

อธิบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



สำนักหอสมุด



การควบคุมความเร็วหุ่นยนต์เมื่อโหลดและพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลง
โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี

**MOBILE ROBOT SPEED CONTROL UNDER VARIABLE LOAD AND
SLOPE USING FUZZY LOGIC CONTROLLER**

นางสาวบุญพิทักษ์ เขียรพันธ์พงศ์ รหัส 56362904
นางสาววิริยภรณ์ ศรีภูมมา รหัส 56363161
นายอรรถพล ปัญญารุ่ง รหัส 56363352

ด
น CD

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
วันที่รับเข้า 24 ส.ค. 2559
เลขหนังสือ 17219982 ✓
เลขเรียกหนังสือ ๗๕

CD-STL 61

๗๕๓ ก
๒๕๕๙

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2559



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ เมื่อโหลดและพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวบุญพิทักษ์ เขียวพันธ์พงศ์ รหัส 56362904
นางสาววิริยภรณ์ ศรีภุมมา รหัส 56363161
นายอรรถพล ปัญญาธิง รหัส 56363352


ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มุฑิตา สงฆ์จันทร์


สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

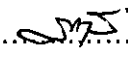
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรือรัมย์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มุฑิตา สงฆ์จันทร์)


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


.....กรรมการ
(ดร. สราวุดี วัฒนวงศ์พิทักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ เมื่อโหลดและพื้นเอียงมีการ
เปลี่ยนแปลง โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวบุญพิทักษ์ เชียรพันธ์พงศ์ รหัส 56362904
นางสาววิริยภรณ์ ศรีภุมมา รหัส 56363161
นายอรรถพล ปัญญารุ่ง รหัส 56363352

ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มุขिता สงฆ์จันทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้การควบคุมแบบฟัซซีเป็นการ
อนุमानแบบแมมดานิ เพื่อให้ความเร็วของหุ่นยนต์มีค่าคงที่ตามที่กำหนดเมื่อโหลดของหุ่นยนต์มี
การเปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 0 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัม โดยค่าอินพุตของฟัซซีเป็นค่าการเปลี่ยนแปลง
โหลดน้ำหนักที่ส่งค่ามาจากโหลดเซลล์ชนิดเสตรนเกจ ค่าการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้น และ
ค่าการเปลี่ยนความสูงของพื้น ซึ่งมีค่าเอาต์พุตของฟัซซีเป็นค่าตัวตั้งไซเกิลที่ใช้ในการควบคุม
ความเร็วของมอเตอร์ โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร็วรอบมอเตอร์ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการใช้
ตัวควบคุมแบบฟัซซีในการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ เมื่อ โหลด ความเอียงของพื้น และความสูง
ของพื้นมีการเปลี่ยนแปลงนั้นยังสามารถควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดได้

Project title Mobile Robot Speed Control Under Variable Load And Slope Using Fuzzy Logic Controller

Name Miss.Boonpitak Thearpanpong ID. 56362904
Miss.Wiriyaporn Sripnumma ID. 56363161
Mr.Attapon Panyarung ID. 56363352

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

Major Electrical Engineering

Department Electrical and Computer Engineering

Academic year 2016

Abstract

This project presents the controlling of robot speed using fuzzy logic. The fuzzy is designed to use mamdani inference. The processed is control the robot to speed at the desired constant when the load is varied between 0 to 5 kilograms. The input of fuzzy controller is the load variable measured by Strain Gauge load cell, The slope of the plane and the height of the plane. The output is the duty cycle used to control the motor is speed. The results show that it is capable to use fuzzy logic method to control the robot at the desired speed when the load, the slope of plane and the height of plane is varied.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกิตา สงฆ์จันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด คณะผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอระลึกถึงความกรุณาของท่านไว้ตลอดไป

ขอขอบพระคุณ บิดามารดาซึ่งมีส่วนช่วยในด้านกำลังใจและส่วนช่วยในด้านกำลังใจที่ทำให้ฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ให้ผ่านไปได้อย่างราบรื่น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆ ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สรารุติ วัฒนวงศ์พิทักษ์ สำหรับคำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำโครงการการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลลจิก รวมถึงข้อมูลและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลลจิก ซึ่งได้นำมาประกอบในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวถึงทุกท่าน ที่ต่างมีส่วนร่วมในการชี้แนะ ให้ข้อมูลและให้ความรู้เกี่ยวกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงออกมาตามวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยต้องการมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวบุญพิทักษ์ เชียรพันธ์พงศ์

นางสาววิริภรณ์ ศรีภุมมา

นายอรรถพล ปัญญารุ่ง

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	4
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	9
2.3 โหลดเซลล์.....	16
2.4 เซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ.....	21
2.5 อัลตราโซนิก.....	22
2.6 ตรีโกณมิติหรือพีชคณิต.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	
3.1 ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว.....	38
3.2 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว.....	39
3.3 ออกแบบฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว.....	45
3.4 ออกแบบตัวควบคุมแบบพีซี.....	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 การทดลองหาความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่โหลคน้ำหนักต่างกัน	60
4.2 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นระนาบ	62
4.3 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 10 องศา.....	69
4.4 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 20 องศา.....	76
4.5 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 10 องศา.....	81
4.6 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 20 องศา.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	88
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา	89
5.3 การนำไปพัฒนาและต่อยอด.....	89
เอกสารอ้างอิง	91
ภาคผนวก ก รายละเอียดข้อมูลของ AVR ATMEGA2560	92
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลของ L298N.....	102
ภาคผนวก ค รายละเอียดข้อมูล LM393.....	106
ภาคผนวก ง รายละเอียดข้อมูล GY-521.....	118
ภาคผนวก จ รายละเอียดข้อมูล HC-SR04.....	122
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	126

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ 2
3.1	ค่าของเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ..... 47
3.2	ตัวแปรและค่าเชิงภาษา..... 48
3.3	ข้อมูลการพยากรณ์ค่าความเป็นไปได้ของเอาต์พุต 58
4.1	ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่แต่ละโหลคน้ำหนัก..... 61
4.2	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที 63
4.3	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที..... 65
4.4	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที..... 66
4.5	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที..... 67
4.6	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที..... 68
4.7	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที..... 71
4.8	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลคน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที..... 72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	73
4.10 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	74
4.11 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	75
4.12 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	77
4.13 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	78
4.14 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	79
4.15 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	82
4.16 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 องศาเป็น 0 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	83
4.17 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 20 องศา ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์..... 4
2.2	ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATmega2560 6
2.3	ตำแหน่งขาของชิป ATmega2560 8
2.4	วงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 9
2.5	วงจรมอเตอร์แบบขนาน..... 11
2.6	วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม..... 13
2.7	กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม 13
2.8	กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม(1) 14
2.9	การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนค่าแรงดัน..... 14
2.10	การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนค่าแรงดัน(1)..... 15
2.11	สัญญาณการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณ มาเปรียบเทียบกับันที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ดิวตี้ไซเคิล 15
2.12	สัญญาณ การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณ มาเปรียบเทียบกับันที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ดิวตี้ไซเคิล 16
2.13	สัญญาณ การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณ มาเปรียบเทียบกับันที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ดิวตี้ไซเคิล 16
2.14	โพลคเชลล์แบบสเตรนเกจ..... 16
2.15	สเตรนเกจ (ก) ประเภทยึดติด (ข) ประเภทไม่ยึดติด 18
2.16	วงจรการบีบอัดของสเตรนเกจในวงจรวิทส โคนบริดจ์ 20
2.17	วงจรรบริดจ์เมื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 20
2.18	การควบคุมโดยตรง..... 25
2.19	การควบคุมแบบไปข้างหน้า..... 26
2.20	การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว 26
2.21	โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีซี..... 27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะให้ค่าระดับ ความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62..... 30
2.23	อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ ให้ค่าระดับ ความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64..... 31
2.24	การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 4) 34
2.25	การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 5) 34
2.26	การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 7) 34
2.27	การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 8) 35
2.28	การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด..... 35
2.29	ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการ เปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$ 36
2.30	การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิ 37
3.1	แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว..... 38
3.2	การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว 39
3.3	โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว ก 40
3.4	โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว ข 40
3.5	จอแสดงผลเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนด ไค โอคดเปล่งแสงสีเขียว และเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่แตกต่างไปจากความเร็วที่กำหนด ไค โอคดเปล่งแสงสีแดง..... 41
3.6	มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง 41
3.7	แบบจำลองรางของการทดลองที่พื้นระนาบ 42
3.8	แบบจำลองรางของการทดลองที่พื้นเอียง 10 องศา..... 42
3.9	แบบจำลองรางของการทดลองที่พื้นเอียง 20 องศา..... 42
3.10	รางการทดลองที่พื้นระนาบ 43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	รายการทดลองที่พื้นเอียง 10 43
3.12	รายการทดลองที่พื้นเอียง 20 43
3.13	หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นระนาบ 44
3.14	หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นเอียง 10 องศา 44
3.15	หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นเอียง 20 องศา 44
3.16	วงจรจับมอเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ L298N 46
3.17	รูปแบบการอนุमानอินพุตและเอาต์พุตของพีซีซี 49
3.18	พีซีซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก 49
3.19	พีซีซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้น 49
3.20	พีซีซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้น 50
3.21	พีซีซีเซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ 50
3.22	มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ (ก) 55
3.23	มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ (ข) 56
3.24	การประมวลผลค่าเอาต์พุตด้วยวิธีแมมดानी (ก) 56
3.25	ผลของการรวมกฎ weight 57
3.26	ผลของการรวมกฎ slope 57
3.27	ผลของเอาต์พุตของกฎข้อที่ 3 57
3.28	การประมวลผลค่าเอาต์พุตด้วยวิธีแมมดानी (ข) 58
4.1	กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อ โหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัมที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที 64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัมที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที	78
4.12 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัมที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที	79
4.13 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัมที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที	80
4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ที่กำหนดเมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับจาก 0 องศาเป็น 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที	82
4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ที่กำหนดเมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับจาก 10 องศาเป็น 0 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที	84
4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ที่กำหนดเมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับจาก 0 องศาเป็น 20 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในระบบภาคขนส่งในระบบของโรงงานอุตสาหกรรม การขนส่ง (transortation) ที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ การเคลื่อนย้ายวัตถุจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่ง ซึ่งส่วนใหญ่ภายในระบบโรงงานอุตสาหกรรมที่พบเห็นได้ จะนิยมเป็นแบบสายพานลำเลียง ระบบการขนส่งวัสดุเป็นระบบที่เข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม ทรัพยากรที่ใช้ควรจะมีคุณสมบัติและประโยชน์ในการใช้สอยที่เหมาะสมและช่วยลดต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ดังนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายวัตถุจึงไม่ได้หมายความว่าถึงการจัดจัดการเคลื่อนย้ายให้หมดไป หากแต่จะพยายามลดปัญหาให้น้อยลง สรุปได้คือ ทำอย่างไรให้การขนส่งเป็นไปอย่างสะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย และประหยัด เพื่อการบริหารจัดการสินค้าของโรงงานอุตสาหกรรมเกิดความมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ปัจจัยเหล่านี้ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสถานะแวดล้อมภายในโรงงานอุตสาหกรรมและกระบวนการขนส่ง จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นระบบขนส่งนั้นจะนิยมเป็นแบบสายพานลำเลียง ซึ่งแต่ละโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการออกแบบที่แตกต่างกันไป เราไม่สามารถปฏิเสธได้ว่าการลำเลียงแบบสายพานนั้นมักจะมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นระนาบ เพื่อชะลอวัสดุหรือเปลี่ยนขั้นตอนการผลิต อาจทำให้การขนส่งนี้เกิดความล่าช้าและเสียเวลา จากเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าและมีความหลากหลาย จึงนำมาซึ่งการวิเคราะห์ โดยใช้ระบบสมองกลฝังตัว (arduino) ควบคุมและตรรกศาสตร์คลุมเคลือ (Fuzzy Logic) เพื่อนำมาประยุกต์ในการสร้างหุ่นยนต์จำลองและช่วยพัฒนาการขนส่ง โดยการควบคุมความเร็วให้คงที่เมื่อหุ่นยนต์จำลองมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด และพื้นระนาบมีการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้นจึงจัดทำโครงการการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์เมื่อโหลดน้ำหนักและพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลง และสร้างหุ่นยนต์จำลองขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

สร้างหุ่นยนต์จำลองที่สามารถควบคุมความเร็วได้โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีเมื่อโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์และพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลงระดับ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1.5.1 สามารถควบคุมความเร็วหุ่นยนต์ให้คงที่ เพื่อให้การขนส่งทำงานอย่างเป็นระบบ

1.5.2 สามารถนำระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้งานกับระบบขนส่งภายในโรงงานอุตสาหกรรมได้

1.6 งบประมาณ

1. ค่าแผงวงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	4,000 บาท
2. ค่าล้อและมอเตอร์	1,000 บาท
3. ค่าอุปกรณ์โครงสร้าง	2,000 บาท
4. ค่าแบตเตอรี่	1,180 บาท
5. ค่าเอกสาร	1,200 บาท
6. ค่าวัสดุอื่นๆ	1,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (หนึ่งหมื่นสามร้อยแปดสิบบาทถ้วน)	<u>10,380 บาท</u>
หมายเหตุ: ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	



บทที่ 2

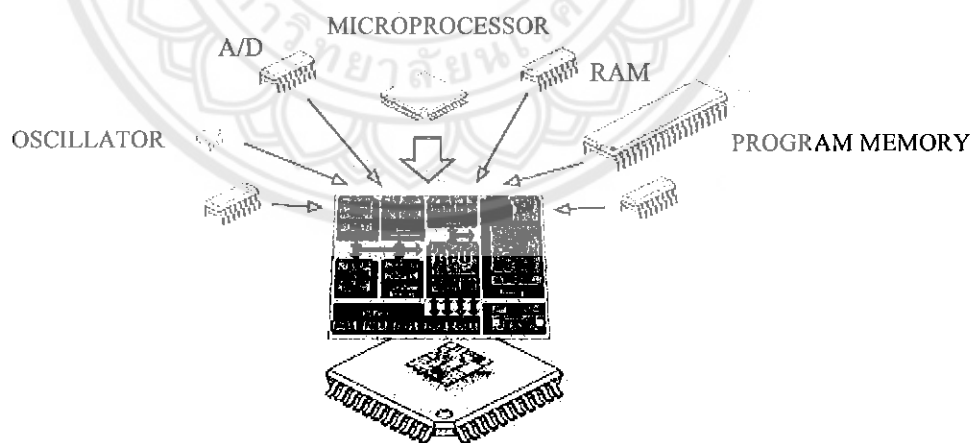
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะรวบรวมหลักการทํางาน และทฤษฎีขององค์ประกอบที่มีความจําเป็นต่อการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมืการทำงานที่สัมพันธ์กันของโครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว ทั้งระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และระบบควบคุมความเร็ว

2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) คืออุปกรณ์ชิปไอซีพิเศษที่เราสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานที่ต้องการ ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจํา และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวกัน

2.1.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: central processing unit) ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางควบคุมการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์รับข้อมูลมาประมวลผลข้อมูลตามคำสั่งของโปรแกรม และส่งผลลัพธ์ออกไปยังหน่วยแสดงผล
2. หน่วยความจำ (memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือหน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลักเปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของคอมพิวเตอร์ คือข้อมูลใดๆที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูลใช้ในการคำนวณของซีพียูและเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยงข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็นหน่วยความจำแรมซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM: electrically erasable PROMs) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง
3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต (port) มี 2 ลักษณะ คือพอร์ตอินพุต (input port) มีหน้าที่รับสัญญาณเข้าและพอร์ตเอาต์พุต (output port) มีหน้าที่ส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ภายนอก
4. ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส คือเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (data bus) บัสแอดเดรส (address bus) และบัสควบคุม (control bus)
5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับกำหนัดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกา มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ดีขึ้น ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

2.1.2 ประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีด้วยกันหลากหลายประเภทแบ่งตามสถาปัตยกรรม

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC
2. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS51
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR
4. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Basic Stamp

5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PSOC
6. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MSP
7. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 68HC
8. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล H8
9. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล RABBIT
10. ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Z80

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้เป็นตระกูล AVR เพราะคุณสมบัติหลักคือ สามารถอินเตอร์เฟซผ่าน USB ได้โดยตรง ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลอื่นๆ สามารถทำได้เพียงต่อผ่านพอร์ต RS-232 เท่านั้น

2.1.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATmega2560



รูปที่ 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ ATmega2560

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถาปัตยกรรมภายในเป็นแบบ RISC (reduced instruction set computer) โดยใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 1 ลูกต่อการปฏิบัติงานใน 1 คำสั่ง ประกอบด้วยหน่วยความจำโปรแกรมภายในที่เป็นแบบแฟลช โปรแกรมข้อมูลได้แบบ ISP (in - system programming)

อาดูยโน (arduino) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบโอเพนซอร์ซ (open source) คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ (hardware) และซอฟต์แวร์ (software) ตัวบอร์ดอาดูยโนถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย Arduino Mega 2560 บอร์ดในของตระกูลอาดูยโน มีคุณสมบัติใช้ชิพ ATmega2560

1. หน่วยความจำแฟลช จำนวน 256 กิโลไบต์ (KB)
2. หน่วยความจำแบบแอสแรม จำนวน 8 กิโลไบต์
3. แรงดันของระบบ 5 โวลต์
4. ระบบกำเนิดความถี่สัญญาณแบบ PWM (pulse width modulation) จำนวน 14 ขา
5. สัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกข้อมูลดิจิทัล (digital input/output) จำนวน 54 ขา
6. สัญญาณขาเข้าแอนะล็อก จำนวน 16 ขา
7. ระบบการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอะซิงโครนัส UART (universal asynchronous receiver-/transmitter) จำนวน 4 ช่อง
8. ระบบการสื่อสารข้อมูลด้วยระบบบัส I2C (inter integrate circuit bus) จำนวน 1 ช่อง
9. ระบบการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบซิงโครนัส (serial peripheral interfaces) จำนวน 1 ช่อง
10. โปรแกรมผ่านอาดูยโนไอดีอี (arduino integrated development environment)
11. โปรแกรมผ่านข้อกำหนดมาตรฐานของบัสการสื่อสารแบบอนุกรม (universal serial bus)
12. มี ISP (in system programming) สำหรับโปรแกรม

โครงสร้างภายนอกและตำแหน่งขา

มีพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต 100 PIN TQFP ใช้งานทั่วไปจำนวน 86 ขา เป็นดิจิทัลอินพุต/เอาต์พุต จำนวน 54 ช่อง (5 โวลต์ TTL LOGIC) และแอนะล็อก จำนวน 16 ช่อง (เป็นแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ขนาด 10 บิต 16 ช่อง) 4 ช่องเป็น UART แบบ 5 โวลต์ TTL LOGIC

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

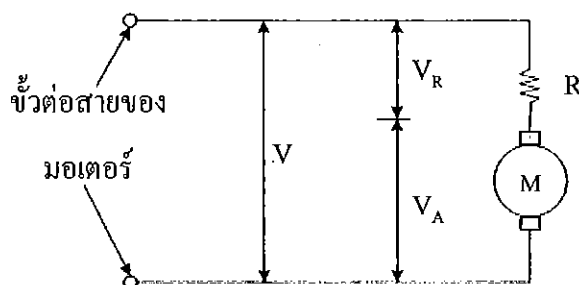
มอเตอร์ไฟฟ้า คือ เครื่องกลไฟฟ้า (electromechanical energy) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (electric energy) เป็นพลังงานกล (mechanical energy) ในรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบหมุน มอเตอร์ไฟฟ้ามีโครงสร้างเบื้องต้นที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแม่เหล็กถาวรและส่วนของขดลวดตัวนำ ซึ่งโครงสร้างคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าอาศัยสนามแม่เหล็ก 2 ชุดที่เกิดขึ้นได้แก่ สนามแม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ ส่งผลให้เกิดการผลักดันกันขึ้นของสนามแม่เหล็กทั้งสองทำให้ขดลวดตัวนำที่วางอยู่กลางแม่เหล็กถาวรเกิดการหมุนเครื่องไปได้

2.2.1 หลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กซึ่งมีสัดส่วนของแรงขึ้นกับกระแสแรงของสนามแม่เหล็ก โดยแรงจะเกิดขึ้นเป็นมุมฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็ก ขณะที่ทิศทางของแรงกลับตรงกันข้ามกัน ถ้าหากกระแสของสนามแม่เหล็กไหลย้อนกลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส และสนามแม่เหล็กเป็นผลทำให้ทิศทางของแรงเปลี่ยนไป ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้มอเตอร์กระแสตรงกลับทิศทางการทำงานได้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวรซึ่งจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้า โดยปกติส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ยึดอยู่กับที่ และขดลวดเหนี่ยวนำจะพันอยู่กับส่วนที่เป็นแกนหมุนของมอเตอร์

2.2.2 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง

ในการอธิบายคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรงให้ละเอียดนั้นต้องพิจารณาแรงดันที่ป้อนและความต้านทานของโรเตอร์ด้วย



รูปที่ 2.4 วงจรภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยสมมติให้ท่อนโรเตอร์ไม่มีความต้านทานอยู่เลย อนุกรมกับความต้านทานซึ่งในที่นี้ก็คือ ความต้านทานของขดลวดนั่นเอง แรงดันที่ขั้วต่อสายของมอเตอร์ก็คือผลบวกระหว่างแรงดันที่ท่อนโรเตอร์ (V_A) และแรงดันตกคร่อมความต้านทานขดลวด (V_R)

แรงดัน V_A ถูกเรียกว่า แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำป้อนกลับ (back emf) ซึ่งเกิดขึ้นในโรเตอร์ ขณะที่หมุนแรงดันที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของ ตัวนำในสนามแม่เหล็ก สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และความเร็วในการเคลื่อนที่ของ ตัวนำ แรงดันที่เกิดขึ้นจะมีขั้วตรงกันข้ามกับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และ แปรผันตรงกับความเร็วในการหมุน ผลบวกของแรงดันที่ท่อนโรเตอร์ (V_A) และแรงดันตกคร่อมขดลวด (V_R) ต้อง เท่ากับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (V)

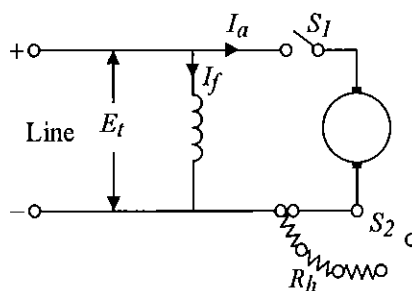
$$V = V_A + V_R \quad (2.1)$$

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

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (2.2)$$

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนจะมีความเร็ว และ V_A เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามความเร็ว V_R ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความแตกต่างระหว่าง V_A และ V จะเริ่มลดลงกระแส I ก็เริ่มลดลงเช่นกันขณะที่มอเตอร์ยังมีความเร็ว อยู่ ความเร็วจะเพิ่มขึ้น แรงบิดจะลดลงจนกว่าจะถึงจุดซึ่งแรงบิดของมอเตอร์รับภาระโหลดได้ สมดุลพอดี ขณะที่มอเตอร์ไม่มีโหลดและหมุนอย่างอิสระจะมีเพียงค่าความฝืดของแบร์ริง และแรงต้านอากาศทำให้ V_A เกือบเท่ากับค่า V

กำลังงานที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายจะเปลี่ยนแปลงโดยอัตโนมัติเพื่อให้เหมาะกับโหลด ทางกล จากรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงถึงมอเตอร์แบบขนาน (Shunt motor) สมมติให้สวิตช์ S , อยู่ในตำแหน่งวงจรปิด และมอเตอร์กำลังหมุนด้วยความเร็วคงที่ขณะขับ โหลดทางกลอย่างเช่นเครื่องกลึง ในโรงงาน แรงดัน E , ที่จ่ายให้มอเตอร์จะถูกรักษาให้คงที่โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งกำลังไฟฟ้า ให้กับมอเตอร์ ดังนั้นกระแส I_f จะคงที่รวมถึงฟลักซ์แม่เหล็กที่มันกำเนิดขึ้นมาก็คงที่ด้วย



