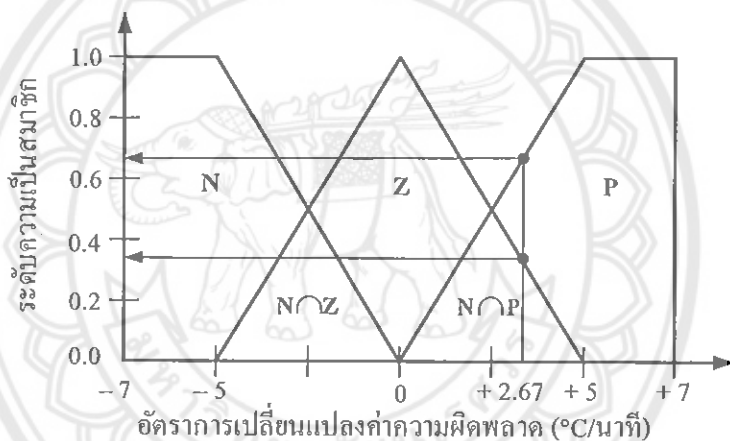
การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาต์พุต โดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้คือ แบบแมมดานี (Mamdani) และแบบซุกิโน (Sugeno) โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานีซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการออกแบบดังจะแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานีประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือการทำฟัซซี การประเมินกฎของฟัซซี การรวมกฎและการทำดีฟัซซี

1) การทำฟัซซี (fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ระบบจะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข จากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้นๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่งๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น พิจารณาการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตจากรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่  $-0.67^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62



รูปที่ 2.6 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่  $+2.67^{\circ}\text{C/นาที}$  ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64

จากค่าความผิดพลาดที่  $-0.67^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต N (เซต “ลบ”) และเซต Z (เซต “ศูนย์”) หมายความว่าสำหรับฟังก์ชันสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่กำหนดคือค่า  $-0.67^{\circ}\text{C}$  มีทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์โดยที่มีระดับความเป็นสมาชิกของเซต N เท่ากับ 0.36 และมีระดับความเป็นสมาชิกของเซต Z เท่ากับ 0.62 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดเป็นสมาชิกของทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์แต่มีระดับความเป็นศูนย์มากกว่าความเป็นลบ เช่นเดียวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่  $+2.67^{\circ}\text{C/นาที}$  ซึ่งจากฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนด ค่านี้อาจมีความเป็นศูนย์และความเป็นบวกคือเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต Z และเซต P ด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.35 และ 0.64 ตามลำดับ ซึ่งค่าระดับความเป็นสมาชิกบ่งบอกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด  $+2.67^{\circ}\text{C/นาที}$  มีความเป็นบวกมากกว่าความเป็นศูนย์ สรุปค่าระดับความเป็นสมาชิกของทั้งสองอินพุตในรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกได้ดังนี้

$$\mu(\text{ค่าความผิดพลาด} = N)(-0.67) = 0.36$$

$$\mu(\text{ค่าความผิดพลาด} = Z)(-0.67) = 0.62$$

$$\mu(\text{ค่าความผิดพลาด} = P)(-0.67) = 0.00$$

$$\mu(\text{ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด} = N)(2.67) = 0.00$$

$$\mu(\text{ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด} = Z)(2.67) = 0.35$$

$$\mu(\text{ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด} = P)(2.67) = 0.64$$

2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้โดยใช้กฎของฟัซซี การประเมินค่ากฎจะเป็นส่วนของ “ถ้า” โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องถูกกระทำในส่วนของ “แล้ว” ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆ กันได้เนื่องจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เช่นที่กล่าวมาแล้วคือค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น แอนด์และออร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าในส่วน “แล้ว” ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำการออร์จากทฤษฎีเซตจะได้ว่า

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.1)$$

ตัวกระทำออร์สามารถมีนิยามได้หลายอย่าง เช่น ตัวกระทำออร์ในกล่องเครื่องมือฟัซซีลอจิกในแมทแลป (MATLAB Fuzzy Logic Toolbox) จะมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน max และฟังก์ชันทางสถิติที่เรียกว่า probor หรือผลรวมเชิงพีชคณิต (algebraic sum) ดังนี้

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= \text{probor}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) \end{aligned} \quad (2.2)$$

เช่นเดียวกับตัวกระทำแอนด์ ในกล่องเครื่องมือฟัซซีลอจิกในแมทแลปมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน min และฟังก์ชันผลคูณ prod ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.3)$$

หรือ

$$\begin{aligned} \mu_{A \cap B}(x) &= \text{prod}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ &= \mu_A(x) \times \mu_B(x) \end{aligned} \quad (2.4)$$

ในบางกรณีการใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกันอาจจะให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้ หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่ง

เงื่อนไขในส่วนของ “ถ้า” แล้ว ผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่ากฎข้อใดที่ต้องถูกพิจารณาในส่วน “แล้ว” ต่อไป พิจารณาตัวอย่างระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีกฎของฟัชซีทั้งหมด 9 ข้อ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่หนึ่งได้แก่ ค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67^{\circ}\text{C}$  ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ N และ Z ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์และอยู่ในส่วน “ถ้า” ของกฎข้อที่ 1 2 4 5 7 และ 8 ในขณะที่เงื่อนไขของอินพุตตัวที่สองได้แก่อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67^{\circ}\text{C/นาท}$  ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Z และ P ที่ไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ในส่วนของ “ถ้า” ของกฎข้อที่ 4 5 6 7 8 และ 9 เมื่อทำการแอนด์โดยใช้ฟังก์ชัน  $\min$  กับเงื่อนไขทั้งสองแล้วจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองที่มีค่าไม่เป็นศูนย์คือเงื่อนไขในข้อ 4 5 7 และ 8 กฎของฟัชซีทั้ง 9 ข้อเขียนได้ดังนี้

1) IF (ค่าผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N) THEN

เอาท์พุต = C

IF (0.36 AND 0.00) = 0.00 THEN เอาท์พุต = C

2) IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N) THEN

เอาท์พุต = H

IF (0.62 AND 0.00) = 0.00 THEN เอาท์พุต = H

3) IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N) THEN

เอาท์พุต = H

IF (0.00 AND 0.00) = 0.00 THEN เอาท์พุต = H

4) IF (ค่าผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN

เอาท์พุต = C

IF (0.36 AND 0.35) = 0.35 THEN เอาท์พุต = C

5) IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN

เอาท์พุต = NC

IF (0.62 AND 0.35) = 0.35 THEN เอาท์พุต = NC

6) IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN

เอาท์พุต = H

IF (0.00 AND 0.35) = 0.00 THEN เอาท์พุต = H

7) IF (ค่าผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN

เอาท์พุต = C

IF (0.36 AND 0.64) = 0.36 THEN เอาท์พุต = C

8) IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN

เอาท์พุต = C

IF (0.62 AND 0.64) = 0.62 THEN เอาท์พุท = C

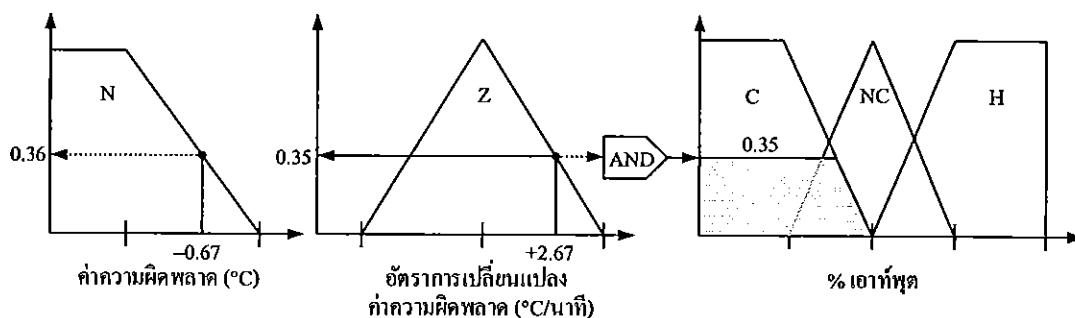
9) IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN  
เอาท์พุท = H

IF (0.00 AND 0.64) = 0.00 THEN เอาท์พุท = H

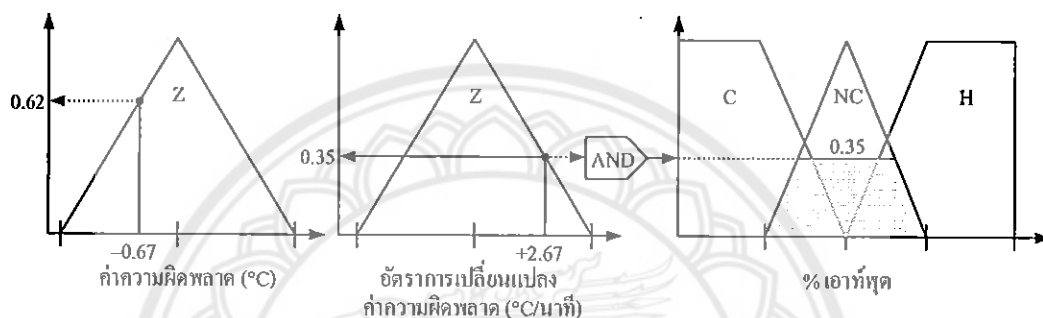
จากค่าผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67^{\circ}\text{C/นาท}$  มีผลให้ส่วนของ “แล้ว” ซึ่งก็คือตัวแปรเอาท์พุทของกฎข้อ 4 5 7 และ 8 จะถูกประเมินค่าในขั้นตอนต่อไป ค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุทในส่วนของ “ถ้า” จะเป็นตัวบอกว่าตัวแปรเอาท์พุทจะมีรูปร่างของระดับความเป็นสมาชิกอย่างไร โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุทจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุทใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 2.7



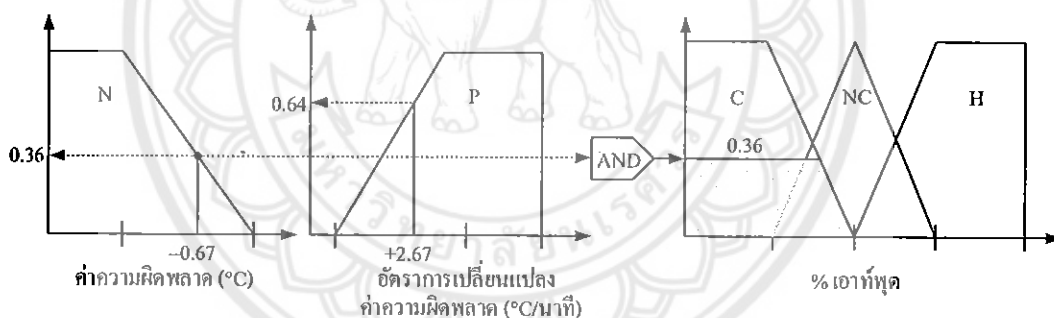




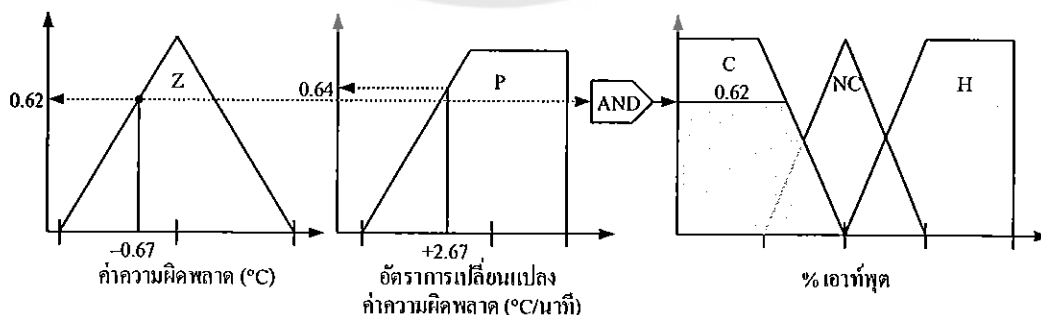
กฎ 4) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เอาท์พุต = C



กฎ 5) IF (ค่าความผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เอาท์พุต = NC



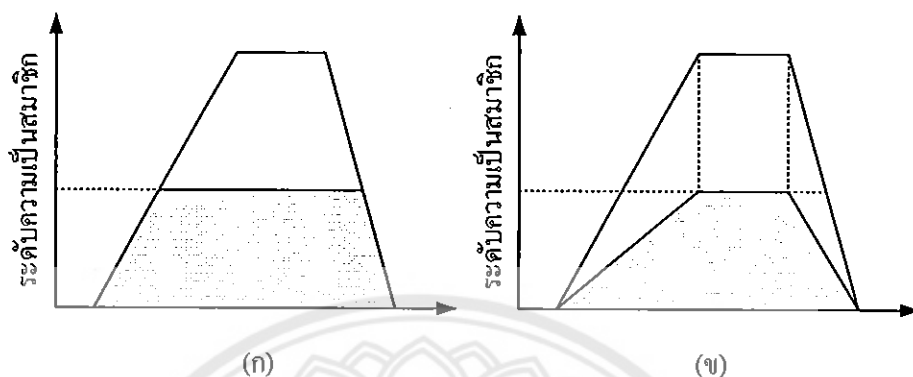
กฎ 7) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เอาท์พุต = C



กฎ 8) IF (ค่าความผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เอาท์พุต = C

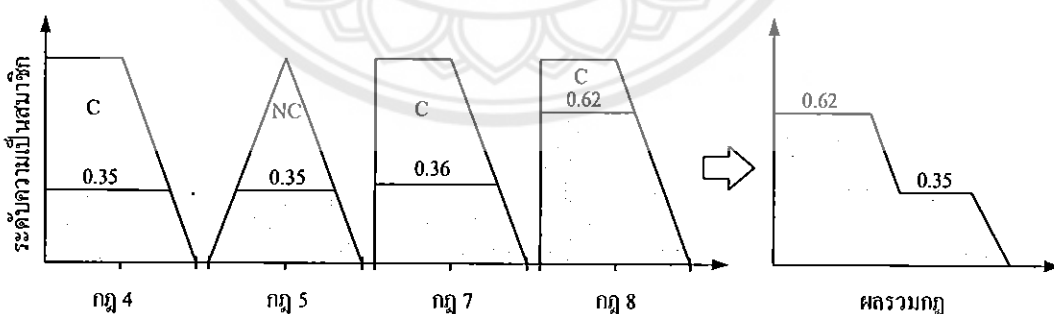
รูปที่ 2.7 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

ถึงแม้ว่าวิธีการตัดยอดเอาที่พุดจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน แต่เป็นวิธีที่เร็วและง่ายสำหรับการคำนวณรวมไปถึงการนำไปใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัดยอดและวิธีการปรับขนาด



รูปที่ 2.8 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด

3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาที่พุด โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน รูปที่ 2.9 แสดงการรวมกฎจากระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาที}$  โดยในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดี่ยวเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 2.9 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$  และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาที}$

4) การทำดีฟัซซี่ (defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่างๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี่ ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาที่พุด แต่ค่าของเอาที่พุดจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่

สามารถเป็นค่าฟัซซีได้เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

วิธีการทำดีฟัซซีมีหลายแบบ วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงของฟัซซีเซต A ในช่วง [a, b] สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

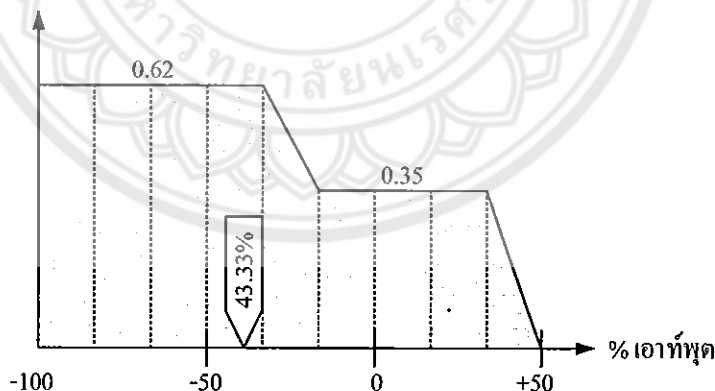
$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x)xdx}{\int_a^b \mu_A(x)dx} \tag{2.5}$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถหาได้จากข้อมูลการชักตัวอย่างดังนี้

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \tag{2.6}$$

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 2.9 ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$COG = \frac{[(-100 - 83.33 - 66.67 - 50 - 33.33) \times 0.62] + [(-16.67 + 0 + 16.67 + 33.33) \times 0.35]}{0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.62 + 0.35 + 0.35 + 0.35 + 0.35} = -43.33$$



รูปที่ 2.10 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีเท่ากับ -43.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าระบบต้องเปิดเครื่องทำความเย็นที่ระดับ 43.33 เปอร์เซ็นต์ การทำดีฟัซซีของระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.10

## 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) คือชิปประมวลผลอย่างหนึ่งซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลตามโปรแกรมหรือชุดคำสั่งเหมือนกับไมโครโพรเซสเซอร์ โครงสร้างภายในจะเป็นวงจรรวมขนาดใหญ่ประกอบไปด้วย หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก บัสข้อมูล บัสควบคุม บัสที่อยู่ พอร์ตขนาน พอร์ตอนุกรม รีจิสเตอร์ หน่วยความจำ วงจรนับ วงจรจับเวลาและวงจรอื่นๆ รวมกันอยู่ภายในชิปหรือ ไอซี ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในงานควบคุมสามารถติดต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตได้สะดวกใช้งานง่าย สามารถทำงานได้โดยใช้ชิปเดียว มีคำสั่งที่สนับสนุนในการเขียนโปรแกรมควบคุมและสามารถเข้าถึงข้อมูลระดับบิตได้

### 2.2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

1) หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากที่สุดของฮาร์ดแวร์ เพราะมีหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูลที่ใช้ใช้ป้อนเข้ามาทางอุปกรณ์นำเข้าข้อมูลตามชุดคำสั่งหรือ โปรแกรมที่ผู้ใช้ต้องการใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หน่วยคำนวณและตรรกะ (ALU: Arithmetic & Logical Unit) ทำหน้าที่เหมือนกับเครื่องคำนวณอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยทำงานเกี่ยวกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น บวก ลบ คูณ หาร อีกทั้งยังมีความสามารถในการเชิงตรรกศาสตร์ หมายถึง ความสามารถในการเปรียบเทียบตามเงื่อนไข และกฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้คำตอบออกมาว่าเงื่อนไข นั้นเป็น จริง หรือ เท็จ อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยควบคุม (control unit) ทำหน้าที่ควบคุมลำดับขั้นตอนการประมวลผล รวมไปถึงการประสานงานกับอุปกรณ์นำเข้าข้อมูล อุปกรณ์แสดงผล และหน่วยความจำสำรองด้วย

2) หน่วยความจำ (memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (program memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ คือข้อมูลใดๆที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (data memory) ใช้ในการคำนวณของซีพียูและเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยง ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM: Electrically Erasable PROMs) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3) ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต (port) มี 2 ลักษณะคือพอร์ตอินพุต (input port) มีหน้าที่รับสัญญาณเข้าและพอร์ตเอาต์พุต (output port) มีหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ภายนอก

4) ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (bus) คือ เส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียูหน่วยความจำและพอร์ตเป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (data bus) บัสแอดเดรส (address bus) และบัสควบคุม (control bus)

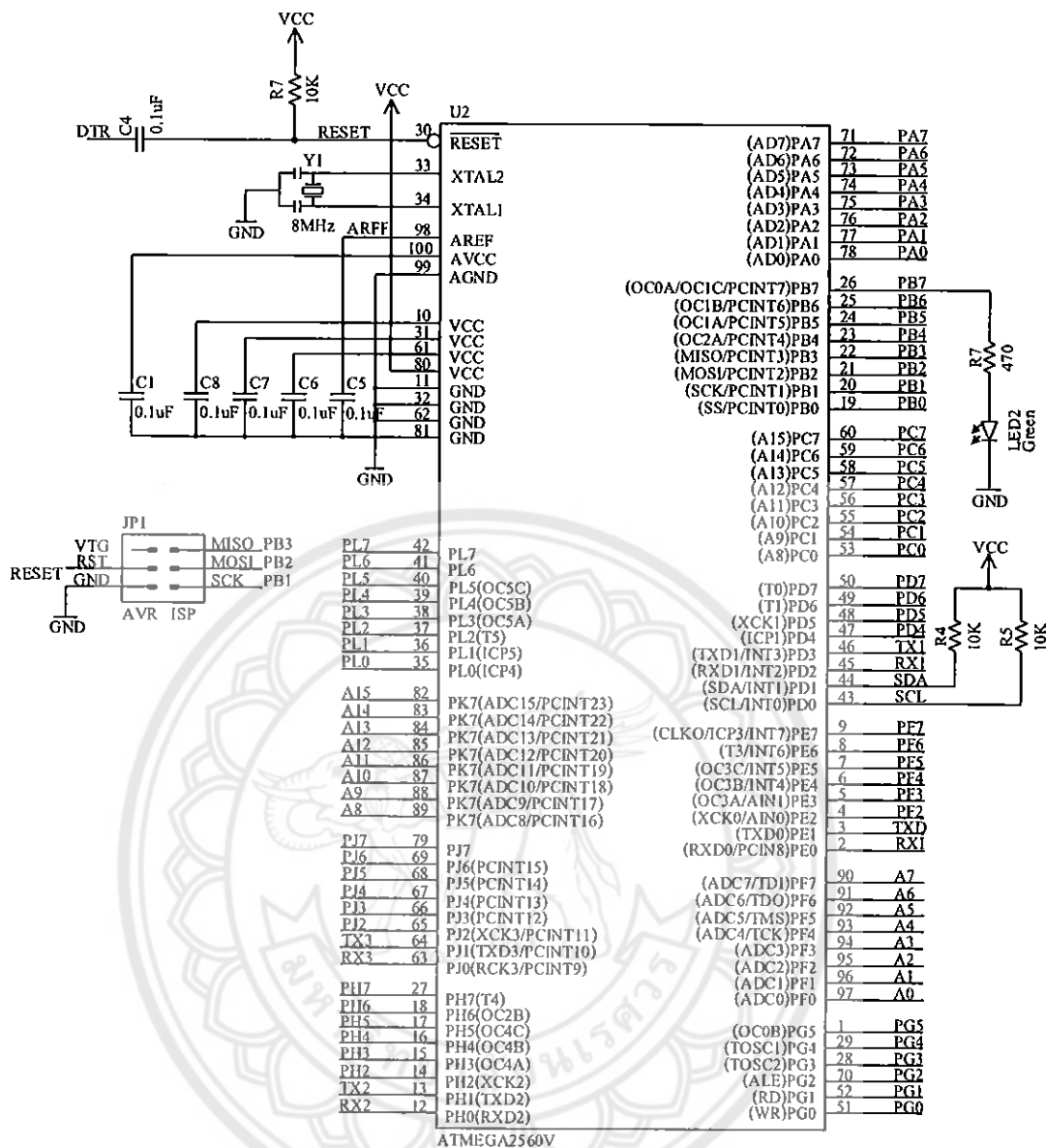
5) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับ การกำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกา มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้น ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้น มีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

### 2.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATmega2560

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เป็นไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ของบริษัท Atmel มีสถาปัตยกรรมภายในเป็นแบบ RISC (reduced instruction set computer) โดยใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ลูกในการปฏิบัติงานใน 1 คำสั่ง โดยจะประกอบด้วยหน่วยความจำโปรแกรมภายในที่เป็นแบบแฟลชโปรแกรมข้อมูลได้แบบ in-system programmable