รูปที่ 2.5 วงจรมอเตอร์แบบขนาน

ถ้าโหลดทางกลของมอเตอร์เพิ่มขึ้น แรงบิดที่ขับ โหลดที่เกิดจากกระแสอาร์เมเจอร์จะไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดจากโหลดที่เพิ่มขึ้นมากขึ้น ทำให้มอเตอร์หมุนช้าลง ขณะที่ความเร็วลดลงจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ (E_b) ลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้กระแสจำนวนมากไหลเข้าขดลวดอาร์เมเจอร์ยังส่งผลให้แรงบิดในการขับ โหลดเพิ่มมากขึ้นตามสมการที่ 2.3

$$T = K_t \phi I_a \quad (2.3)$$

ดังนั้นแรงบิดขับ โหลดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่มอเตอร์หมุนช้าลง และในที่สุดมอเตอร์จะหยุดหมุนช้าลงในทันทีที่แรงบิดขับ โหลดไปมีค่าเท่ากับแรงบิดของ โหลดรวมกับแรงเสียดทาน การสูญเสียในแกนเหล็กของมอเตอร์

ถ้าโหลดทางกลของมอเตอร์ลดลง แรงบิดขับ โหลดที่เกิดจากกระแสอาร์เมเจอร์จะมีค่ามากเกินไปพอที่จะเอาชนะแรงบิดของโหลด ทำให้มอเตอร์เกิดความเร่ง หมุนเร็วขึ้น ขณะที่ความเร็วเพิ่มมากขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ (E_b) เพิ่มมากขึ้นด้วย และทำให้กระแสอาร์เมเจอร์ I_a ลดลงส่งผลให้มอเตอร์หยุดเพิ่มความเร็วกว่าและจะหมุนด้วยความเร็วคงที่รวมทั้งมีกระแสอาร์เมเจอร์คงที่เมื่อแรงบิดขับ โหลดตกลงเท่ากับค่าของแรงบิดของโหลด ค่ากำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่ายจึงเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติเพื่อให้พอดีกับ โหลดของมอเตอร์ ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ (E_b) ของมอเตอร์สามารถปรับกระแสได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อจะเริ่มเดินเครื่องจำเป็นต้องมีสเตรเตอร์ (เป็นความต้านทานที่เปลี่ยนค่าไว้) สเตรเตอร์จะทำหน้าที่จำกัดกระแสตอนสเตรเตอร์ไม่ให้ไหลเข้ามอเตอร์มากเกินไป และจำกัดแรงบิดเริ่มหมุนไม่ให้สูงเกินไป ให้อยู่ในสถานะที่พอเหมาะไม่ทำให้เกิดการกระชากซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายกับระบบเกียร์ หรือสายพานได้ทั้งนี้เราจะพิจารณา

$$E_t = E_b + I_a R_a \quad (2.4)$$

และ

$$I_a = \frac{E_t - E_b}{R_a} \quad (2.5)$$

ในสมการที่ (2.5) ค่า R_a ของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปจะน้อยมาก เช่น 0.12 หรือ 0.5 โอห์ม ในเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ปานกลางขณะที่เริ่มเดินเครื่อง มอเตอร์ยังไม่หมุน $E_b = 0$ ($N = 0$) จากสมการ (2.5) จะได้

$$I_a = \frac{E_t}{R_a} \quad (2.6)$$

ในกรณีนี้ I_a จะมีค่ามาก เช่น ถ้า $E_t = 220$ โวลต์ และ $R_a = 0.1$ โอห์ม

$$\text{จะได้ } I_a \text{ ตอนเริ่มเดิน} = \frac{220}{0.1} = 2,200 \text{ แอมแปร์}$$

ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก ค่าแรงบิดเริ่มหมุนที่สูงมากจะทำให้เกิดการกระชาก และทำให้อุปกรณ์ป้องกัน เช่น ฟิวส์ หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์เปิดวงจรได้ ถ้าหากไม่มีการแก้ไขจะทำให้โหลดที่ต่ออยู่รวมทั้งคอมมิวเตเตอร์เกิดความเสียหายได้ เราจึงจำเป็นต้องหาความต้านทาน R_s มาต่ออนุกรมกับวงจรอาร์เมเจอร์ ดังรูป 2.14 เป็นผลทำให้วงจรอาร์เมเจอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 3.0 เท่าของกระแสมักัด ความต้านทานที่นำมาต่อนี้เรียกว่าสเตรเตอร์ซึ่งจะสามารถปลดค่าทิ้งได้เป็นลำดับจนกระทั่งค่า R_s เป็นศูนย์ มอเตอร์จึงทำงานตามปกติได้ ซึ่งจะทำให้ได้กระแสขณะเริ่มเดินเป็น

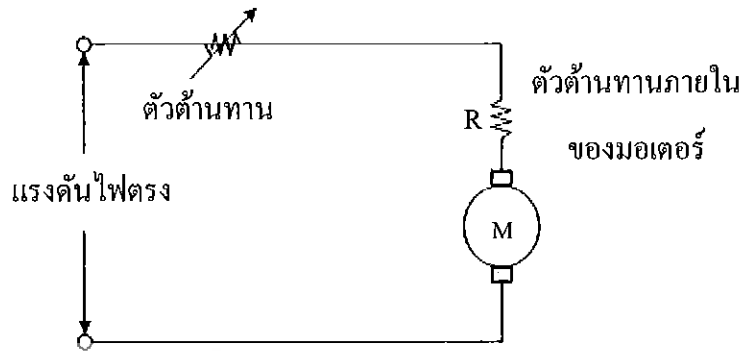
$$I_{start} = \frac{E_t}{R_a + R_s} \quad (2.7)$$

โดย R_s คือค่าความต้านทานขณะเริ่มหมุนดังรูปที่ 2.5

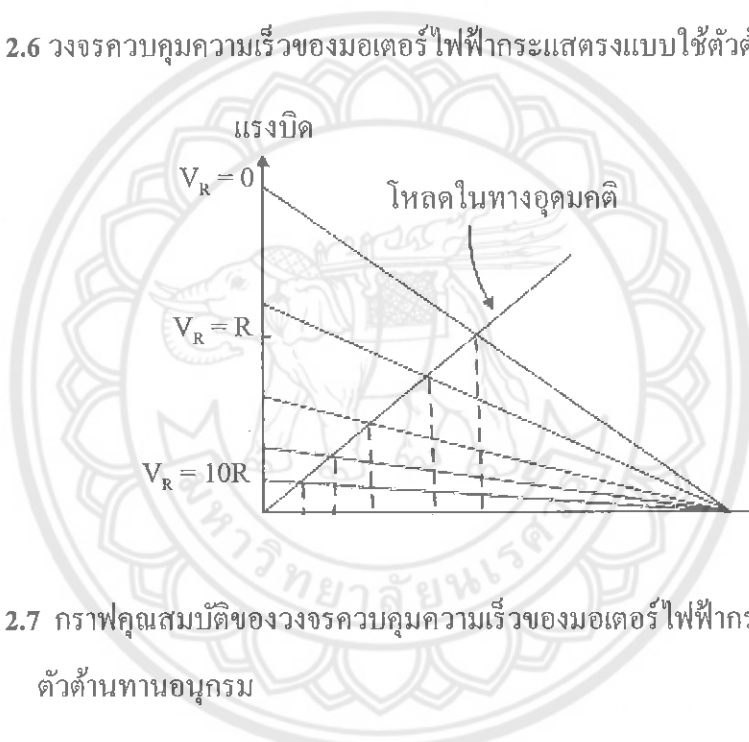
2.2.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. การควบคุมด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของการควบคุมมอเตอร์คือ ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้อนุกรมกับมอเตอร์ โดยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ การบังคับแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะกำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทาน มักนิยมใช้กับมอเตอร์ตัวเล็กๆ การบังคับแบบนี้ให้คุณสมบัติการสตาร์ทดี คือให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ แต่จะให้ความเร็วสูงมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะที่มีโหลด

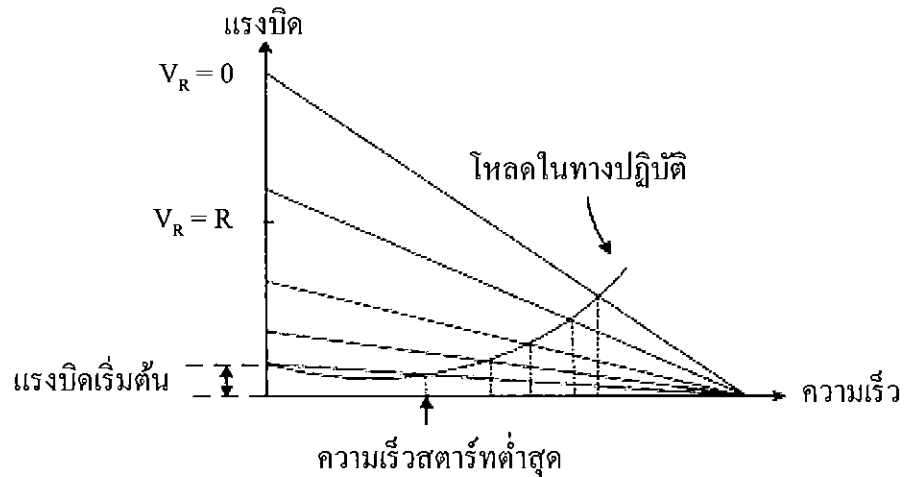
น้อยๆ ดังนั้นการบังคับแบบนี้มีประโยชน์เฉพาะภาวะที่แรงต้านคงที่ เช่น การบังคับความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.6 วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม



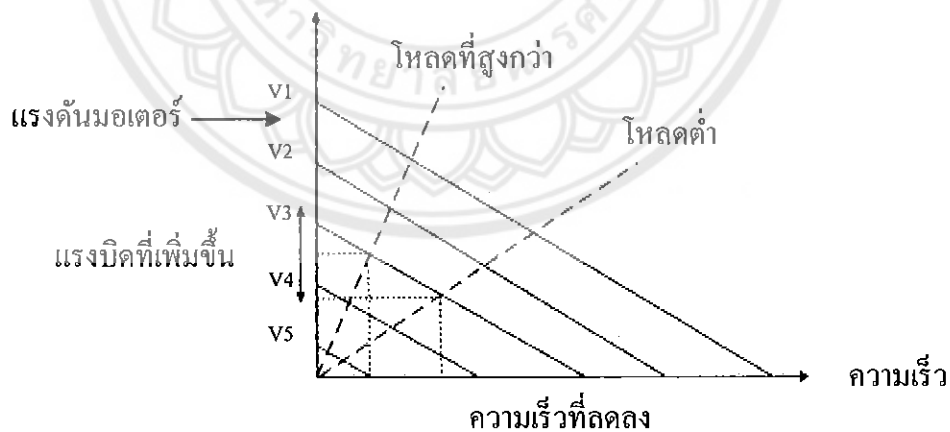
รูปที่ 2.7 กราฟคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานอนุกรม



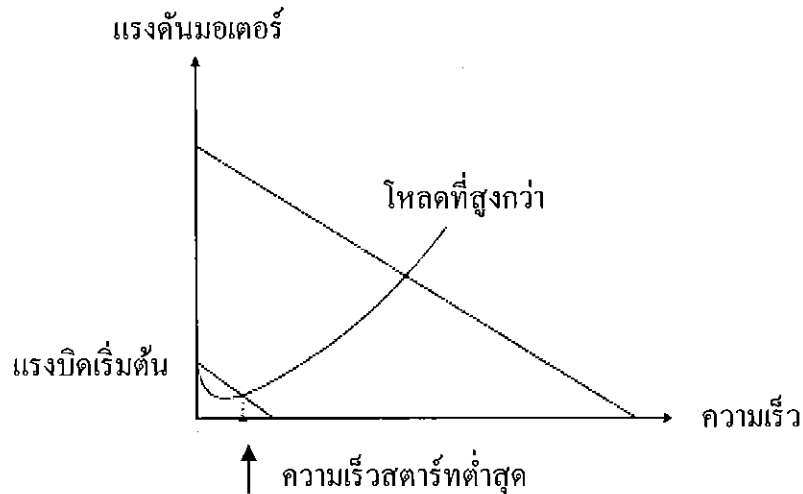
รูปที่ 2.8 กราฟคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบใช้

ตัวต้านทานอนุกรม(1)

2. การควบคุมด้วยวิธีเปลี่ยนค่าแรงดัน วิธีนี้ดีกว่าวิธีการแรกแต่จะซับซ้อนกว่า ต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายกำลังสูง และมอเตอร์จะถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าได้จากแหล่งจ่ายที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำ ข้อดีของการควบคุมวิธีนี้คือ ถ้าความเร็วลดลงจากผลของแรงบิด แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับความเร็ว ส่วนข้อเสียจากการควบคุมวิธีนี้คือ เมื่อมอเตอร์มีความเร็วต่ำแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าต่ำเช่นกัน



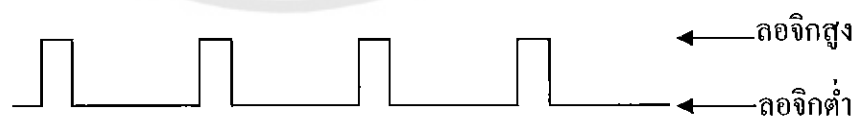
รูปที่ 2.9 การควบคุมความเร็ว โดยเปลี่ยนค่าแรงดัน



รูปที่ 2.10 การควบคุมความเร็วโดยเปลี่ยนค่าแรงดัน(1)

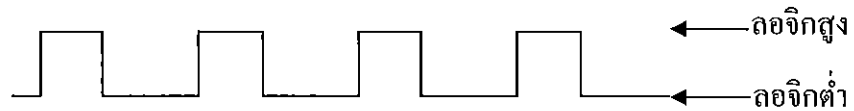
3. การควบคุมด้วยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ การควบคุมแบบนี้สามารถขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ความเร็ว 10 : 1 กระแสถูกปล่อยให้ฟีดแบ็กที่ ผลของคุณสมบัติ ความเร็วและแรงบิด ได้รับการปรับปรุงดีขึ้นกว่าการบังคับด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้

4. การควบคุมแบบ การปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน คือการมอดูเลตสัญญาณให้มีความกว้างตามสัดส่วนที่กำหนด บนความถี่ของคลื่นพาหะที่ต้องการใช้งาน โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของพัลส์ (duty cycle) ซึ่งค่าของดิวิตีไซเคิล คือ ช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด สามารถใช้ประกอบกับวงจร ไฮบริดจ์เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ซึ่งลักษณะการทำงานของสัญญาณ การปรับความกว้างของพัลส์จะเป็นดังรูปที่ 2.11 ถึงรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 สัญญาณการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ดิวิตีไซเคิล

จากรูปที่ 2.11 คือ รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีก 90 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหากค่าดิวิตีไซเคิลมีค่าน้อย หมายความว่า ความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีลักษณะแคบ



รูปที่ 2.12 สัญญาณการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน
ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ คิวตี้ไซเคิล

จากรูปที่ 2.12 คือ รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีก 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีลักษณะกว้างเท่ากับความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกต่ำ

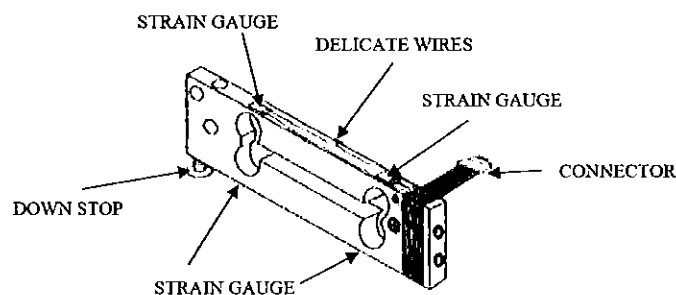


รูปที่ 2.13 สัญญาณการปรับความกว้างของพัลส์โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกัน
ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ คิวตี้ไซเคิล

จากรูปที่ 2.13 คือ รูปสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ 90 เปอร์เซ็นต์ และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีก 10 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหากค่าคิวตี้ไซเคิลมีค่ามาก หมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีลักษณะกว้างกว่าสถานะลอจิกต่ำ

2.3 โหลดเซลล์

โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ เป็นต้น



รูปที่ 2.14 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ

2.3.1 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (strain gauge load cell)

หลักการของโหลดเซลล์ ประเภทนี้ก็คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (Strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วน โดยตรงกับแรงที่มากระทำ ปกติแล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว (Wheatstone Bridge Circuit) ในการวัด โดยเกจตัวด้านทานทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของมันไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึงส่ง สัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น มิลลิโวลต์/โวลต์ หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 โวลต์ ให้กับโหลดเซลล์ที่มี Spec. 2 มิลลิโวลต์/โวลต์ ที่โหลดเต็มพิกัด สมมุติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ ที่น้ำหนักโหลดเต็มพิกัด สัญญาณที่จะได้ก็จะได้เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์

2.3.2 การพิจารณาเลือกใช้โหลดเซลล์

การพิจารณาเลือกพิกัดใช้งาน โหลดเซลล์นั้น ต้องคำนึงถึงน้ำหนักของสิ่งของรวมกับน้ำหนักของภาชนะชั่ง และเลือก โหลดเซลล์ที่สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าประมาณ 2 เท่าของน้ำหนักรวม เพื่อป้องกันความเสียหายจากค่าน้ำหนักเกินอันเกิดจากการแกว่ง หรือการกระแทกของน้ำหนัก มีวิธีการคำนวณคร่าวๆ

$$\frac{(\text{weight} + \text{weight of container}) \times \text{Safetyfactor}}{\text{number of loadcell}} \quad (2.8)$$

ซึ่งในโครงการนี้เลือกใช้โหลดเซลล์ประเภทสเตรนเกจ เนื่องจากหลักการของโหลดเซลล์ประเภทนี้ คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียดจะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วน โดยตรงกับแรงที่มากระทำ ปกติแล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว ในการวัดเพื่อให้ได้ความไวสูงสุด และมีการชดเชยผลของอุณหภูมิขณะทำการวัดด้วยเกจทั้ง 4 จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าชดเชยวงจร โดยทั่วไปเกจ 2 ตัวจะอยู่ในสภาพถูกดึง และอีก 2 ตัวอยู่ในสภาพถูกกด ตัวด้านทานทั้ง 4 จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวเองไม่ว่าจะเป็นแรงกด หรือแรงดึงส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

สเตรนเกจสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทยึดติด (bonded strain gauge) และประเภทไม่ยึดติด (unbonded strain gauge) ซึ่งสเตรนเกจทั้งสองประเภทจะมีลักษณะของ

โครงสร้าง และการทำงานที่คล้ายกัน คือ ทำด้วยเส้นลวดเล็กๆขดไปขดมา และนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดความเครียดเมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออก

ความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลงผล คือ ความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาว และแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นเขียนสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.9)$$

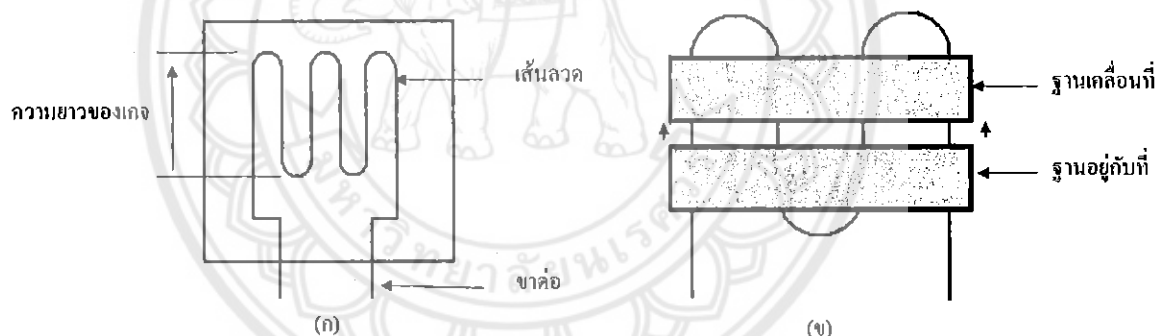
โดยที่

R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำ (โอห์ม)

ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของลวดตัวนำที่ใช้ทำสเตรนเกจ (โอห์มต่อเมตร)

L คือ ความยาวของขดลวดตัวนำ (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ (ตารางเมตร)



รูปที่ 2.15 สเตรนเกจ (ก) ประเภทยึดติด (ข) ประเภทไม่ยึดติด

ในรูปที่ 2.15 (ก) จะแสดงโครงสร้างของสเตรนเกจประเภทยึดติดที่ทำมาจากเส้นลวดเล็กๆ ขดไปขดมาหลายครั้ง และยึดตั้งติดไว้บนแผ่นกระดาษ หรือพลาสติกบางๆ โดยทั่วไปเส้นลวดนี้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.001 นิ้ว และมีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม สำหรับโครงสร้างของสเตรนเกจประเภทไม่ยึดติดจะทำจากเส้นลวดเล็กๆ ที่ติดอยู่กับฐานที่อยู่กับที่ และเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

การใช้สเตรนเกจในการตรวจวัดความเครียดวัตถุนั้นจะพิจารณาถึงปริมาณทางกายภาพสองประการ คือ ค่าความต้านทานของเกจ (gauge resistance) ที่เปลี่ยนแปลง และค่าของความยาวที่

เปลี่ยนแปลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวแปรนี้จะแสดงเป็นอัตราส่วนที่เรียกว่า เกจแฟกเตอร์ (gauge factor) ดังสมการต่อไปนี้

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2.10)$$

โดยที่

K คือ ค่าตัวประกอบเกจ

ΔR คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ (โอห์ม)

R คือ ค่าความต้านทานของลวดตัวนำเริ่มแรกก่อนถูกแรงกระทำ (โอห์ม)

ΔL คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดตัวนำหลังจากถูกแรงกระทำ (เมตร)

L คือ ค่าความยาวของลวดตัวนำก่อนถูกแรงกระทำ (เมตร)

เนื่องจากค่า $\Delta L/L$ ได้รับการกำหนดชื่อทางกลศาสตร์ว่าค่าคงตัวความเครียดแทนด้วยตัวแปร ϵ จึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.11)$$

จากการค้นพบของฮุก (Hooke) เกี่ยวกับวัตถุหลายๆชนิดที่มีขนาดจำกัด ซึ่งจะมีอัตราส่วนคงที่ $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ ระหว่างความเค้นและความเครียด ความเค้นจะนิยามได้ว่าเป็นแรงภายในต่อหน่วยพื้นที่ ค่าคงที่สมการของความเค้น คือ

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.12)$$

โดยที่

σ คือ ค่าความเค้นของวัสดุ (กิโลกรัม)

F คือ แรงที่กระทำต่อวัสดุ คือ แรงที่กระทำต่อวัสดุ (กิโลกรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (ตารางเมตร)

ค่าคงที่ของสัดส่วนระหว่างความเค้น และความเครียดตามกฎของฮุก (Hooke's law) นี้ เรียกว่า ดัชนีการยืดหดตัวของวัตถุ (modulus of elasticity of the material) หรือเรียกว่า ยัง โมดูลัส (Modulus Young's) ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.13)$$

โดยที่

E คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (กิโลกรัม)

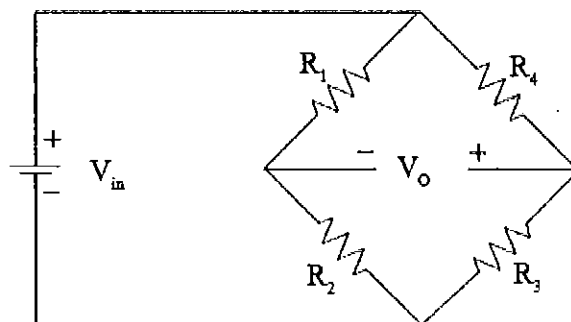
ϵ คือ ค่าความเครียดของวัสดุ

การใช้งานของสเตรนเกจ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความเที่ยงตรงในการวัดความยืดหรือหดตัวของวัสดุได้เป็นอย่างดี เช่น การวัดความเครียดของคานและเสาทางด้านโยธาโดยเราจะนำเอาสเตรนเกจไปแปะติดกับคาน หรือเสาที่ต้องการวัด และต้องงานเข้าร่วมกับวงจรบริดจ์ เพื่อวัดหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป

วงจรวิทสโตนบริดจ์ เนื่องจากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมนำสเตรนเกจมาใช้งานโดยต่อวงจรประเภทวิทสโตนบริดจ์ ดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรการบีบอัดของสเตรนเกจในวงจรวิทสโตนบริดจ์



รูปที่ 2.17 วงจรบริดจ์เมื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ

จากรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันให้แก่วงจรบริดจ์ระหว่างขั้วอินพุตบวก และอินพุตลบในสถานะที่ยังไม่มีแรงมากระทำ หรือยังไม่มีน้ำหนักมากระทำต่อโพลดเซลล์ ค่าความต้านทานของสเตรนเกจภายในจะมีค่าเท่ากันทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสถานะสมดุล แรงดันเอาต์พุตที่ออกมาระหว่างขั้วเอาต์พุตบวก และเอาต์พุตลบจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อมีแรงมากระทำหรือมีน้ำหนักมากระทำต่อโพลดเซลล์จะทำให้สเตรนเกจยืดออก หรืองอเข้าจะทำให้ค่าความต้านทานภายในสเตรนเกจของแต่ละตัวนั้นเปลี่ยนค่าไปทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสถานะที่ไม่สมดุล ทำให้สามารถวัดแรงดันที่เอาต์พุตออกมาได้ยังมีน้ำหนัก หรือวัตถุที่มากระทำต่อโพลดเซลล์มากเท่าไร จะทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจนั้นเปลี่ยนค่าไปมากขึ้น และยังทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรบริดจ์มีค่าน้อยมากจึงต้องอาศัยวงจรขยายสัญญาณ ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะนำแรงดันที่ได้ไปประมวลผลในกระบวนการต่อไป โดยแรงดันเอาต์พุตภายในวงจรวิสโตมบริดจ์จะเป็นไปตามสมการ

$$V = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{in} \quad (2.14)$$

2.4 เซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ

เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุหรือไจโรสโคปเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการตรวจวัดค่าความเอียง (หาได้จากกรเปลี่ยนแปลงของมุมตามแนวแกน X,Y,Z) ทำให้ทราบสถานะความสมดุลของตัวหุ่นยนต์ จึงสามารถควบคุมการทำงานให้เกิดความสมดุลได้ ในปัจจุบันไจโรสโคป นั้นมีให้เลือกมากมายหลากหลายชนิด มีหลักการการทำงานที่แตกต่างกันไป แต่ประเภทที่นิยมนำมาใช้กันคือ “Vibratory MEMS Gyroscope” เนื่องจากมีขนาดเล็ก ใช้งานง่ายและราคาไม่แพง ซึ่งเหมาะกับงานจำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์

2.4.1 ทฤษฎีและหลักการ

หลักการเบื้องต้นของไจโรสโคป สามารถอธิบายได้ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน จากกฎข้อแรกที่ว่าถึงคุณสมบัติของวัตถุทุกอย่างมีความเฉื่อย (inertia) หรือมวล ซึ่งความเฉื่อยของวัตถุจะพยายามรักษาสภาพของวัตถุนั้นๆ ให้อยู่ในลักษณะเดิมเสมอถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำ และเมื่อพิจารณาเมื่อวัตถุมีการหมุนอยู่ด้วยความเฉื่อยของวัตถุนั้น ความเฉื่อยจะทำให้ทิศทางการหมุนคงที่ และหากมีการเปลี่ยนทิศทางการหมุนจะนำกฎข้อที่สองมาอธิบาย นั่นคือเมื่อมีโมเมนต์ของแรง

คู่ความกระทำทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุม ตัวใจโรสโคปก็จะหมุนไปจากตำแหน่งเดิมเรียกว่า การหมุนควง (precession) ดังนั้นคุณสมบัติใหญ่ๆของใจโรสโคปคือ ความเฉื่อย และการหมุนควง

2.4.2 ชนิดของใจโรสโคป แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. แบบสมดุล (balanced gyroscope) คือตัวหมุนแกน และ โครงซึ่งยึดไว้ด้วยแกนยาวที่สามารถหมุนได้ในแนวระดับ และถ่วงสมดุลด้วยตุ้มน้ำหนัก
2. แบบไม่สมดุล (unbalanced gyroscope) คือตัวหมุนแกน และ โครงซึ่งยึดไว้ด้วยแกนยาวที่สามารถหมุนได้ในแนวระดับ แต่จะไม่มีตุ้มสำหรับถ่วงน้ำหนัก
3. แบบโฟคอดท์ (Foucault gyroscope) มีตัวหมุนอยู่ในกรอบ (gimbal) ซึ่งแกนของการหมุนสามารถหมุนได้อย่างอิสระทุกทิศทาง

2.5 อัลตราโซนิค

อัลตราโซนิคหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยินโดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 เฮิร์ตซ์เท่านั้น แต่คนที่อายุยังน้อย ๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้นโดยปกติแล้วคำว่าอัลตราโซนิคจึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 เฮิร์ตซ์ ขึ้นไป

2.5.1 ทฤษฎีและหลักการ

สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง เรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้นเช่น คลื่นความถี่ 300 เฮิร์ตซ์ ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษ ๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมาย คลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิค อย่างเช่น 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มิลลิเมตร เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มีกรเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ หรือที่เราเรียกว่า “มีทิศทาง”

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยส่งกระแยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น คลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 กิโลเฮิร์ตซ์ เพราะที่ความถี่สูงขึ้นไปอากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้น ๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ขณะที่ความถี่เป็น จิกะเฮิร์ตซ์ ก็มีใช้กัน ในหลายๆ การใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ

2.5.2 เซนเซอร์ตรวจจับด้วยพลังงานเสียง (Ultrasonic Sensors)

อัลตราโซนิกเซนเซอร์ส่งสัญญาณพัลส์ของพลังงานซึ่งเป็นการเดินทางของความเร็วเสียง การลดทอนของพลังงานที่ถูกสะท้อนกลับมาจากวัตถุเสียงนี้เป็นการสะท้อนกลับจากวัตถุแล้วเดินทางกลับไปยังเซนเซอร์ โดยการตรวจจับระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางไปกลับของเสียงเมื่อมีการตกกระทบจากวัตถุแล้วนำมาคำนวณเป็นระยะทาง

2.5.3 หน้าที่และการทำงาน

รูปแบบต่าง ๆ ของอัลตราโซนิกเซนเซอร์ประกอบด้วย ตัวตรวจจับด้วยคลื่นอัลตราโซนิก, ชุดส่งสัญญาณ, ชุดประมวลผลและชุดเอาต์พุต มักจะใช้เป็นภาครับและภาคส่ง อาจมีระบบซึ่งประกอบด้วยส่วนหลักๆ แยกกันอยู่ 2 ส่วน ในระหว่างการทำงาน เซนเซอร์จะทำการส่งสัญญาณเสียงซึ่งเรียกว่า ซาวด์พาร์เซลส์ (Sound parcels) ให้ขบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ ของเวลาทำงานไปเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการรับการสะท้อนครั้งแรกเกิดขึ้น

2.5.4 วงจรส่งผ่าน / รับ

สำหรับการทำงานเป็นวงจรของอัลตราโซนิกเซนเซอร์ จะส่งผ่านคลื่นพัลส์เสียงที่ช่วงเวลาเปลี่ยนแปลง คลื่นเสียงที่ปล่อยออกไปจะถูกสะท้อนได้โดยวัตถุที่เหมาะสม โดยเซนเซอร์และระบบการทำงานจะรับการสะท้อนของคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมา เวลาในการเดินทางของคลื่นพัลส์ของ

คลื่นเสียงเป็นการวัดระยะห่างจากวัตถุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเซนเซอร์ ระยะห่างนี้นำไปแสดงในรูปของสัญญาณนาฬิกาสัญญาณลอจิก

เนื่องจากขบวนการดำเนินไปตามเวลาที่คลื่นสะท้อนเดินทาง ไม่ใช่เป็นไปตามความเข้มของคลื่นสะท้อน จึงจัดได้ว่าอัลตราโซนิกเซนเซอร์ มีข้อดีเหนือกว่าเซนเซอร์แบบออปติคัล (Optical Sensor) เวลาที่คลื่นสะท้อนการเดินทางจะทำให้ขบวนการดำเนินโดยไม่ขึ้นกับความเข้มของคลื่นสะท้อน ตรวจจับที่วัตถุยังคงสะท้อนคลื่นที่สามารถตรวจจับได้ออกมา ดังนั้นคุณลักษณะการสวิตช์ไม่เปลี่ยนไป แม้ในสถานะที่การสะท้อนเป็นไปอย่างไม่ดีคลื่นสะท้อนที่อ่อนจะมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับวัตถุ ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถทำการตรวจจับวัตถุได้เลย ความเร็วที่เปลี่ยนไปของคลื่นพัลส์ของเสียง มีผลกระทบต่อพิสัย การทำงานของสวิตช์ระยะทาง โดยตรง เซนเซอร์ทำงานด้วยวงจรเวลาที่คงที่ เช่น $t = 20$ มิลลิวินาที จะส่งคลื่นเสียงออกมาอย่างสม่ำเสมอ

2.5.5 มุมของวัตถุ (Target Angle)

วัตถุที่มีลักษณะแบนที่ตั้งกับแกนของลำแสงจะสะท้อนพลังงานเสียงไปยังเซนเซอร์ได้มากที่สุด ดังนั้นถ้ามุมของวัตถุเพิ่มมากขึ้น พลังงานโดยรวมจะส่งกลับไปยังเซนเซอร์ได้น้อยลง สำหรับอัลตราโซนิกส่วนใหญ่มุมของวัตถุควรจะน้อยกว่า หรือเท่ากับ 10 องศา

2.5.6 กระแสอากาศ (Air Currents)

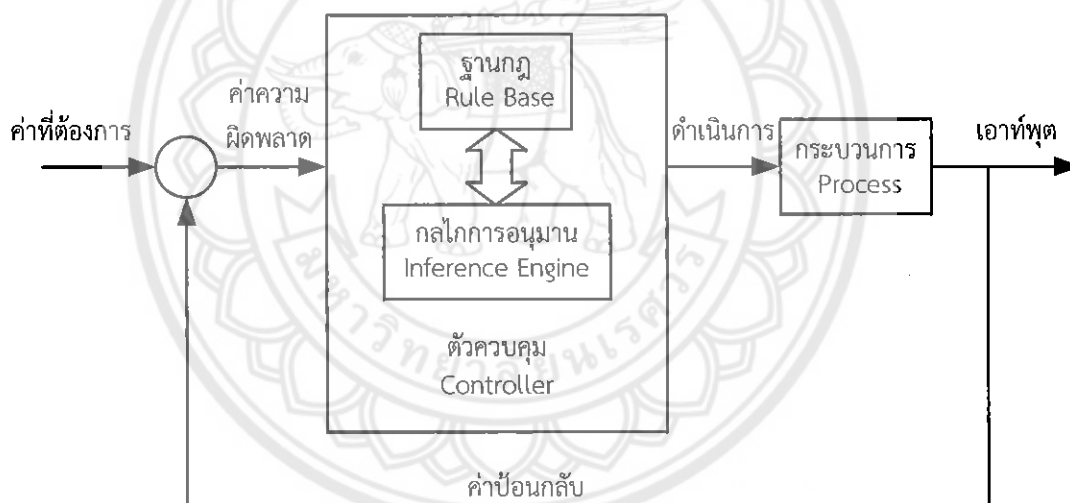
กระแสอากาศที่เนื่องมาจากลม พัดลม อุปกรณ์นิวแมติก หรือแหล่งอื่นๆสามารถรบกวนเส้นทางของพลังงานเสียงได้ ดังนั้นเซนเซอร์อาจไม่สามารถตรวจจับวัตถุในสภาพแวดล้อมแบบนี้ได้

2.6 ตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic)

ตัวควบคุมแบบฟัซซีได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องซักผ้า กล้องวิดีโอ หม้อหุงข้าว ตู้เย็น รวมไปถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ตัวควบคุมแบบ ฟัซซีใช้หลักของฟัซซีลอจิกในการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ โดยที่ตัวของฟัซซีลอจิกเองสามารถคำนวณด้วยคำพูดแทนตัวเลข เช่น “มากขึ้นนิด” หรือ “ลดลงหน่อย” ไม่ใช่ “มากขึ้น 10” หรือ “ลดลง 5.2” เป็นต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถควบคุมด้วยประโยคแทนที่จะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น “อินพุตกำลังลดลงให้ปรับเอาต์พุตให้มากขึ้นหน่อย” ไม่ใช่ “อินพุตมีค่าเท่ากับ 2 ให้ปรับเอาต์พุตเท่ากับ 7” จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีมี

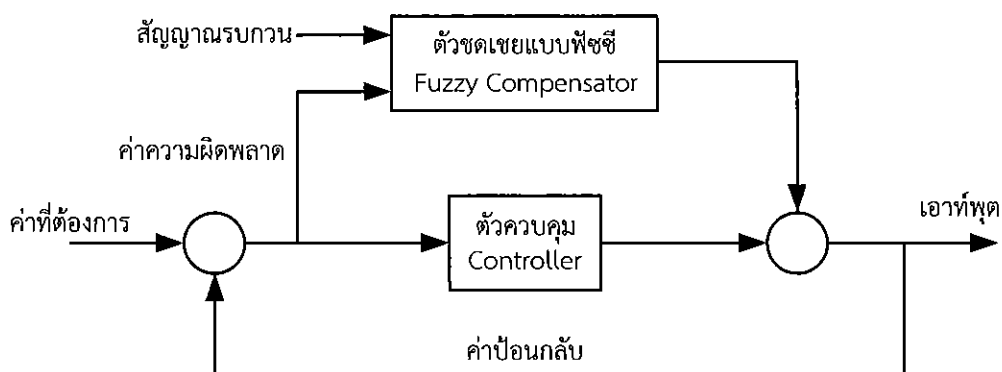
ลักษณะของการใช้ฐานกฎ (rule base) ที่มาจากการควบคุมด้วยคนจริงๆ ได้ ตัวควบคุมแบบนี้จึงมีประโยชน์มากในการประยุกต์ใช้กับงานเชิงปฏิบัติการจริงด้วยผู้เชี่ยวชาญ กลยุทธ์ในการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบภาษาธรรมชาติ เหมือนที่ผู้ควบคุมใช้พูดสั่งงาน กฎต่างๆ ที่ใช้จึงต้องถูกคัดแยกออกจากส่วนที่เป็นสมการคณิตศาสตร์ ตัวควบคุมแบบฟัซซีมีรูปแบบการใช้งานหลายรูปแบบดังนี้

1. การควบคุมโดยตรง (direct control) ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่เป็นการควบคุมโดยตรงนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีจะอยู่ในส่วนหน้าก่อนที่เอาต์พุตจะถูกป้อนกลับ เอาต์พุตที่ได้จากกระบวนการจะถูกเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ตั้งไว้ ถ้ามีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นคือเอาต์พุตไม่ตรงหรือไม่สอดคล้องกับค่าอินพุตที่ต้องการ ตัวควบคุมจะดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งตามกลวิธีที่กำหนดหรือที่ได้ออกแบบไว้ในตัวควบคุม ตัวควบคุมแบบฟัซซีในรูปนี้ถูกใช้แทนตัวควบคุมแบบ PID แบบดั้งเดิม



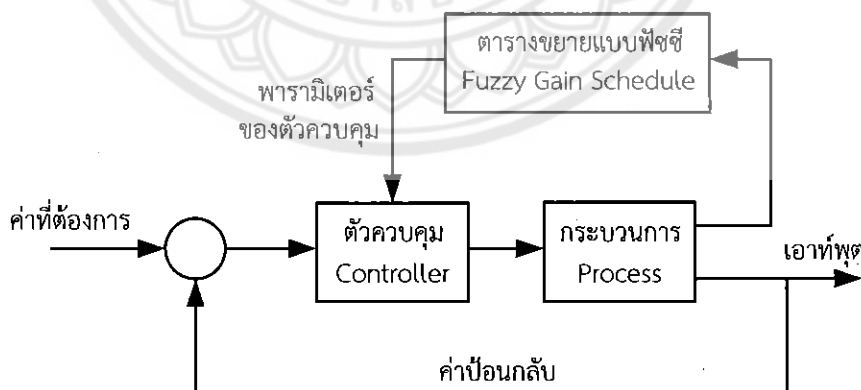
รูปที่ 2.18 การควบคุมโดยตรง

2. การควบคุมแบบไปข้างหน้า (feedforward control) การนำเอาฟัซซีลอจิกมาเป็นตัวชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมแบบไปข้างหน้าสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.19 ตัวชดเชยแบบฟัซซีใช้สัญญาณรบกวนเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าจะทำการชดเชยให้กับตัวควบคุมขนาดไหน ตัวควบคุมในระบบอาจจะเป็นตัวควบคุม PID แบบเชิงเส้น ในขณะที่ตัวชดเชยแบบฟัซซีจะทำการชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.19 การควบคุมแบบไปข้างหน้า

3. การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (parameter adaptive control) ในกรณีที่ระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีจุดทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นที่ตั้งไว้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับจุดทำงานใหม่ได้ด้วยการจัดตารางการขยายแบบฟัซซี (fuzzy gain scheduling) ตัวควบคุมที่มีการจัดตารางการขยายแบบฟัซซีจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ซึ่งมีค่าของพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิม อินพุตที่วัดจากตัวตรวจจับจะถูกใช้เป็นตัวแปรการจัดตาราง (scheduling variable) ที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเดิม การปรับค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปของตารางค้นหา (look-up table) รูปที่ 2.20 แสดงแผนผังทั่วไปของการควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวแบบฟัซซี

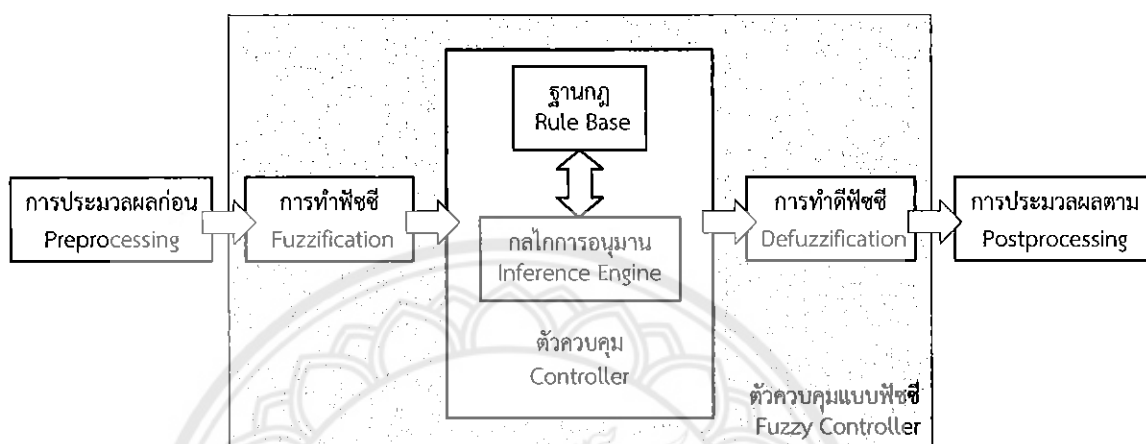


รูปที่ 2.20 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว

2.6.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมเชิงเส้นซึ่งมีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นจะต้องทำการคำนวณเหมือนกับเช่นวิธีราก-โลคัส (root locus) วิธี

ผลตอบสนองความถี่ (frequency response) หรือวิธีวางตำแหน่งโพล (pole placement) กฎที่ใช้ในตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถไม่เป็นเชิงเส้นได้ รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีองค์ประกอบในการประมวลผลก่อนและหลังเป็นการปรับสภาพอินพุตและเอาต์พุตที่จะใช้กับตัวควบคุมแบบฟัซซีให้มีความเหมาะสม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.21 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

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

ขั้นตอนการประมวลผลก่อนมีผลต่อประสิทธิภาพหรือการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีโดยตรง ค่าสัญญาณดิจิทัลที่ละเอียดจะทำให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างราบเรียบกว่าค่าที่หยาบ การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานอาจส่งผลต่อการกำหนดตัวแปรในระบบฟัซซีได้

2. การทำฟัซซี (fuzzification) ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตนั้นตามเงื่อนไขที่ถูกออกแบบไว้

3. ฐานกฎ (rule base) กฎในระบบฟัซซีถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุม กฎดังกล่าวสามารถมาจากเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมไปถึงสามารถให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าหนึ่งผลลัพธ์ได้ ตัวควบคุมที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

ในขณะที่ตัวควบคุมที่มีเพียงหนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตจะเรียกว่า SISO (Single-Input Single-Output) ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุตจะทำการควบคุมสัญญาณค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว แนวคิดของการใช้ฐานกฎในพีชชีลอจิกทำให้ระบบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของมนุษย์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง

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

5. การทำดีฟัซซี (defuzzification) ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานจะอยู่ในรูป เช่นเปิดเครื่องทำความเย็น “แรงที่สุด” หรือลดเครื่องทำความร้อน “ลงพอประมาณ” ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่น เปิดเครื่องทำความเย็น เพิ่มขึ้น 25% เป็นต้น

6. การประมวลผลตาม (postprocessing) เอาต์พุตที่ได้จากระบบอาจจะต้องถูกปรับให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐานในย่านที่ใช้งานจริง เช่น แปลงค่า 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เป็นแรงดันขนาด -5 ถึง +5 โวลต์ สำหรับควบคุมให้เครื่องทำความเย็น เปิดปิดตามปริมาณที่ต้องการ

2.6.2 กฎของพีชชี (Fuzzy rule)

กฎของพีชชีเป็นวิธีการนำเอาความรู้ของมนุษย์มาใส่ในระบบพีชชีลอจิก กฎของพีชชีคือ กลุ่มของประโยคเงื่อนไข 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 เป็นตัวแปรภาษา และ A และ B เป็นค่าเชิงภาษา โดยปกติแล้วกฎของพีชซีจะครอบคลุมค่าของตัวแปรที่อยู่ในส่วนเงื่อนไข IF ยกตัวอย่างเช่นระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าของตัวแปรอุณหภูมิที่เป็นไปได้คือ “เย็น” “กำลังดี” และ “ร้อน” ดังนั้นเงื่อนไขของพีชซีที่ครอบคลุมค่าดังกล่าวจะเป็น

กฎ 1 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ เย็น
แล้ว เอาท์พุต เป็น ให้ความร้อน

กฎ 2 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ ร้อน
แล้ว เอาท์พุต เป็น ให้ความเย็น

กฎ 3 :

ถ้า อุณหภูมิ เท่ากับ กำลังดี
แล้ว เอาท์พุต เป็น ไม่เปลี่ยนแปลง

กฎของพีชซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือส่วน “ถ้า” (IF) และส่วน “แล้ว” (THEN) ในทฤษฎีเดิม เมื่อค่าเงื่อนไขใน “ถ้า” เป็นจริง ส่วน “แล้ว” จะถูกประเมิน แต่ในทฤษฎีพีชซี ค่าเงื่อนไขใน “ถ้า” จะมีความเป็นพีชซีในระดับหนึ่ง 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

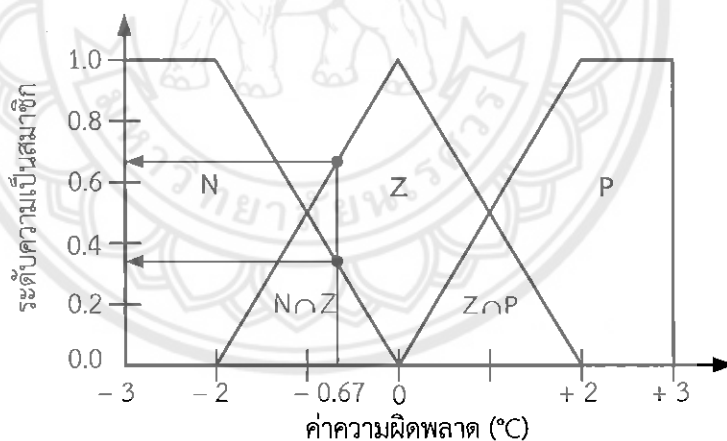
ทุกเงื่อนไขใน “ถ้า” จะถูกประเมินพร้อมๆ กันและรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต เช่น แอนด์ (AND) หรือ ออร์ (OR) โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไปโดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็นเท่านั้นเนื่องจากจะทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบกฎของพีชซีเพราะบางกฎอาจไม่สามารถมีโอกาสดังกล่าวได้ จะสังเกตว่าจำนวนเงื่อนไขจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภาษาภายในระบบ

2.6.3 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani-style inference)