### 2.2.3 โครงสร้างภายนอกและตำแหน่งขา

มีพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต 100 PIN TQFP ใช้งานทั่วไปจำนวน 86 ขา เป็นดิจิทัล อินพุต/เอาต์พุตจำนวน 54 ช่อง (5 โวลต์ TTL logic) และอนาล็อก จำนวน 16 ช่อง (เป็นอนาล็อกเป็นดิจิทัล ขนาด 10 บิต 16 ช่อง) 4 ช่องเป็น UART (แบบ 5 โวลต์ TTL logic)



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งขาของชิป ATmega2560

### 2.2.4 ภาษาที่ใช้ในการเขียนคำสั่งควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

ภาษาที่ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งได้เช่นเดียวกับการเขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์คือภาษาระดับสูงและภาษาระดับต่ำ ภาษาระดับสูงเช่น ภาษาซี, เบสิก ข้อดีคือเขียนง่าย แก้ไขเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติมได้ง่าย ส่วนข้อเสียก็คือการทำงานจะช้า ขนาดโปรแกรมที่เขียนมีขนาดใหญ่ ภาษาระดับต่ำซึ่งก็คือภาษาแอสเซมบลี ข้อดีคือ ตัวคอมไพล์ แจกฟรี ขนาดโปรแกรมหลังจากคอมไพล์แล้วมีขนาดเล็ก โปรแกรมมีความเร็ว แต่ข้อเสียก็คือเขียนยากเพราะลักษณะภาษาไม่ค่อยสื่อความหมาย ซึ่งแต่ละภาษาก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ในโครงการนี้ได้เลือกใช้ภาษาซีในการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

## 2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าคือเครื่องกลไฟฟ้า (electromechanical energy) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (electric energy) เป็นพลังงานกล (mechanical energy) ในรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ามีโครงสร้างเบื้องต้นที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ประกอบด้วยขดลวดที่พันรอบแกนโลหะที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก ซึ่งโครงสร้างคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าอาศัยสนามแม่เหล็ก 2 ชุดที่เกิดขึ้น ได้แก่ สนามแม่เหล็กถาวรสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ โดยเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดที่อยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก จะทำให้ขดลวดหมุนไปรอบแกน และเมื่อสลับขั้วไฟฟ้า การหมุนของขดลวดจะหมุนกลับทิศทางเดิม

### 2.3.1 หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กซึ่งมีส่วนหนึ่งของแรงขึ้นกับกระแสแรงของสนามแม่เหล็ก โดยแรงจะเกิดขึ้นเป็นมุมฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็ก ขณะที่ทิศทางของแรงกลับตรงกันข้ามกัน ถ้าหากกระแสของสนามแม่เหล็กไหลย้อนกลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส และสนามแม่เหล็กเป็นผลทำให้ทิศทางของแรงเปลี่ยนไป ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้มอเตอร์กระแสตรงกลับทิศทางการทำงานได้

สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวรซึ่งจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็ก หรือเหล็กกล้า โดยปกติส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ยึดอยู่กับที่ และขดลวดเหนี่ยวนำจะพันอยู่กับส่วนที่เป็นแกนหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 2.12 วงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยสมมติให้หุ่นโรเตอร์ไม่มีความต้านทานอยู่เลย อนุกรมกับความต้านทานซึ่งในที่นี้ก็คือความต้านทานของขดลวดนั่นเอง แรงดันที่ขั้วต่อสายของมอเตอร์ก็คือผลบวกระหว่างแรงดันที่หุ่นโรเตอร์ ( $V_A$ ) และ แรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวด ( $V_R$ )

แรงดัน ( $V_A$ ) ถูกเรียกว่า แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำป้อนกลับ (back emf) ซึ่งเกิดขึ้นในโรเตอร์ ขณะที่หมุนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของตัวนำในสนามแม่เหล็ก สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และความเร็วในการเคลื่อนที่ของ

ตัวนำแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีข้อตรงกันข้ามกับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และแปรผันตรงกับความเร็วในการหมุน ผลบวกของแรงดันที่หุ้่นโรเตอร์ ( $V_A$ ) และแรงดันตกคร่อมขดลวด ( $V_R$ ) ต้องเท่ากับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ( $V$ )

$$V = V_A + V_R \quad (2.7)$$

### 1) กระแสมอเตอร์

เมื่อพิจารณาตั้งแต่มอเตอร์หยุดนิ่ง ความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น  $V_A = 0$ ,  $V_R = V$  กระแสที่ไหลในมอเตอร์หาได้จาก

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (2.8)$$

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีความเร็วและ  $V_A$  เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเร็ว  $V_R$  ซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง  $V_A$  และ  $V$  จะเริ่มลดลงกระแส  $I$  ก็จะเริ่มลดลงเช่นกันขณะที่มอเตอร์ยังมีความเร็วอยู่ ความเร็วจะเพิ่มขึ้น แรงบิดจะลดลงจนกว่าจะถึงจุดซึ่งแรงบิดของมอเตอร์รับภาระโหลดได้สมดุลพอดี ขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลดและหมุนอย่างอิสระจะมีเพียงค่าความฝืดของแบร้งและแรงต้านอากาศทำให้  $V_A$  เกือบเท่ากับค่า  $V$

### 2) สมการไฟฟ้าของมอเตอร์

$$E_C = \frac{\phi \cdot P \cdot n \cdot z}{60 \cdot a} \quad (2.9)$$

$$K' = P \cdot \frac{z}{60 \cdot a} \quad (2.9)$$

$$E_C = K' \cdot \phi \cdot n \quad (2.10)$$

เมื่อ  $E_C$  คือ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ [โวลต์]

$\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กขั้ว [เวเบอร์]

$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก [ขั้ว]

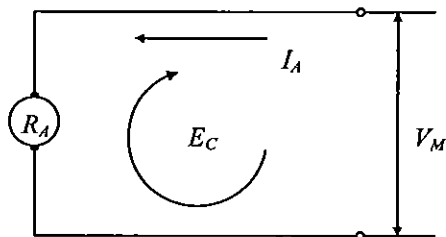
$n$  คือ จำนวนรอบที่มอเตอร์หมุน [รอบ/นาที]

$z$  คือ จำนวนตัวนำบนอาร์เมเจอร์ [ตัวนำ]

$a$  คือ จำนวนวงจรไฟฟ้าคู่ขนานบนอาร์เมเจอร์ [ตัวนำ]

$K'$  คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ (โดยลักษณะสร้าง)





รูปที่ 2.13 วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์

จากรูปที่ 2.13 จะได้สมการ ดังนี้

$$V_M = E_C + I_A \cdot R_A = E_C + V_A \quad (2.11)$$

$$E_C = V_M - I_A \cdot R_A = V_M - V_A \quad (2.12)$$

$$V_A = I_A \cdot R_A = V_M - E_C \quad (2.13)$$

$$I_A = \frac{V_M - E_C}{R_A} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.10)

$$E_C = K' \cdot \phi \cdot n$$

จะได้

$$n = \frac{E_C}{K' \cdot \phi} = \frac{V_M - V_A}{K' \cdot \phi} \quad (2.15)$$

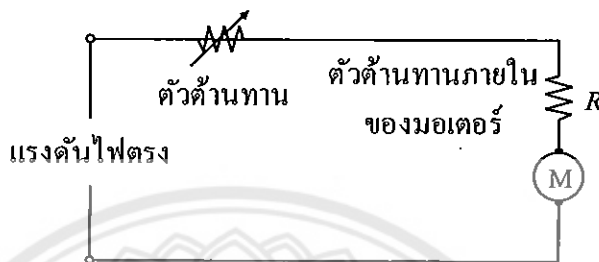
### 2.3.2 การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยแม่เหล็กขั้ว 2 ขั้ววางอยู่ระหว่างขดลวดตัวนำเมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กซึ่งมีสัดส่วนแรงกับกระแสแรง โดยแรงจะเกิดขึ้นเป็นมุมฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็ก ขณะที่ทิศทางของแรงกลับตรงกันข้ามกันถ้าหากกระแสของสนามแม่เหล็กไหลย้อนกลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและสนามแม่เหล็กเป็นผลทำให้เกิดทิศทางของแรงเปลี่ยนไป ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้มอเตอร์กระแสตรงกลับทิศการหมุนได้ ซึ่งสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ส่วนหนึ่งเกิดจากแม่เหล็กถาวรซึ่งจะยึดติดกับแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้า โดยปกติส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ยึดอยู่กับที่และขดลวดเหนี่ยวนำจะพันอยู่กับส่วนที่เป็นแกนของมอเตอร์

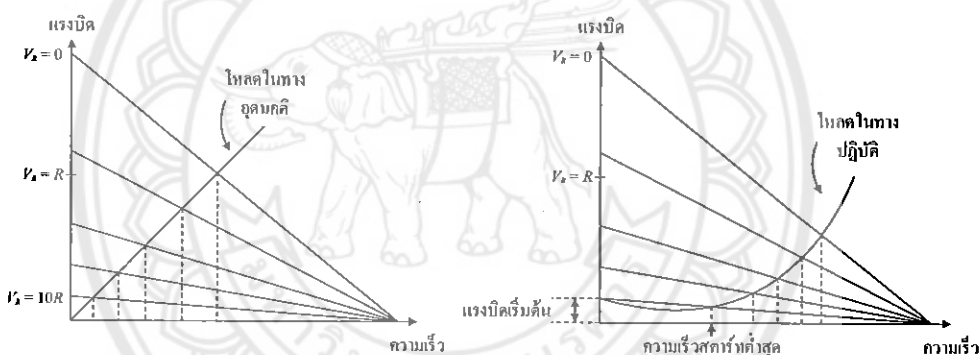
### 2.3.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1) การควบคุมแบบปรับค่าได้เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของการควบคุมมอเตอร์คือใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ออกุกรมกับมอเตอร์โดยกำหนดให้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้จะเป็นตัวกำหนด

ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์การบังคับแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะกำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทานมักนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กๆการบังคับแบบนี้ให้คุณสมบัติการสตาร์ทที่ดี (ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ)แต่จะให้ความเร็วที่สูงมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะที่มีโหลดน้อยๆดังนั้นการบังคับแบบนี้มีประโยชน์เฉพาะภาวะที่แรงต้านคงที่ เช่น การบังคับความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เป็นต้น

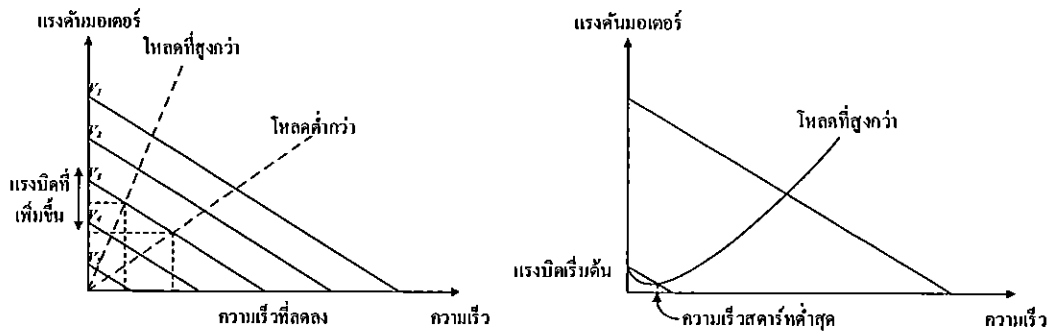


รูปที่ 2.14 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม



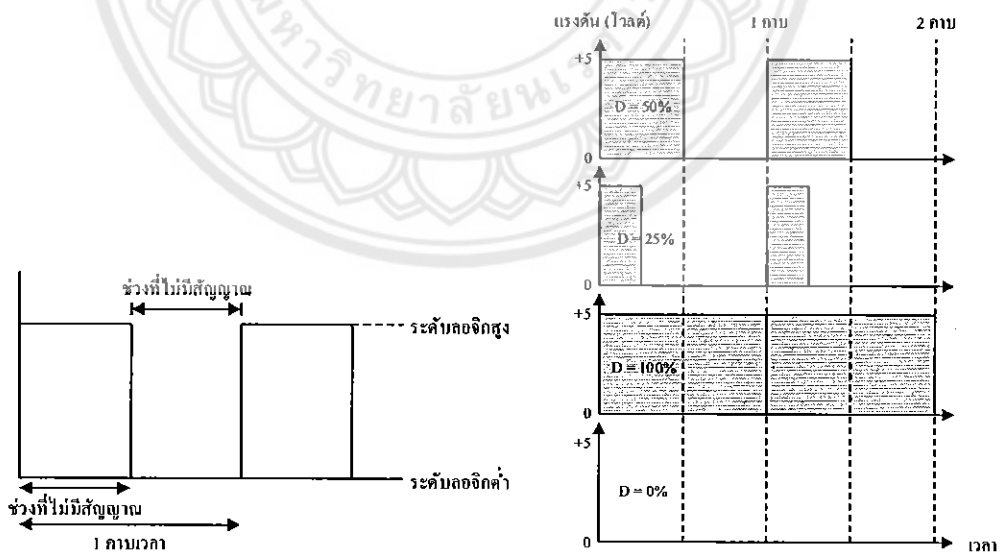
รูปที่ 2.15 กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม

2) การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดันวิธีการนี้ดีกว่าวิธีการแรกแต่จะซับซ้อนกว่าต้องที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อัตราขยายแบบกำลังสูงและมอเตอร์จะถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้จากแหล่งจ่ายที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ข้อดีของการควบคุมวิธีนี้คือถ้าความเร็วลดลงจากผลของแรงบิดแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับความเร็ว ส่วนข้อเสียจากการควบคุมวิธีนี้คือ เมื่อมอเตอร์มีความเร็วต่ำแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าต่ำเช่นกัน



รูปที่ 2.16 กราฟคุณสมบัติการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง โดยการเปลี่ยนค่าแรงดัน

3) การควบคุมแบบ PWM (pulse width modulation) การมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วน และความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของดีวตี้ไซเคิล (duty cycle) นั้นเอง ซึ่งค่าของดีวตี้ไซเคิล คือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าดีวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ก็หมายถึงใน 1 รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่ง และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีกครึ่งหนึ่งและในทำนองเดียวกันถ้าหากค่าดีวตี้ไซเคิลมีค่ามากกว่าหมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้น หากค่าดีวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ก็หมายความว่าไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย



รูปที่ 2.17 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดีวตี้ไซเคิล ของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่



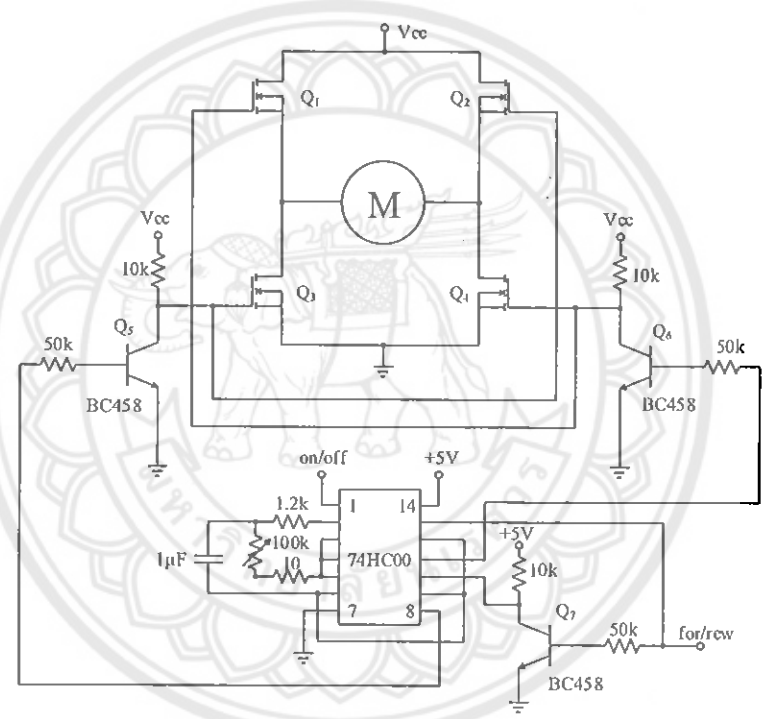
19220352

สำนักหอสมุด

### 2.3.4 วงจรไคร้ฟมอเตอร์

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือการทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนสามารถทำได้โดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วสูงสุดภายใต้สภาวะที่มอเตอร์รับภาระอยู่ในขณะนั้น ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทิศทางก็ทำได้โดยการกลับขั้วของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในกรณีที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มหรือลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ PWM เป็นวิธีที่นิยมมากในการเพิ่มหรือลดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจะเปลี่ยนไปตามความกว้างของพัลส์

ส.พ. 2561



รูปที่ 2.18 วงจรควบคุมมอเตอร์ PWM กลับทิศทางหมุนได้

วงจรควบคุมมอเตอร์ที่แสดงข้างล่างนี้สามารถควบคุมทั้งความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ วงจรนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุม

ส่วนที่ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ ประกอบด้วยมอสเฟต (Q1-Q4) และทรานซิสเตอร์ (Q5-Q6) มอสเฟต (Q1-Q4) ถูกต่อแบบบริดจ์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านมอเตอร์สามารถกลับทิศทางได้ เมื่อ Q1 และ Q4 นำกระแสไฟฟ้าจะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่งและมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามถ้า Q2 และ Q3 นำกระแสไฟฟ้า ทรานซิสเตอร์ (Q5-Q6) จะทำหน้าที่ขับมอสเฟส โดยทรานซิสเตอร์ Q5 ขับมอสเฟส Q2 กับ Q3 ในขณะที่มอสเฟส Q1 กับ Q4 จะถูกขับ

ด้วยทรานซิสเตอร์ Q6 ขั้วห้ามของวงจรถัดคืออย่าให้ Q1 กับ Q3 หรือ Q2 กับ Q4 นำกระแสพร้อมกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรและมอเตอร์เฟสอาจจะเสียหายได้

ดังนั้นในการออกแบบส่วนควบคุมจึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรป้องกันการลัดวงจรของมอเตอร์ด้วย วงจรส่วนควบคุมนั้นมี IC 74HC00 เป็นส่วนประกอบสำคัญ ทรานซิสเตอร์ Q5 จะต่อเป็นวงจร inverting เพื่อคอยกลับสัญญาณควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็นการป้องกันไม่ให้มอเตอร์เฟส (Q1-Q4) นำกระแสพร้อมกันด้วย IC 74HC00 ตัวด้านทานปรับค่าได้และตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ผลิตพัลส์โดยที่ความถี่และความกว้างของพัลส์จะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทาน ปรับค่าได้และค่าของตัวเก็บประจุ

ดังนั้นความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถที่จะปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับค่าของตัวต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ จากวงจรข้างล่างนี้ การควบคุมให้มอเตอร์หมุนหรือหยุดหมุนทำได้โดยการให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 1 ของ IC 74HC00 ถ้าขา 1 ของ IC 74HC00 ได้รับระดับแรงดันเป็น 0 โวลต์ มอเตอร์จะหยุดหมุนและมอเตอร์จะหมุนเมื่อขา 1 ของ IC 74HC00 ได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ +5 โวลต์

สำหรับการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์นั้นทำได้โดยการให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขา 13 ของ IC 74HC00 ถ้าขา 13 ของ IC 74HC00 ได้รับระดับแรงดันเป็น +5 โวลต์ มอเตอร์จะหมุนในทิศทางหนึ่งและมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้ามถ้าขา 13 ของ IC 74HC00 จะได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 0 โวลต์

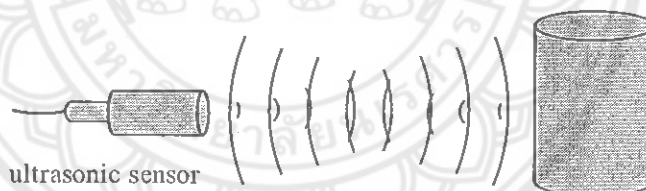
จุดอ่อนของวงจรถวลมอเตอร์นี้คือความเร็วรอบของมอเตอร์จะไม่คงที่ถ้าโหลดที่ให้กับมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้หลักการควบคุมมอเตอร์แบบวงรอบปิด (close loop control system)

## 2.4 ตัวรับรู้

ตัวรับรู้หรือเซ็นเซอร์คืออุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณหรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ เสียง แสง การสัมผัส เป็นต้น ปัจจุบันมีการนำระบบเซ็นเซอร์มาใช้บนโทรศัพท์มือถือ ในหลายรูปแบบ เช่น ระบบตรวจจับความเคลื่อนไหว ระบบหมุนภาพ อัตโนมติ เซ็นเซอร์ปรับมุมมองหน้าจอ เซ็นเซอร์ตรวจวัดระดับเสียง ตรวจวัดความเข้มข้นแม่เหล็ก ตรวจจับแสงสว่างสำหรับการปรับแสงบนหน้าจออัตโนมัติ หรืออกซิมิตีเซ็นเซอร์ (proximity sensor) ระบบเปิด/ปิดหน้าจออัตโนมัติขณะสนทนาแบบหู เป็นต้น ซึ่งเรามักพบคุณสมบัติเหล่านี้ได้กับ โทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ทโฟน ทั้งในระบบ iOS และ Android OS

### 2.4.1 ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิก

ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกทำงาน โดยอาศัยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นคลื่นในย่านที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยินเสียง ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกทำงานโดยอาศัยการกระจาย หรือการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ไปกระทบกับพื้นผิวของตัวกลาง ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว บางส่วนของคลื่นเสียงจะแทรกผ่านเข้าไปในตัวกลางนั้น และส่วนใหญ่ของคลื่นความถี่สูงนี้จะสะท้อนกลับเรียกว่า (echo) โดยช่วงเวลาของการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวรับรู้ ดังรูป



รูปที่ 2.19 การตรวจจับระยะห่างของวัตถุ

โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกในการวัดระยะทาง (distance measurement) ของวัตถุหรือการวัดระดับ (level measurement) ของเหลว สามารถใช้งานกับวัตถุทั้งชนิดโลหะและอโลหะทุกชนิด โปร่งใส โปร่งแสงหรือทึบแสง ตรวจจับวัตถุได้หลายขนาด ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นหรือคุณสมบัติการดูดซับเสียง เช่น ผ้า ฝุ่นผง โฟมหรือฟองน้ำ ซึ่งจะดูดซับคลื่นเสียงไม่ให้สะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณ และเนื่องจากลักษณะการสะท้อนกลับของเสียงขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบที่ทำให้เสียงกระจายไปในทิศทางต่าง ๆ จึงไม่เหมาะกับวัตถุที่มีลักษณะเป็นก้อนๆ ไม่สม่ำเสมอ ผลที่ได้จากการสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้กับวัตถุลักษณะนี้จะมีความเที่ยงตรง (precision) ต่ำ สำหรับวัตถุที่มีผิวเรียบคลื่นเสียงที่มากตกกระทบส่วนใหญ่จะสะท้อนออกจากพื้นผิวนั้นอย่างมีระเบียบ ค่าความเที่ยงตรงที่ได้จากการวัดจะมีค่าสูงมากกว่า โดยตำแหน่ง

ของตัวรับรู้ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของวัตถุจะให้ประสิทธิภาพในการสะท้อนคลื่นกลับมายังตัวรับมากที่สุด ในสภาวะแวดล้อมที่มีฝุ่นละอองหรือมีไอน้ำในอากาศ เสียงอาจถูกดูดซึมไปบ้างและสูญเสียพลังงานไปในรูปของพลังงานความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวรับรู้ชนิดแสง (optical sensor/photo sensor) ตัวรับรู้ชนิดนี้ได้รับผลกระทบจากละอองไอน้ำที่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่พื้นผิวของวัตถุ พบว่าวัตถุที่มีอุณหภูมิ (temperature) สูงจะทำให้เกิดความผิดพลาดของการวัดขึ้น โดยทำให้ระยะการตรวจจับสั้นลง ผลที่ได้จะไม่แน่นอน เนื่องจากเสียงที่เดินทางผ่านอากาศที่มีอุณหภูมิสูงมีความเร็วสูงกว่าเสียงที่เดินทางผ่านอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าการติดตั้งตัวรับรู้ชนิดใช้เสียงตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ต้องระวังการสอดแทรกหรือการกวนกันของคลื่นเสียงความถี่สูงที่เกิดขึ้นจากตัวรับรู้แต่ละตัว โดยระยะห่างระหว่างตัวรับรู้พิจารณาจากรัศมีของการแผ่กระจายคลื่นความถี่ที่ส่งออกไป และในการติดตั้งตัวรับรู้ต้องระวังมุมอับที่สัญญาณเสียงไม่สามารถเดินทางผ่านไปได้ หรือเรียกว่าบริเวณ blind zone หรือ dead zone



### บทที่ 3

## วิธีดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะรวบรวมขั้นตอนการทำงาน โครงสร้างของหุ่นยนต์และการออกแบบตัวควบคุมพีซี ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันของขั้นตอนการทำงาน โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง ทั้งระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และระบบควบคุมระยะห่าง

หลังจากศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของ โครงการในบทที่ผ่านมา สามารถนำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ โดยสร้างหุ่นยนต์ตัวหน้าและหุ่นยนต์ตัวหลังเพื่อควบคุมระยะห่างโดยใช้พีซีเมื่อระยะห่างมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีขั้นตอนและการดำเนินงานดังต่อไปนี้

### 3.1 ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลัง

การทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลังจะเคลื่อนที่ตามกันบนรางโดยหุ่นยนต์ตัวหลังจะสามารถควบคุมระยะห่างตามที่กำหนด ซึ่งรางที่ใช้จะเป็นรางไม้รูปวงรี โดยมีช่วงทางตรงระยะ 300 เซนติเมตร และมีรัศมีตรงช่วงทางโค้ง 100 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



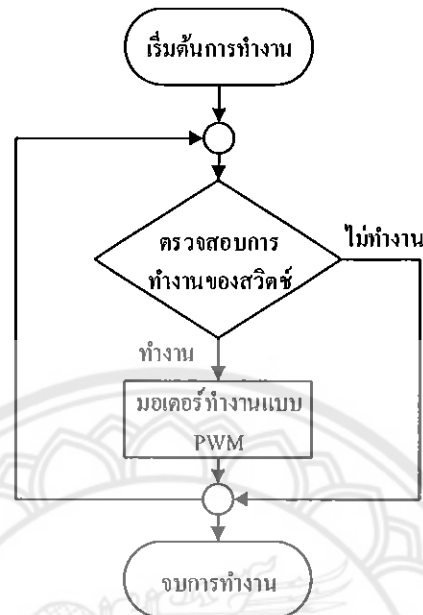
รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลัง

#### 3.1.1 การทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้า

การทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าจะทำงานโดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเริ่มต้นการทำงานจะต้องกดสวิตช์เปิดเพื่อให้มอเตอร์ของหุ่นยนต์ตัวหน้าทำงานแบบ PWM มอเตอร์จะทำงานทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วคงที่ และเมื่อกดสวิตช์ปิด



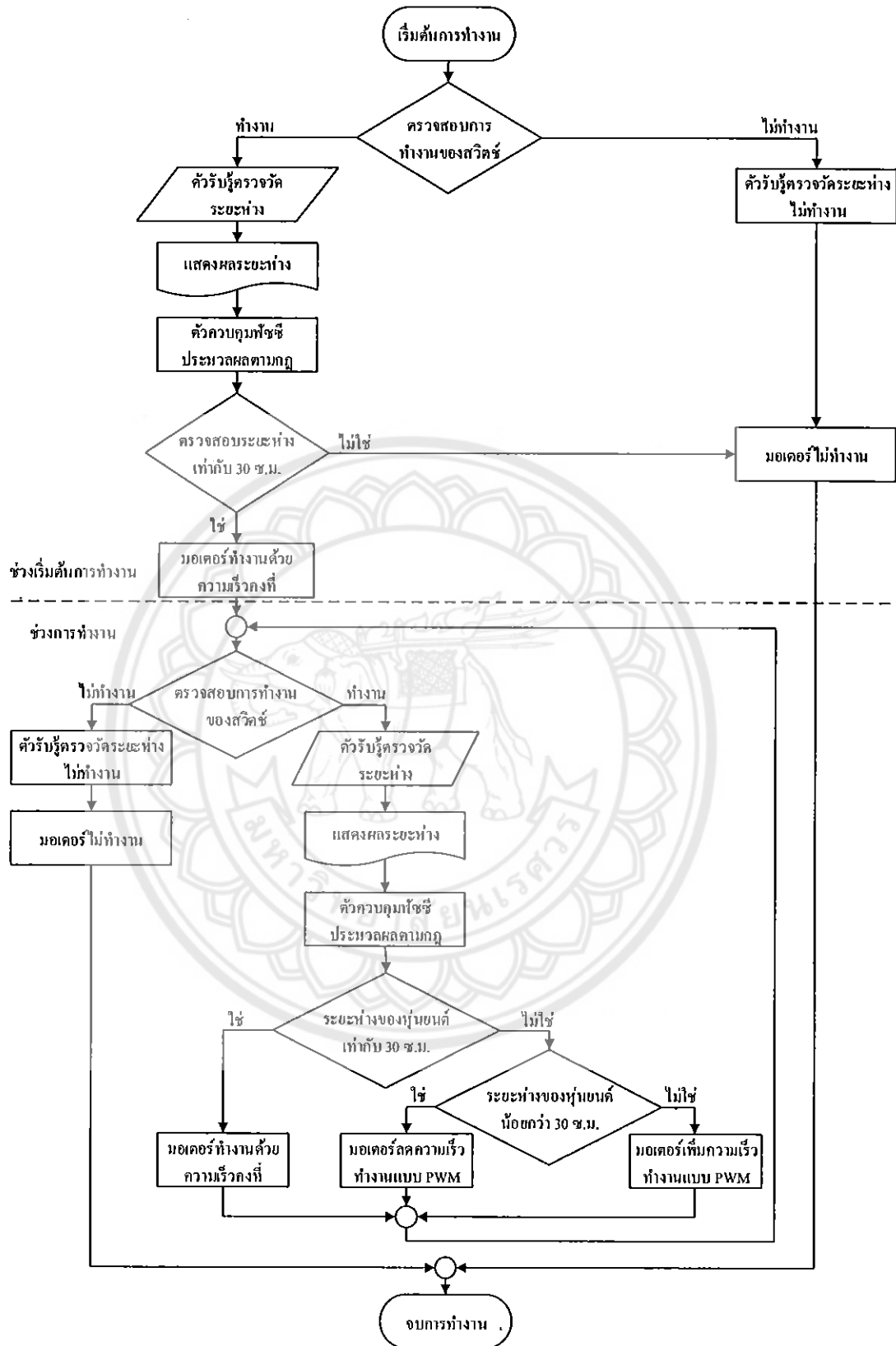
มอเตอร์จะหยุดทำงาน ทำให้ระบบสิ้นสุดการทำงาน ขั้นตอนการทำงานในส่วนของผู้ยนต์ตัวหน้าสามารถอธิบายตามผังงานดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แพนผังขั้นตอนการทำงานของผู้ยนต์ตัวหน้า

### 3.1.2 การทำงานของผู้ยนต์ตัวหลัง

การทำงานของผู้ยนต์ตัวหลังจะควบคุมระยะห่างโดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเริ่มต้นการทำงานจะต้องกดสวิทช์เปิดเพื่อให้ตัวรับรู้ระยะทางของผู้ยนต์ตัวหลังทำงาน จะแสดงค่าระยะห่างที่หน้าจอแสดงผล และรับค่าอินพุตเป็นระยะห่างของผู้ยนต์ตัวหน้า ตัวควบคุมพีซีซีจะทำการประมวลผลค่าระยะห่างของผู้ยนต์ แล้วตรวจสอบเงื่อนไขถ้าระยะห่างมีค่าไม่เท่ากับ 30 เซนติเมตร มอเตอร์จะไม่มีการทำงาน ถ้าระยะห่างมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร มอเตอร์จะเริ่มการทำงานแบบ PWM ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อผู้ยนต์เริ่มมีการเคลื่อนที่จะมีการตรวจสอบสวิทช์อีกครั้ง ถ้าสวิทช์เปิดจะทำให้ตัวรับรู้ระยะทางของผู้ยนต์ตัวหลังทำงาน จะแสดงค่าระยะห่างที่หน้าจอแสดงผล และรับค่าอินพุตเป็นระยะห่างของผู้ยนต์ ตัวควบคุมพีซีซีจะทำการประมวลผลค่าจากระยะห่างของผู้ยนต์ แล้วตรวจสอบเงื่อนไขถ้าระยะห่างมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร มอเตอร์จะการทำงานแบบ PWM ด้วยความเร็วคงที่ ถ้าระยะห่างมีค่าไม่เท่ากับ 30 เซนติเมตร จะทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่า ถ้าระยะห่างมีค่าน้อยกว่า 30 เซนติเมตร มอเตอร์จะเริ่มการทำงานแบบ PWM ด้วยการลดความเร็ว ถ้าระยะห่างมีค่ามากกว่า 30 เซนติเมตร มอเตอร์จะเริ่มการทำงานแบบ PWM ด้วยการเพิ่มความเร็ว แล้วส่งค่าป้อนกลับไปยังการตรวจสอบสวิทช์ และเมื่อกดสวิทช์ปิดมอเตอร์จะหยุดทำงาน ทำให้ระบบสิ้นสุดการทำงาน ขั้นตอนการทำงานในส่วนของผู้ยนต์ตัวหลังสามารถอธิบายตามผังงานดังแสดงในรูปที่ 3.3

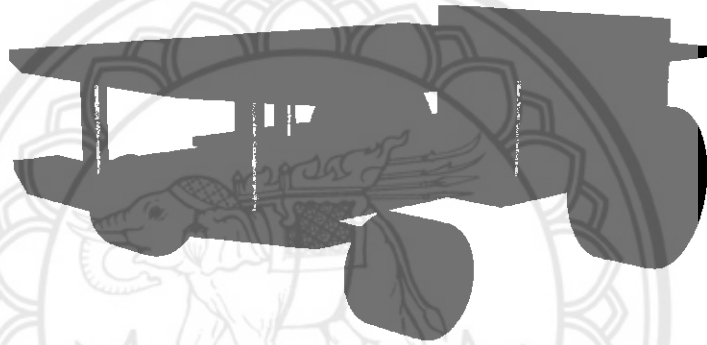


รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ตัวหลัง

## 3.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง

### 3.2.1 ออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์

การออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์แบ่งออกเป็นหุ่นยนต์ตัวหน้าและหุ่นยนต์ตัวหลัง โดยที่ หุ่นยนต์ตัวหน้าจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ 1 ด้านล่างจะวางแผงวงจรควบคุมและ แบตเตอรี่ ส่วนที่ 2 ด้านหลังจะใช้ติดแผ่นอะคริลิกทำพื้นหลังเพื่อให้ตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลัง ตรวจจับได้ การออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์ตัวหลังเพื่อควบคุมระยะห่างจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ 1 ด้านล่างจะวางแผงวงจรควบคุมและแบตเตอรี่ ส่วนที่ 2 ด้านบนใช้ติดตั้งตัวรับรู้ ตรวจวัดระยะทาง ไดโอดเปล่งแสง และจอแอลซีดีแสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



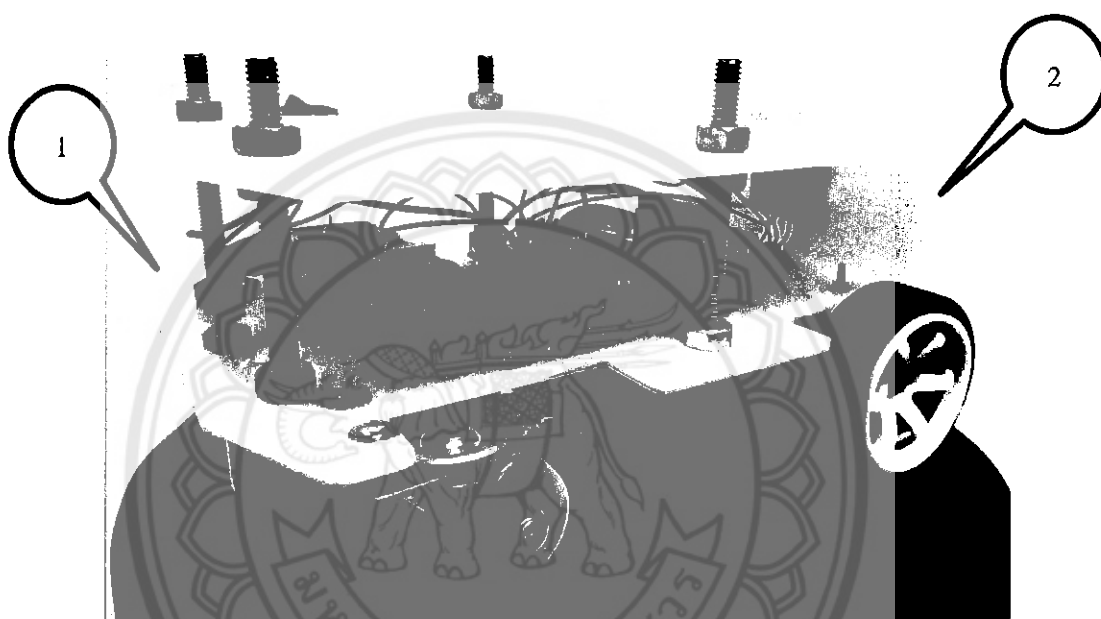
รูปที่ 3.4 การออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์ตัวหน้า



รูปที่ 3.5 การออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์ตัวหลัง

### 3.2.2 โครงสร้างของหุ่นยนต์เมื่อสร้างเสร็จ

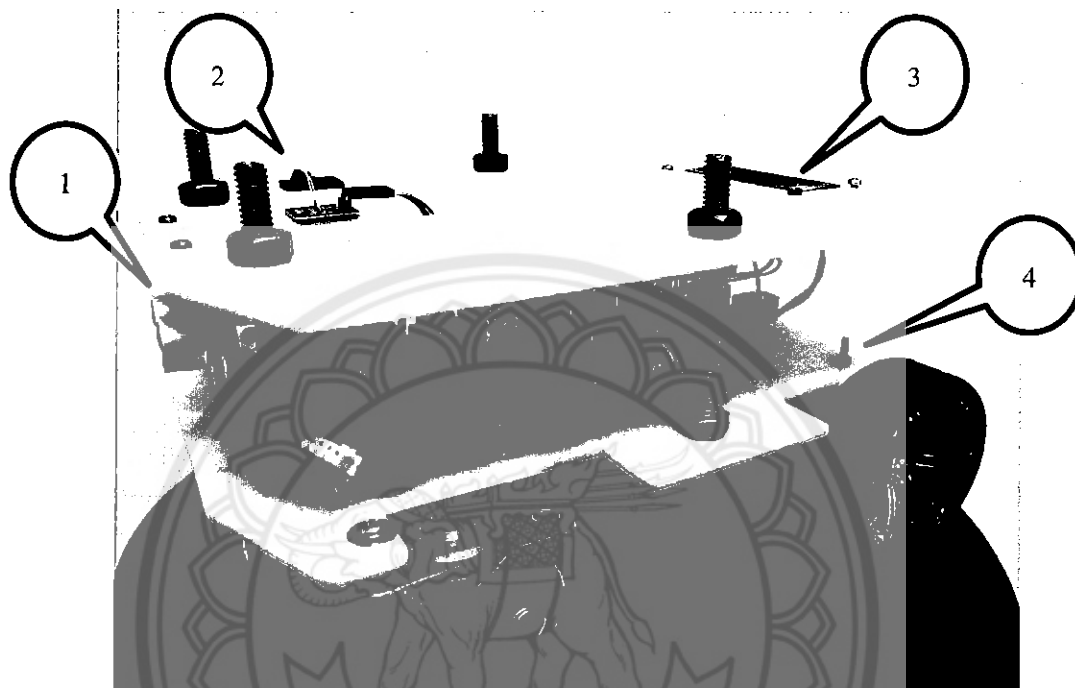
ทำการสร้างโครงหุ่นยนต์ตัวหน้าโดยใช้อะคริลิกมาประกอบชิ้นส่วนและยึดติดเข้าด้วยกัน จากนั้นในส่วนชั้นล่างได้ทำการติดตั้งแผงวงจรควบคุมและแบตเตอรี่ ในส่วนด้านหลังได้ทำการติดแผ่นอะคริลิกทำพื้นหลังเพื่อให้ตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลังสามารถตรวจจับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของหุ่นยนต์ตัวหน้า

- 1) ชั้นแผงวงจรควบคุมและแบตเตอรี่
- 2) แผ่นอะคริลิกทำพื้นหลัง

ทำการสร้างโครงหุ่นยนต์ตัวหลัง โดยใช้อะคริลิกมาประกอบชิ้นส่วนและยึดติดเข้าด้วยกัน จากนั้นในส่วนชั้นล่างได้ทำการติดตั้งแผงวงจรควบคุมและแบตเตอรี่ ในส่วนของชั้นบนได้ทำการติดตั้ง ไดโอดเปล่งแสง ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทาง และจอแอลซีดีแสดงระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของหุ่นยนต์ตัวหลัง

- 1) ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทาง
- 2) ไดโอดเปล่งแสง
- 3) จอแอลซีดีแสดงระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์
- 4) ชั้นแผงวงจรควบคุมและแบตเตอรี่

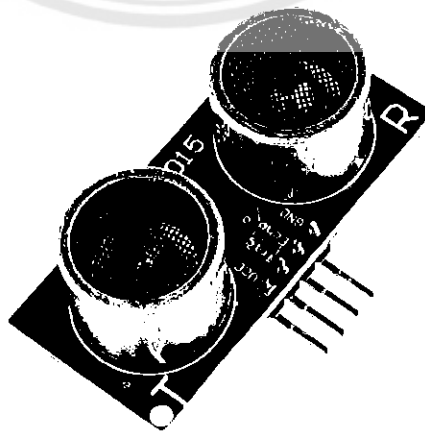
### 3.3 อุปกรณ์เพิ่มเติม

#### 3.3.1 ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทาง

ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดระยะห่างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ใช้คลื่นเสียงความถี่ประมาณ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ มี 2 ส่วนหลักคือ ตัวส่งคลื่นที่ทำหน้าที่สร้างคลื่นเสียงออกไปในการวัดระยะแต่ละครั้ง เมื่อคลื่นเสียงไปกระทบวัตถุหรือสิ่งกีดขวาง คลื่นเสียงถูกสะท้อนกลับมายังตัวรับแล้วประมวลผลด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในตัวรับรู้ ถ้าจับเวลาในการเดินทางของคลื่นเสียงในทิศทางไปและกลับ และถ้าทราบความเร็วเสียงในอากาศก็จะสามารถคำนวณระยะห่างจากวัตถุที่กีดขวางได้

ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิกรุ่น US-015 ใช้สำหรับวัดระยะทางตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยใช้หลักการคำนวณระยะทางจากสะท้อนกลับของคลื่นเสียงในอากาศ มีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์
- 2) ความต้องการกระแสไฟฟ้า 2.2 มิลลิแอมป์
- 3) ทำงานที่อุณหภูมิ 0 ถึง + 70 องศาเซลเซียส
- 4) มุมสะท้อนน้อยกว่า 15 องศา
- 5) ระยะที่ตรวจวัดได้ระหว่าง 2 เซนติเมตรถึง 400 เซนติเมตร
- 6) ความแม่นยำ 0.3 เซนติเมตร และความผิดพลาด 1 เปอร์เซ็นต์
- 7) ขนาด 45 × 20 × 1.6 มิลลิเมตร
- 8) เส้นผ่านศูนย์กลางตัวรับรู้ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 ตัวรับรู้ตรวจวัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิกรุ่น US-015

ที่มา: <https://www.sainsmart.com>

### 3.3.2 จอแสดงผลแอลซีดี

โครงสร้างของจอแสดงผลแอลซีดีทั่วไปจะประกอบขึ้นด้วยแผ่นแก้ว 2 แผ่นประกบกันอยู่ โดยเว้นช่องว่างตรงกลางไว้ 6-10 ไมโครเมตร ผิวด้านในของแผ่นแก้วจะเคลือบด้วยตัวนำไฟฟ้าแบบใสเพื่อใช้แสดงตัวอักษร ตรงกลางระหว่างตัวนำไฟฟ้าแบบใสกับผลึกเหลวจะมีชั้นของสารที่ทำให้โมเลกุลของผลึกรวมตัวกันในทิศทางที่แสงส่องมากระทบเรียกว่า alignment layer และผลึกเหลวที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นแบบแม่เหล็ก

จอแสดงผลแอลซีดี 16×2 แบบ I2C (yellow screen) ในการควบคุมสั่งงานตัวจอแสดงผลแอลซีดีนั้นมีส่วนควบคุมรวมไว้ในตัวแล้ว สามารถส่งคำสั่งควบคุมการทำงานของจอแสดงผลแอลซีดีผ่านส่วนควบคุมว่าต้องการให้แสดงผลอย่างไร โดยตัวควบคุมของจอแสดงผลแอลซีดีตัวนี้เป็นแบบฮิตาชิเบอร์ HD44780 และขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ มีดังนี้

- 1) กราวด์ใช้ต่อระหว่างกราวด์ของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์กับจอแสดงผลแอลซีดี
- 2) ไฟเลี้ยงวงจรที่ป้อนให้กับจอแสดงผลแอลซีดี ขนาด +5 โวลต์
- 3) ขา VO ใช้ปรับความสว่างของหน้าจอแอลซีดี
- 4) ขา RS ใช้บอกให้ตัวควบคุมจอแสดงผลแอลซีดีทราบว่ารหัสที่ส่งมาทางขารับข้อมูลเป็นคำสั่งหรือข้อมูล
- 5) ขา R/W ใช้กำหนดว่าจะอ่านหรือเขียนข้อมูลกับตัวควบคุมจอแสดงผลแอลซีดี
- 6) ขา E เป็นขาที่กำหนดการทำงานให้กับจอแสดงผลแอลซีดี



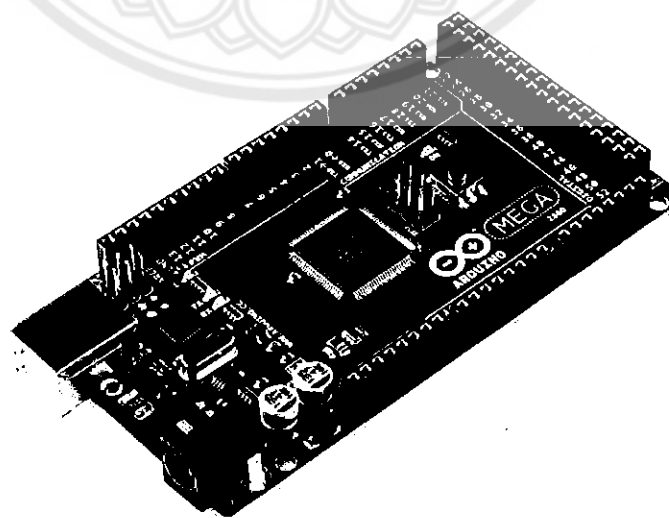
รูปที่ 3.9 จอแสดงผลแอลซีดี

### 3.4 แผงวงจรที่ใช้ในหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง

#### 3.4.1 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในโครงการนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เนื่องจากเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้อย่างสะดวก ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่นำมาใช้คือไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 เนื่องจากเป็นแพลตฟอร์ม (platform) ของอินพุต/เอาต์พุต ขั้นพื้นฐานที่พอเพียงกับการใช้งานและการเรียนรู้ โดยตัวแผงวงจรมีชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต ไม่ว่าจะเป็นพอร์ตดิจิทัลและพอร์ตอนุกรม ซึ่งแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับสัญญาณจากภายนอก และส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวแผงวงจรออกแบบจากไมโครคอมพิวเตอร์ชิปเดี่ยว และมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับเขียนโปรแกรมให้สามารถรับสัญญาณจากสวิทช์หรือตัวรับรู้และควบคุมหลอดไฟ มอเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ และสามารถทำงานได้อิสระหรือทำงานติดต่อกับโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ มีคุณสมบัติดังนี้