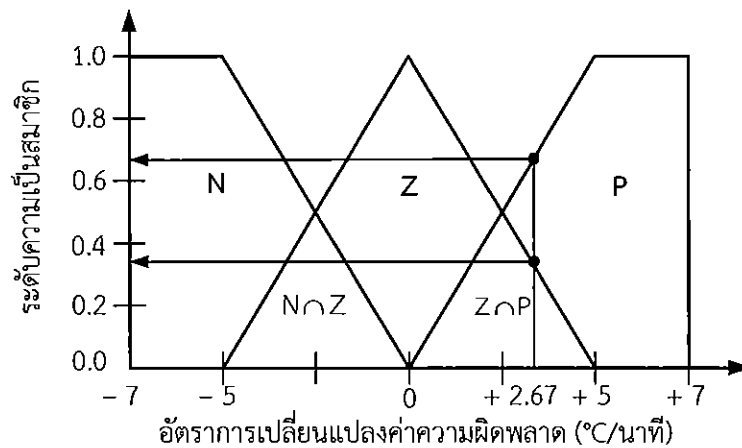
การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาต์พุตโดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การอนุมานฟัซซีมีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้คือ แบบแมมดานิ (Mamdani) และแบบซุกิโน (Sugeno) โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการออกแบบคังจะแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การทำฟัซซี (fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ระบบจะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข จากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่าต่างๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่งๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น พิจารณาการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตจากรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ -0.67°C จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62



รูปที่ 2.23 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ $+2.67$ °C/นาที ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64

จากค่าความผิดพลาดที่ -0.67 °C ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต N (เซต “ลบ”) และเซต Z (เซต “ศูนย์”) หมายความว่าสำหรับฟังก์ชันสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่กำหนดคือค่า -0.67 °C มีทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์โดยที่มีระดับความเป็นสมาชิกของเซต N เท่ากับ 0.36 และมีระดับความเป็นสมาชิกของเซต Z เท่ากับ 0.62 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดเป็นสมาชิกของทั้งความเป็นลบและความเป็นศูนย์แต่มีระดับความเป็นศูนย์มากกว่าความเป็นลบ เช่นเดียวกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ $+2.67$ °C/นาที ซึ่งจากฟังก์ชันสมาชิกที่กำหนด ค่านี้อาจมีความเป็นศูนย์และความเป็นบวกคือเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต Z และเซต P ด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.35 และ 0.64 ตามลำดับ ซึ่งค่าระดับความเป็นสมาชิกบ่งบอกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด $+2.67$ °C/นาที มีความเป็นบวกมากกว่าความเป็นศูนย์ สรุปค่าระดับความเป็นสมาชิกของทั้งสองอินพุต ในรูปฟังก์ชันสมาชิก ได้ดังนี้

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

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

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

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

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

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

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้โดยใช้กฎ

ของฟัซซี การประเมินค่ากฎจะเป็นส่วนของ “ถ้า” โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไข จากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องถูกกระทำในส่วนของ “แล้ว” ซึ่งอาจจะมิกกฎในเงื่อนไขดังกล่าว มากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆ กันได้เนื่องจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เช่นที่กล่าวมาแล้วคือค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่า ด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น แอนด์และออร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าในส่วน “แล้ว” ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำออร์จากทฤษฎีเซตจะได้ว่า

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.15)$$

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

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= \text{probor}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) \end{aligned} \quad (2.16)$$

เช่นเดียวกับตัวกระทำแอนด์ ในกล่องเครื่องมือฟัซซีลอจิกในแมทแลปมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน \min และฟังก์ชันผลคูณ *prod* ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.17)$$

หรือ

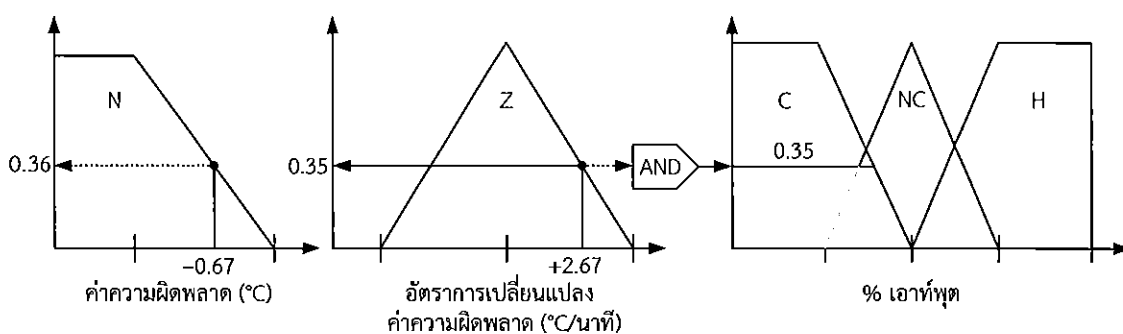
$$\begin{aligned} \mu_{A \cap B}(x) &= \text{prod}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \\ &= \mu_A(x) \times \mu_B(x) \end{aligned} \quad (2.18)$$

ในบางกรณีการใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกันอาจจะให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้ หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขในส่วน ของ “ถ้า” แล้ว ผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่ากฎข้อใดที่ต้องถูกพิจารณาในส่วน “แล้ว” ต่อไป พิจารณาตัวอย่างระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งมิกกฎของฟัซซีทั้งหมด 9 ข้อ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่หนึ่งได้แก่ ค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ N และ Z ที่ไม่เท่ากับ ศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์และอยู่ในส่วน “ถ้า” ของกฎข้อที่ 1 2 4 5 7 และ 8 ในขณะที่ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่สองได้แก่อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67$ °C/นาที่ ซึ่ง

ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Z และ P ที่ไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ในส่วนของ “ถ้า” ของกฎข้อที่ 4 5 6 7 8 และ 9 เมื่อทำการแอนด์โดยใช้ฟังก์ชัน \min กับเงื่อนไขทั้งสองแล้วจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองที่มีค่าไม่เป็นศูนย์คือเงื่อนไขข้อ 4 5 7 และ 8 กฎของพีชคณิตทั้ง 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 เอาท์พุต = C
9. IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เอาท์พุต = H
IF (0.00 AND 0.64) = 0.00 THEN เอาท์พุต = H

จากค่าผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67$ °C/นาที มีผลให้ส่วนของ “แล้ว” ซึ่งก็คือตัวแปรเอาท์พุตของกฎข้อ 4 5 7 และ 8 จะถูกประเมินค่าในขั้นตอนต่อไป ค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุตในส่วนของ “ถ้า” จะเป็นตัวบอกว่าตัวแปรเอาท์พุตจะมีรูปร่างของระดับความเป็นสมาชิกอย่างไร โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ถึงรูปที่ 2.27



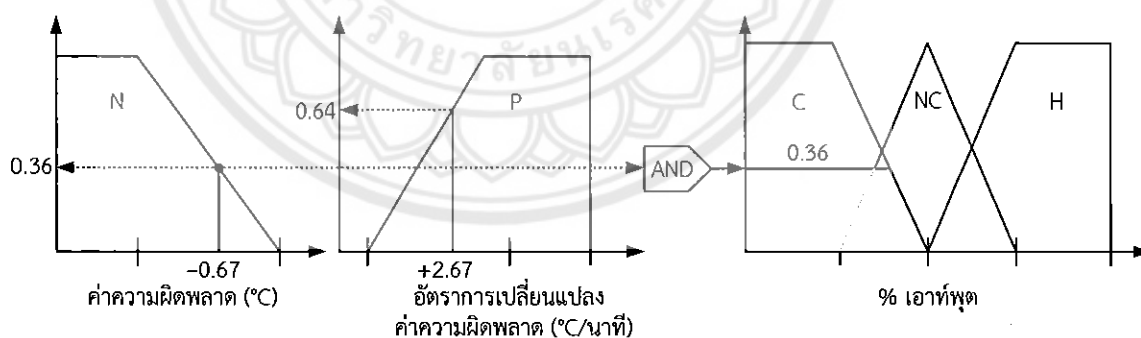
กฎ 4) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เอาร์ทพูด = C

รูปที่ 2.24 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 4)



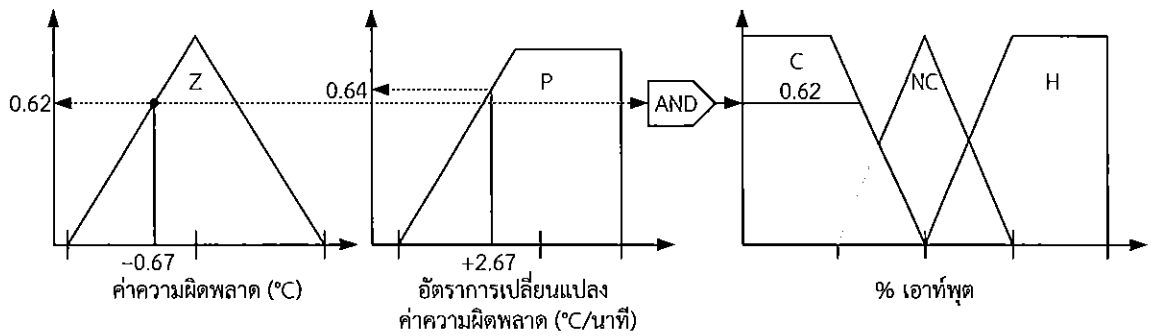
กฎ 5) IF (ค่าความผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เอาร์ทพูด = NC

รูปที่ 2.25 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 5)



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

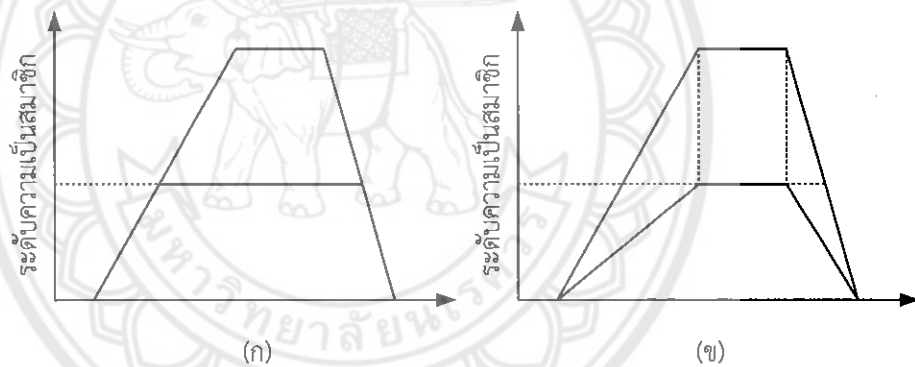
รูปที่ 2.26 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 7)



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

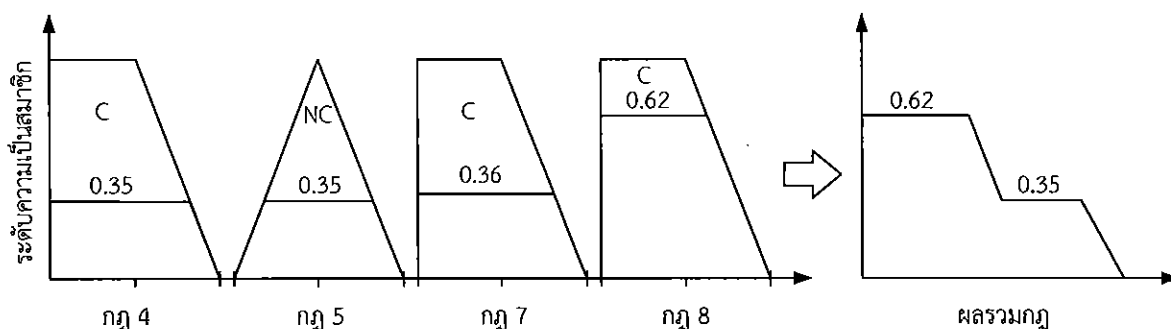
รูปที่ 2.27 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี (กฎข้อ 8)

ถึงแม้ว่าวิธีการตัดยอดเอาร์ทพูดจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน แต่เป็นวิธีที่เร็วและง่ายสำหรับการคำนวณรวมไปถึงการนำไปใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 2.28 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัดยอดและวิธีการปรับขนาด



รูปที่ 2.28 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด

3. การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์ จะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาร์ทพูด โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน รูปที่ 2.29 แสดงการรวมกฎจากระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67°C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67^{\circ}\text{C/นาทีก}$ โดยในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดี่ยวเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 2.29 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+2.67\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$

4. การทำดีฟัซซี่ (defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่างๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี่ ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาต์พุต แต่ค่าของเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซี่ได้เพราะค่าฟัซซี่จะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซี่เท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซี่คือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปแบบของค่าชัดเจน

วิธีการทำดีฟัซซี่มีหลายแบบ วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ค่าจุดศูนย์กลางถ่วงของฟัซซี่เซต A ในช่วง $[a, b]$ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

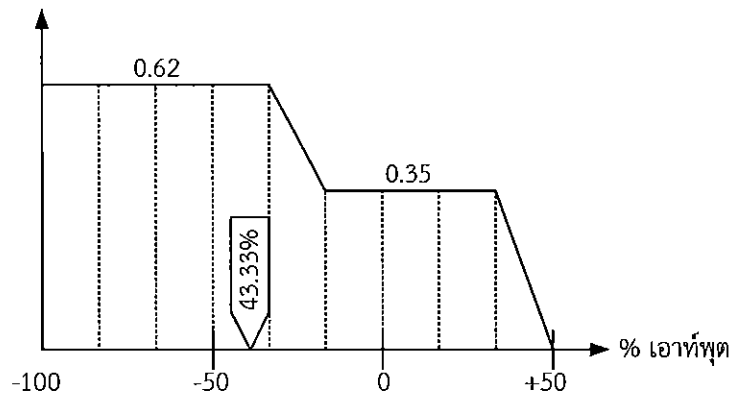
$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \tag{2.19}$$

ในทางปฏิบัติการคำนวณค่าจุดศูนย์กลางถ่วงสามารถหาได้จากข้อมูลการชักตัวอย่างดังนี้

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_A(x) x}{\sum_{x=a}^b \mu_A(x)} \tag{2.20}$$

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 2.30 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 2.30 การทำดีฟัซซี่ด้วยวิธีหาจุดศูนย์กลางของระบบควบคุมอุณหภูมิจ

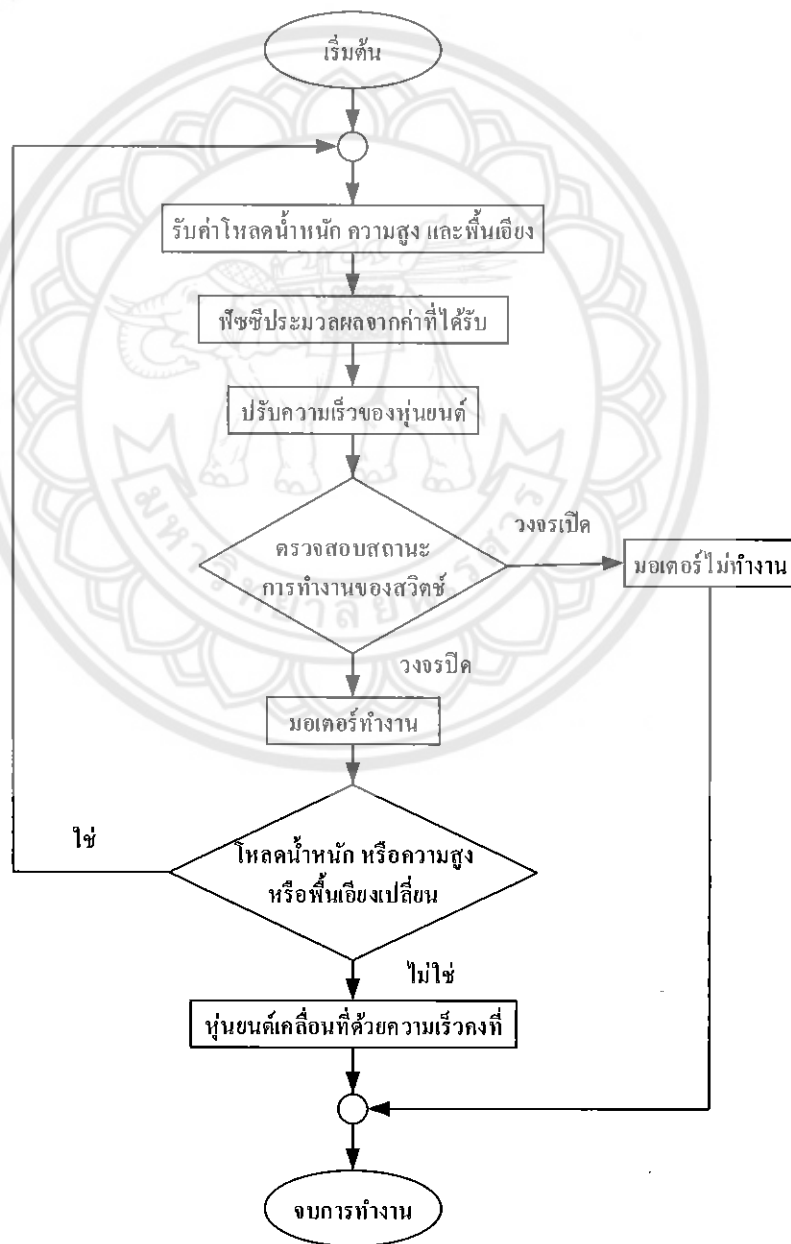
ค่าเอาท์พุทที่ได้จากการทำดีฟัซซี่เท่ากับ -43.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าระบบต้องเปิดเครื่องทำความเย็นที่ระดับ 43.33 เปอร์เซ็นต์ การทำดีฟัซซี่ของระบบควบคุมอุณหภูมิจสามารถเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.30



บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

หลังจากศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการในบทที่ผ่านมา สามารถนำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ เพื่อสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็วโดยพีซีเมื่อไหลค่าน้ำหนักและพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีขั้นตอนและการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว

จากรูปที่ 3.1 เมื่อเริ่มต้นการทำงานหุ่นยนต์จะรับค่าอินพุตคือน้ำหนักของโหลด, พื้นเอียง และความสูงจากพื้นถึงฐานของหุ่นยนต์ จากนั้นระบบควบคุมพีซีจะทำการประมวลผลค่าจากอินพุต เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ และจะทำการตรวจสอบสถานะของสวิทช์ เมื่อสวิทช์อยู่ในสถานะปิดวงจรหุ่นยนต์จะทำงาน คือเคลื่อนที่ตามคำสั่ง และตรวจสอบเงื่อนไขความเร็วรอบของมอเตอร์ว่ามีความเร็วรอบตามที่กำหนดหรือไม่ ถ้าความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่เป็นไปตามที่กำหนด จะส่งค่าป้อนกลับไปยังระบบประมวลผลพีซี และทำการปรับความเร็ว ถ้าหุ่นยนต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หุ่นยนต์ก็จะเคลื่อนที่ไปตามคำสั่งด้วยความเร็วคงที่

3.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว

3.2.1 ออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว

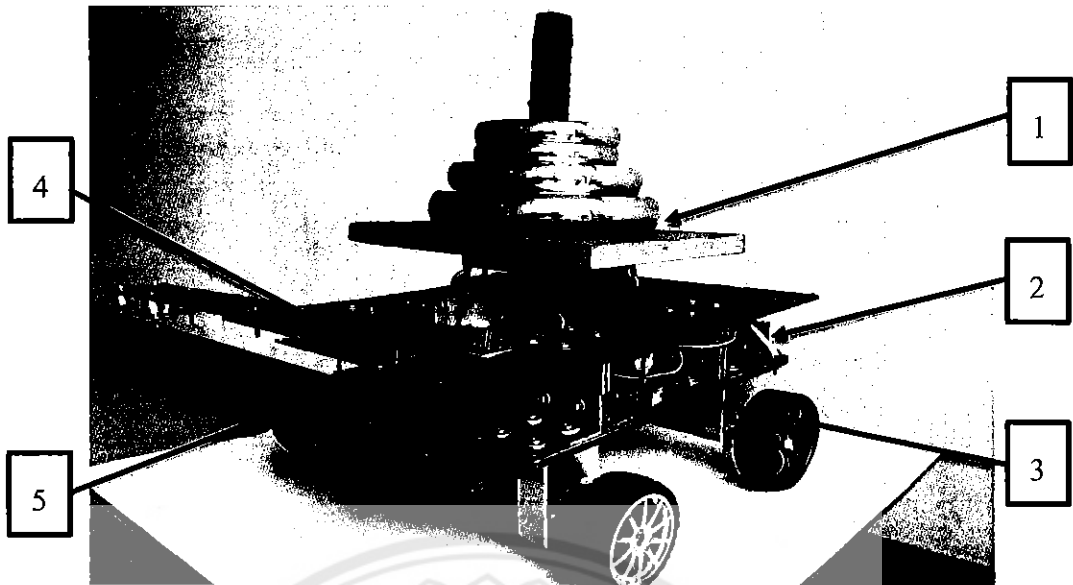
การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็วจะแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ด้านล่างจะวางแผงวงจรควบคุมและแบตเตอรี่ ส่วนที่ 2 ด้านบนใช้วางโหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



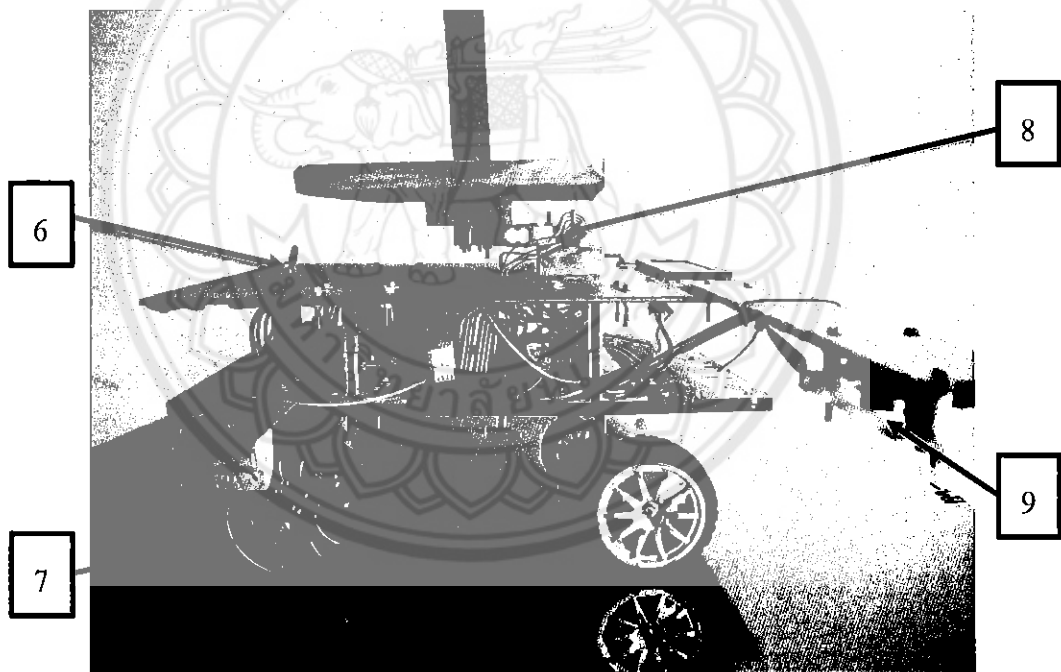
รูปที่ 3.2 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว

3.2.2 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว และแบบจำลองของรางที่ใช้ในการทดลอง

ทำการสร้างโครงหุ่นยนต์โดยใช้อะคริลิกมาประกอบชิ้นส่วนยึดติดเข้าด้วยกัน จากนั้นนำแบตเตอรี่ และแผงวงจรควบคุมมาติดตั้งที่ชั้นล่าง ส่วนโหลดเซลล์นำมาติดตั้งที่ชั้นบน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.4 ในส่วนของรางที่ใช้กับการทดลอง จากไม้เป็นองค์ประกอบหลัก มีระยะทางทั้งหมด 8.40 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถึงรูปที่ 3.9



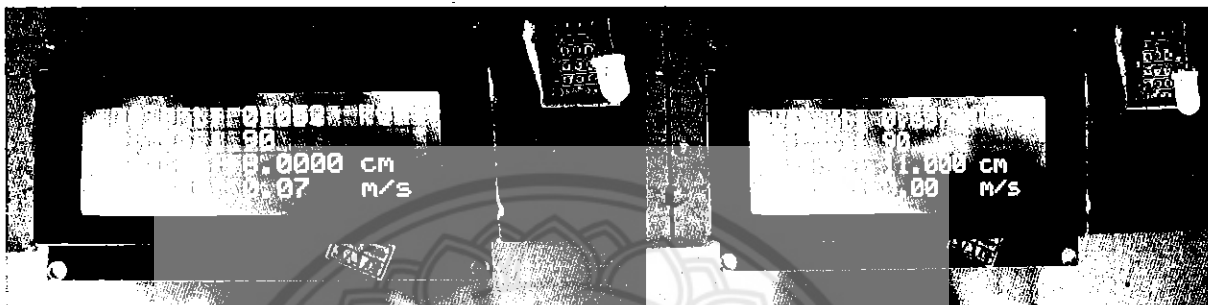
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว (ก)



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว (ข)

1. ชั้นโพลดเซลล์ ใช้ตรวจวัดน้ำหนักรถของโพลด
2. แผงวงจรขับมอเตอร์
3. แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
4. จอแอลซีดีแสดงค่าน้ำหนักรถของโพลด, ความเอียงของพื้น, ความสูงจากพื้นถึงฐานหุ่นยนต์ และความเร็วรอบของมอเตอร์

5. ไดโอดเปล่งแสงใช้แสดงสถานะความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์
6. สวิตช์ ปิด/เปิด การทำงานของหุ่นยนต์
7. เซนเซอร์เข้ารหัสแบบหมุน
8. โหลดเซลล์ ชนิดสเตรนเกจ รับน้ำหนัก
9. อัลตราโซนิก



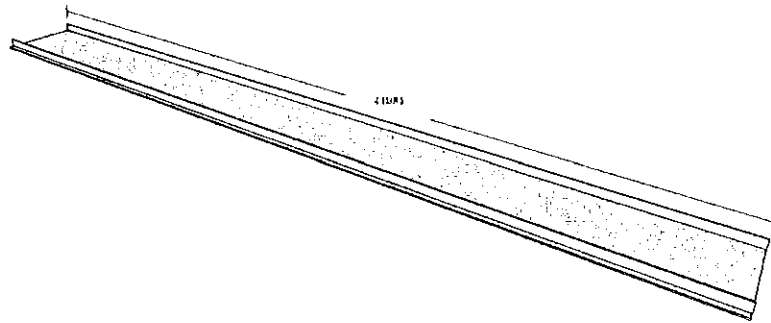
รูปที่ 3.5 จอแสดงผลเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนด ไดโอดเปล่งแสงสีเขียว และเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่แตกต่างไปจากความเร็วที่กำหนด ไดโอดเปล่งแสงสีแดง

มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังนี้

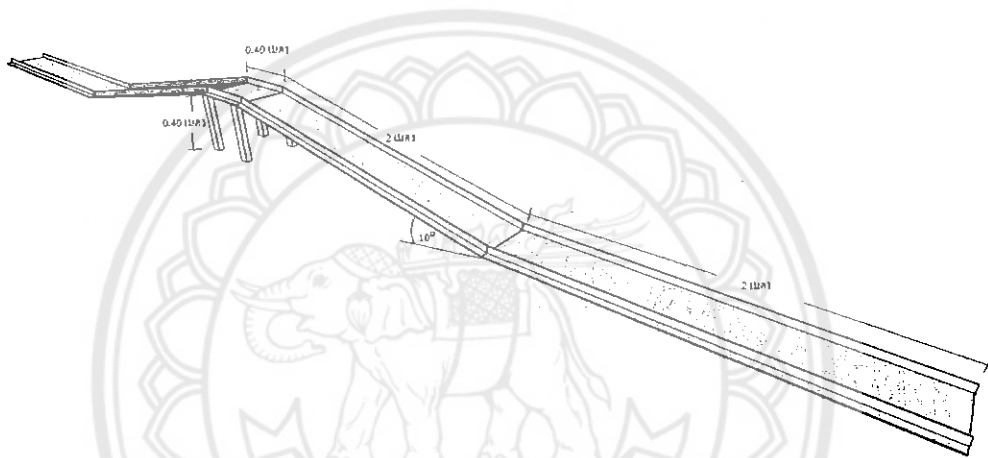
1. แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์
2. กระแสขณะไม่มีโหลด 180 มิลลิแอมป์ และขณะมีโหลด 600 มิลลิแอมป์
3. แกนเพลลาแบบเยื้อง 6 มิลลิเมตร
4. รับน้ำหนักได้ 6 – 10 กิโลกรัม
5. อัตราการทด 50 : 1
6. ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที



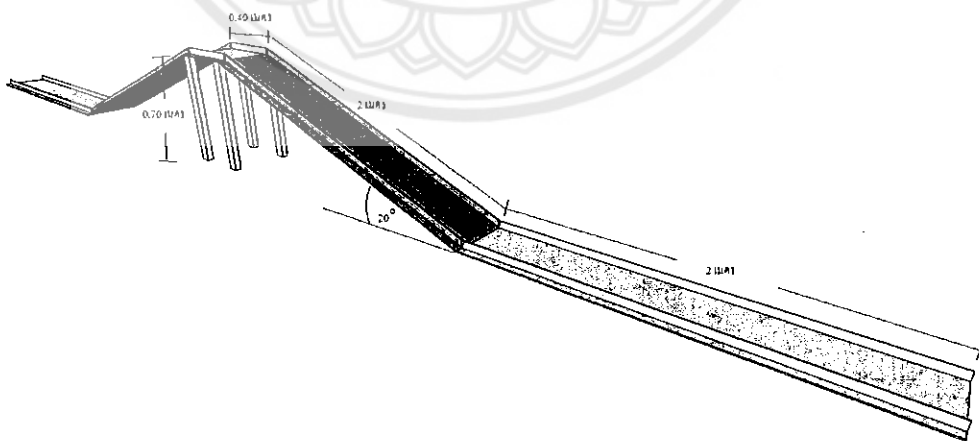
รูปที่ 3.6 มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.7 แบบจำลองร่างของการทดลองที่พื้นระนาบ



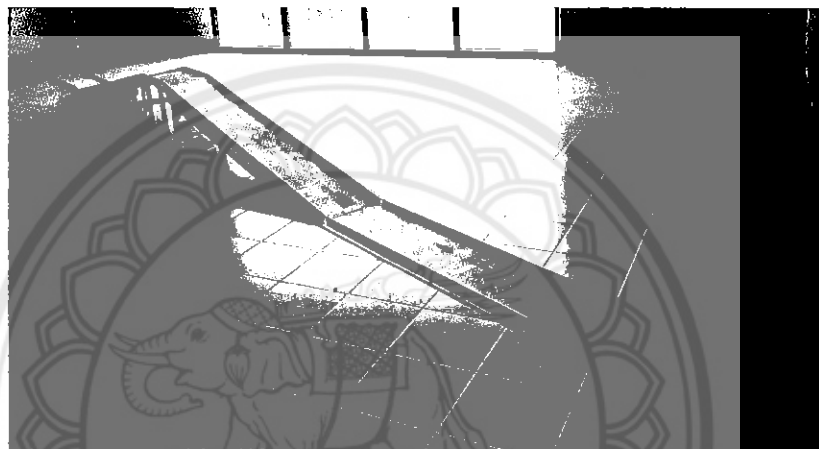
รูปที่ 3.8 แบบจำลองร่างของการทดลองที่พื้นเอียง 10 องศา



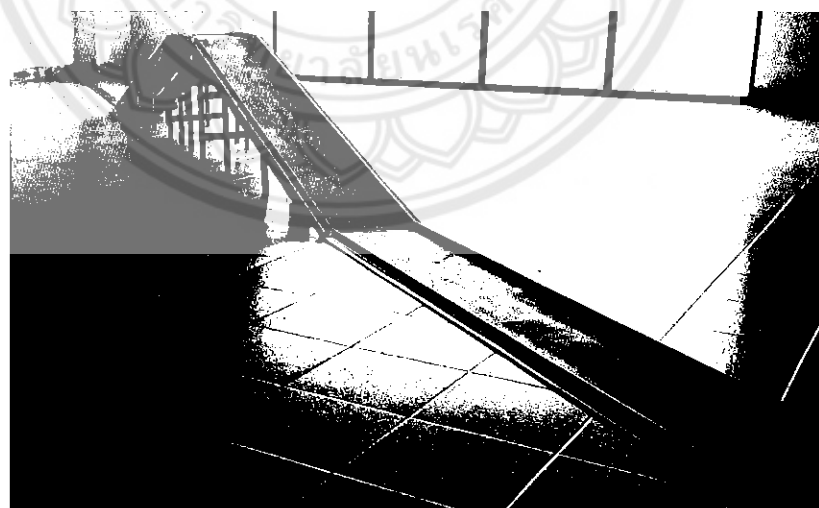
รูปที่ 3.9 แบบจำลองร่างของการทดลองที่พื้นเอียง 20 องศา



รูปที่ 3.10 รางการทดลองที่พื้นระนาบ



รูปที่ 3.11 รางการทดลองที่พื้นเอียง 10 องศา



รูปที่ 3.12 รางการทดลองที่พื้นเอียง 20 องศา



รูปที่ 3.13 หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นระนาบ



รูปที่ 3.14 หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นเอียง 10 องศา



รูปที่ 3.15 หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นเอียง 20 องศา

3.3 ออกแบบฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว

ส่วนประกอบที่เป็นฮาร์ดแวร์(Hardware) ของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็วมีดังนี้

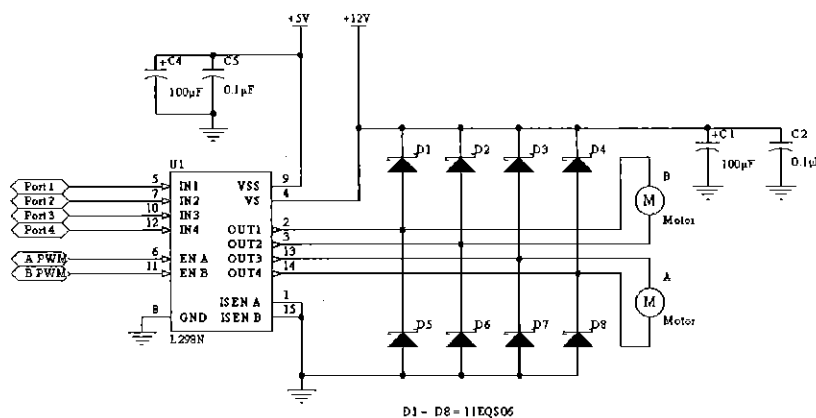
1. แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
2. แผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์
3. แผงวงจรตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ
4. แผงวงจรตรวจจับวัตถุด้วยคลื่นเสียง

3.3.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในโครงการนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เนื่องจากเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาประยุกต์ในการใช้งานได้อย่างสะดวก ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่นำมาใช้คือไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 เนื่องจากเป็นแพลตฟอร์ม (Platform) ของอินพุต/เอาต์พุต (I/O) ขั้นพื้นฐานที่พอเพียงกับการใช้งานและการเรียนรู้ โดยตัวแผงวงจรมีชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมพอร์ต อินพุต/เอาต์พุต ไม่ว่าจะเป็นพอร์ตดิจิทัล พอร์ตอนาล็อกพีดับเบิลยูเอ็มและพอร์ตอนุกรม ซึ่งแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรับสัญญาณจากภายนอก และส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ตัวแผงวงจรถูกออกแบบจากไมโครคอมพิวเตอร์ชิปเดี่ยว และมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับเขียนโปรแกรมให้สามารถรับสัญญาณจากสวิทช์หรือตัวรับรู้และควบคุมหลอดไฟ มอเตอร์ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ และสามารถทำงานได้อิสระหรือทำงานติดต่อกับโปรแกรมที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้

3.3.2 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้เป็นไอซีเบอร์ L298N เป็นตัวขับเคลื่อนหลักสามารถใช้ในการขับเคลื่อนความร้อนต่ำ มีวงจรเรกูเลตในตัว ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งจะขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ 2 ตัวพร้อมกัน สามารถควบคุมการหมุนกลับทิศทางได้แบบอิสระ รองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้กว้าง 7-35 โวลต์ มีกระแสสูงสุดได้ 2 แอมป์ต่อข้าง และกำลังสูงสุดที่สามารถใช้ได้ 20 วัตต์ ซึ่งมีวงจรการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.16 ดังนี้



รูปที่ 3.16 วงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ L298N

3.3.3 วงจรตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ

วงจรตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุสำหรับไอซี GY-521 เป็นโมดูลเครื่องวัดความเร่งและไจโรสโคป ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้ง 2 อย่างในเวลาเดียวกัน ใช้ในการตรวจสอบทิศการเคลื่อนที่ และสามารถใช้ในการตรวจสอบความเร็วในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแกน XYZ ได้ ยกตัวอย่าง ถ้าวัตถุเกิดการเคลื่อนที่หรือเอียงเอาที่พูดของเครื่องวัดความเร่งจะบอกค่าของการเอียงว่าสถานะปัจจุบันค่าของ XYZ อยู่ที่เท่าไร แต่ไจโรสโคปจะวัดค่าได้ตอนที่กำลังเอียงหรือตอนที่กำลังเคลื่อนไหวเท่านั้น เมื่อวัตถุหยุดนิ่ง ค่าของไจโรสโคปจะวัดไม่ได้เพราะไม่มีการเคลื่อนไหว

คุณสมบัติของวงจรตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ

1. ใช้ไฟเลี้ยง 3.3 - 5 โวลต์
2. ชิป MPU6050
3. เชื่อมต่อผ่านบัส I2C

คุณลักษณะของวงจรตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ

1. อุณหภูมิที่รองรับ 40-50 องศาเซลเซียส
2. รองรับแรงดัน 3.3 - 5 โวลต์
3. ทดสอบการตกกระแทกที่ 1.8 เมตร

ตารางที่ 3.1 ค่าของเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวและความเอียงของวัตถุ

Accelerometer slope	ax	ay	az
-20	112-114	86	169
-10	118-120	87	170
0	94-96	88	170
10	77-79	87	170
20	65-67	86	169

3.3.4 วงจรตรวจจับวัตถุด้วยคลื่นเสียง

วงจรตรวจจับวัตถุด้วยคลื่นเสียงสำหรับ ไอซีเบอร์ HC - SR04 เป็นอุปกรณ์ใช้วัดระยะทาง โดยไม่ต้องมีการสัมผัสกับตำแหน่งที่ต้องการวัด วัดได้ตั้งแต่ 2 - 400 เซนติเมตร โดยส่งสัญญาณอัลตราโซนิกความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์ ไปที่วัตถุที่ต้องการวัดและรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา พร้อมทั้งจับเวลาเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณระยะทาง

คุณสมบัติของวงจรตรวจจับวัตถุด้วยคลื่นเสียง

1. ใช้แรงดันประมาณ +5 โวลต์
2. กินกระแสประมาณ 15 มิลลิแอมป์
3. ช่วงการวัดระยะทางประมาณ 4 เซนติเมตร ถึง 4 เมตร
4. ความกว้างเชิงมุมในการวัด 15 องศา
5. ความกว้างของสัญญาณ Pulse สำหรับ Trigger: 10 ไมโครวินาที
6. ระดับแรงดันลอจิกสำหรับขา TRIG และ ECHO: 5 โวลต์ TTL

3.4 ออกแบบตัวควบคุมแบบพีซี

โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมนี้ถูกออกแบบด้วยโปรแกรมเมทแลปเพื่อจำลองการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยมีการรับค่าอินพุตจากค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถของโหลดจากโหลดเซลล์, ค่าความเอียงของพื้น และค่าความสูงจากพื้นถึงฐานของหุ่นยนต์ ในเวลาขณะนั้นส่งผลให้เอาท์พุตแสดงค่าเป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จึงทำการออกแบบตัวควบคุมพีซีได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

1. การกำหนดอินพุตเอาต์พุตของระบบ
2. การสร้างฐานกฎฟัซซี
3. การประมวลผลฐานกฎฟัซซี

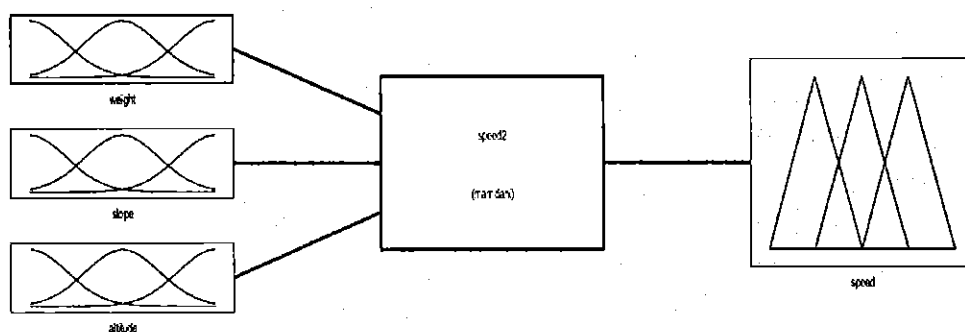
3.4.1 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

1. การกำหนดอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

การกำหนดค่าอินพุต คือนำค่าการเปลี่ยนแปลงของไหลต่อน้ำหนัก ค่าการเปลี่ยนแปลงองศาของพื้นถนน และความสูงจากพื้นถนนถึงฐานของหุ่นยนต์ มากำหนดเป็นฟัซซีเซตจะได้อินพุต 3 ตัว ซึ่งจะได้เอาต์พุตเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์รถ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และมีตัวแปรและค่าเชิงภาษาดังตารางที่ 3.2

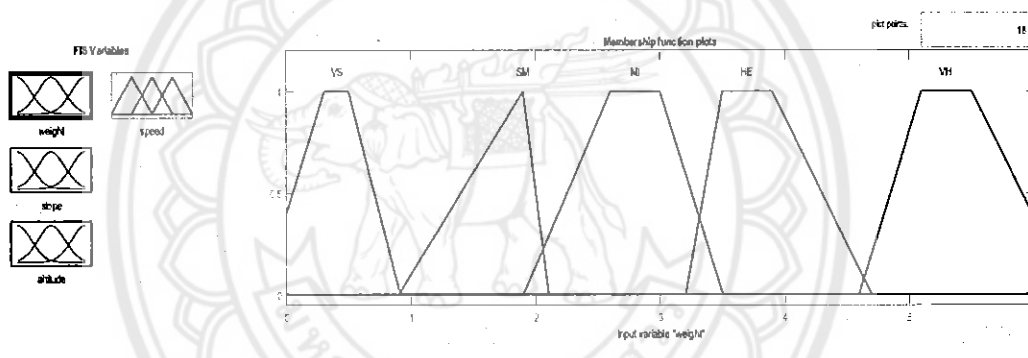
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและค่าเชิงภาษา

ลำดับ	ชื่อตัวแปร	ความหมาย	ค่าตัวแปร	ความหมาย
1	weight	น้ำหนัก	very small (VS) small (SM) middle (MI) heavy (HE) very heavy (VH)	น้ำหนักน้อยมาก น้ำหนักน้อย หนักปานกลาง หนักมาก หนักมากๆ
2	slope	องศาพื้นเอียง	positive slope 20 (PS20) positive slope 10 (PS10) plane (PLA0) negative slope 20 (NS20) negative slope 10 (NS10)	ค่าบวกของพื้นเอียง 20 องศา ค่าบวกของพื้นเอียง 10 องศา พื้นระนาบ 0 องศา ค่าลบของพื้นเอียง 20 องศา ค่าลบของพื้นเอียง 10 องศา
3	altitude	ความสูง	low (LO) medium (ME) high (HI)	สูงน้อย สูงพอดี สูงมาก
4	speed	ความเร็วรอบมอเตอร์	very slow (VS) slow (SL) normal (NO) faster (FA) very fast (VF) super fast (SF)	ลดมาก ลด ปกติ เร็ว เร็วมาก เร็วมากๆ



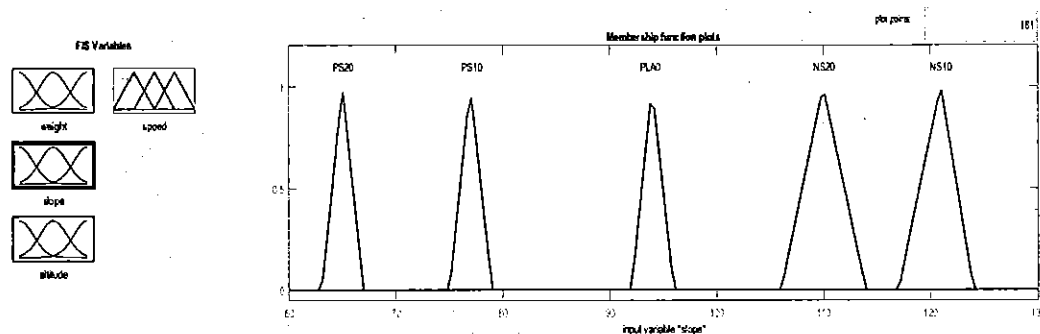
รูปที่ 3.17 รูปแบบการอนุมานอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี

อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น very small (VS), small (SM), middle (MI), heavy (HE) และvery heavy (VH) มีขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนักตั้งแต่ 0 กิโลกรัม ถึง 6 กิโลกรัม โดยรับค่าอินพุตจาก โหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ดังนี้



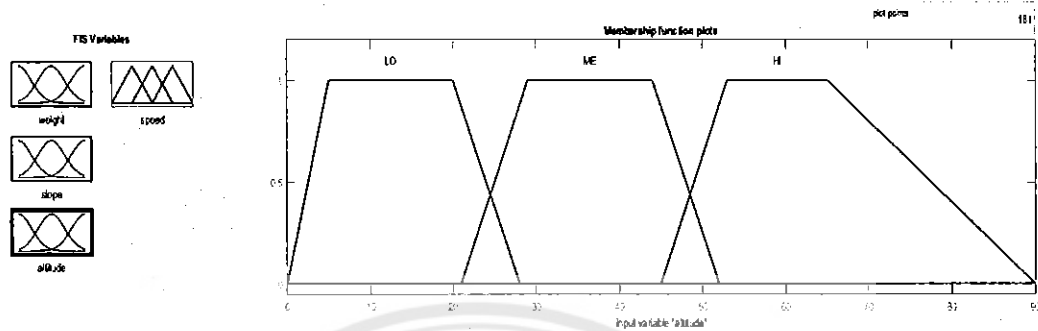
รูปที่ 3.18 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก

อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้น ซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น positive slope 20 (PS20), positive slope 10 (PS10), plane (PLA0), negative slope 20 (NS20) และnegative slope 10 (NS10) โดยมีขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้นตั้งแต่ 60 ถึง 130 โดยรับค่าอินพุตจากเซนเซอร์วัดความเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ดังนี้



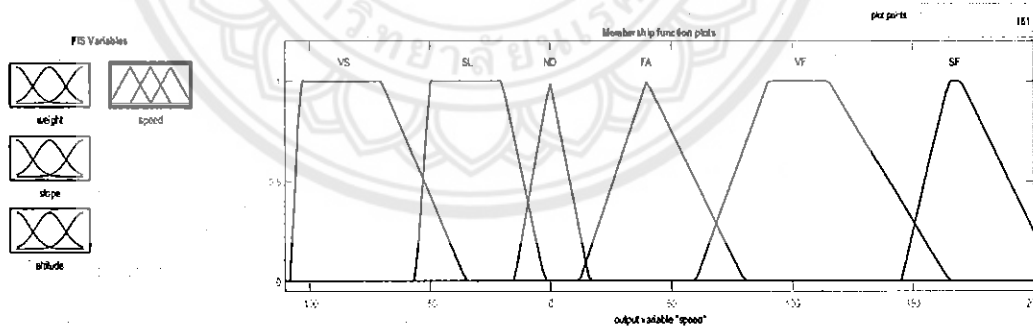
รูปที่ 3.19 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้น

อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้น ซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น low (LO), medium (ME) และ high (HI) โดยมีขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้นถนน 0 ถึง 90 โดยรับค่าอินพุตจากเซนเซอร์ตรวจจับพลังงานด้วยเสียง ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ดังนี้



รูปที่ 3.20 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้น

เอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์รถ ซึ่งแบ่งฟัซซีเซตออกเป็น very slow (VS), slow (SL), normal (NO), faster (FA), very fast (VF) และ super fast (SF) มีขอบเขตของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์รถตั้งแต่ -110 ถึง 200 ค่าขอบเขตของค่าเอาต์พุตนี้มาจากการทดลองหาความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ เมื่อหุ่นยนต์มีการรับโหลดน้ำหนัก 5 กิโลกรัมเคลื่อนที่บนพื้นเอียง 20 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ดังนี้



รูปที่ 3.21 ฟัซซีเซตสำหรับปริมาณเอาต์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์

2. การสร้างฐานกฎฟัซซี

เมื่อทราบปริมาณอินพุตแล้ว ต้องมีกฎฟัซซีเพื่อที่จะสามารถเชื่อมโยงจากปริมาณอินพุตไปยังปริมาณเอาต์พุตได้ เขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

ถ้า x เท่ากับ A และ y เท่ากับ B แล้ว z เท่ากับ C

และ

“ถ้า x เท่ากับ A และ y เท่ากับ B และ z เท่ากับ C แล้ว w เท่ากับ D ”

กฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีดังนี้

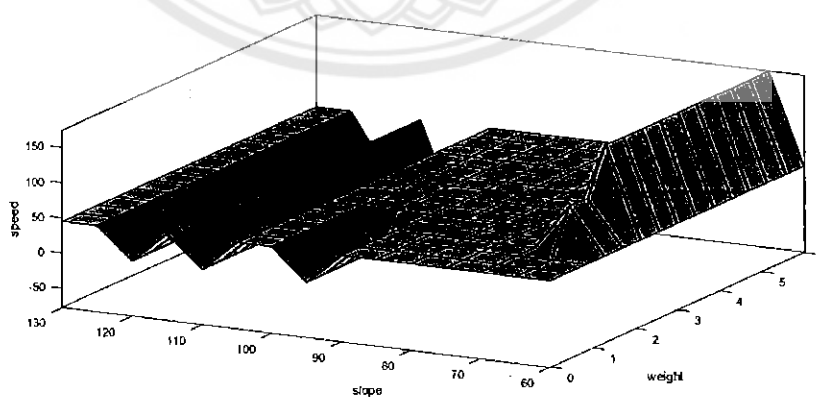
1. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ PLA0 แล้ว speed เท่ากับ NO
2. ถ้า weight เท่ากับ SM และ slope เท่ากับ PLA0 แล้ว speed เท่ากับ NO
3. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PLA0 แล้ว speed เท่ากับ FA
4. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PLA0 แล้ว speed เท่ากับ FA
5. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PLA0 แล้ว speed เท่ากับ FA
6. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SL
7. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ NO
8. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ NO
9. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SL
10. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ NO
11. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ NO
12. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ NO
13. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ NO
14. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ FA
15. ถ้า weight เท่ากับ VS และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ FA

30. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ VS
31. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SL
32. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SL
33. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SL
34. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SL
35. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SL
36. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ FA
37. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ FA
38. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ FA
39. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ VF
40. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SF
41. ถ้า weight เท่ากับ MI และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SF
42. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ VS
43. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ VS

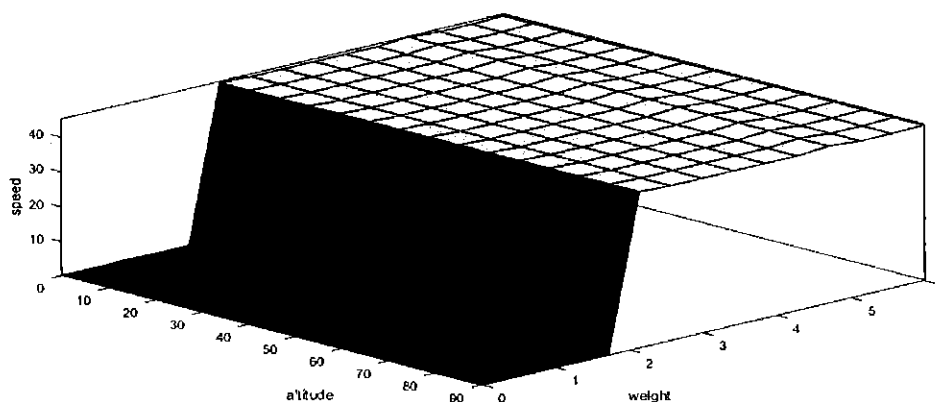
44. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SL
45. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ VS
46. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SL
47. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SL
48. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ FA
49. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ VF
50. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SF
51. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SF
52. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SF
53. ถ้า weight เท่ากับ HE และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SF
54. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ VS
55. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ VS
56. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ NS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SL
57. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ VS

58. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SL
59. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ NS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SL
60. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ VF
61. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ VF
62. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PS10 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SF
63. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ LO แล้ว speed เท่ากับ SF
64. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ ME แล้ว speed เท่ากับ SF
65. ถ้า weight เท่ากับ VH และ slope เท่ากับ PS20 และ altitude เท่ากับ HI แล้ว speed เท่ากับ SF

จากกฎการควบคุมที่สร้างมาข้างต้นสามารถเรียกดูมุมมองพื้นผิวของกฎจากกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.23 ดังนี้



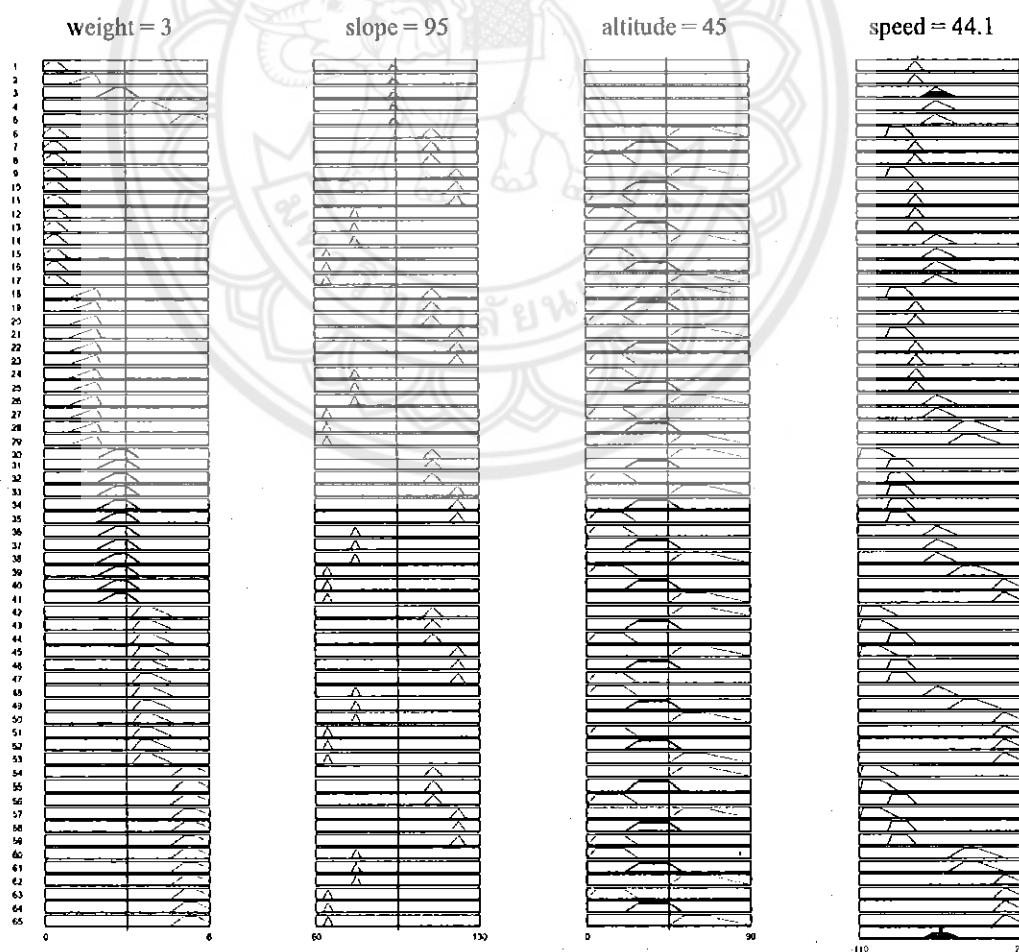
รูปที่ 3.22 มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ (ก)



รูปที่ 3.23 มุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ (ข)

3. การประมวลผลฐานกฎฟัซซี

เมื่อนำข้อมูลค่าอินพุตการเปลี่ยนแปลงของไหลตน้ำหนักที่ 3 กิโลกรัม การเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้นที่ 95 และความสูงของพื้นที่ 45 มาวิเคราะห์ทำการคำนวณกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ จะได้ดังรูปที่ 3.24 ดังนี้

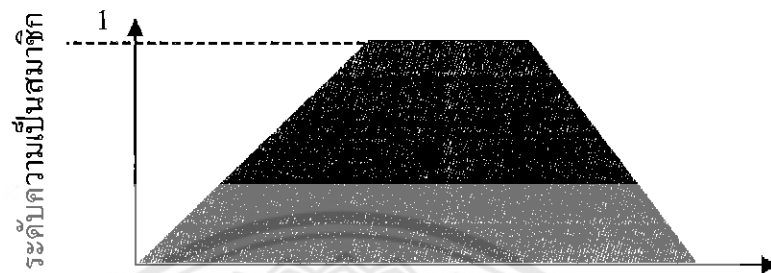


รูปที่ 3.24 การประมวลผลค่าเอาต์พุตด้วยวิธีแมมดานิ (ก)

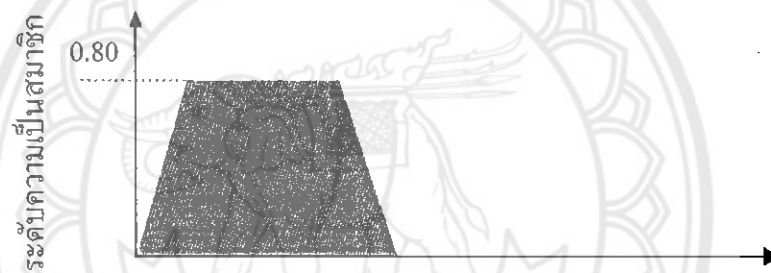
หรือหาได้จากสมการ

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

กฎข้อที่ 3



รูปที่ 3.25 ผลของการรวมกฎ weight

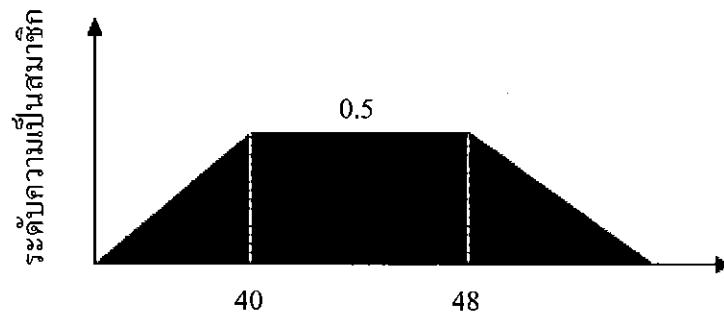


รูปที่ 3.26 ผลของการรวมกฎ slope



รูปที่ 3.27 ผลของเอาต์พุตของกฎข้อที่ 3

พิจารณาเอาต์พุตของระบบควบคุมความเร็วหุ่นยนต์ในรูปที่ 3.28 ค่า COG สามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 3.28 การประมวลผลค่าเอาท์พุทด้วยวิธีแมมดามิ (ข)

$$\text{COG} = \frac{(40+48) \times 0.5}{0.5+0.5} = 44.00 \quad (3.2)$$

สรุปการพยากรณ์ข้อมูลเบื้องต้น ดังตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการพยากรณ์ค่าความเป็นไปได้ของเอาท์พุท

ค่าอินพุทของการเปลี่ยนแปลง โหลดน้ำหนัก	ค่าอินพุทของการ เปลี่ยนแปลงความ เอียงของพื้น	ค่าอินพุทของการ เปลี่ยนแปลงความสูง ของพื้น	ค่าเอาท์พุทการ เปลี่ยนแปลงความเร็ว ของหุ่นยนต์
0	66	50	44.9
0	78	50	34.4
1	66	50	79
1	78	50	31.7
2	66	50	113
2	78	50	58.3
3	66	50	161
3	78	50	74.6
4	66	50	161
4	78	50	130
5	66	50	161
5	78	50	130

ผลการออกแบบตัวควบคุมพีซีซี

เมื่อระบบรับค่าอินพุตของการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนัก, ค่าอินพุตของการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้น และค่าอินพุตของการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้น ตามตารางที่ 3.3 จะได้ค่าเอาต์พุตการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์แต่ละโหลดน้ำหนักที่ประมวลผลออกมาเป็นไปตามตารางที่ 3.3 เพื่อนำค่าเอาต์พุตที่ได้ไปควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ พบว่าการออกแบบนี้เมื่อมีค่าอินพุตของการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนัก, ค่าอินพุตของการเปลี่ยนแปลงความเอียงของพื้น และค่าอินพุตของการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้นเปลี่ยนแปลงไป ค่าเอาต์พุตที่ได้มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด การออกแบบนี้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง เนื่องจากผลที่ได้เป็นไปตามหลักความเป็นจริง



บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะเป็นการทดลองการทำงานของหุ่นยนต์แบบควบคุมความเร็วโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิก เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการทำงานของหุ่นยนต์ โดยแบ่งออกเป็น 6 การทดลองดังนี้

1. การทดลองหาความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่โหลดน้ำหนักต่างกัน
2. การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นระนาบ
3. การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 10 องศา
4. การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 20 องศา
5. การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 10 องศา
6. การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 20 องศา

4.1 การทดลองหาความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่โหลดน้ำหนักต่างกัน

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่โหลดน้ำหนักต่างกัน โดยหุ่นยนต์มีน้ำหนัก 2.78 กิโลกรัม แบ่งการทดลองออกเป็น 18 การทดลองย่อยดังนี้

1. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 0 กิโลกรัม ที่พื้นระนาบ
2. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ที่พื้นระนาบ
3. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 2 กิโลกรัม ที่พื้นระนาบ
4. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 3 กิโลกรัม ที่พื้นระนาบ
5. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 4 กิโลกรัม ที่พื้นระนาบ
6. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 5 กิโลกรัม ที่พื้นระนาบ
7. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 0 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 10 องศา
8. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 10 องศา
9. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 2 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 10 องศา
10. การทดลองเมื่อมีโหลดน้ำหนัก 3 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 10 องศา

11. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 4 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 10 องศา
12. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 5 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 10 องศา
13. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 0 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 20 องศา
14. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 20 องศา
15. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 2 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 20 องศา
16. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 3 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 20 องศา
17. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 4 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 20 องศา
18. การทดลองเมื่อมีไหลค้ำน้ำหนัก 5 กิโลกรัม ที่พื้นเอียง 20 องศา

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับขนาดของพื้นเอียงให้มีขนาด 0 องศา
2. ตั้งค่ามอเตอร์ให้ทำงานที่ 100 เปอร์เซ็นต์
3. ใส่ไหลค้ำน้ำหนักตามที่กำหนดในตารางที่ 4.1
4. เปิดสวิทช์ให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่ง และให้เคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ จากนั้นสังเกตความเร็วสูงสุดที่แสดงบนจอแอลซีดี และบันทึกค่านี้นลงไปในตารางที่ 4.1
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าพื้นเอียงจาก 0 องศาเป็น 10 องศาและ 20 องศา
6. บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่แต่ละไหลค้ำน้ำหนัก

ไหลค้ำน้ำหนัก ที่กำหนด (กิโลกรัม)	ความเร็วของหุ่นยนต์ ที่พื้นระนาบ (เมตร/วินาที)	ความเร็วของหุ่นยนต์ ที่พื้นเอียง 10 องศา (เมตร/วินาที)	ความเร็วของหุ่นยนต์ ที่พื้นเอียง 20 องศา (เมตร/วินาที)
0	0.32	0.29	0.25
1	0.31	0.29	0.22
2	0.30	0.25	0.20
3	0.28	0.24	0.15
4	0.27	0.23	0.13
5	0.26	0.20	0.10

จากการทดลองข้างต้นพบว่าไหลค้ำน้ำหนักและพื้นเอียง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ เป็นไปตามตารางที่ 4.1 ดังนั้นความเร็วที่เลือกใช้ในการทดลองต่อไปนี้จะเป็ความเร็วที่หุ่นยนต์สามารถทำงานได้คือ ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที สำหรับการทดลองพื้นระนาบและพื้นเอียง 10 องศา ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที สำหรับพื้นเอียง 20 องศา

4.2 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นระนาบ

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นระนาบ โดยจะกำหนดให้ความเร็วที่ใช้ในการทดลองมี 2 ความเร็ว คือ ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลองย่อย ดังนี้

1. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงทีละ 1.25 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักเริ่มต้น 0 กิโลกรัม, 1.25 กิโลกรัม, 2.5 กิโลกรัมและ 3.75 กิโลกรัม
2. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักเริ่มต้น 0 กิโลกรัม, 1 กิโลกรัมและ 2.5 กิโลกรัม
3. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักเริ่มต้น 0 กิโลกรัมและ 1 กิโลกรัม
4. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักเริ่มต้น 0 กิโลกรัม
5. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักเริ่มต้น 0 กิโลกรัม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับขนาดของพื้นเอียงให้มีขนาด 0 องศา
2. ตั้งค่าให้หุ่นยนต์มีความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที
3. ใส่ไหลค้ำน้ำหนักร่วมต้นให้หุ่นยนต์ ตามที่กำหนดในตารางที่ 4.2
4. เปิดสวิทซ์ให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น จนเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่กำหนด ให้ใส่ไหลค้ำน้ำหนักร่วมต้นเพิ่มขึ้ 1.25 กิโลกรัมและเริ่มจับเวลา
5. สังเกตหุ่นยนต์จากไดโอดเปล่งแสง เมื่อความเร็วกลับมามีค่าคงที่เท่าเดิมให้หยุดจับเวลา

6. จากนั้นนำเวลาที่ได้มาบันทึกผลในตารางที่ 4.2
7. ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนโหลดน้ำหนักที่เพิ่มทีละ 1.25 กิโลกรัมเป็น เพิ่มโหลดน้ำหนักทีละ 2.5 กิโลกรัม, 3 กิโลกรัม, 4 กิโลกรัมและ 5 กิโลกรัมตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.6
8. ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์จาก 0.18 เมตร/วินาทีเป็นความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที บันทึกผลลงในตารางที่ 4.2 ถึงตารางที่ 4.6

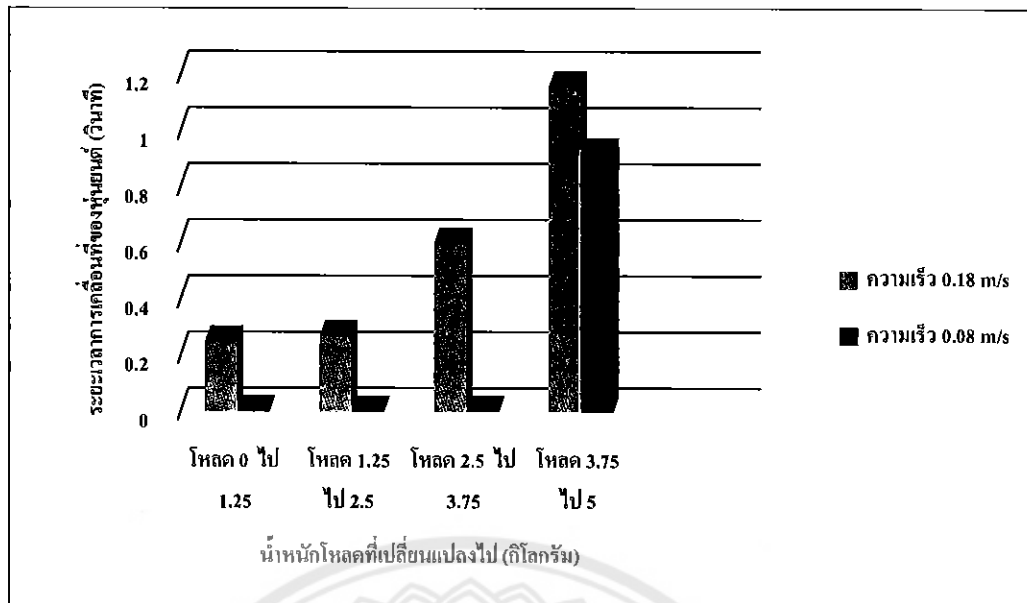
4.2.1 การทดลองที่ 1 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	น้อย มาก	น้อย มาก	0.20	น้อย มาก	1.08	0.25	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก
1.25	0.66	0.73	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	0.27	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก
2.5	น้อย มาก	1.23	1.11	น้อย มาก	0.70	0.60	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก
3.75	2.10	0.86	1.28	0.60	0.97	1.16	น้อย มาก	0.88	0.83	1.19	0.79	0.92

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.1 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

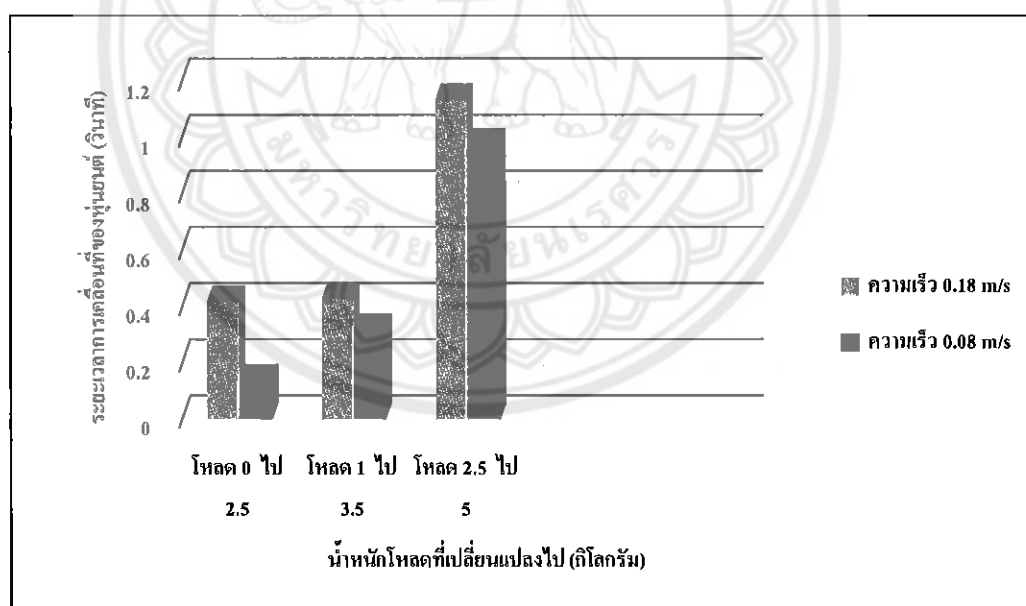
4.2.2 การทดลองที่ 2 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	น้อย มาก	น้อย มาก	0.92	0.71	0.50	0.42	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	0.69	0.14
1	0.87	น้อย มาก	0.91	น้อย มาก	0.40	0.43	0.55	น้อย มาก	0.63	0.46	น้อย มาก	0.32
2.5	0.91	1.10	0.32	1.74	1.64	1.14	2.51	0.88	น้อย มาก	0.68	0.84	0.98

หมายเหตุ หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.2 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

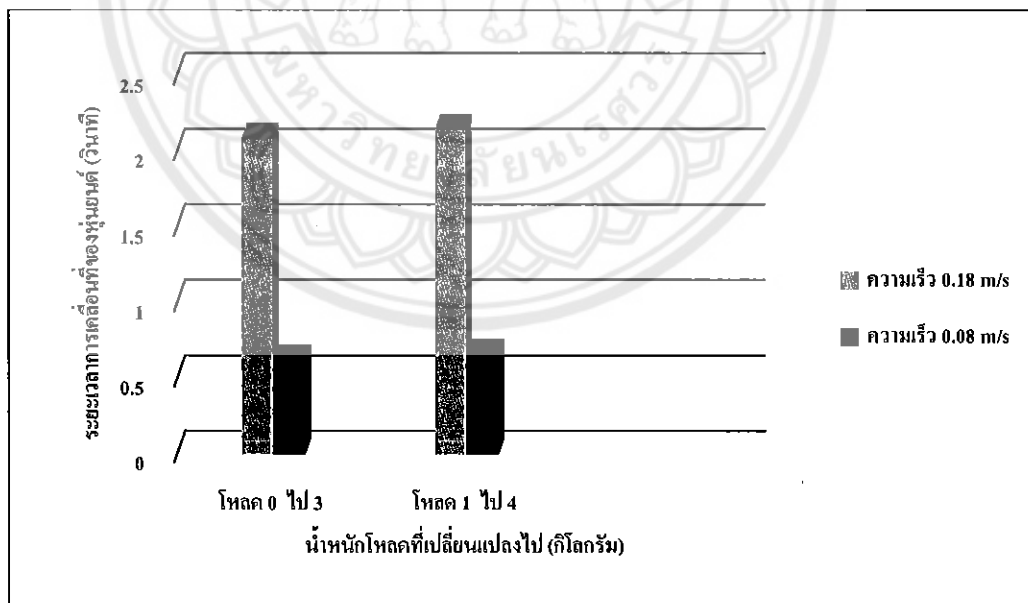
4.2.3 การทดลองที่ 3 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	5.50	0.76	2.61	0.71	0.89	2.09	0.45	0.38	0.68	0.86	0.77	0.62
1	4.36	2.60	1.72	0.88	1.23	2.15	0.14	0.30	0.41	0.45	2.01	0.66