- 1) มีอินพุตและเอาต์พุต ทั้งหมด 54 ขา
- 2) ความถี่ที่ให้กับบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ 16 เมกะเฮิร์ตซ์
- 3) ICSP ส่วนที่เป็น AVR ขนาดเล็กสำหรับการ โปรแกรมอาดูโน
- 4) หน่วยความจำแรม 256 กิโลไบต์
- 5) ทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์



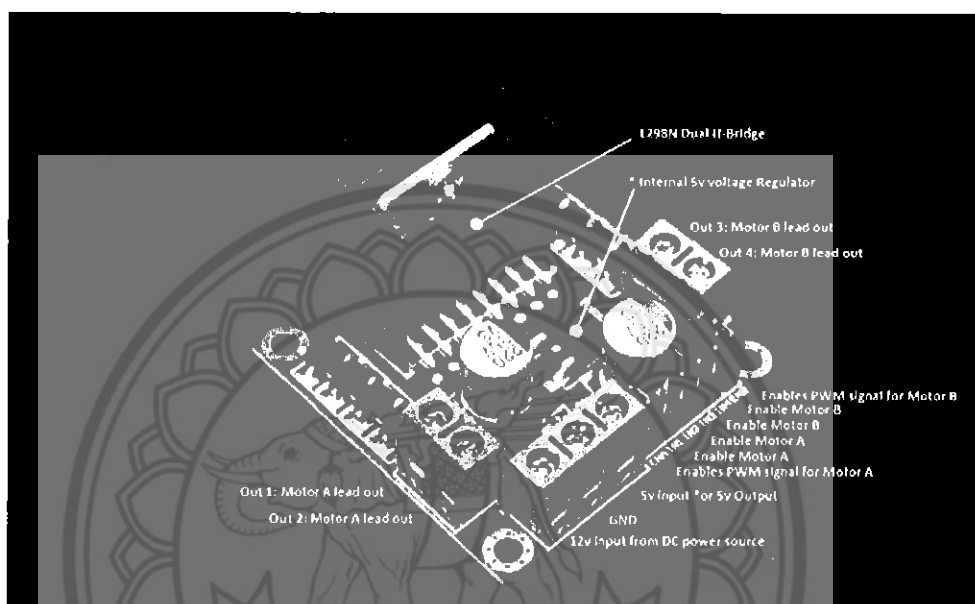
รูปที่ 3.10 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560

ที่มา: <https://www.arduinoall.com/>



### 3.4.2 แผงวงจรขับมอเตอร์

วงจรขับมอเตอร์ใช้ไอซีเบอร์ L298N สามารถเลือกใช้สำหรับขับมอเตอร์กระแสตรงหรือสเตปมอเตอร์ สามารถควบคุมหมุนกลับทิศทางได้แบบอิสระ ขับมอเตอร์กระแสตรงได้ 2 ตัว พร้อมกัน หรือขับสเตปมอเตอร์ได้ 1 ตัว รองรับแรงดันได้กว้าง 7-35 โวลต์ กระแสสูงสุด 2 แอมป์ต่อข้าง ซึ่งแผงวงจรขับมอเตอร์แสดงในรูปแบบที่ 3.11 ดังนี้



รูปที่ 3.11 แผงวงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ L298N

ที่มา: <http://naringroup.blogspot.com>

#### 1) การทำงานของแต่ละขา

- 1.1) Out 1 ช่องต่อขั้วไฟของมอเตอร์ A
- 1.2) Out 2 ช่องต่อขั้วไฟของมอเตอร์ A
- 1.3) Out 3 ช่องต่อขั้วไฟของมอเตอร์ B
- 1.4) Out 4 ช่องต่อขั้วไฟของมอเตอร์ B
- 1.5) 12 V ช่องจ่ายไฟเลี้ยงมอเตอร์ 12 โวลต์ (ต่อได้ตั้งแต่ 5 โวลต์ ถึง 35 โวลต์)
- 1.6) GND ช่องต่อไฟลบ (กราวด์)
- 1.7) 5V ช่องจ่ายไฟเลี้ยงมอเตอร์ 5 โวลต์
- 1.8) ENA ช่องต่อสัญญาณ PWM สำหรับมอเตอร์ A
- 1.9) IN1 ช่องต่อสัญญาณลอจิกเพื่อควบคุมทิศทางของมอเตอร์ A
- 1.10) IN2 ช่องต่อสัญญาณลอจิกเพื่อควบคุมทิศทางของมอเตอร์ A
- 1.11) IN3 ช่องต่อสัญญาณลอจิกเพื่อควบคุมทิศทางของมอเตอร์ B

1.12) IN4 ช่องต่อสัญญาณลอจิกเพื่อควบคุมทิศทางของมอเตอร์ B

1.13) ENB ช่องต่อสัญญาณ PWM สำหรับมอเตอร์ B

## 2) การต่อเข้าใช้งานกับบอร์ด Arduino Mega 2560

ในการต่อกับบอร์ดอาดูโน่นั้น ขา IN1, IN2, IN3 และ IN4 นั้น สามารถต่อกับพอร์ตดิจิตอลพอร์ตใดก็ได้เนื่องจาก 4 ขานี้ จะใช้ในการควบคุมสัญญาณลอจิกบอกทิศทางให้กับมอเตอร์ ส่วน ENA และ ENB นั้นจำเป็นที่จะต้องต่อกับพอร์ตดิจิตอลที่รองรับ PWM เนื่องจากจะต้องใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ในการสั่งงาน L298N ให้ควบคุมมอเตอร์นั้น มีหลักการพื้นฐาน ดังนี้

- 1) ENA ใช้สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ A ใช้คำสั่ง analogWrite (พอร์ตที่ต่อขา ENA, ความเร็วมอเตอร์ 0-255)
- 2) IN1, IN2 ใช้ควบคุมทิศทางของมอเตอร์ A ใช้คำสั่ง digitalWrite (พอร์ตที่ต่อขา IN1, IN2, สถานะ HIGH, LOW)

ตารางที่ 3.1 การทำงานมอเตอร์ A

ENA	IN1	IN2	คำอธิบาย
1	N/A	N/A	มอเตอร์ A ไม่ทำงาน
1	LOW	LOW	มอเตอร์ A หยุดการทำงานแบบหมุนอิสระ
0-255	LOW	HIGH	มอเตอร์ A ทำงานและหมุนกลับหลังด้วยความเร็วที่ ENA
0-255	HIGH	LOW	มอเตอร์ A ทำงานและหมุนเดินหน้าด้วยความเร็วที่ ENA
1	HIGH	HIGH	มอเตอร์ A หยุดการทำงานแบบทันที

### 3.5 ออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมนี้ถูกออกแบบด้วยโปรแกรมเมทแลปเพื่อจำลองการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยมีการรับค่าอินพุตจากค่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวจากตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลังและส่งเป็นค่าเอาต์พุตในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ของหุ่นยนต์ตัวหลัง จึงทำการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

- 1) การกำหนดอินพุตเอาต์พุตของระบบ
- 2) การสร้างฐานกฎฟัซซี
- 3) การประมวลผลฐานกฎฟัซซี

#### 3.5.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

- 1) การกำหนดอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

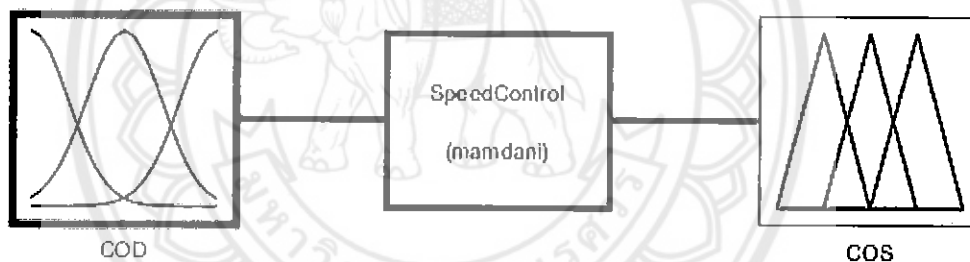
การกำหนดค่าอินพุตได้นำค่าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัวมากำหนดเป็นฟัซซีเซตจะได้อินพุต 1 ตัวและจะได้เอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหลัง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และมีตัวแปรและค่าเชิงภาษาดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและค่าเชิงภาษา

ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
1) COD	การเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัว	(NVL) Negative Very Large	เปลี่ยนแปลงกว้างมากทางลบ
		(NL) Negative Large	เปลี่ยนแปลงกว้างทางลบ
		(NM) Negative Medium	เปลี่ยนแปลงปานกลางทางลบ
		(NS) Negative Small	เปลี่ยนแปลงน้อยทางลบ
		(NVS) Negative Very Small	เปลี่ยนแปลงน้อยมากทางลบ
		(PVS) Positive Very Small	เปลี่ยนแปลงน้อยมากทางบวก
		(PS) Positive Small	เปลี่ยนแปลงน้อยทางบวก
		(PM) Positive Medium	เปลี่ยนแปลงปานกลางทางบวก
		(PL) Positive Large	เปลี่ยนแปลงกว้างทางบวก
(PVL) Positive Very Large	เปลี่ยนแปลงกว้างมากทางบวก		

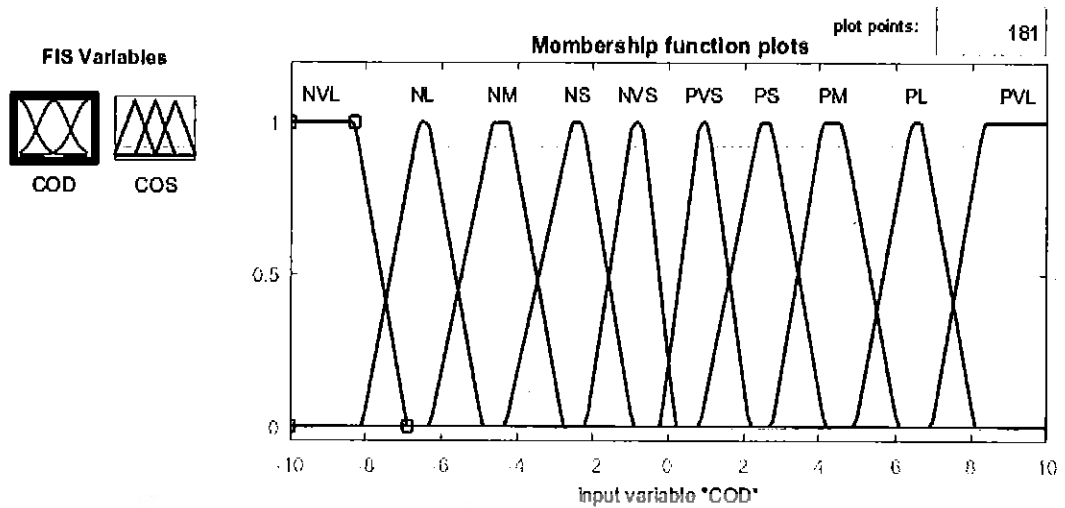
ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ตัวแปรและค่าเชิงภาษา

ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
2) COS	การเปลี่ยนแปลง ความเร็วของ หุ่นยนต์ตัวหลัง	(NVL) Negative Very Large (NL) Negative Large (NM) Negative Medium (NS) Negative Small (NVS) Negative Very Small (PVS) Positive Very Small (PS) Positive Small (PM) Positive Medium (PL) Positive Large (PVL) Positive Very Large	ลดความเร็วมากที่สุด ลดความเร็วมาก ลดความเร็วปานกลาง ลดความเร็วน้อย ลดความเร็วน้อยมาก เพิ่มความเร็วน้อยมาก เพิ่มความเร็วน้อย เพิ่มความเร็วปานกลาง เพิ่มความเร็วมาก เพิ่มความเร็วมากที่สุด



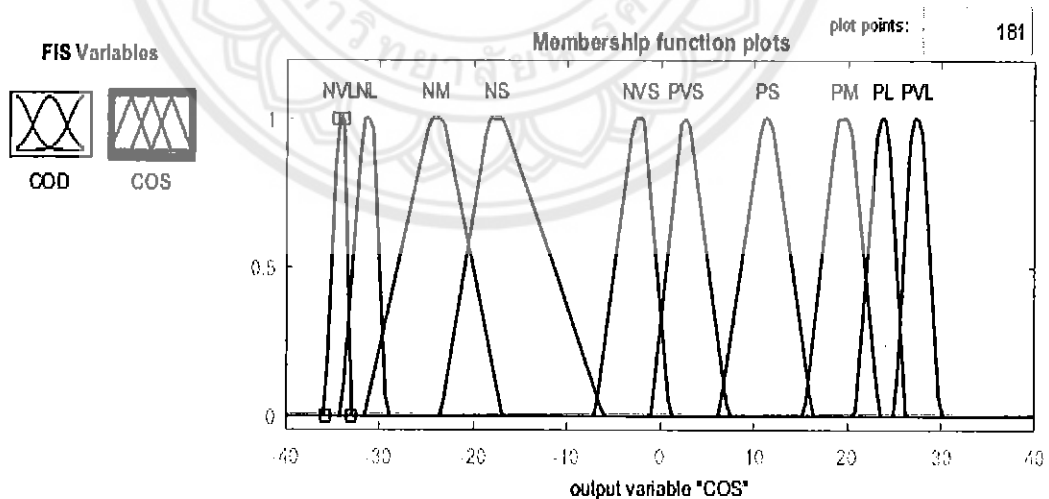
รูปที่ 3.12 รูปแบบการอนุมานอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี่

อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัว (The Change Of Distance: COD) ซึ่งแบ่งฟัซซี่เซตออกเป็น Negative Very Large (NVL), Negative Large (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Negative Very Small (NVS), Positive Very Small (PVS), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL) และ Positive Very Large (PVL) ซึ่งจะได้ว่าขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของหุ่นยนต์ตั้งแต่ -10 เซนติเมตร ถึง +10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ดังนี้



รูปที่ 3.13 ฟังก์ชันเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์

เอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหลัง (The Change Of Speed: COS) ซึ่งแบ่งฟังก์ชันเซตออกเป็น Negative Very Large (NVL), Negative Large (NL), Negative Medium (NM), Negative Small (NS), Negative Very Small (NVS), Positive Very Small (PVS), Positive Small (PS), Positive Medium (PM), Positive Large (PL) และ Positive Very Large (PVL) ซึ่งจะได้ว่าขอบเขตของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ตั้งแต่ -40 ถึง +40 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ดังนี้



รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันเซตสำหรับปริมาณเอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

## 2) การสร้างฐานกฎฟัซซี

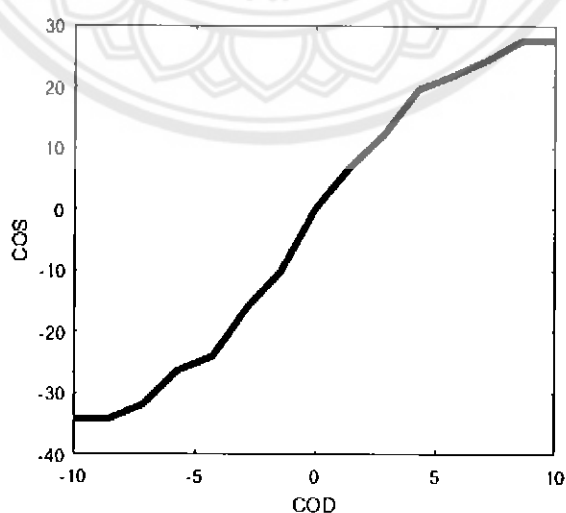
เมื่อทราบปริมาณอินพุตแล้ว ต้องมีกฎฟัซซีเพื่อที่จะสามารถเชื่อมโยงจากปริมาณอินพุตไปยังปริมาณเอาต์พุตได้ เขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

“ถ้า  $x$  คือ  $A$  แล้ว  $y$  คือ  $B$ ”

กฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีดังนี้

- 1) ถ้า (COD คือ NVL) แล้ว (COS คือ NVL)
- 2) ถ้า (COD คือ NL) แล้ว (COS คือ NL)
- 3) ถ้า (COD คือ NM) แล้ว (COS คือ NM)
- 4) ถ้า (COD คือ NS) แล้ว (COS คือ NS)
- 5) ถ้า (COD คือ NVS) แล้ว (COS คือ NVS)
- 6) ถ้า (COD คือ PVS) แล้ว (COS คือ PVS)
- 7) ถ้า (COD คือ PS) แล้ว (COS คือ PS)
- 8) ถ้า (COD คือ PM) แล้ว (COS คือ PM)
- 9) ถ้า (COD คือ PL) แล้ว (COS คือ PL)
- 10) ถ้า (COD คือ PVL) แล้ว (COS คือ PVL)

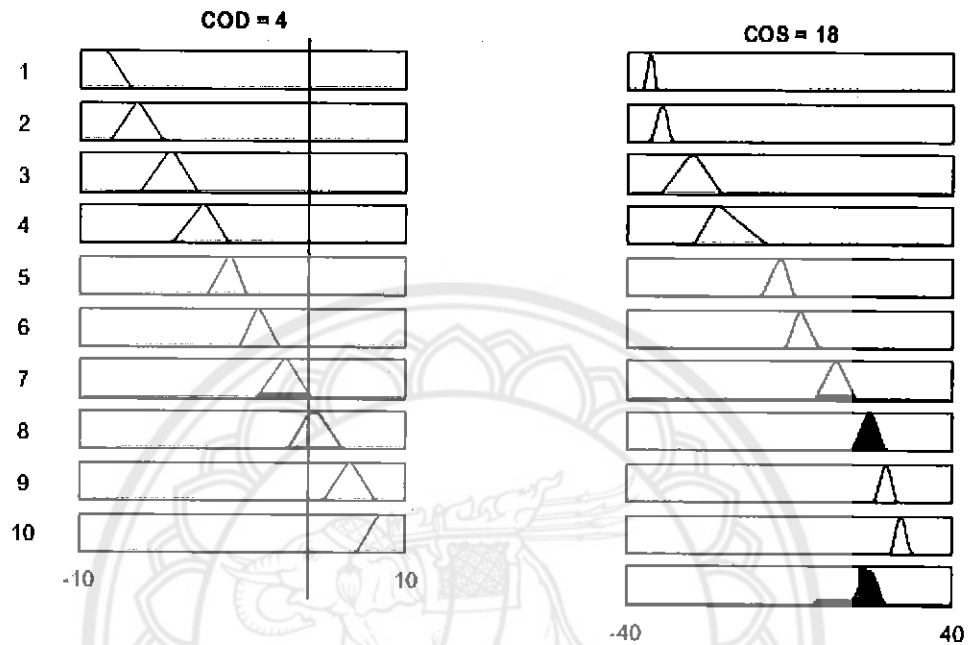
จากกฎการควบคุมที่สร้างมาข้างต้นสามารถเรียกดูมุมมองพื้นผิวของกฎจากกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.15 ดังนี้



รูปที่ 3.15 มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมระยะห่างและความเร็วของหุ่นยนต์

### 3) การประมวลผลฐานกฏพีซซี

เมื่อนำข้อมูลค่าอินพุตการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ มาวิเคราะห์ทำการคำนวณกฎการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะได้ดังรูปที่ 3.16 ดังนี้

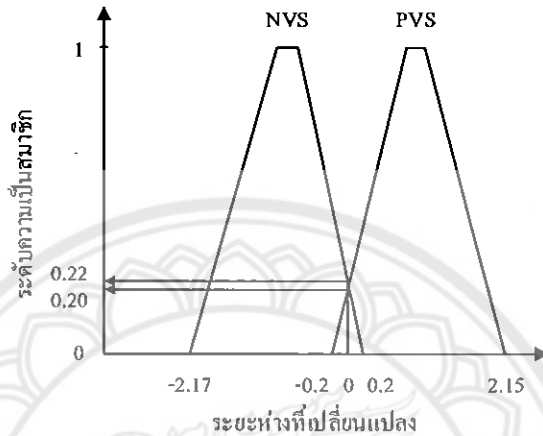


รูปที่ 3.16 การประมวลผลค่าเอาต์พุตด้วยวิธีแมนดานี

3.5.2 ตัวอย่างการคำนวณ

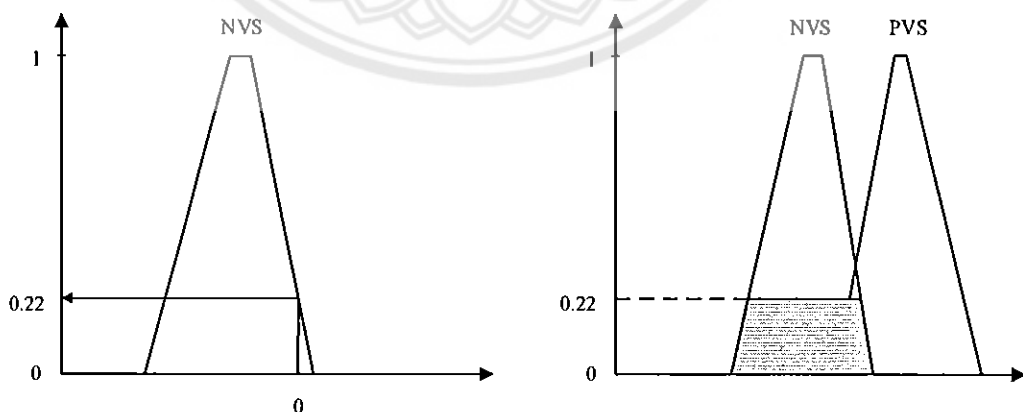
กรณีที่ 1 เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์มีค่าเปลี่ยนไปเท่ากับ 0 เซนติเมตร

1) การทำฟัซซี (fuzzification) คือการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเท่ากับ 0 เซนติเมตร



รูปที่ 3.17 ระดับความเป็นสมาชิกของระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงที่ 0 เซนติเมตร จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิก เท่ากับ 0.20 และ 0.22

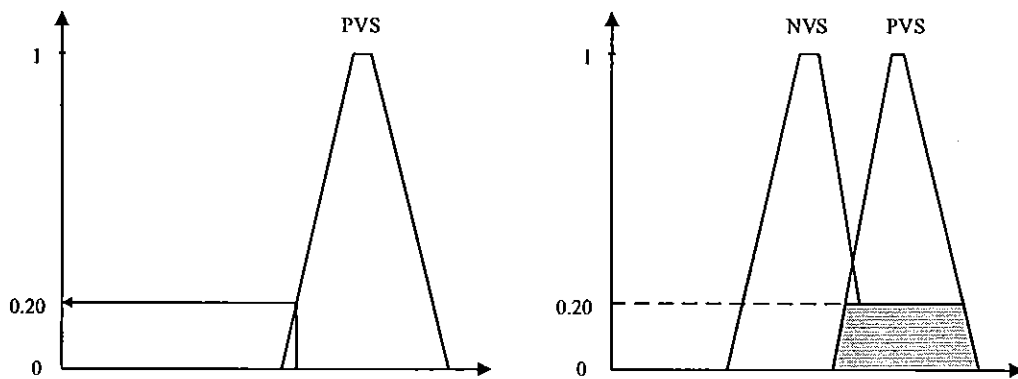
2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต จะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.18



กฎ 5) ถ้า (COD is NVS) แล้ว (COS is NVS)