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 เมตร/วินาที



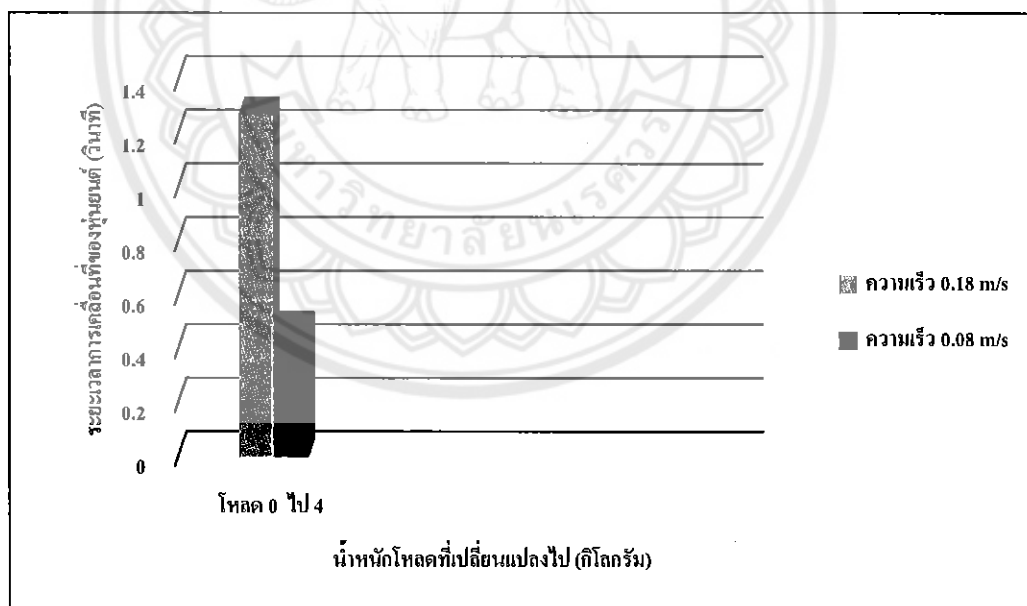
รูปที่ 4.3 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

4.2.4 การทดลองที่ 4 เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ไหลค้ำ น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	1.81	0.80	1.64	1.04	1.13	1.28	0.65	0.12	0.36	0.57	0.74	0.48



รูปที่ 4.4 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

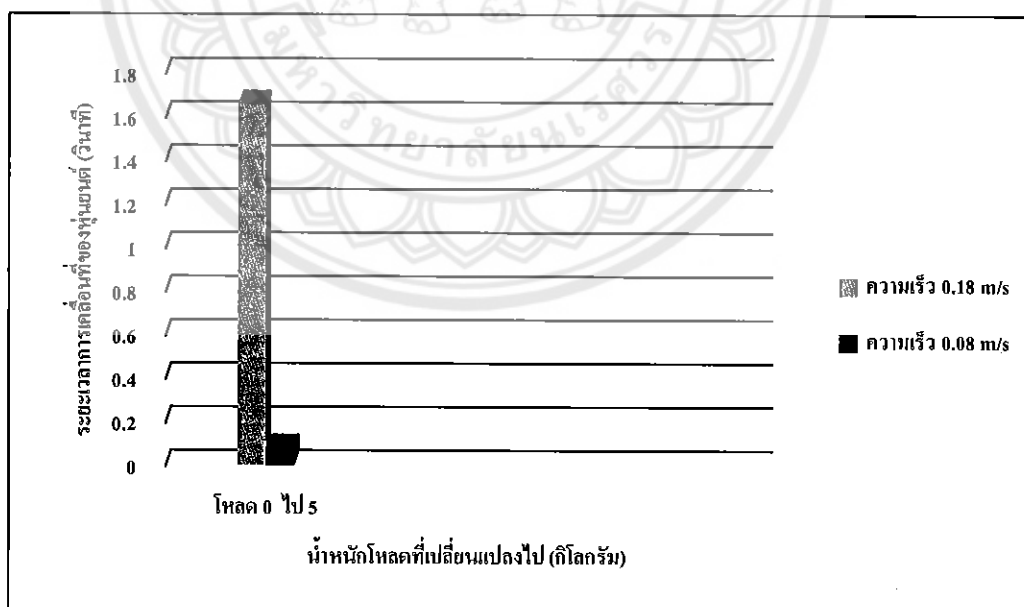
4.2.5 การทดลองที่ 5 เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อ ไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ไหล่น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที					เฉลี่ย	ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					เฉลี่ย
	ครั้งที่						ครั้งที่					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
0	0.32	2.14	2.53	1.57	1.76	1.66	0.43	น้อยมาก	น้อยมาก	น้อยมาก	น้อยมาก	0.08

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.5 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

จากการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นระนาบนี้ พบว่าที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที มีระยะเวลาในการประมวลผลนานกว่าที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ทั้งนี้เพราะที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที มีความเร็วรอบมอเตอร์มากกว่าจึงไม่สามารถปรับความเร็วได้ทันถ่วงที ขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที มีจำนวนรอบน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเกิดขึ้นจึงทำให้ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่ใช้ประมวลผลมีการปรับเพิ่มลดเอาต์พุตที่ไม่มากหุ่นยนต์จึงสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด และหากหุ่นยนต์มีการรับน้ำหนักไหลค้ำรวมมากขึ้นจะมีการใช้ระยะเวลาในการประมวลผลนานขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความเป็นจริงที่ว่าเมื่อวัตถุมีการรับน้ำหนักมากขึ้นจะเกิดแรงกระทำกับตัวหุ่นยนต์ทำให้หุ่นยนต์มีการปรับลดความเร็วอย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมแบบฟัซซีจึงมีการใช้ระยะเวลาในการประมวลผลเพื่อให้หุ่นยนต์กลับมาวิ่งด้วยความเร็วที่กำหนดดังเดิม

4.3 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 10 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 10 องศา โดยจะกำหนดให้ความเร็วที่ใช้ในการทดลองมี 2 ความเร็ว คือ ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลองย่อย ดังนี้

1. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลงทีละ 1.25 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักรเริ่มต้น 0 กิโลกรัม, 1.25 กิโลกรัม, 2.5 กิโลกรัม และ 3.75 กิโลกรัม
2. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักรเริ่มต้น 0 กิโลกรัม, 1 กิโลกรัม และ 2.5 กิโลกรัม
3. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักรเริ่มต้น 0 กิโลกรัม และ 1 กิโลกรัม
4. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักรเริ่มต้น 0 กิโลกรัม
5. การทดลองเมื่อไหลค้ำน้ำหนักรมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม โดยมีไหลค้ำน้ำหนักรเริ่มต้น 0 กิโลกรัม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับขนาดของพื้นเอียงให้มีขนาด 10 องศา
2. ตั้งค่าให้หุ่นยนต์มีความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที
3. ใส่โหลดน้ำหนักเริ่มต้นให้หุ่นยนต์ ตามที่กำหนดในตารางที่ 4.7
4. เปิดสวิทช์ให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น จนเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่กำหนด ให้ใส่โหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.25 กิโลกรัมและเริ่มจับเวลา
5. สังเกตหุ่นยนต์จากไดโอดเปล่งแสง เมื่อความเร็วกลับมามีค่าคงที่เท่าเดิมให้หยุดจับเวลา
6. จากนั้นนำเวลาที่ได้อ่านบันทึกผลในตารางที่ 4.7
7. ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนโหลดน้ำหนักที่เพิ่มทีละ 1.25 กิโลกรัมเป็น เพิ่มโหลดน้ำหนักทีละ 2.5 กิโลกรัม, 3 กิโลกรัม, 4 กิโลกรัมและ 5 กิโลกรัมตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.8 ถึงตารางที่ 4.11
8. ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์จาก 0.18 เมตร/วินาทีเป็นความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที บันทึกผลลงในตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.11

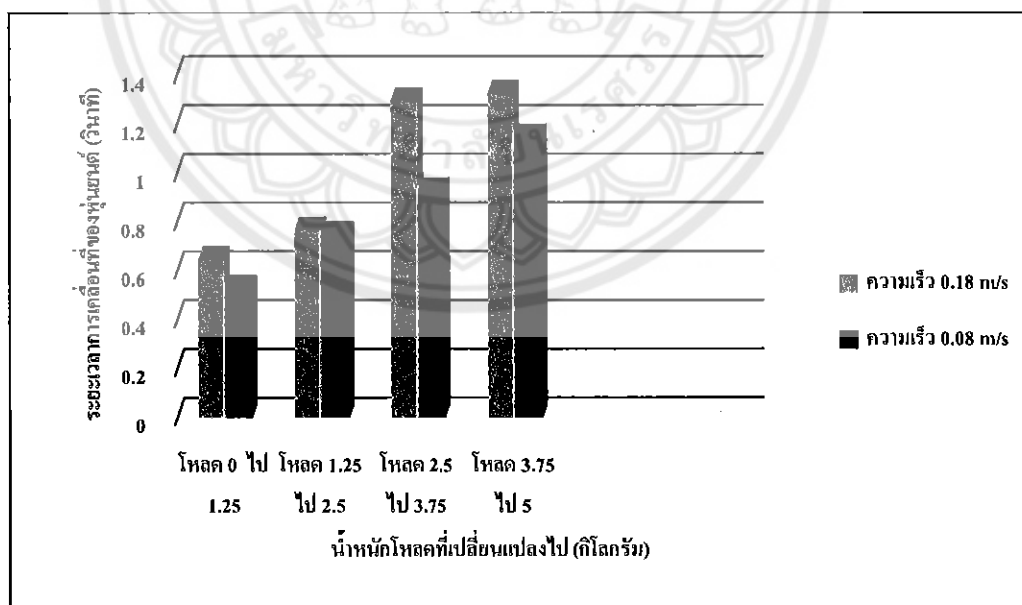
4.3.1 การทดลองที่ 1 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	2.14	น้อย มาก	น้อย มาก	1.13	น้อย มาก	0.65	0.21	0.54	0.23	0.41	1.29	0.53
1.25	0.81	น้อย มาก	0.82	2.24	น้อย มาก	0.77	0.92	1.22	0.31	0.98	0.36	0.75
2.5	1.21	2.30	1.74	0.53	0.76	1.30	น้อย มาก	0.91	2.67	0.43	0.65	0.93
3.75	1.12	1.57	1.47	1.30	1.21	1.33	0.34	1.50	0.45	2.01	1.45	1.15

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาน้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.6 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

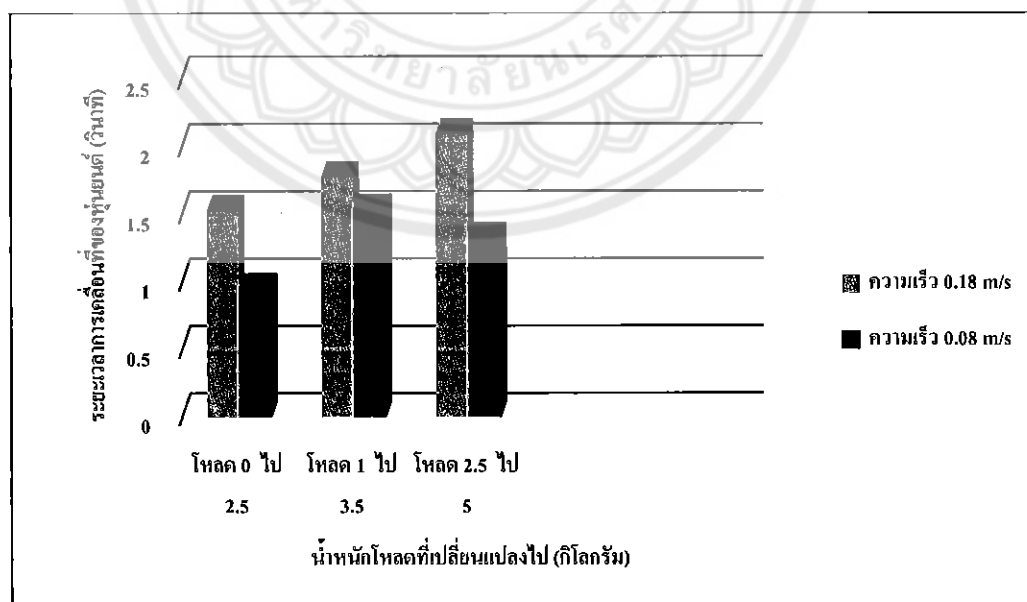
4.3.2 การทดลองที่ 2 เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.8 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ไหล่น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	0.63	2.30	1.19	0.42	3.12	1.53	1.18	1.03	1.01	0.27	1.29	0.95
1	น้อยมาก	0.67	0.73	น้อยมาก	0.38	1.78	1.81	2.31	น้อยมาก	1.93	0.64	1.33
2.5	4.41	2.63	0.53	0.75	2.19	2.10	2.12	1.76	1.31	1.65	0.89	1.54

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.7 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหล่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

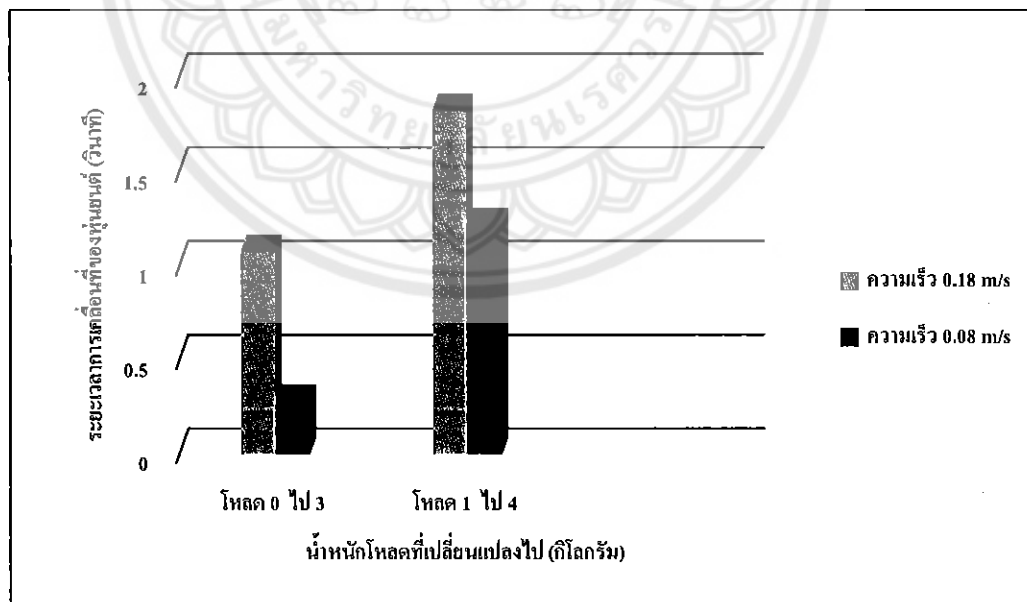
4.3.3 การทดลองที่ 3 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	1.54	2.92	น้อย มาก	0.95	น้อย มาก	1.08	น้อย มาก	น้อย มาก	0.81	น้อย มาก	0.61	0.28
1	1.52	1.44	3.05	2.00	1.18	1.83	0.38	1.40	1.69	1.65	1.00	1.22

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.8 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

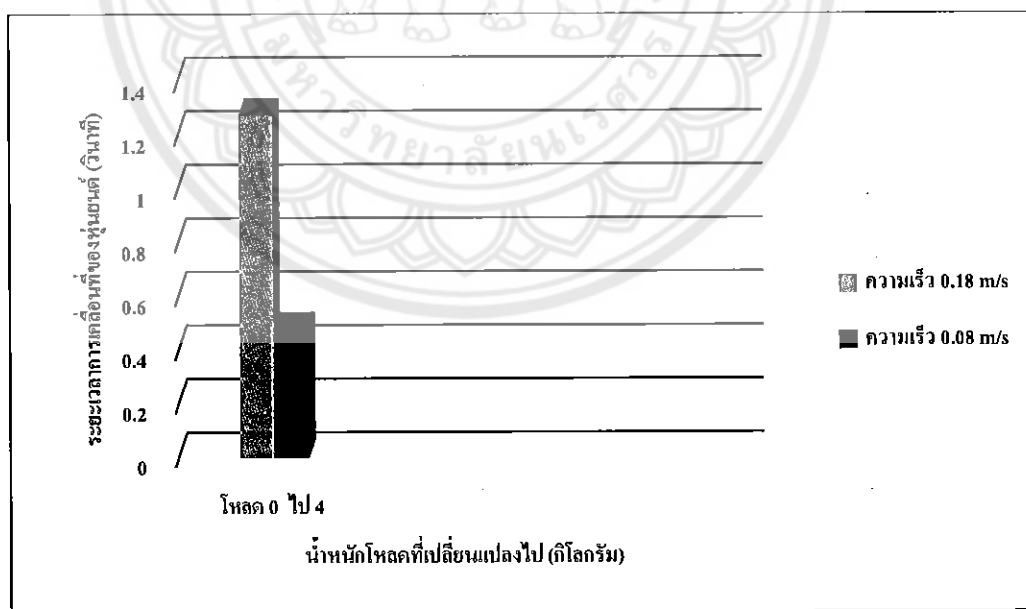
4.3.4 การทดลองที่ 4 เมื่อไหลค่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ไหลค่น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	1.33	1.39	0.54	0.35	1.27	0.97	1.84	น้อยมาก	1.43	0.90	น้อยมาก	0.83

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



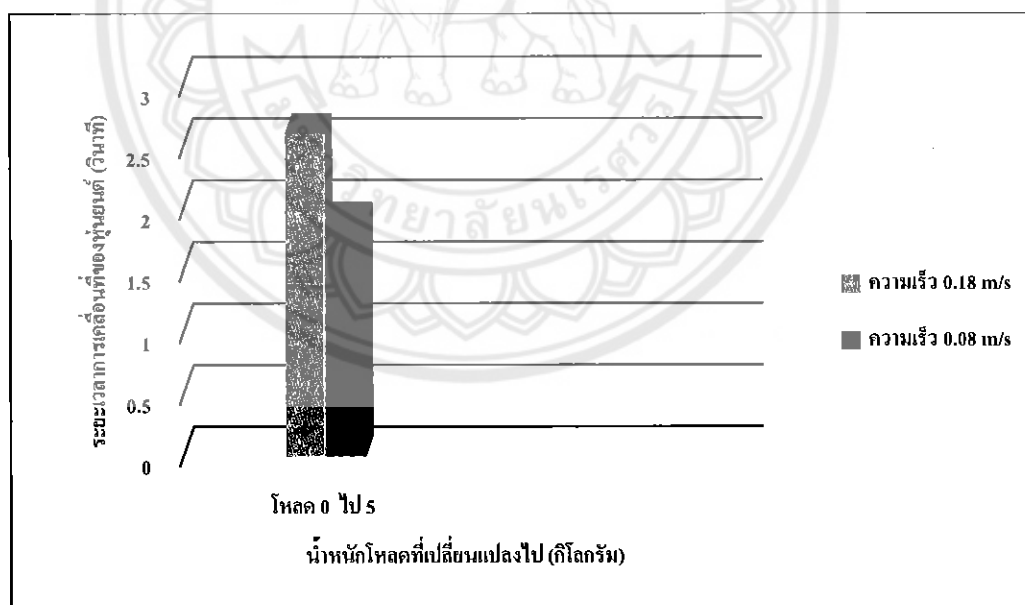
รูปที่ 4.9 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค่น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

4.3.5 การทดลองที่ 5 เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ไหลค้ำน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
0	2.14	2.54	3.06	1.85	3.54	2.62	2.49	2.53	1.39	0.91	2.22	1.90



รูปที่ 4.10 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อไหลค้ำน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

ในการทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อไหลค
น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาทีที่มีการใช้ระยะเวลาใน
การประมวลผลนานกว่าความเร็ว 0.08 เมตร/วินาทีเช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ที่ทดลอง
บนพื้นระนาบ แต่การทดลองที่พื้นเอียง 10 องศาที่มีการระยะเวลาการประมวลผลที่นานมากขึ้น
กว่าเดิมเนื่องจากองศาของพื้นเอียงและความสูงของรางที่ใช้ในการทดลองส่งผลต่อความเร็วของ
หุ่นยนต์ เป็นไปตามกฎแรงโน้มถ่วงเมื่อมีแรงเข้ามากระทำและทิศทางของแรงที่ตรงกันข้ามกับ
ความเร็ว ด้วยเหตุผลนี้หุ่นยนต์จึงมีการปรับลดความเร็วและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลที่มาก
กว่าเดิม

4.4 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อไหลค น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 20 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่
กำหนด เมื่อไหลคน้ำหนัมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 20 องศา โดยจะกำหนดให้ความเร็วที่ใช้
ในการทดลองเป็น 0.08 เมตร/วินาที แบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลองย่อยดังนี้

1. การทดลองเมื่อไหลคน้ำหนัมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม โดยมีไหลคน้ำหนั
เริ่มต้น 0 กิโลกรัม, 1.25 กิโลกรัม, 2.5 กิโลกรัมและ 3.75 กิโลกรัม
2. การทดลองเมื่อไหลคน้ำหนัมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม โดยมีไหลคน้ำหนั
เริ่มต้น 0 กิโลกรัม, 1 กิโลกรัมและ 2.5 กิโลกรัม
3. การทดลองเมื่อไหลคน้ำหนัมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม โดยมีไหลคน้ำหนัเริ่มต้น
0 กิโลกรัมและ 1 กิโลกรัม
4. การทดลองเมื่อไหลคน้ำหนัมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม โดยมีไหลคน้ำหนัเริ่มต้น
0 กิโลกรัม
5. การทดลองเมื่อไหลคน้ำหนัมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม โดยมีไหลคน้ำหนัเริ่มต้น
0 กิโลกรัม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับขนาดของพื้นเอียงให้มีขนาด 20 องศา
2. ตั้งค่าให้หุ่นยนต์มีความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที
3. ใส่ไหลคน้ำหนัเริ่มต้นให้หุ่นยนต์ ตามที่กำหนดในตารางที่ 4.12

4. เปิดสวิทช์ให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น จนเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่กำหนด ให้ใส่โหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.25 กิโลกรัมและเริ่มจับเวลา
5. สังเกตหุ่นยนต์จากไดโอดเปล่งแสง เมื่อความเร็วกลับมามีค่าคงที่เท่าเดิมให้หยุดจับเวลา
6. จากนั้นนำเวลาที่ได้อ่านบันทึกผลในตารางที่ 4.12
7. ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนโหลดน้ำหนักที่เพิ่มทีละ 1.25 กิโลกรัมเป็น เพิ่มโหลดน้ำหนักทีละ 2.5 กิโลกรัม, 3 กิโลกรัม, 4 กิโลกรัมและ 5 กิโลกรัมตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.12 ถึงตารางที่ 4.14

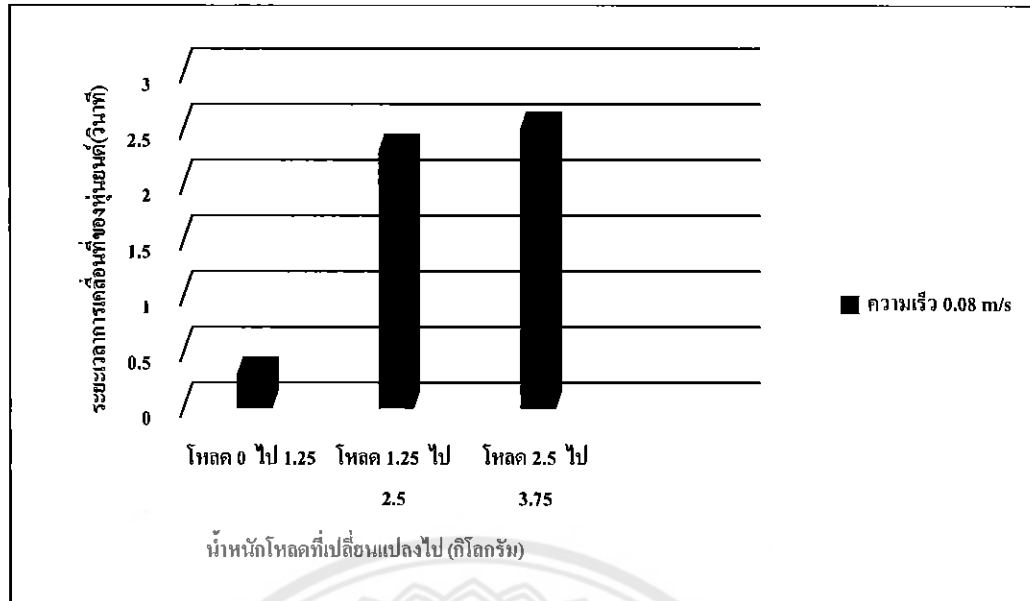
4.4.1 การทดลองที่ 1 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.12 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อ โหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลดน้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)					เฉลี่ย
	ครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
0	น้อยมาก	น้อยมาก	1.59	น้อยมาก	น้อยมาก	0.31
1.25	4.69	2.64	0.98	2.26	0.98	2.31
2.5	2.87	2.06	4.24	4.07	4.31	3.51
3.75	เกินความสามารถของหุ่นยนต์					