รูปที่ 3.18 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

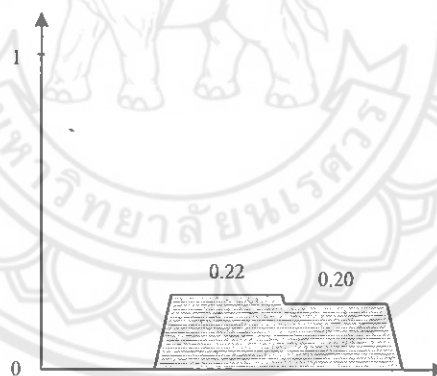




กฎ 6) ถ้า (COD is PVS) แล้ว (COS is PVS)

รูปที่ 3.18 (ต่อ) การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน



รูปที่ 3.19 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

4) การทำดีฟัซซี (defuzzification) ซึ่งใช้วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

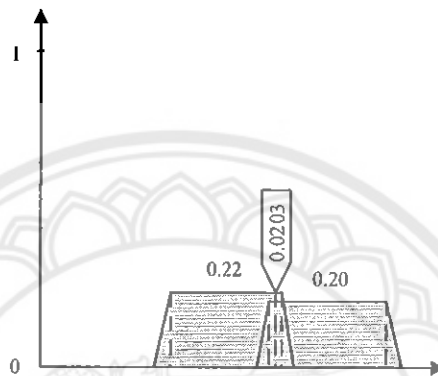
$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \tag{3.1}$$

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ในรูปที่ 3.19 ค่าจุดศูนย์ถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

X	-6.923	-6	-0.923	-0.3	0.4	1.052	6.559	7.298
Y	0	0.22	0.22	0.22	0.22	0.2	0.2	0.2

$$COG = \frac{(-6.923 \times 0) + ((-6 - 0.923 - 0.3 + 0.4) \times 0.22) + ((1.052 + 6.559 + 7.298) \times 0.2)}{0 + 0.22 + 0.22 + 0.22 + 0.22 + 0.2 + 0.2 + 0.2}$$

$$COG = 0.0203$$

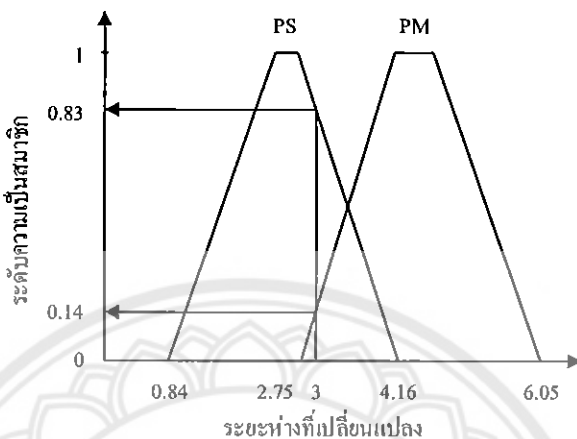


รูปที่ 3.20 การทำดีพีชชีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางของระบบควบคุมมอเตอร์

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีพีชชีเท่ากับ 0.0203 ซึ่งหมายความว่าระบบควบคุมมอเตอร์จะต้องเพิ่มค่าความเร็วมอเตอร์เท่ากับค่าเอาต์พุตที่ได้จากการทำดีพีชชี

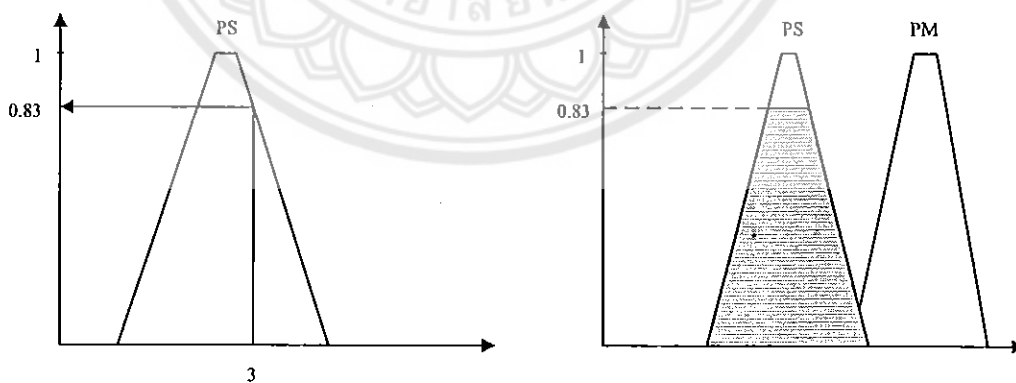
กรณีที่ 2 เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์มีค่าเปลี่ยนไปเท่ากับ 3 เซนติเมตร

1) การทำฟัซซี (fuzzification) คือการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเท่ากับ 3 เซนติเมตร



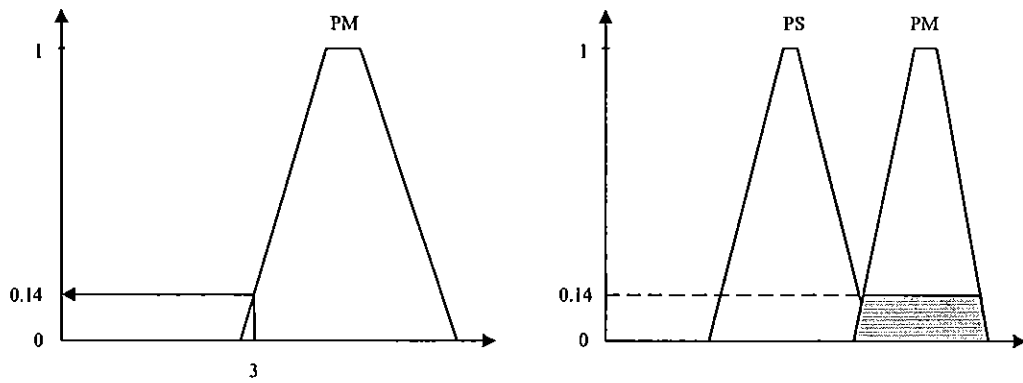
รูปที่ 3.21 ระดับความเป็นสมาชิกของระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงที่ 3 เซนติเมตร จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิก เท่ากับ 0.14 และ 0.83

2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.22



กฎ 7) ถ้า (COD is PS) แล้ว (COS is PS)

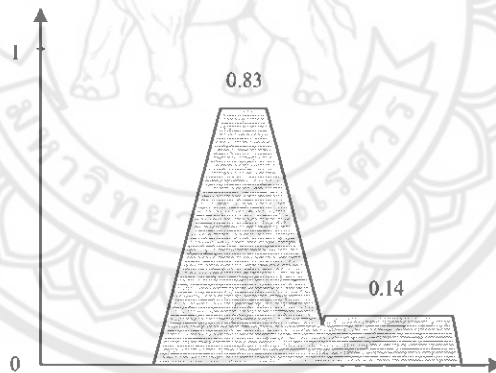
รูปที่ 3.22 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี



กฎ 8 ถ้า (COD is PM) แล้ว (COS is PM)

รูปที่ 3.22 (ต่อ) การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยกรรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน



รูปที่ 3.23 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

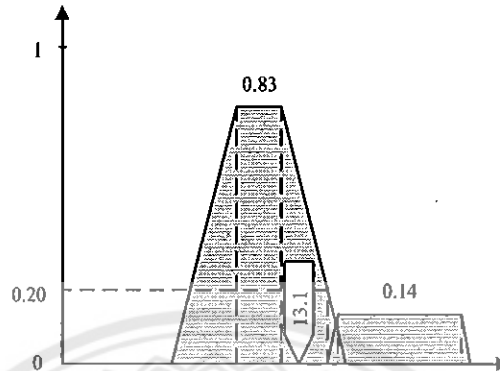
4) การทำดีฟัซซี (defuzzification) ซึ่งใช้วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ในรูปที่ 3.23 ค่าจุดศูนย์ถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

X	6.326	10.1	12.7	15.9	16	16.3	23	23.4
Y	0	0.83	0.83	0.2	0.14	0.14	0.14	0

$$COG = \frac{(6.326 \times 0) + ((10.1 + 12.7) \times 0.83) + (15.9 \times 0.2) + ((16 + 16.3 + 23) \times 0.14) + (23.4 \times 0)}{0 + 0.83 + 0.83 + 0.2 + 0.14 + 0.14 + 0.14 + 0}$$

$$COG = 13.1$$

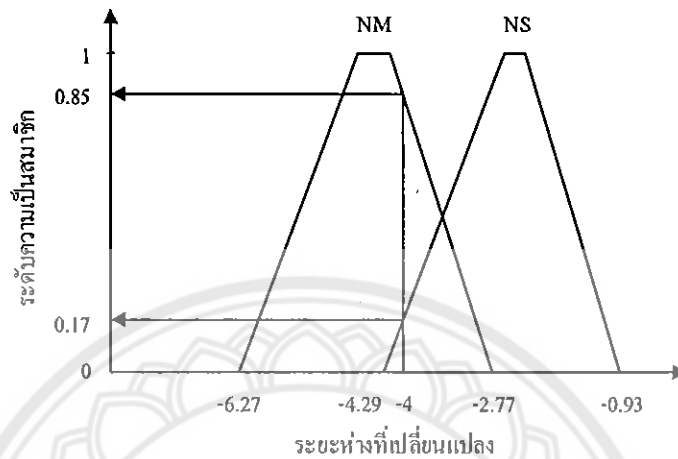


รูปที่ 3.24 การทำดีพีซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วงของระบบควบคุมมอเตอร์

ค่าเอชท์พุดที่ได้จากการทำดีพีซีเท่ากับ 13.1 ซึ่งหมายความว่าระบบควบคุมมอเตอร์จะต้องเพิ่มค่าความเร็วมอเตอร์เท่ากับค่าเอชท์พุดที่ได้จากการทำดีพีซี

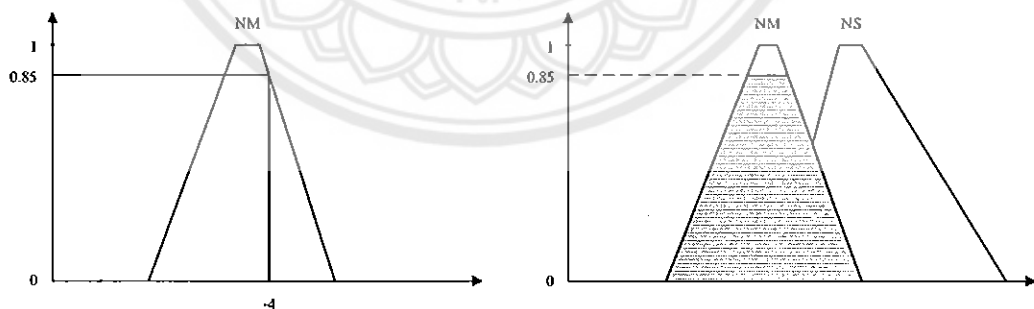
กรณีที่ 3 เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์มีค่าเปลี่ยนไปเท่ากับ -4 เซนติเมตร

1) การทำฟัซซี่ (fuzzification) คือการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัว เท่ากับ -4 เซนติเมตร



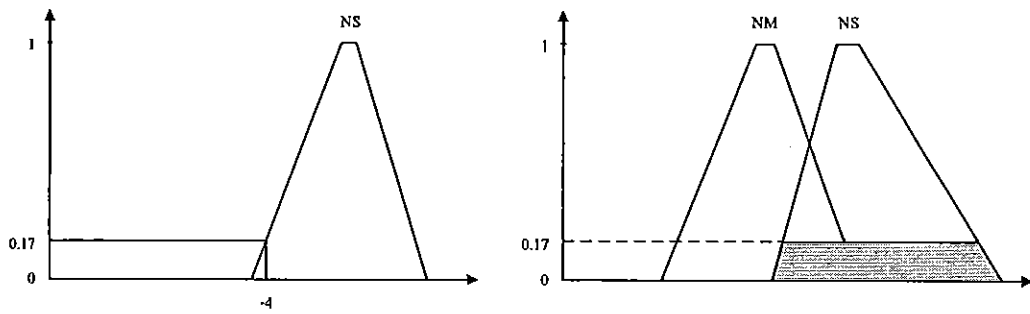
รูปที่ 3.25 ระดับความเป็นสมาชิกของระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงที่ -4 เซนติเมตร จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิก เท่ากับ 0.17 และ 0.85

2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี่ (fuzzy rule evaluation) โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต จะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.26



กฎ 3) ถ้า (COD is NM) แล้ว (COS is NM)

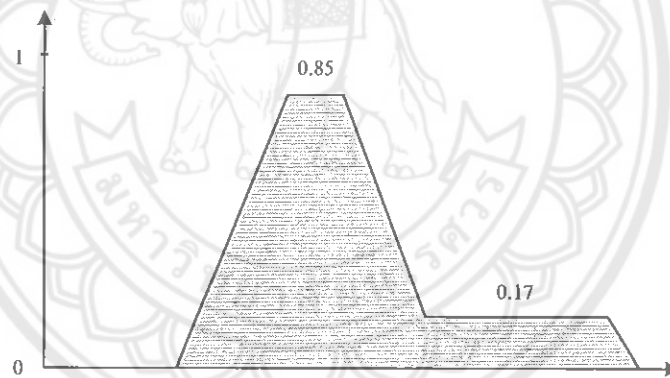
รูปที่ 3.26 การอนุมานฟัซซี่แบบแมมดานี



กฎ 4) ถ้า (COD is NS) แล้ว (COS is NS)

รูปที่ 3.26 (ต่อ) การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน



รูปที่ 3.27 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิกด้วยวิธีตัดยอด

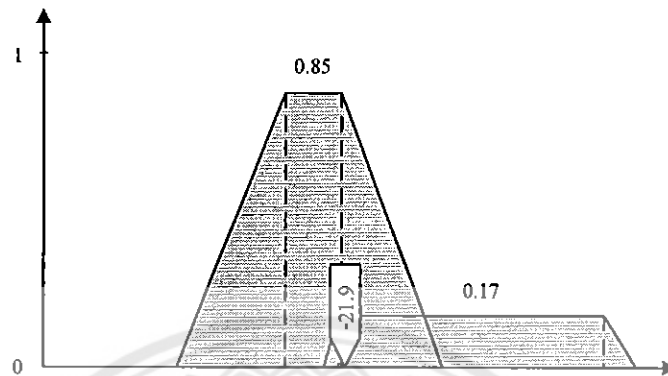
4) การทำดีฟัซซี (defuzzification) ซึ่งใช้วิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ในรูปที่ 3.27 ค่าจุดศูนย์ถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

X	-31.52	25.5	23.3	22.4	22.3	16.8	7.85	-6.018
Y	0	0.87	0.87	0.87	0.87	0.17	0.17	0

$$COG = \frac{(-31.52 \times 0) + ((25.5 + 23.3 + 22.4 + 22.3) \times 0.87) + ((16.8 + 7.85) \times 0.17) + (-6.018 \times 0)}{0 + 0.87 + 0.87 + 0.87 + 0.87 + 0.17 + 0.17 + 0}$$

$$COG = -21.9$$



รูปที่ 3.28 การทำดีพีซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วงของระบบควบคุมมอเตอร์

ค่าเอ้าท์พุทที่ได้จากการทำดีพีซซีเท่ากับ -21.9 ซึ่งหมายความว่าระบบควบคุมมอเตอร์จะต้องเพิ่มค่าความเร็วมอเตอร์เท่ากับค่าเอ้าท์พุทที่ได้จากการทำดีพีซซี



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

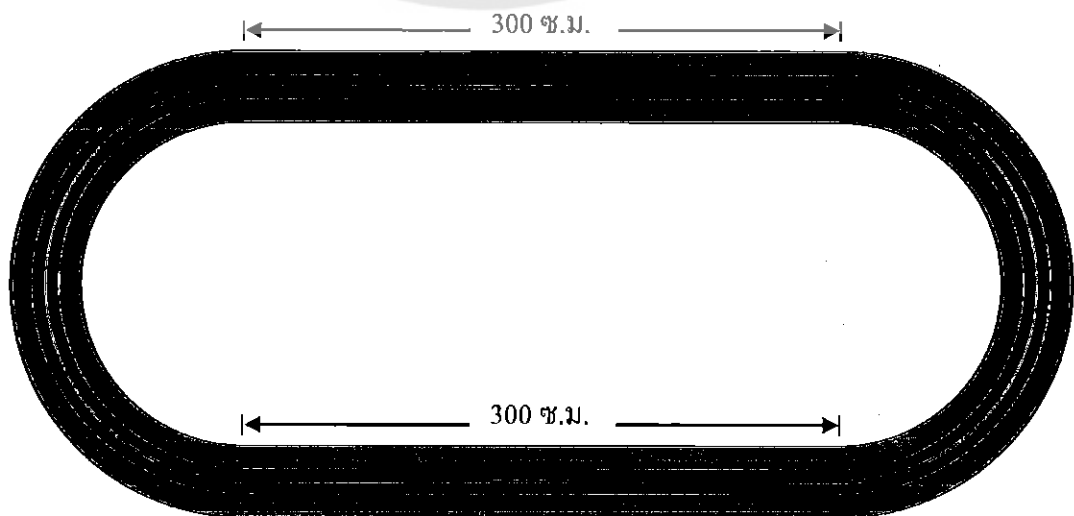
ในบทนี้เป็นการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่าง โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีชซี เมื่อระยะห่างของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะแบ่งการทดลองได้ดังนี้

- 1) การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิก
- 2) การทดลองควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์เมื่อตั้งค่าระยะห่างตามที่กำหนด
- 3) การทดลองหาค่าระยะเวลาของหุ่นยนต์ตัวหลังที่สามารถกลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด เมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

#### 4.1 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิก

การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ตัวหลัง จะทำการทดลองเพื่อหาว่าตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดค่าได้ในช่วงที่มากที่สุดเท่าไร และหาว่าที่ระยะห่างต่างๆ ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกมีค่าความผิดพลาดมากน้อยอย่างไร

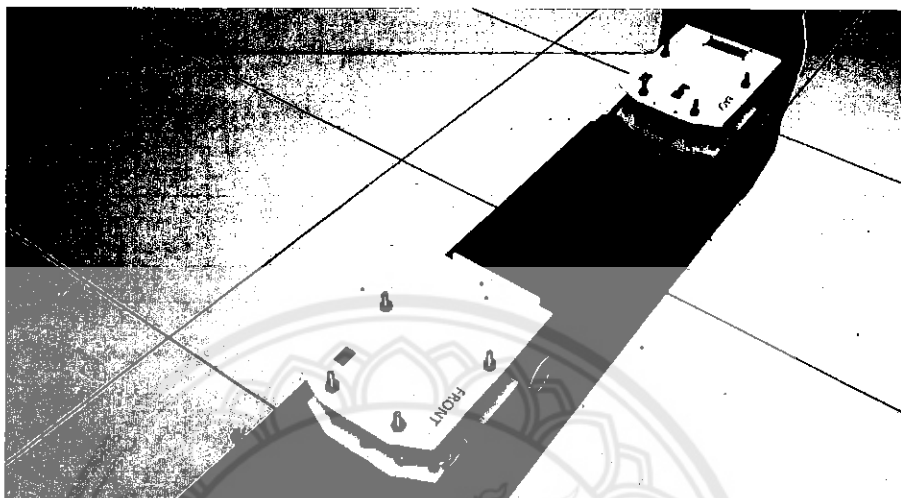
เริ่มต้นการทดลองโดยวางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวบนรางในช่วงทางตรง และเริ่มต้นวัดที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดระยะห่างทุกๆ 5 เซนติเมตร ไปจนถึงระยะห่างที่ตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลังไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งจะทำให้การบันทึกค่าที่ตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลังวัดได้เมื่ออยู่บนรางดังแสดงในรูปที่ 4.1, รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จากนั้นทำการวัดระยะห่างในช่วงทางโค้ง โดยการทำการทดลองเช่นเดียวกับในช่วงทางตรง แล้วทำการบันทึกผลลงในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.1 รางที่ใช้ในการทดลอง

#### 4.1.1 การวัดระยะห่างในช่วงทางตรง

การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ตัวหลังในช่วงทางตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



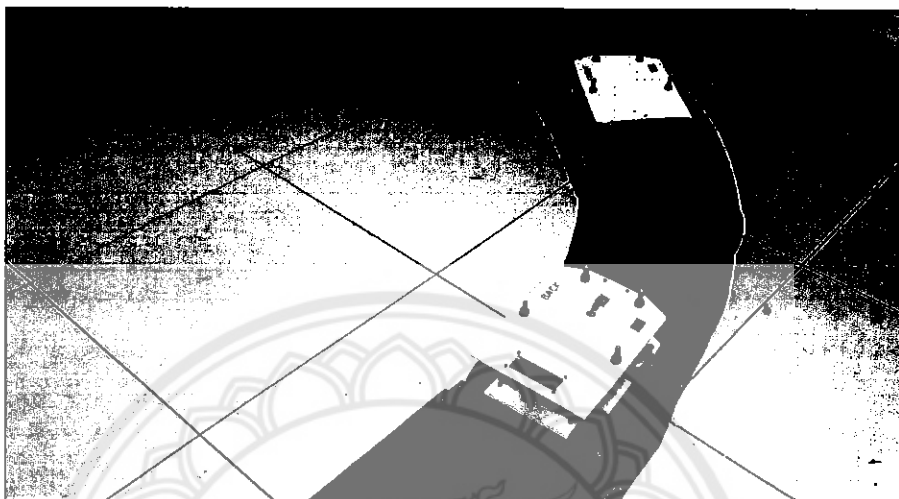
รูปที่ 4.2 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกในช่วงทางตรง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าระยะห่างที่ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดได้ในช่วงทางตรง

วัดที่ระยะ (เซนติเมตร)	ระยะห่างที่วัดได้ในช่วงทางตรง				ค่าความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
10	10.88	10.98	10.81	10.89	8.90
15	15.41	15.48	15.43	15.44	2.93
20	20.51	20.53	20.51	20.52	2.60
25	25.49	25.48	25.49	25.49	1.96
30	29.52	29.54	29.55	29.54	1.53
35	34.55	34.50	34.52	34.52	1.37
40	39.45	39.52	39.48	39.48	1.30
45	44.45	44.49	44.44	44.46	1.20
50	49.85	49.88	49.83	49.52	0.96
55	54.71	54.69	54.86	54.75	0.45
60	59.93	59.90	60.07	59.97	0.05

#### 4.1.2 การวัดระยะห่างในช่วงทางโค้ง

การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ตัวหลังในช่วงทางโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกในช่วงทางโค้ง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าระยะห่างที่ตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดได้ในช่วงทางโค้ง

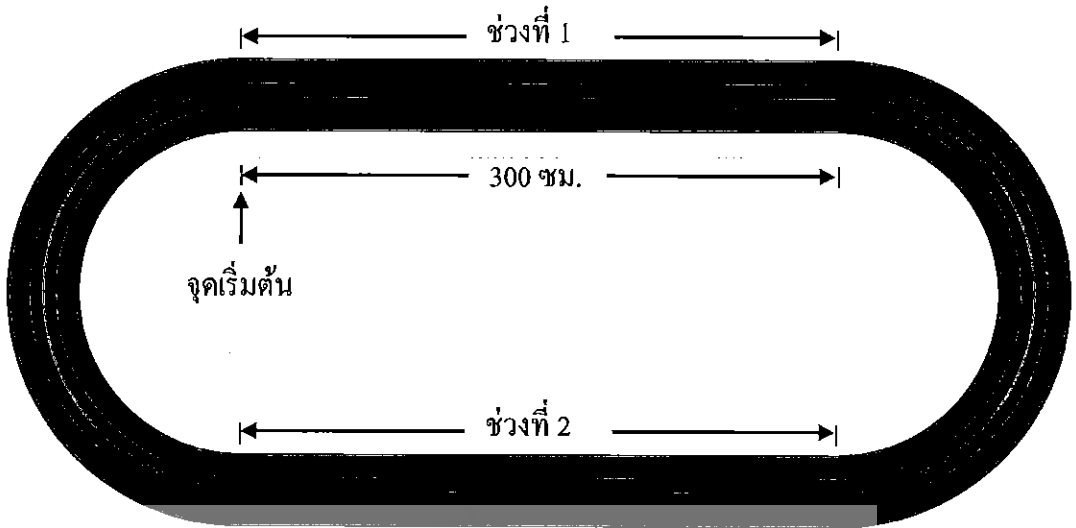
วัดที่ระยะ (เซนติเมตร)	ระยะห่างที่วัดได้ในช่วงทางโค้ง				ค่าความ ผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
10	12.02	12.04	12.05	12.04	20.40
15	16.70	16.76	16.73	16.73	11.53
20	21.45	21.41	21.40	21.42	7.10
25	26.14	26.17	26.11	26.14	4.56
30	31.10	31.13	31.10	31.11	3.70
35	36.00	36.04	36.03	36.02	2.91
40	40.98	40.95	40.96	40.96	2.40
45	45.77	45.80	45.78	45.78	1.73
50	50.69	50.70	50.71	50.70	1.40
55	55.55	55.59	55.58	55.57	1.04
60	60.49	60.50	60.49	60.49	0.82
65	ไม่สามารถวัดได้				

จากการทดลอง 4.1 การทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ตัวหลังในช่วงทางตรง จะเห็นว่าตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดระยะห่างได้ แต่มีค่าความผิดพลาดในช่วงระยะเริ่มต้น เมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้นค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยลง และการทดลองหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกของหุ่นยนต์ตัวหลังในช่วงทางโค้ง จะเห็นว่าตัวรับรู้สามารถวัดระยะห่างได้อยู่ในช่วง 10 เซนติเมตรถึง 60 เซนติเมตร เนื่องจากคุณสมบัติของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกสามารถวัดระยะห่างในช่วงทางโค้งโดยมีมุมในการวัดไม่เกิน 15 องศา ซึ่งในช่วงทางโค้งเมื่อระยะห่างเกิน 60 เซนติเมตรจะทำให้มุมในการวัดเกิน 15 องศาจะส่งผลให้ตัวรับรู้ทำงานผิดพลาด

#### 4.2 การทดลองควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์เมื่อตั้งค่าระยะห่างตามที่กำหนด

การทดลองควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์เมื่อตั้งค่าระยะห่างให้เท่ากับ 30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร จะทำการทดลองเพื่อวัดค่าระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อทดสอบว่าหุ่นยนต์ทั้งสองตัวสามารถควบคุมระยะห่างได้ โดยนำค่าระยะห่างที่วัดได้มาพิจารณาว่าการทำงานของหุ่นยนต์มีความผิดพลาดมากน้อยอย่างไร และเปรียบเทียบว่าที่การตั้งค่าระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเป็นระยะเท่าไรคือระยะห่างที่เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

เริ่มต้นการทดลองโดยการวางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่จุดเริ่มต้น โดยให้หุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีระยะห่างกัน 10 เซนติเมตร จากนั้นกดสวิทช์ให้หุ่นยนต์ตัวหลังทำงานซึ่งตัวรับรู้จะทำการวัดระยะห่างและจะยังไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากหุ่นยนต์ทั้งสองตัวยังมีระยะห่างไม่เท่ากับระยะห่างที่กำหนด ต่อมากดสวิทช์ให้หุ่นยนต์ตัวหน้าทำงาน โดยหุ่นยนต์ตัวหน้าจะเริ่มเคลื่อนที่ และเมื่อตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลังวัดระยะห่างจากหุ่นยนต์ตัวหน้าได้ระยะห่างตามที่กำหนด (30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร) จะทำให้หุ่นยนต์ตัวหลังเคลื่อนที่ตามหุ่นยนต์ตัวหน้า จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ทุกๆ ระยะ 50 เซนติเมตร ไปจนสุดทางตรงเป็นระยะทาง 300 เซนติเมตร โดยเส้นทางที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นรางโค้งรูปวงรีดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 คือทางตรงช่วงแรก และช่วงที่ 2 คือทางตรงช่วงที่ 2 จากนั้นให้เริ่มทำการทดลองใหม่โดยทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิมตั้งแต่เริ่มต้น โดยทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง และบันทึกผลการทดลองลงในตาราง



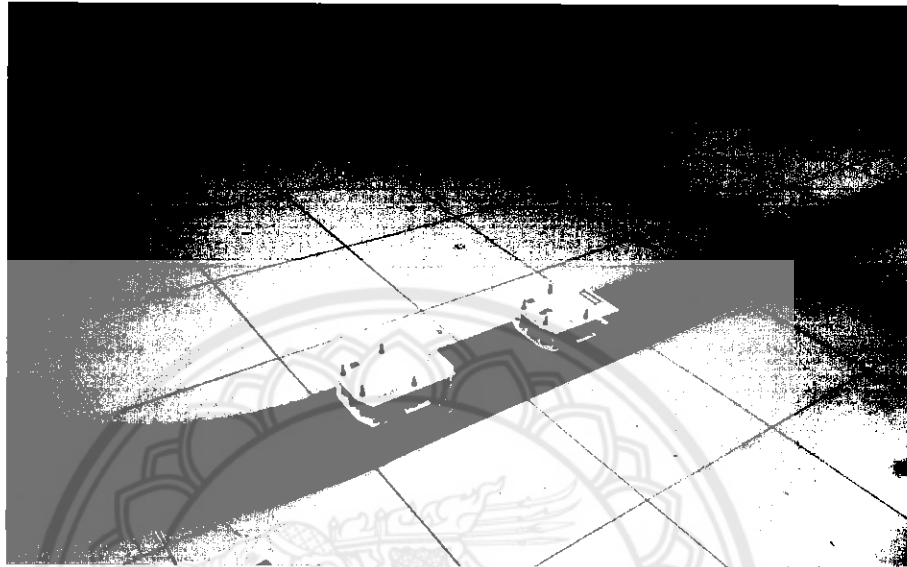
รูปที่ 4.4 รางที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.5 วางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่จุดเริ่มต้น

#### 4.2.1 เมื่อตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 30 เซนติเมตร

การทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลังจะเคลื่อนที่ตามกันบนรางโดยหุ่นยนต์ตัวหลังจะสามารถควบคุมระยะห่างตามที่กำหนดซึ่งเท่ากับ 30 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6



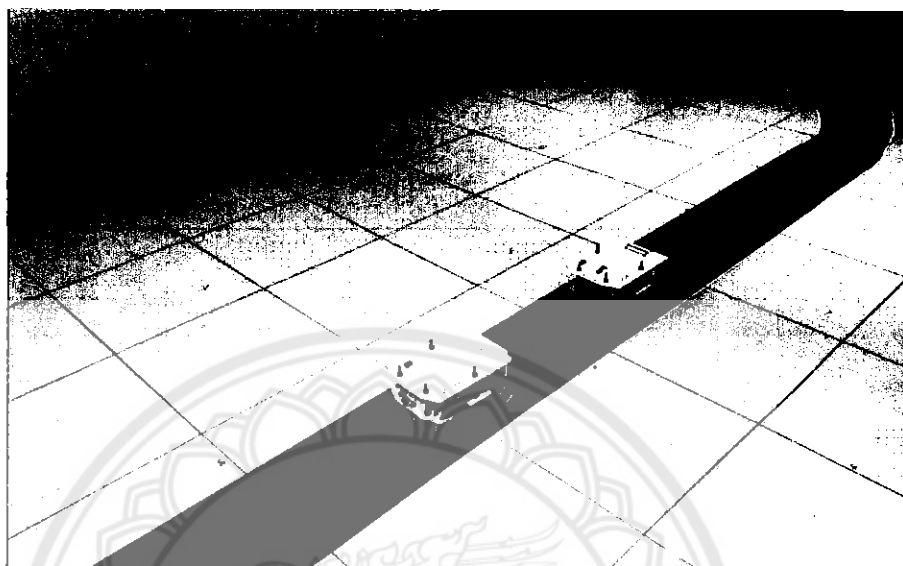
รูปที่ 4.6 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่ออยู่บนราง โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	ช่วงที่ทำการทดลอง	ค่าระยะห่างที่วัดตามระยะทางที่กำหนด (เซนติเมตร)						ค่าเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)
		50	100	150	200	250	300			
1	ช่วงที่ 1	33.9	31.2	31.1	30.1	31.1	29.4	31.18	3.93	3.93
	ช่วงที่ 2	33.5	32.3	31.3	30.3	30.1	29.9			
2	ช่วงที่ 1	33.5	31.6	31.4	30.5	30.2	29.8	31.23	4.10	
	ช่วงที่ 2	33.7	31.5	31.4	30.2	30.2	30.8			
3	ช่วงที่ 1	33.5	31.5	31.1	30.1	30.3	30.0	31.08	3.60	
	ช่วงที่ 2	33.5	31.4	31.2	30.2	30.1	30.1			
4	ช่วงที่ 1	33.1	31.5	31.2	30.5	30.6	29.8	31.13	3.77	
	ช่วงที่ 2	33.1	31.1	31.0	30.3	30.7	30.7			
5	ช่วงที่ 1	33.5	32.1	31.3	30.3	30.5	30.6	31.28	4.27	
	ช่วงที่ 2	33.4	32.0	31.2	30.2	30.1	30.1			

#### 4.2.2 เมื่อตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 40 เซนติเมตร

การทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลังจะเคลื่อนที่ตามกันบนรางโดยหุ่นยนต์ตัวหลังจะสามารถควบคุมระยะห่างตามที่กำหนดซึ่งเท่ากับ 40 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7



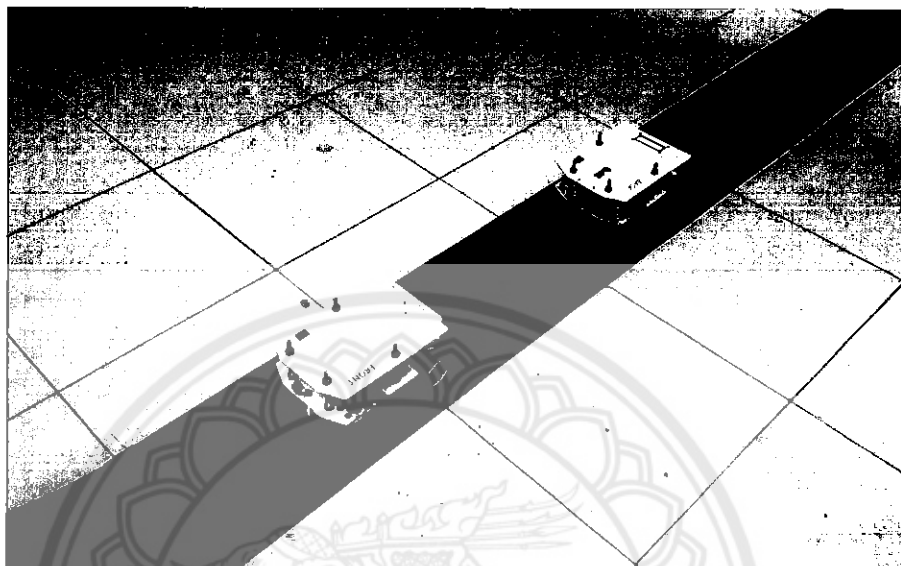
รูปที่ 4.7 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่ออยู่บนราง โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	ช่วงที่ทำการทดลอง	ค่าระยะห่างที่วัดตามระยะทางที่กำหนด (เซนติเมตร)						ค่าเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)
		50	100	150	200	250	300			
1	ช่วงที่ 1	44.5	41.6	38.8	39.9	40.1	38.1	40.94	2.35	2.34
	ช่วงที่ 2	43.4	43.5	41.1	40.1	40.3	39.9			
2	ช่วงที่ 1	43.7	43.1	39.9	40.1	40.0	39.8	40.90	2.25	
	ช่วงที่ 2	43.5	43.0	40.1	40.1	38.8	38.7			
3	ช่วงที่ 1	43.5	39.9	40.1	39.8	41.3	40.0	40.95	2.38	
	ช่วงที่ 2	43.5	43.2	40.2	40.0	40.0	39.9			
4	ช่วงที่ 1	43.5	42.5	39.2	40.5	40.1	40.1	40.98	2.45	
	ช่วงที่ 2	43.3	42.6	40.0	40.3	40.5	39.1			
5	ช่วงที่ 1	43.8	40.5	39.1	40.1	40.5	40.5	40.90	2.25	
	ช่วงที่ 2	43.4	42.5	40.3	41.3	39.5	39.3			

### 4.2.3 เมื่อตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 50 เซนติเมตร

การทำงานของหุ่นยนต์ตัวหน้าและตัวหลังจะเคลื่อนที่ตามกันบนรางโดยหุ่นยนต์ตัวหลังจะสามารถควบคุมระยะห่างตามที่กำหนดซึ่งเท่ากับ 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8



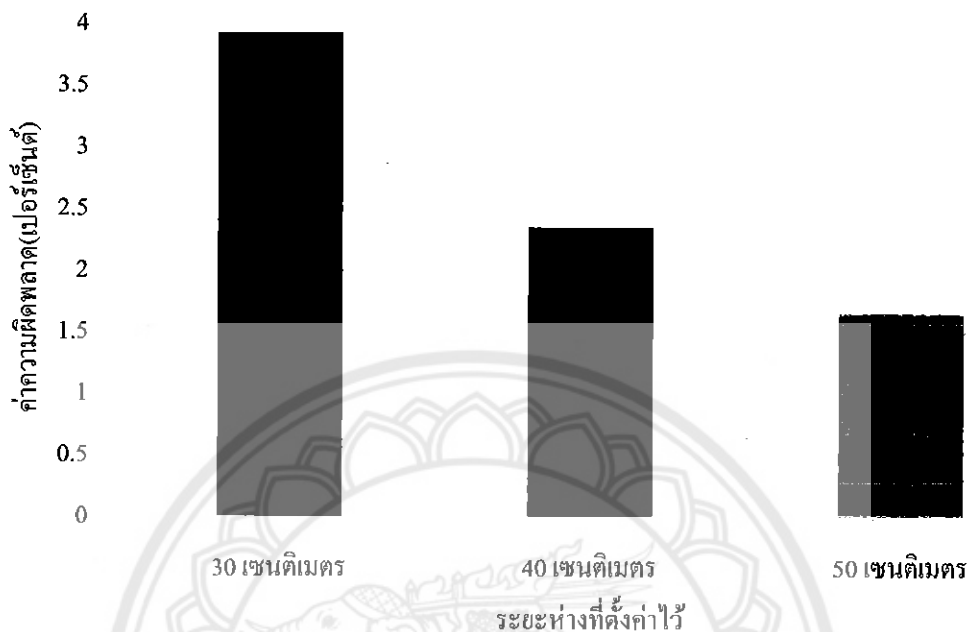
รูปที่ 4.8 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่ออยู่บนรางโดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	ช่วงที่ทำการทดลอง	ค่าระยะห่างที่วัดตามระยะทางที่กำหนด (เซนติเมตร)						ค่าเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)
		50	100	150	200	250	300			
1	ช่วงที่ 1	54.5	48.8	50.0	50.0	51.1	50.5	50.86	1.72	1.66
	ช่วงที่ 2	54.4	52.5	48.8	49.5	50.1	50.1			
2	ช่วงที่ 1	54.6	50.1	50.0	50.5	50.9	50.1	50.98	1.96	
	ช่วงที่ 2	54.3	50.5	50.1	50.5	50.1	50.1			
3	ช่วงที่ 1	52.2	49.5	51.1	51.4	50.2	50.1	50.87	1.74	
	ช่วงที่ 2	53.8	50.1	50.4	51.1	50.3	50.2			
4	ช่วงที่ 1	52.7	49.1	51.0	50.8	50.8	50.1	50.78	1.56	
	ช่วงที่ 2	53.5	50.4	50.0	50.1	50.1	50.7			
5	ช่วงที่ 1	52.2	51.3	50.4	50.8	50.6	50.3	50.67	1.34	
	ช่วงที่ 2	52.1	50.1	49.5	50.3	50.3	50.1			



จากการทดลอง 4.2 สามารถเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์เมื่อตั้งค่าระยะห่างตามที่กำหนดได้ดังรูปที่ 4.9



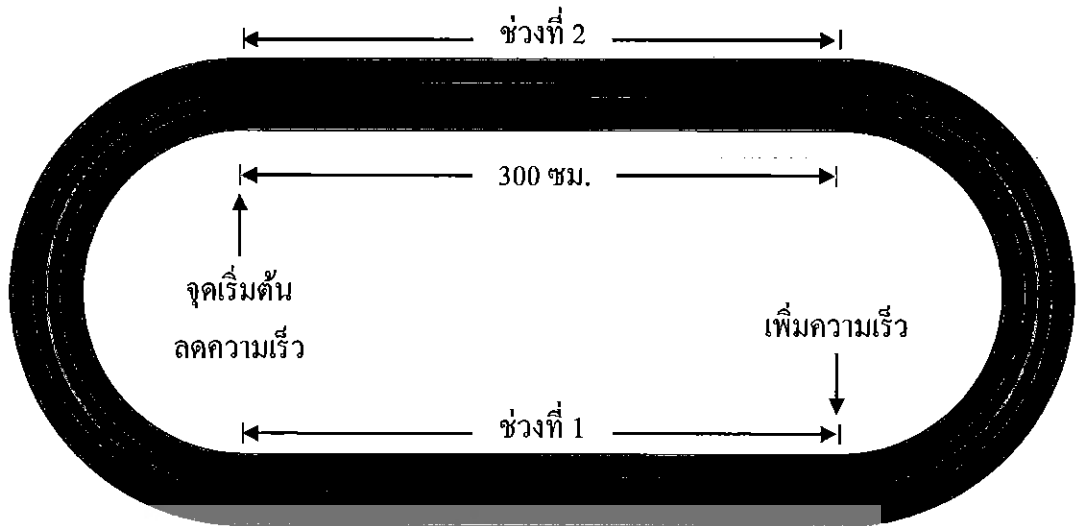
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่การตั้งค่าระยะห่างต่างๆ

จากกราฟในรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่การตั้งค่าระยะห่างต่างๆระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัว เรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ 30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร ตามลำดับ จะได้ว่าเมื่อตั้งค่าระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวให้มีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตรจะได้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.66 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากคุณสมบัติของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกจะมีค่าความผิดพลาดน้อยลงเมื่อระยะห่างที่วัดมีค่ามากขึ้น

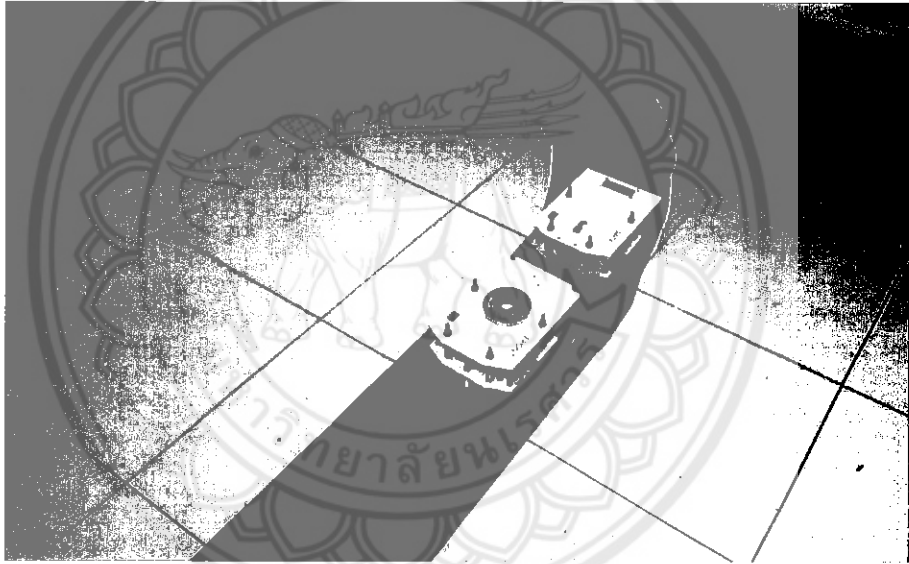
### 4.3 การทดลองหาเวลาของหุ่นยนต์ตัวหลังที่สามารถกลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด เมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

การทดลองหาเวลาของหุ่นยนต์ตัวหลังที่สามารถกลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด (30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร) เมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมามีค่าระยะห่างจากหุ่นยนต์ตัวหน้าตามที่กำหนด โดยจะพิจารณา 2 กรณีคือ กรณีเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้าและกรณีลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า และทำการเปรียบเทียบว่ากรณีใดใช้เวลาน้อยที่สุด

เริ่มต้นการทดลองโดยการวางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่จุดเริ่มต้น โดยให้หุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีระยะห่างกัน 10 เซนติเมตร ต่อมาให้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้าให้ลดลง โดยการเพิ่มโหลด 0.5 กิโลกรัมที่หุ่นยนต์ตัวหน้า จากนั้นกดสวิตช์ให้หุ่นยนต์ตัวหลังทำงานซึ่งตัวรับรู้ จะทำการวัดระยะห่างและจะยังไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากหุ่นยนต์ทั้งสองตัวยังมีระยะห่างไม่เท่ากับระยะห่างที่กำหนด ต่อมากดสวิตช์ให้หุ่นยนต์ตัวหน้าทำงาน โดยหุ่นยนต์ตัวหน้าจะเริ่มเคลื่อนที่ และเมื่อตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวหลังวัดระยะห่างจากหุ่นยนต์ตัวหน้าได้ระยะห่างตามที่กำหนด (30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร) จะทำให้หุ่นยนต์ตัวหลังเคลื่อนที่ตามหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยเส้นทางที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นรางโค้งรูปวงรีดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงที่ 1 คือทางตรงช่วงแรก และช่วงที่ 2 คือทางตรงช่วงที่ 2 เมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้าเคลื่อนที่ถึงทางตรงช่วงที่ 1 ให้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้าให้เพิ่มขึ้น โดยการนำโหลด 0.5 กิโลกรัมออก และให้ทำการจับเวลาตั้งแต่เริ่มเพิ่มความเร็วจนถึงเวลาที่หุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด ต่อมาเมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้าเคลื่อนที่ถึงทางตรงช่วงที่ 2 ให้ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้าให้ลดลง โดยการเพิ่ม โหลด 0.5 กิโลกรัม และให้ทำการจับเวลาตั้งแต่เริ่มลดความเร็วจนถึงเวลาที่หุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด ซึ่งจะถูกลบเป็นรอบที่ 1 จากนั้นให้ทำการทดลองซ้ำเหมือนเดิม ตั้งแต่การเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยไม่มีหยุดเป็นจำนวน 5 รอบ และบันทึกผลการทดลองลงในตาราง



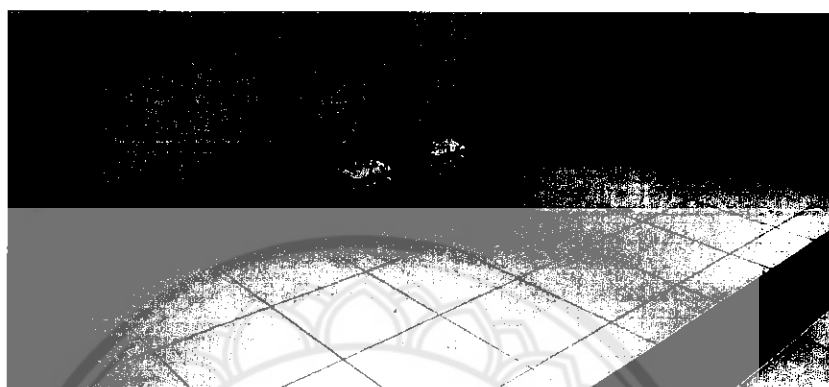
รูปที่ 4.10 รางที่ใช้ในการทดลอง



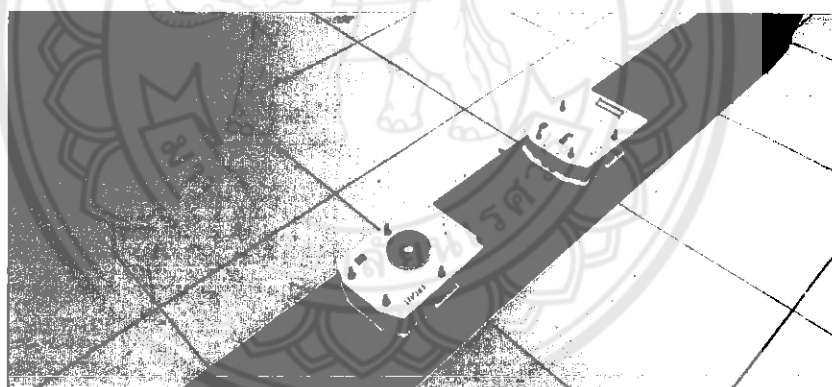
รูปที่ 4.11 วางหุ่นยนต์ทั้งสองตัวที่จุดเริ่มต้น

#### 4.3.1 เมื่อตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 30 เซนติเมตร

การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อเคลื่อนที่บนราง ซึ่งหุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมา มีระยะห่างตามที่กำหนดเท่ากับ 30 เซนติเมตร เมื่อมีการลดความเร็วและเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ ตัวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร



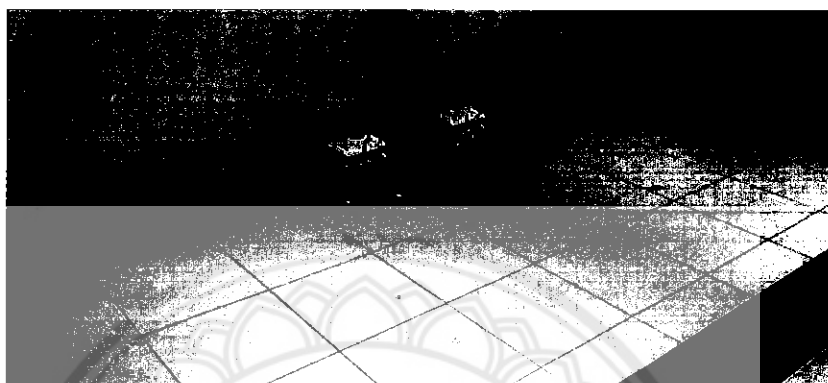
รูปที่ 4.13 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.6 เวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด โดยตั้งค่าระยะห่าง 30 เซนติเมตร

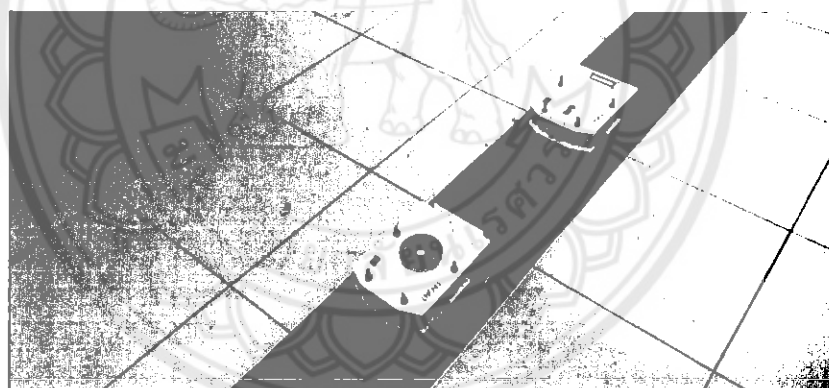
ช่วงที่ ทำการทดลอง	เวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด (วินาที)					
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	เฉลี่ย
ช่วงที่ 1 เพิ่มความเร็ว หุ่นยนต์ตัวหน้า	3.38	3.36	3.37	3.31	3.38	3.36
ช่วงที่ 2 ลดความเร็ว หุ่นยนต์ตัวหน้า	1.62	1.59	1.63	1.60	1.61	1.61

### 4.3.2 เมื่อตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 40 เซนติเมตร

การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อเคลื่อนที่บนราง ซึ่งหุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมา มีระยะห่างตามที่กำหนดเท่ากับ 40 เซนติเมตร เมื่อมีการลดความเร็วและเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ ตัวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร



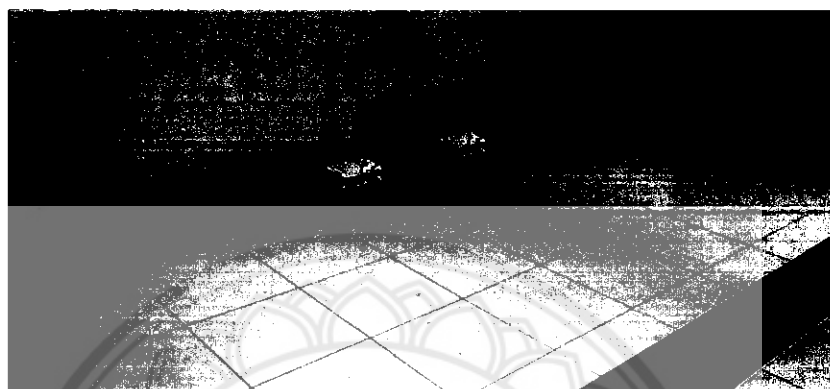
รูปที่ 4.15 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.7 เวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด โดยตั้งค่าระยะห่าง 40 เซนติเมตร

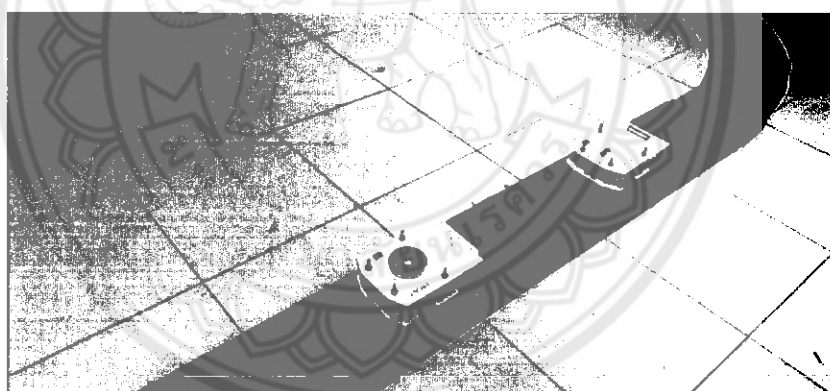
ช่วงที่ ทำการทดลอง	เวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด (วินาที)					เฉลี่ย
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	
ช่วงที่ 1 เพิ่มความเร็ว หุ่นยนต์ตัวหน้า	3.36	3.43	3.41	3.35	3.41	3.40
ช่วงที่ 2 ลดความเร็ว หุ่นยนต์ตัวหน้า	1.58	1.65	1.62	1.62	1.59	1.61

### 4.3.3 เมื่อตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 50 เซนติเมตร

การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อเคลื่อนที่บนราง ซึ่งหุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมา มีระยะห่างตามที่กำหนดเท่ากับ 50 เซนติเมตร เมื่อมีการลดความเร็วและเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ ตัวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการเพิ่มความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร

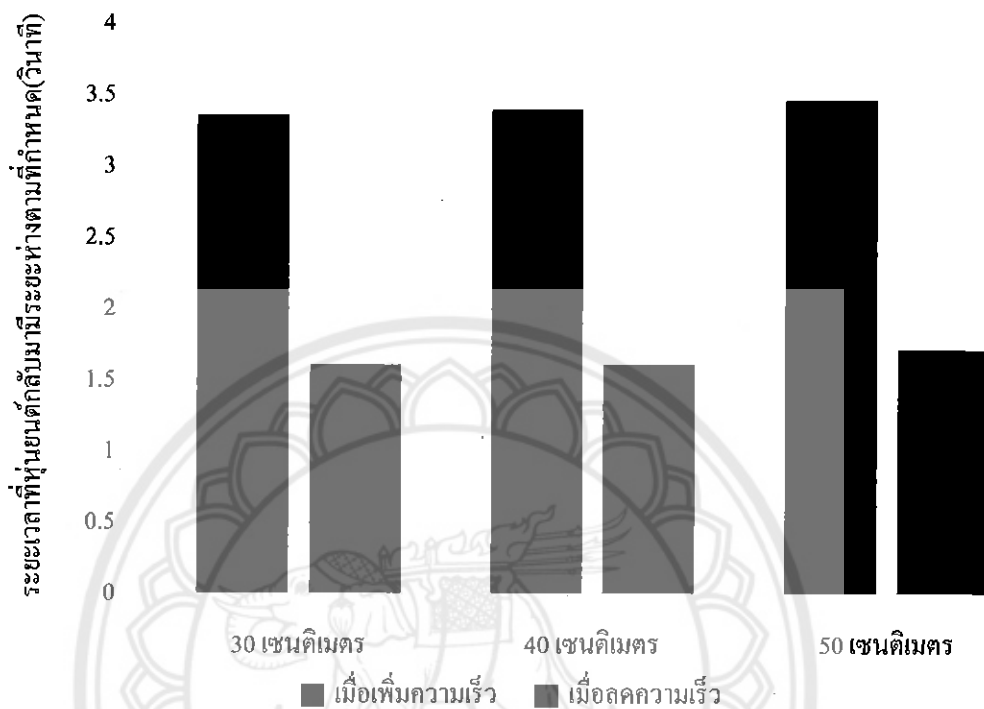


รูปที่ 4.17 การทำงานของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อมีการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.8 เวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด โดยตั้งค่าระยะห่าง 50 เซนติเมตร

ช่วงที่ ทำการทดลอง	เวลาที่หุ่นยนต์กลับมามีค่าระยะห่างตามที่กำหนด (วินาที)					
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4	รอบที่ 5	เฉลี่ย
ช่วงที่ 1 เพิ่มความเร็ว หุ่นยนต์ตัวหน้า	3.45	3.50	3.41	3.56	3.43	3.47
ช่วงที่ 2 ลดความเร็ว หุ่นยนต์ตัวหน้า	1.71	1.75	1.64	1.78	1.72	1.72

จากการทดลอง 4.3 สามารถเขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมา มีระยะห่างตามที่กำหนดเมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมา มีระยะห่างตามที่กำหนดระหว่างการเพิ่มความเร็วและการลดความเร็วของหุ่นยนต์ตัวหน้า

จากกราฟในรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าการตั้งค่าให้หุ่นยนต์มีระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเท่ากับ 30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตรตามลำดับ จะให้ผลการทดลองที่เหมือนกันคือในกรณีที่หุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วให้ลดลงจะมีระยะเวลาที่หุ่นยนต์สามารถกลับมา มีค่าระยะห่างตามที่กำหนดน้อยกว่ากรณีที่หุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในกรณีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ให้ลดลงจะทำให้หุ่นยนต์ตัวหน้ามีความเร็วลดลงทันทีในขณะที่หุ่นยนต์ตัวหลังยังคงมีความเร็วเท่าเดิมจึงสามารถลดความเร็วได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้ระยะห่างมีค่าตามที่กำหนดจึงทำให้ใช้เวลาน้อยซึ่งจะใช้เวลาอยู่ในช่วง 1.61-1.72 วินาที แต่ในกรณีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ให้เพิ่มขึ้นนั้นหุ่นยนต์ตัวหลังยังคงมีความเร็วเท่าเดิมซึ่งการที่หุ่นยนต์ตัวหลังจะสามารถกลับมา มีระยะห่างตามที่กำหนด หุ่นยนต์ตัวหลังจะต้องมีการเพิ่มความเร็วให้มากขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากน้อยไปมากจะมีแรงเฉื่อยซึ่งต้องออกแรงมากขึ้นจึงทำให้ใช้เวลามากซึ่งจะใช้เวลาอยู่ในช่วง 3.36-3.47 วินาที

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการการควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์โดยใช้พีซีลจอกเมื่อระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปการทำงานของหุ่นยนต์ ดังนี้

1) หุ่นยนต์ตัวหลังสามารถควบคุมระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวเมื่อระยะห่างของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหุ่นยนต์ตัวหลังสามารถควบคุมระยะห่างตามที่กำหนด ดังนี้ 30 เซนติเมตร, 40 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตร โดยที่ระยะห่างของหุ่นยนต์ที่ค่าดังกล่าวจะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -1 เซนติเมตร จนถึง +5 เซนติเมตร ซึ่งการตั้งค่าระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ให้มีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตรจะเป็นระยะห่างที่ทำให้หุ่นยนต์มีค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทั้งสองตัวน้อยที่สุด โดยมีร้อยละความผิดพลาดเท่ากับ 1.66 เนื่องจากคุณสมบัติของตัวรับรู้ชนิดอัลตราโซนิกจะมีค่าความผิดพลาดน้อยลงเมื่อระยะห่างที่วัดมีค่ามากขึ้น

2) หุ่นยนต์ตัวหลังสามารถกลับมาที่มีค่าระยะห่างตามที่กำหนด เมื่อหุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ซึ่งจะได้ว่ากรณีที่หุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วให้ลดลงจะมีระยะเวลาที่หุ่นยนต์สามารถกลับมาที่มีค่าระยะห่างตามที่กำหนดน้อยกว่ากรณีที่หุ่นยนต์ตัวหน้ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากในกรณีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ให้ลดลงจะทำให้หุ่นยนต์ตัวหน้ามีความเร็วลดลงทันที ในขณะที่หุ่นยนต์ตัวหลังยังคงมีความเร็วเท่าเดิมจึงสามารถลดความเร็วได้อย่างรวดเร็วเพื่อให้ระยะห่างมีค่าตามที่กำหนดจึงทำให้ใช้เวลาน้อย แต่ในกรณีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ให้เพิ่มขึ้นนั้นหุ่นยนต์ตัวหลังยังคงมีความเร็วเท่าเดิมซึ่งการที่หุ่นยนต์ตัวหลังจะสามารถกลับมาที่มีระยะห่างตามที่กำหนด หุ่นยนต์ตัวหลังจะต้องมีการเพิ่มความเร็วให้มากขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากน้อยไปมากจะมีแรงเฉื่อยซึ่งต้องออกแรงมากขึ้นจึงทำให้ใช้เวลานาน



## 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

1) ช่วงทางตรงที่ใช้ในการทดลองมีระยะทางที่สั้นเกินไป ส่งผลให้การบันทึกผลการทดลองมีความละเอียดน้อย ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่ามาก

แนวทางการแก้ปัญหา ออกแบบและสร้างรางให้มีช่วงทางตรงที่ใช้ในการทดลองให้มีระยะทางที่มากขึ้น เพื่อที่จะสามารถบันทึกผลการทดลองให้มีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยลงกว่าเดิม

2) ค่าความเสียดทานของพื้นไม้ที่ใช้ในการทดลอง และแกนเหล็กยึดกับรางมีค่าสูง จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ช้าลง

แนวทางการแก้ปัญหา ทำการทดลองบนพื้นไม้แบบเรียบ เพื่อลดแรงเสียดทาน

## 5.3 การนำไปพัฒนาและประยุกต์การใช้งาน

สามารถนำการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์สองตัวไปประยุกต์สร้างหุ่นยนต์ควบคุมระยะห่างที่มีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น มีจำนวนหุ่นยนต์ที่มากขึ้น และสามารถเคลื่อนที่ได้หลายรูปแบบ เช่น การเคลื่อนที่บนพื้นที่เอียงหรือการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง เป็นต้น เพื่อรองรับการใช้งานด้านขนส่งมวลชน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] **Arduio maga2560**, <https://goo.gl/2ziFbu>, สืบค้นเมื่อ สิงหาคม 2559
- [2] **เซนเซอร์วัดระยะทาง**, <https://goo.gl/BNNy1j>, สืบค้นเมื่อ สิงหาคม 2559
- [3] **L298N Dual Full-bridge motor driver module (Red PCB)**, <https://goo.gl/8cElWh>, สืบค้นเมื่อ สิงหาคม 2559
- [4] **[Robot] การใช้ชุดขับมอเตอร์ L298N Dual H-Bridge Motor Controller**, <https://goo.gl/dcK8oK>, สืบค้นเมื่อ สิงหาคม 2559
- [5] **eFFL (Fuzzy)**, <https://goo.gl/j73EHr>, สืบค้นเมื่อ มกราคม 2560





ภาคผนวก ก

รายละเอียดข้อมูลของ AVR ATMEGA2560

มหาวิทยาลัยนเรศวร



## Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V

8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash

### SUMMARY

#### Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
  - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
  - 64K/128K/256K Bytes of In-System Self-Programmable Flash
  - 4Kbytes EEPROM
  - 8Kbytes Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
    - In-System Programming by On-chip Boot Program
    - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
    - Endurance: Up to 81Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® OTouch® library support
  - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
  - QTouch and QMatrix acquisition
  - Up to 64 sense channels
- JTAG (IEEE® std. 1149.1 compliant) Interface
  - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
  - Extensive On-chip Debug Support
  - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
  - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four 8-bit PWM Channels
  - Six/Ten PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - Output Compare Modulator
  - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
  - Interrupt and Wakeup on Pin Change
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 5488 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
  - 64-pad QFNMLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
  - 100-lead TQFP, 100-ball CBGA (ATmega640/1280/2560)
  - RoHS/fully Green
- Temperature Range:
  - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
  - Active Mode: 1MHz, 1.2V: 600µA
  - Power-down Mode: 0.1µA at 1.2V
- Speed Grade:
  - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
    - 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 6MHz @ 2.7V - 5.5V
  - ATmega2560V/ATmega2561V:
    - 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 6MHz @ 2.7V - 5.5V
  - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
    - 0 - 8MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V
  - ATmega2560/ATmega2561:
    - 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V



Figure 1-2. CBGA-pinout ATmega640/1280/2560

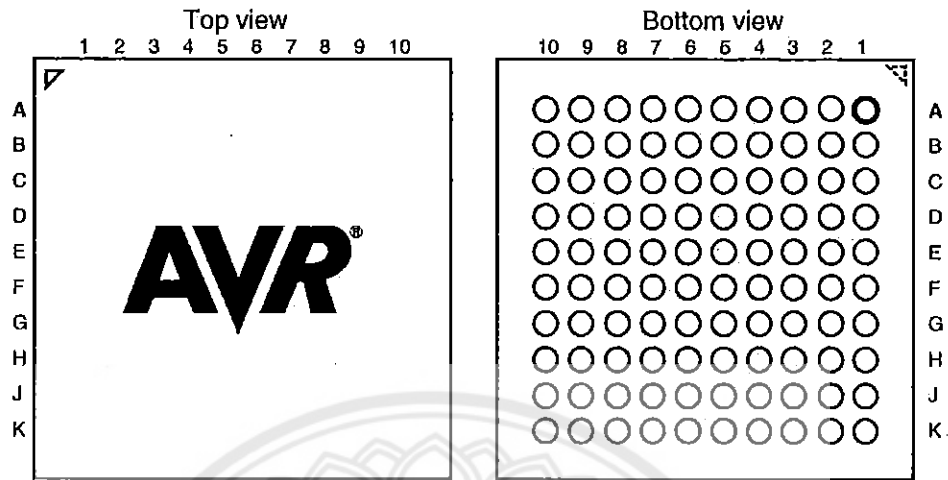
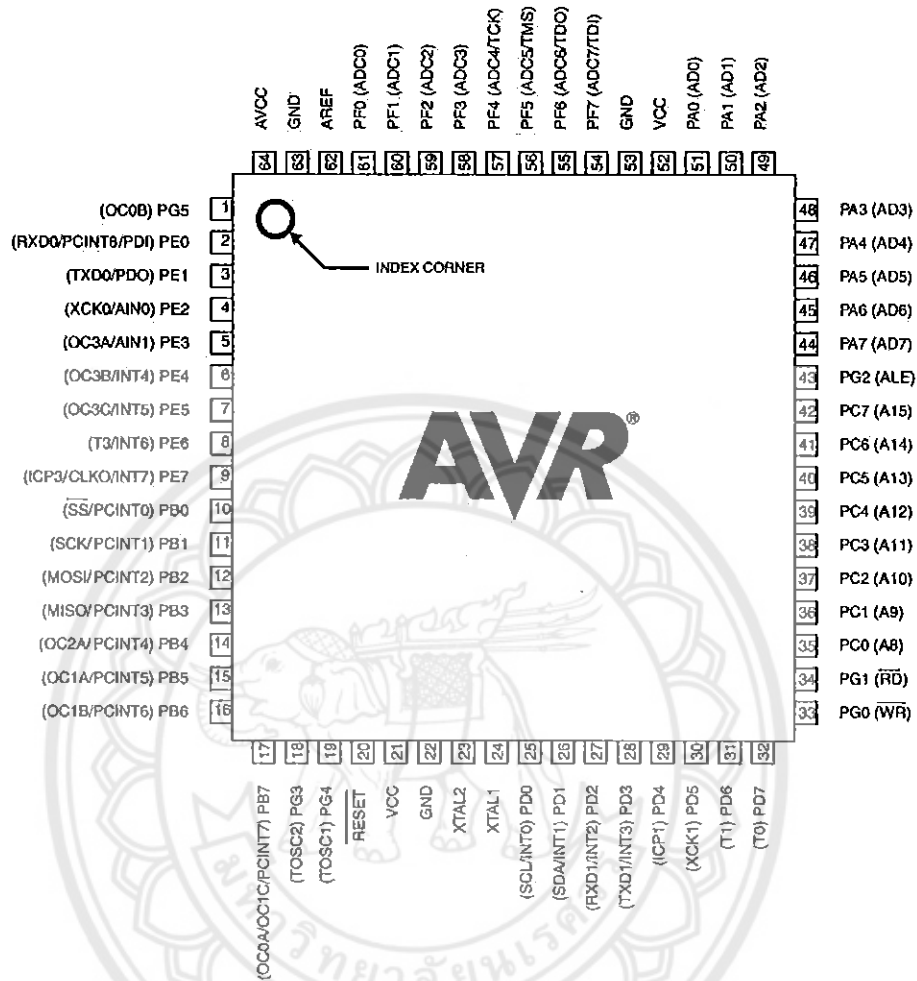


Table 1-1. CBGA-pinout ATmega640/1280/2560

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	GND	AREF	PF0	PF2	PF5	PK0	PK3	PK6	GND	VCC
B	AVCC	PG5	PF1	PF3	PF6	PK1	PK4	PK7	PA0	PA2
C	PE2	PE0	PE1	PF4	PF7	PK2	PK5	PJ7	PA1	PA3
D	PE3	PE4	PE5	PE6	PH2	PA4	PA5	PA6	PA7	PG2
E	PE7	PH0	PH1	PH3	PH5	PJ6	PJ5	PJ4	PJ3	PJ2
F	VCC	PH4	PH6	PB0	PL4	PD1	PJ1	PJ0	PC7	GND
G	GND	PB1	PB2	PB5	PL2	PD0	PD5	PC5	PC6	VCC
H	PB3	PB4	RESET	PL1	PL3	PL7	PD4	PC4	PC3	PC2
J	PH7	PG3	PB6	PL0	XTAL2	PL6	PD3	PC1	PC0	PG1
K	PB7	PG4	VCC	GND	XTAL1	PL5	PD2	PD6	PD7	PG0

Note: The functions for each pin is the same as for the 100 pin packages shown in Figure 1-1 on page 2.

Figure 1-3. Pinout ATmega1281/2561



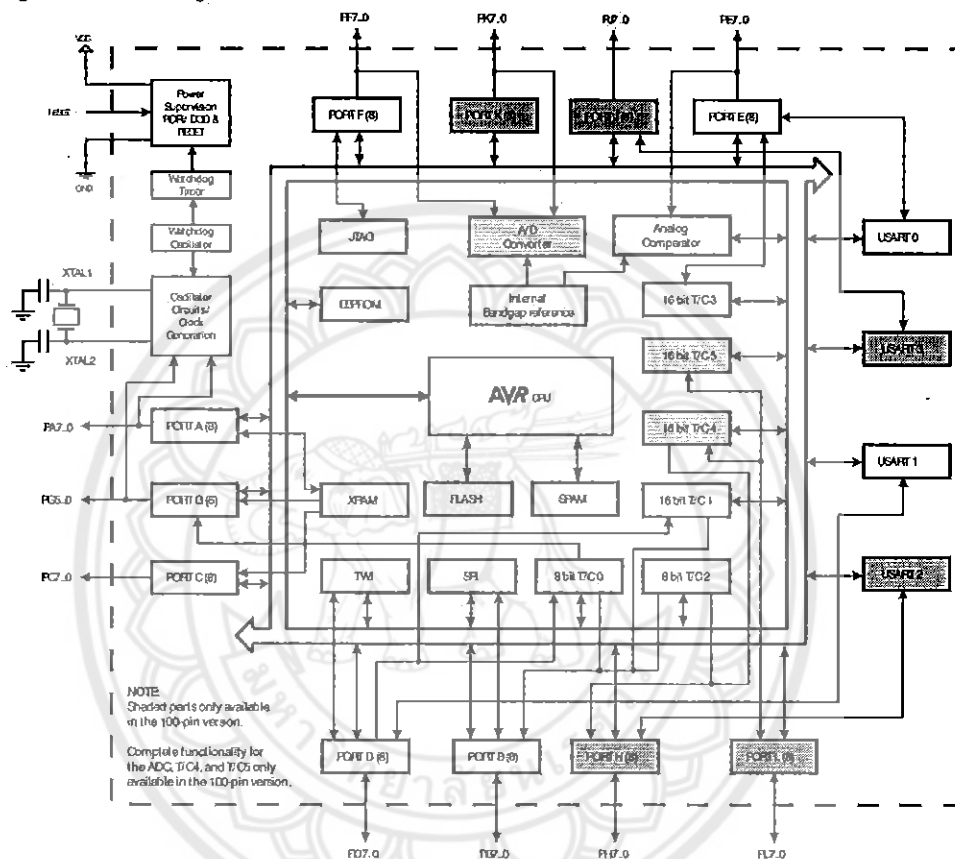
Note: The large center pad underneath the QFN/MLF package is made of metal and internally connected to GND. It should be soldered or glued to the board to ensure good mechanical stability. If the center pad is left unconnected, the package might loosen from the board.

## 2. Overview

The ATmega640/1280/1281/2560/2561 is a low-power CMOS 8-bit microcontroller based on the AVR enhanced RISC architecture. By executing powerful instructions in a single clock cycle, the ATmega640/1280/1281/2560/2561 achieves throughputs approaching 1 MIPS per MHz allowing the system designer to optimize power consumption versus processing speed.

### 2.1 Block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram



The Atmel® AVR® core combines a rich instruction set with 32 general purpose working registers. All the 32 registers are directly connected to the Arithmetic Logic Unit (ALU), allowing two independent registers to be accessed in one single instruction executed in one clock cycle. The resulting architecture is more code efficient while achieving throughputs up to ten times faster than conventional CISC microcontrollers.



The ATmega640/1280/1281/2560/2561 provides the following features: 64K/128K/256K bytes of In-System Programmable Flash with Read-While-Write capabilities, 4Kbytes EEPROM, 8Kbytes SRAM, 54/86 general purpose I/O lines, 32 general purpose working registers, Real Time Counter (RTC), six flexible Timer/Counters with compare modes and PWM, four USARTs, a byte oriented 2-wire Serial Interface, a 16-channel, 10-bit ADC with optional differential input stage with programmable gain, programmable Watchdog Timer with Internal Oscillator, an SPI serial port, IEEE® std. 1149.1 compliant JTAG test Interface, also used for accessing the On-chip Debug system and programming and six software selectable power saving modes. The Idle mode stops the CPU while allowing the SRAM, Timer/Counters, SPI port, and Interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the register contents but freezes the Oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or Hardware Reset. In Power-save mode, the asynchronous timer continues to run, allowing the user to maintain a timer base while the rest of the device is sleeping. The ADC Noise Reduction mode stops the CPU and all I/O modules except Asynchronous Timer and ADC, to minimize switching noise during ADC conversions. In Standby mode, the Crystal/Resonator Oscillator is running while the rest of the device is sleeping. This allows very fast start-up combined with low power consumption. In Extended Standby mode, both the main Oscillator and the Asynchronous Timer continue to run.

Atmel offers the QTouch® library for embedding capacitive touch buttons, sliders and wheels functionality into AVR microcontrollers. The patented charge-transfer signal acquisition offers robust sensing and includes fully debounced reporting of touch keys and includes Adjacent Key Suppression® (AKS®) technology for unambiguous detection of key events. The easy-to-use QTouch Suite toolchain allows you to explore, develop and debug your own touch applications.

The device is manufactured using the Atmel high-density nonvolatile memory technology. The On-chip ISP Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system through an SPI serial interface, by a conventional non-volatile memory programmer, or by an On-chip Boot program running on the AVR core. The boot program can use any interface to download the application program in the application Flash memory. Software in the Boot Flash section will continue to run while the Application Flash section is updated, providing true Read-While-Write operation. By combining an 8-bit RISC CPU with In-System Self-Programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel ATmega640/1280/1281/2560/2561 is a powerful microcontroller that provides a highly flexible and cost effective solution to many embedded control applications.

The ATmega640/1280/1281/2560/2561 AVR is supported with a full suite of program and system development tools including: C compilers, macro assemblers, program debugger/simulators, in-circuit emulators, and evaluation kits.

## 2.2 Comparison Between ATmega1281/2561 and ATmega640/1280/2560

Each device in the ATmega640/1280/1281/2560/2561 family differs only in memory size and number of pins. Table 2-1 summarizes the different configurations for the six devices.

Table 2-1. Configuration Summary

Device	Flash	EEPROM	RAM	General Purpose I/O pins	16 bits resolution PWM channels	Serial USARTs	ADC Channels
ATmega640	64KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1280	128KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1281	128KB	4KB	8KB	54	6	2	8
ATmega2560	256KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega2561	256KB	4KB	8KB	54	6	2	8

## 2.3 Pin Descriptions

### 2.3.1 VCC

Digital supply voltage.

### 2.3.2 GND

Ground.

### 2.3.3 Port A (PA7..PA0)

Port A is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port A output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port A pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port A pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port A also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 75.

### 2.3.4 Port B (PB7..PB0)

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port B has better driving capabilities than the other ports.

Port B also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 76.

### 2.3.5 Port C (PC7..PC0)

Port C is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port C output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port C also serves the functions of special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 79.

### 2.3.6 Port D (PD7..PD0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port D also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 80.

### 2.3.7 Port E (PE7..PE0)

Port E is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port E output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port E pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port E pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port E also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 82.

### 2.3.8 Port F (PF7..PF0)

Port F serves as analog inputs to the A/D Converter.

Port F also serves as an 8-bit bi-directional I/O port, if the A/D Converter is not used. Port pins can provide internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port F output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port F pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port F pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. If the JTAG interface is enabled, the pull-up resistors on pins PF7(TDI), PF5(TMS), and PF4(TCK) will be activated even if a reset occurs.

Port F also serves the functions of the JTAG interface.

### 2.3.9 Port G (PG5..PG0)

Port G is a 6-bit I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port G output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port G pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port G pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port G also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on page 86.

### 2.3.10 Port H (PH7..PH0)

Port H is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port H output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port H pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port H pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port H also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 88.

### 2.3.11 Port J (PJ7..PJ0)

Port J is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port J output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port J pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port J pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. Port J also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 90.

**2.3.12 Port K (PK7..PK0)**

Port K serves as analog inputs to the A/D Converter.

Port K is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port K output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As Inputs, Port K pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port K pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port K also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 92.

**2.3.13 Port L (PL7..PL0)**

Port L is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port L output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As Inputs, Port L pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port L pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port L also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on page 94.

**2.3.14  $\overline{\text{RESET}}$** 

Reset Input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in "System and Reset Characteristics" on page 360. Shorter pulses are not guaranteed to generate a reset.

**2.3.15 XTAL1**

Input to the inverting Oscillator amplifier and input to the Internal clock operating circuit.

**2.3.16 XTAL2**

Output from the inverting Oscillator amplifier.

**2.3.17 AVCC**

AVCC is the supply voltage pin for Port F and the A/D Converter. It should be externally connected to  $V_{CC}$ , even if the ADC is not used. If the ADC is used, it should be connected to  $V_{CC}$  through a low-pass filter.

**2.3.18 AREF**

This is the analog reference pin for the A/D Converter.





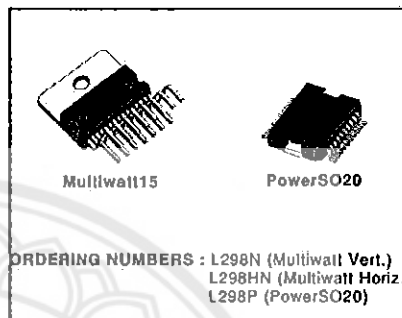
L298

## 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)

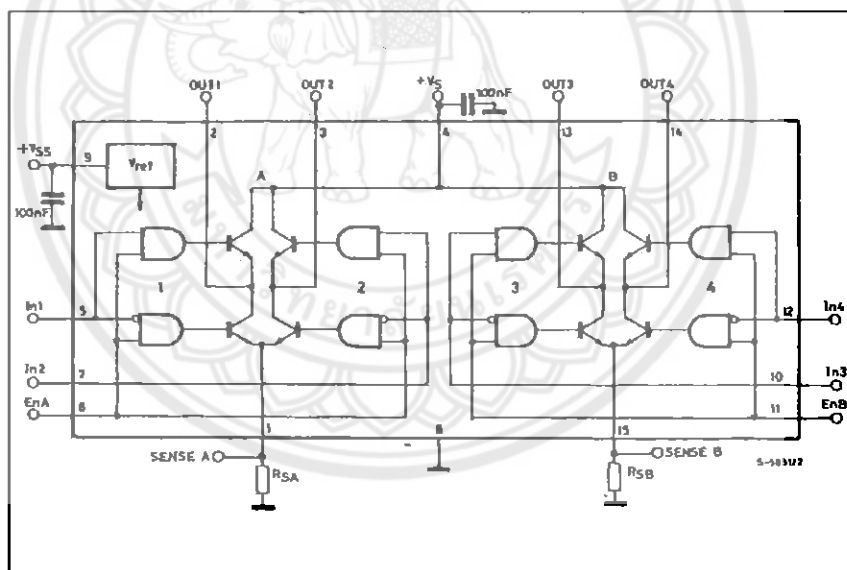
## DESCRIPTION

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

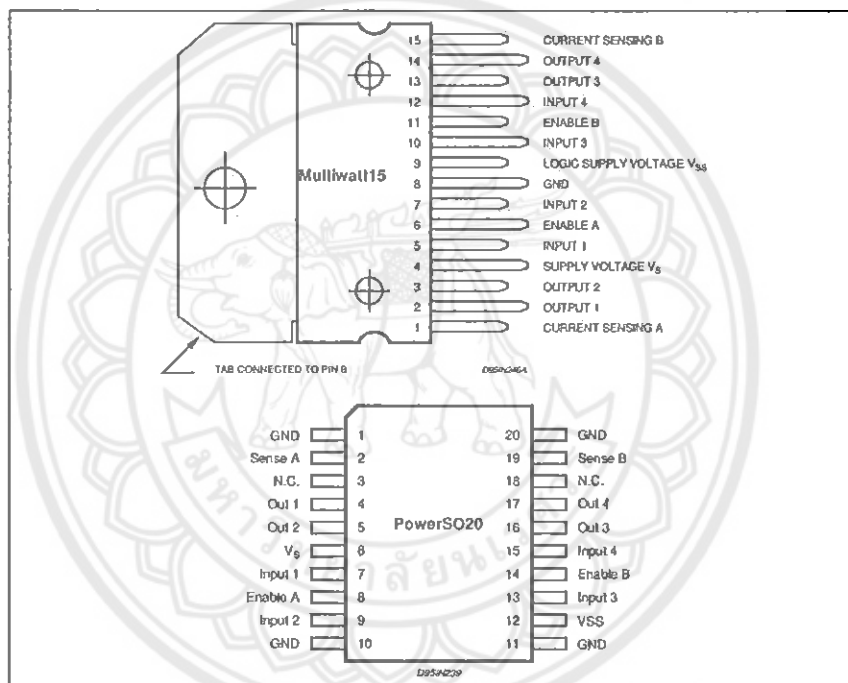


## L298

## 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 ( $t = 100\mu s$ ) - Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ ) - DC Operation	3 2.5 2	A A A
$V_{sens}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
$T_{stg}, T_J$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

## PIN CONNECTIONS (top view)



## THERMAL DATA

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

(\*) Mounted on aluminum substrate

L298

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

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

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

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>S</sub>	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V <sub>B1</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> = H; I <sub>L</sub> = 0	V <sub>i</sub> = L V <sub>i</sub> = H V <sub>i</sub> = X	24 7	36 12	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>IL</sub>	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>i</sub> = L			-10	μA
I <sub>IH</sub>	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>i</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>en</sub> = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V <sub>en</sub> = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>en</sub> = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = L			-10	μA
I <sub>en</sub> = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V <sub>en</sub> = H ≤ V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>CEsat</sub> (H)	Source Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A I <sub>L</sub> = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V <sub>CEsat</sub> (L)	Sink Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V <sub>CEsat</sub>	Total Drop	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V <sub>sens</sub>	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V







ภาคผนวก ก

รายละเอียดข้อมูลของ L324

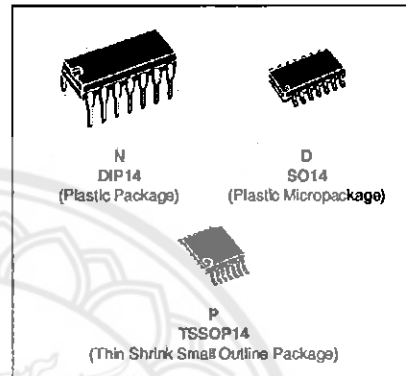
มหาวิทยาลัยพระนคร



## LM124 LM224 - LM324

### LOW POWER QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE GAIN BANDWIDTH : 1.3MHz
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LARGE VOLTAGE GAIN : 100dB
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/AMPLI : 375µA
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 20nA
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE : 5mV max.  
(for more accurate applications, use the equivalent parts LM124A-LM224A-LM324A which feature 3mV max)
- LOW INPUT OFFSET CURRENT : 2nA
- WIDE POWER SUPPLY RANGE :  
SINGLE SUPPLY : +3V TO +30V  
DUAL SUPPLIES : ±1.5V TO ±15V



#### DESCRIPTION

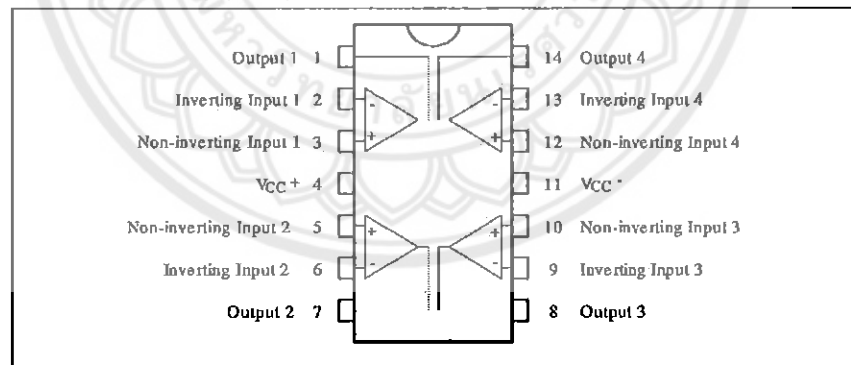
These circuits consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers. They operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

#### ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
LM124	-55°C, +125°C	•	•	•
LM224	-40°C, +105°C	•	•	•
LM324	0°C, +70°C	•	•	•

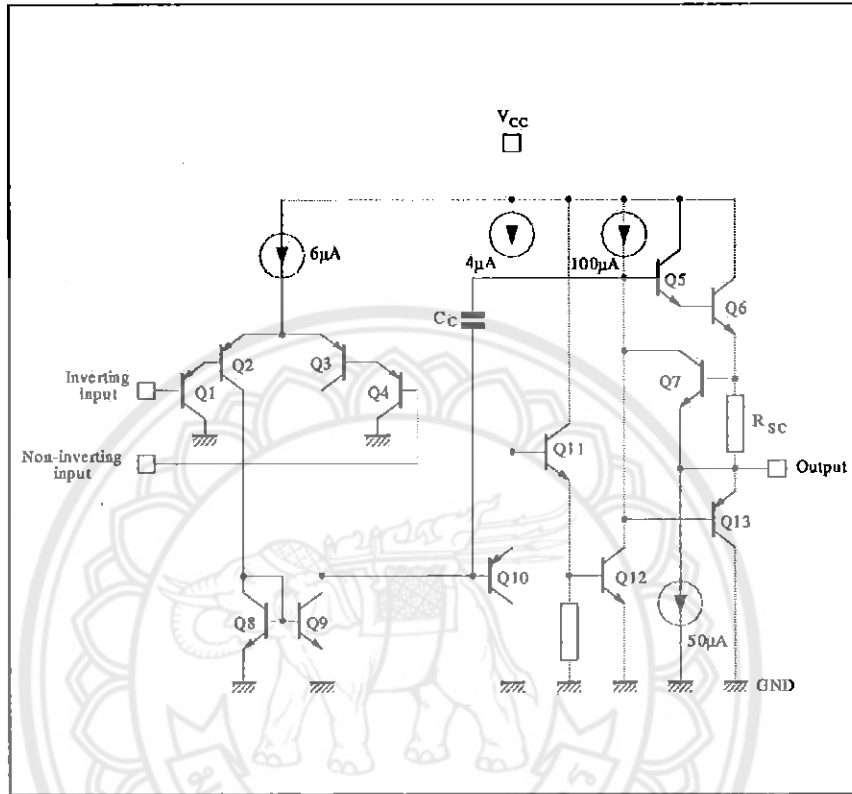
Example : LM224N

#### PIN CONNECTIONS (top view)



LM124 - LM224 - LM324

SCHEMATIC DIAGRAM (1/4 LM124)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	LM124	LM224	LM324	Unit
$V_{cc}$	Supply Voltage		$\pm 16$ or 32		V
$V_i$	Input Voltage		-0.3 to +32		V
$V_d$	Differential Input Voltage - (*)	+32	+32	+32	V
$P_{tot}$	Power Dissipation	500	500	600	mW
		-	400	400	mW
-	Output Short-circuit Duration - (note 1)		Infinite		
$I_{in}$	Input Current - (note 6)	50	50	50	mA
$T_{oper}$	Operating Free Air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}C$
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-65 to +150	-65 to +150	-65 to +150	$^{\circ}C$

## LM124 - LM224 - LM324

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC} = +5V$ ,  $V_{CC} = \text{Ground}$ ,  $V_O = 1.4V$ ,  $T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	LM124 - LM224 - LM324			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
$V_{io}$	Input Offset Voltage (note 3) $T_{amb} = +25^\circ C$ LM324 $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ LM324		2	5 7 9	mV
$I_{io}$	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 100	nA
$I_b$	Input Bias Current (note 2) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	150 300	nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $V_{CC} = +15V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $V_O = 1.4V$ to $11.4V$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	100		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_S \leq 10k\Omega$ ) ( $V_{CC} = 5V$ to $30V$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	65 65	110		dB
$I_{CC}$	Supply Current, all Amp, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +5V$ $V_{CC} = +30V$ $V_{CC} = +5V$ $V_{CC} = +30V$		0.7 1.5 0.8 1.5	1.2 3 1.2 3	mA
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range ( $V_{CC} = +30V$ ) - (note 4) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0 0		$V_{CC} - 1.5$ $V_{CC} - 2$	V
CMR	Common-mode Rejection Ratio ( $R_S \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 60	80		dB
$I_{source}$	Output Current Source ( $V_{id} = +1V$ ) $V_{CC} = +15V$ , $V_O = +2V$	20	40	70	mA
$I_{sink}$	Output Sink Current ( $V_{id} = -1V$ ) $V_{CC} = +15V$ , $V_O = +2V$ $V_{CC} = +15V$ , $V_O = +0.2V$	10 12	20 50		mA $\mu A$

## LM124 - LM224 - LM324

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	LM124 - LM224 - LM324			Unit
		Min.	Typ.	Max.	
V <sub>OH</sub>	High Level Output Voltage (V <sub>CC</sub> = +30V) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub> T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub> (V <sub>CC</sub> = +5V, R <sub>L</sub> = 2kΩ) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>	R <sub>L</sub> = 2kΩ	26	27	V
		R <sub>L</sub> = 10kΩ	26	27	
			27	28	
			27		
			3.5		
		3			
V <sub>OL</sub>	Low Level Output Voltage (R <sub>L</sub> = 10kΩ) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>		5	20 20	mV
SR	Slew Rate V <sub>CC</sub> = 15V, V <sub>I</sub> = 0.5 to 3V, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, unity gain)		0.4		V/μs
GBP	Gain Bandwidth Product V <sub>CC</sub> = 30V, f = 100kHz, V <sub>n</sub> = 10mV R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF		1.3		MHz
THD	Total Harmonic Distortion f = 1kHz, A <sub>V</sub> = 20dB, R <sub>L</sub> = 2kΩ, V <sub>O</sub> = 2V <sub>pp</sub> C <sub>L</sub> = 100pF, V <sub>CC</sub> = 30V		0.015		%
e <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Voltage f = 1kHz, R <sub>s</sub> = 100Ω, V <sub>CC</sub> = 30V		40		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
DV <sub>IO</sub>	Input Offset Voltage Drift		7	30	μV/°C
DI <sub>IO</sub>	Input Offset Current Drift		10	200	pA/°C
V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub>	Channel Separation (note 5) 1kHz ≤ f ≤ 20kHz		120		dB

Notes: 1. Short-circuits from the output to V<sub>CC</sub> can cause excessive heating if V<sub>CC</sub> > 15V. The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of V<sub>CC</sub>. Destructive dissipation can result from simultaneous short-circuit on all amplifiers.

2. The direction of the input current is out of the IC. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

3. V<sub>O</sub> = 1.4V, R<sub>L</sub> = 0Ω, 5V < V<sub>CC</sub> < 30V, 0 < V<sub>E</sub> < V<sub>CC</sub> - 1.5V

4. The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is V<sub>CC</sub> - 1.5V, but either or both inputs can go to +32V without damage.

5. Due to the proximity of external components insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

6. This input current only exists when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistor becoming forward biased and thereby acting as input diodes clamps. In addition to this diode action, there is also NPN parasitic action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the Op-amps to go to the V<sub>CC</sub> voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative.

This is not destructive and normal output will set up again for input voltage higher than -0.3V.

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายตฉานนท์ พุ่มดี

ภูมิลำเนา 242 ม.6 ต.สมอแข อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน  
ผดุงราษฎร์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี  
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: [tachanonp56@email.nu.ac.th](mailto:tachanonp56@email.nu.ac.th)



ชื่อ นายนครินทร์ นิลกระจ่าง

ภูมิลำเนา 254 ม.3 ต.พลาชุมพล อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน  
พิษณุโลกพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี  
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: [nakharinn56@email.nu.ac.th](mailto:nakharinn56@email.nu.ac.th)



ชื่อ นายมนตรี หัวสัว

ภูมิลำเนา 56 ม.10 ต.ปากน้ำ อ.สวรรคโลก จ.สุโขทัย 64110

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน  
ศรีสำโรงชนูปถัมภ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี  
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: [montrih56@email.nu.ac.th](mailto:montrih56@email.nu.ac.th)