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



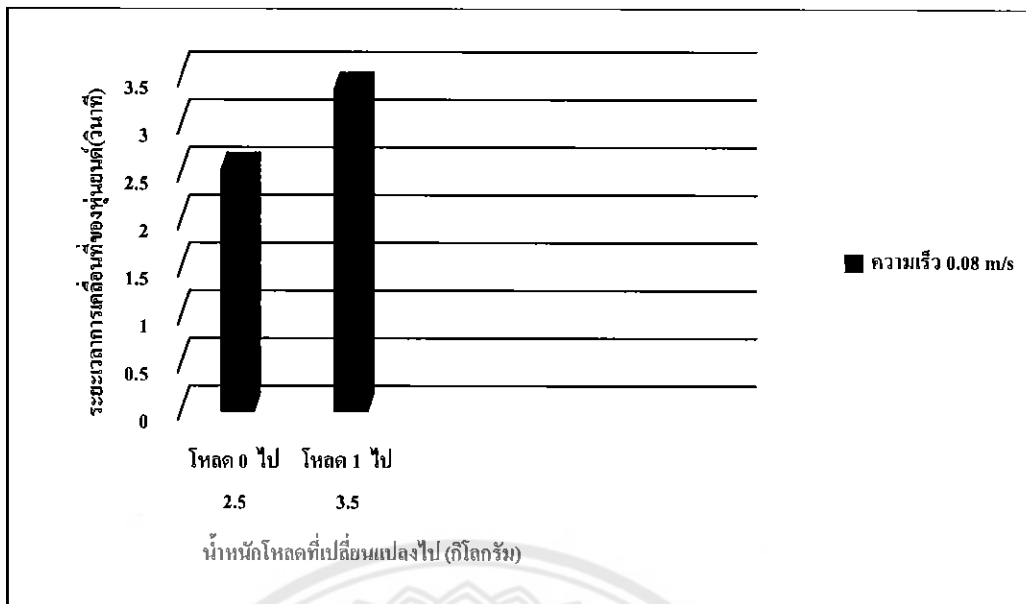
รูปที่ 4.11 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 1.25 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

4.4.2 การทดลองที่ 2 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.13 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)					เฉลี่ย
	ครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
0	0.88	3.79	2.94	2.81	2.28	2.54
1	3.71	2.41	4.62	3.85	2.31	3.38
2.5	เกินความสามารถของหุ่นยนต์					



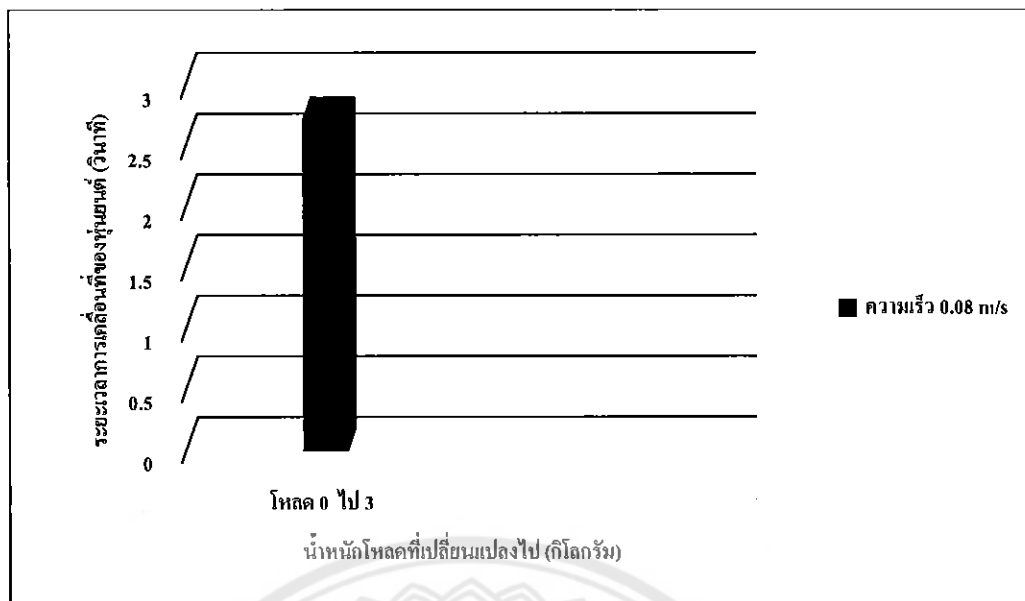
รูปที่ 4.12 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อ โหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 2.5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

4.4.3 การทดลองที่ 3 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อ โหลด น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และ รูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.14 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อ โหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลดน้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)					เฉลี่ย
	ครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
0	2.70	2.08	3.23	2.55	3.11	2.73
1	เกินความสามารถของหุ่นยนต์					



รูปที่ 4.13 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 3 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

4.4.4 การทดลองที่ 4 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ที่โหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 4 กิโลกรัม หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

4.4.5 การทดลองที่ 5 เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ที่โหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้

การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นเอียง 20 องศาสามารถใช้ความเร็วที่ 0.08 เมตร/วินาทีเท่านั้นเนื่องจากความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่รับได้เมื่อมีการรับโหลดน้ำหนัก 5 กิโลกรัมดังตาราง 4.1 แต่เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่า หุ่นยนต์ไม่สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดหากมีการรับโหลดตั้งแต่ 4 กิโลกรัมขึ้นไป ทั้งนี้เพราะว่าการทดลองหาความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ทางคณะผู้จัดทำใช้วงจรขับกระแสสำหรับมอเตอร์ที่มีความสามารถสูงสุด แต่เมื่อมีการปรับลดความเร็วที่กำหนดทำให้มอเตอร์ไม่มีแรงในการขับหรือส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เมื่อหุ่นยนต์มีการรับโหลดน้ำหนักรวมที่มากกว่าบนพื้นเอียง 20 องศา น้ำหนักและความเร็วของหุ่นยนต์จึงส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มากกว่าเดิม

4.5 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 10 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 10 องศา ที่ระยะทางรวมทั้งหมด 8.40 เมตร โดยจะกำหนดให้ความเร็วที่ใช้ในการทดลองมี 2 ความเร็ว คือ ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองย่อย ดังนี้

1. การทดลองเมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 10 องศา โดยมีโหลดน้ำหนักเริ่มต้นคงที่ตั้งแต่ 1 กิโลกรัม – 5 กิโลกรัม
2. การทดลองเมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 องศาเป็น 0 องศา โดยมีโหลดน้ำหนักเริ่มต้นคงที่ตั้งแต่ 1 กิโลกรัม – 5 กิโลกรัม

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับขนาดของพื้นเอียงให้มีขนาด 10 องศา
2. ตั้งค่าให้หุ่นยนต์มีความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที
3. ใส่โหลดน้ำหนักเริ่มต้นให้หุ่นยนต์ 1 กิโลกรัม
4. เปิดสวิทซ์ให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น และเริ่มจับเวลา
5. สังเกตหุ่นยนต์จากไดโอดเปล่งแสง เมื่อความเร็วกลับมามีค่าคงที่เท่าเดิมให้หยุดจับเวลา
6. จากนั้นนำเวลาที่ได้อ่านบันทึกผลในตารางที่ 4.15
7. ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนโหลดน้ำหนักจาก 1 กิโลกรัมเป็น 2 กิโลกรัม, 3 กิโลกรัม, 4 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัมตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.16
8. ทำการทดลองซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนความเร็วของหุ่นยนต์จาก 0.18 เมตร/วินาทีเป็นความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที บันทึกผลลงในตารางที่ 4.15 ถึงตารางที่ 4.16

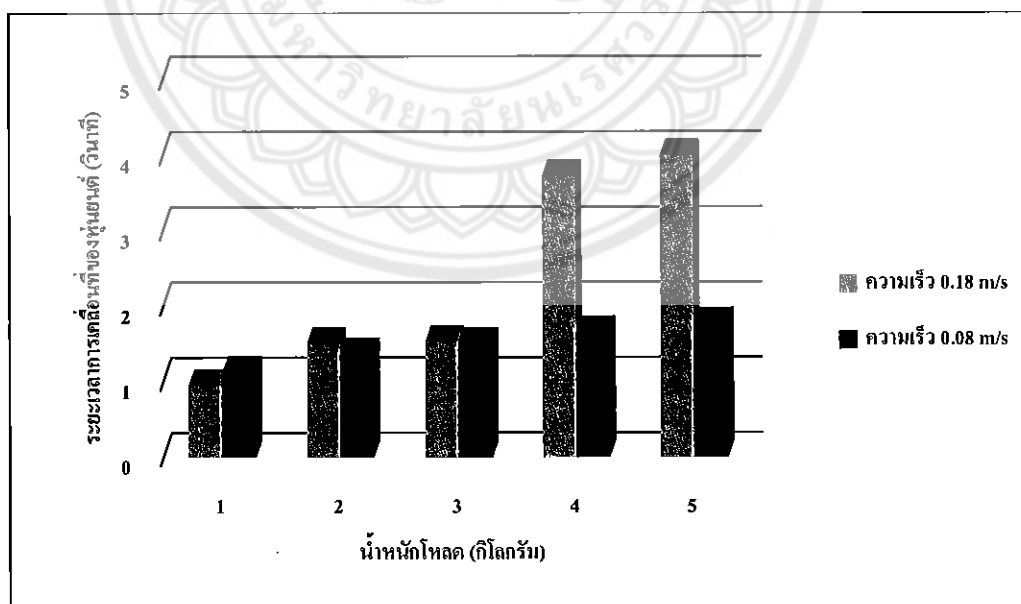
4.5.1 การทดลองที่ 1 เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาทีดังแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.15 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)											
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที					
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	น้อย มาก	น้อย มาก	1.87	1.84	1.09	0.96	0.61	1.03	1.10	1.36	1.58	1.13
2	1.22	0.81	1.52	1.32	2.70	1.51	0.90	1.93	1.82	0.82	1.41	1.37
3	1.27	3.13	1.04	0.86	1.40	1.54	1.05	2.22	1.68	1.09	1.51	1.51
4	4.40	2.87	4.83	4.00	2.60	3.74	1.27	3.69	1.16	1.21	1.00	1.66
5	4.72	3.81	3.40	4.82	3.31	4.01	2.34	3.01	1.48	0.98	1.07	1.77

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาน้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.14 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับจาก 0 องศาเป็น 10 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

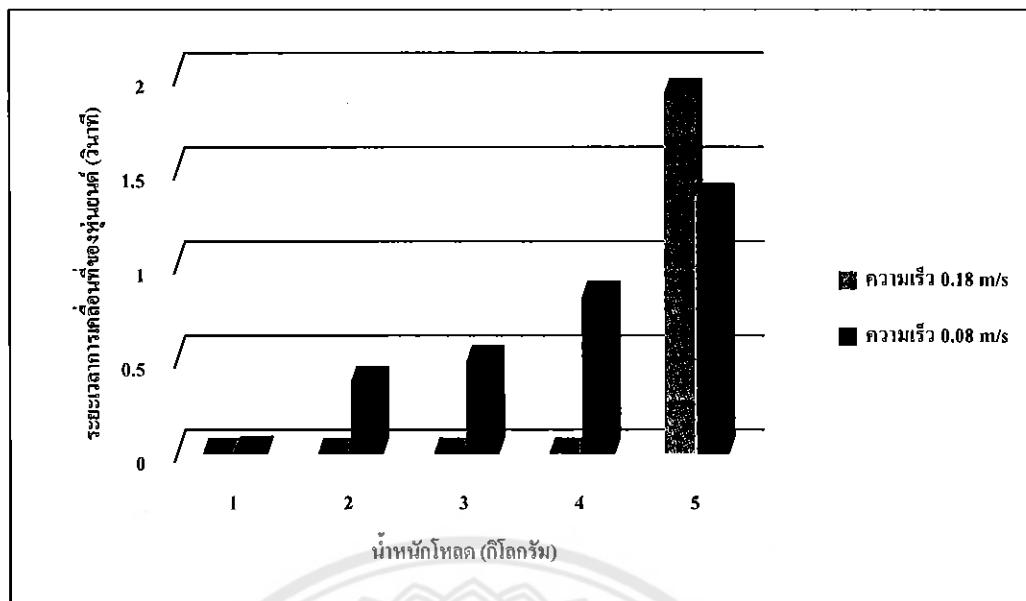
4.5.2 การทดลองที่ 2 เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 องศาเป็น 0 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 องศาเป็น 0 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาทีดังแสดงในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.16 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 องศาเป็น 0 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลด น้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)												
	ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที						ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที						
	ครั้งที่					เฉลี่ย	ครั้งที่					เฉลี่ย	
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		
1	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	0.01
2	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	1.12	0.38
3	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	0.21	น้อย มาก	0.43	0.94	0.88	0.49	
4	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	น้อย มาก	0.58	น้อย มาก	2.31	น้อย มาก	0.62	0.83	
5	น้อย มาก	0.5	3.8	2	3.25	1.91	1.53	1.72	0.97	1.52	1.01	1.35	

หมายเหตุ น้อยมาก คือระยะเวลาที่น้อยกว่า 0.01 วินาที



รูปที่ 4.15 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับจาก 10 องศาเป็น 0 องศา ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที

การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 10 องศา เมื่อหุ่นยนต์มีการรับโหลดน้ำหนักที่คงที่ ที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที มีการปรับความเร็วของหุ่นยนต์นานกว่าความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที เมื่อเปลี่ยนองศาพื้นถนนจาก 0 องศาเป็น 10 องศาเหตุผลเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา แต่เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่บนพื้นถนน 10 องศาแล้วเปลี่ยนเป็น 0 องศา ความเร็วที่ 0.18 เมตร/วินาทีประมวลผลได้ดีกว่าที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที หุ่นยนต์มีการปรับลดความเร็วเช่นเดียวกัน แต่น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์เมื่อมีการรับโหลดน้ำหนัก 5 กิโลกรัมและทิศทางของแรงที่เสริมกัน ทำให้มีค่าโมเมนตัมมากกว่าหุ่นยนต์ขณะที่รับโหลดน้ำหนักเพียง 4 กิโลกรัม ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วขึ้น เนื่องจากหุ่นยนต์มีการรับค่าอินพุตเข้ามาตลอด หุ่นยนต์จึงมีการปรับค่าความเร็วอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ความเร็วกลับมามีค่าตามที่กำหนด ส่งผลให้ค่าที่อ่านได้บนจอแสดงผลมีการประวิงเวลา ทำให้ค่าที่แสดงผลนั้นไม่เป็นค่า ณ ปัจจุบัน

4.6 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อพื้นถนน มีการเปลี่ยนแปลง 20 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 20 องศา องศา ที่ระยะทางรวมทั้งหมด 8.40 เมตร กำหนดให้ความเร็วที่ใช้ในการทดลองเป็น 0.08 เมตร/วินาที แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองย่อย ดังนี้

1. การทดลองเมื่อไหลด์พื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 20 องศา โดยมีไหลด์น้ำหนักเริ่มต้นคงที่ตั้งแต่ 1 กิโลกรัม – 5 กิโลกรัม
2. การทดลองเมื่อไหลด์พื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 องศาเป็น 0 องศา โดยมีไหลด์น้ำหนักเริ่มต้นคงที่ตั้งแต่ 1 กิโลกรัม – 5 กิโลกรัม

ขั้นตอนการทดลอง

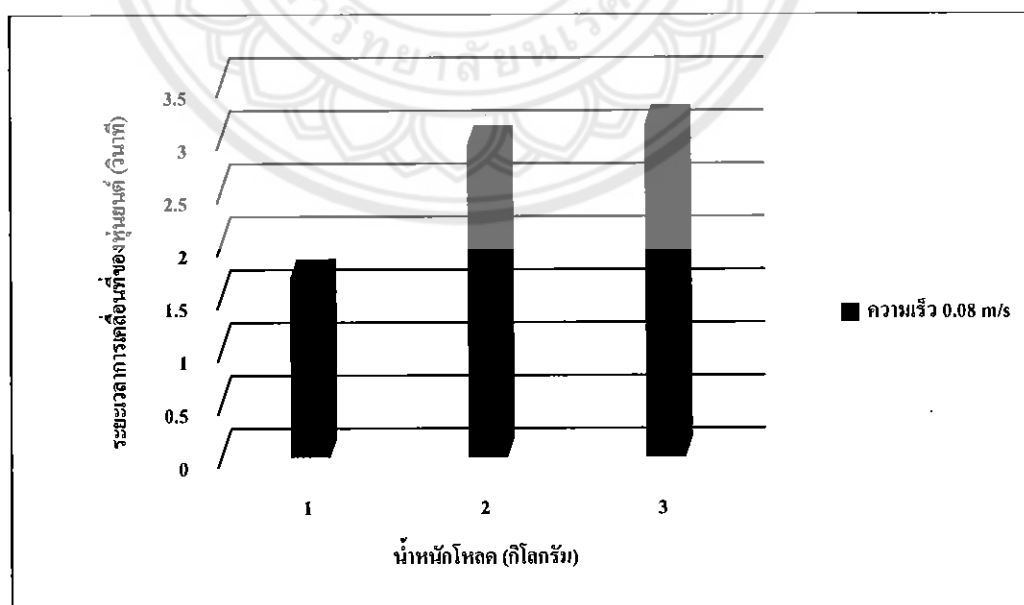
1. ปรับขนาดของพื้นเอียงให้มีขนาด 20 องศา
2. ตั้งค่าให้หุ่นยนต์มีความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที
3. ใส่ไหลด์น้ำหนักเริ่มต้นให้หุ่นยนต์ 1 กิโลกรัม
4. เปิดสวิทช์ให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น และเริ่มจับเวลา
5. สังเกตหุ่นยนต์จากไดโอดเปล่งแสง เมื่อความเร็วกลับมามีค่าคงที่เท่าเดิมให้หยุดจับเวลา
6. จากนั้นนำเวลาที่ได้อ่านบันทึกผลในตารางที่ 4.17
7. ทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนไหลด์น้ำหนักจาก 1 กิโลกรัมเป็น 2 กิโลกรัม, 3 กิโลกรัม, 4 กิโลกรัมและ 5 กิโลกรัมตามลำดับ บันทึกผลลงในตารางที่ 4.17

4.6.1 การทดลองที่ 1 เมื่อไหลดพื้นถนนที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 20 องศาที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 20 องศา ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.17 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาเป็น 20 องศา ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

โหลดน้ำหนัก เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์ปรับความเร็ว (วินาที)					เฉลี่ย
	ครั้งที่					
	1	2	3	4	5	
1	0	1.43	1.89	2.65	2.50	1.69
2	2.12	1.68	4.17	3.18	3.63	2.95
3	3.36	1.75	3.35	4.27	2.97	3.14
4	เกินความสามารถของหุ่นยนต์					
5	เกินความสามารถของหุ่นยนต์					



รูปที่ 4.16 กราฟการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงระดับจาก 0 องศาเป็น 20 องศา ที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

4.6.2 การทดลองที่ 2 เมื่อโหลดพื้นถนนที่การเปลี่ยนแปลงจาก 20 องศาเป็น 0 องศาที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที

จากการทดลองเมื่อพื้นเอียงมีการเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที หุ่นยนต์ไม่สามารถประมวลผลได้ ซึ่งอาจเกิดจากระยะของรางที่ใช้ในการทดลองนั้นมีขนาดที่สั้นเกินไป

การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดเมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลง 20 องศา เมื่อหุ่นยนต์มีการรับโหลดน้ำหนักที่คงที่ ที่ความเร็ว 0.08 จะมีระยะเวลาประมวลผลที่นานขึ้นเนื่องจากโหลดน้ำหนักรวมมากและเคลื่อนที่บนพื้นเอียงตั้งแต่ต้นรางการทดลองส่งผลให้รถเคลื่อนที่ขึ้นไปกลางรางที่ล่าช้ากว่าการมีโหลดน้ำหนักรวมที่เท่ากันแต่เป็นการเพิ่มโหลดบนรางทดลอง และเมื่อพื้นถนนมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 องศาเป็น 0 องศา พบว่าหุ่นยนต์มีการประมวลผล แต่ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่แสดงออกมาไม่สอดคล้องกับผลที่ประมวลได้ เนื่องจากหุ่นยนต์มีน้ำหนักรวมที่มาก ตัวหุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างรวดเร็ว แม้มอเตอร์จะมีการปรับความเร็วรอบแล้วก็ตาม เป็นไปตามกฎแรงโน้มถ่วง และในการทดลองนี้มีขนาดความยาวของรางที่จำกัด ส่งผลให้ตัวหุ่นยนต์ไม่สามารถปรับให้การเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์เป็นไปตามผลที่ประมวลได้ทัน

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการ สามารถสรุปผลการทำงานและชี้แจงถึงปัญหาระหว่างการดำเนินงาน รวมทั้งเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา และข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการต่อไปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในโครงการนี้ได้ทำการสร้างหุ่นยนต์ควบคุมความเร็ว โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีลอจิกซึ่งสามารถควบคุมความเร็วให้คงที่เมื่อไหลค่าน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวฉนวน และเมื่อพื้นผิวฉนวนมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อรองรับไหลค่าน้ำหนักที่มีการเปลี่ยนแปลงของหุ่นยนต์โดยสามารถสรุปการทำงานของหุ่นยนต์ได้ดังนี้

1. หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วตามที่กำหนดได้ และสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามที่กำหนดบนพื้นระนาบ และพื้นเอียง 10 องศาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตั้งแต่ 1 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัมที่ความเร็ว 0.18 เมตร/วินาที และ 0.08 เมตร/วินาที ที่พื้นเอียง 20 องศาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไหลค่าน้ำหนัก 1 กิโลกรัมถึง 3.75 กิโลกรัมที่ความเร็ว 0.08 เมตร/วินาที หากความเร็วเริ่มต้นต่ำกว่าค่าที่กำหนด เนื่องจากระยะเวลาที่แตกต่างกันไม่มากส่งผลต่อการพิจารณาถึงข้อแตกต่าง หากความเร็วเริ่มต้นเกินกว่าค่าที่กำหนดหุ่นยนต์จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการรับไหลค่าน้ำหนักตั้งแต่ 4 กิโลกรัมบนพื้นเอียง 20 องศา เนื่องจากความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ที่พื้นเอียง 20 องศา มีความเร็วเพียง 0.10 เมตร/วินาทีเท่านั้น

2. หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วตามที่กำหนดไว้ได้เมื่อมีการรับน้ำหนักคงที่ ขณะพื้นฉนวนมีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นระนาบเปลี่ยนเป็นพื้นเอียง 10 องศา จากพื้นเอียง 10 องศาเปลี่ยนเป็นพื้นระนาบ เมื่อหุ่นยนต์มีการรับน้ำหนักตั้งแต่ 0 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัม และจากพื้นระนาบเปลี่ยนเป็นพื้นเอียงที่ 20 องศาเมื่อหุ่นยนต์มีการรับน้ำหนักตั้งแต่ 0 กิโลกรัมถึง 3 กิโลกรัม

3. เมื่อปรับความเร็วเริ่มต้นที่ 0.08 เมตร/วินาที หุ่นยนต์สามารถปรับความเร็วให้กลับมามีค่าเริ่มต้นได้ดี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไหลค่าน้ำหนักบนพื้นผิวฉนวน แต่ด้วยความที่หุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงไหลค่าน้ำหนักในแต่ละการทดลองที่ต่างกันส่งผลให้ระยะเวลาในการปรับความเร็วนั้นแตกต่างกันด้วย เช่นหากมีการเปลี่ยนแปลงไหลค่าน้ำหนักเริ่มต้นจาก 1.25 กิโลกรัมเป็นไหลค่าน้ำหนักรวม 2.5 กิโลกรัมก็จะแตกต่างจากไหลค่าน้ำหนักเริ่มต้นจาก 0 กิโลกรัมเป็นไหลค่าน้ำหนักรวม 2.5 กิโลกรัม แม้ไหลค่าน้ำหนักรวมมีค่าเท่ากันจริงแต่ช่วงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีค่าต่างกันเป็นสองเท่า หุ่นยนต์จึงใช้ระยะเวลาในการปรับความเร็วให้กลับมามีค่าเริ่มต้นที่ต่างกัน

4. เมื่อปรับความเร็วเริ่มต้นที่ 0.18 เมตร/วินาทีหุ่นยนต์สามารถปรับความเร็วให้กลับมามีค่าเริ่มต้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อพื้นการทดลองเปลี่ยนแปลงจากพื้นเอียง 10 องศาเป็นพื้นระนาบเมื่อมีการรับน้ำหนักตั้งแต่ 0 กิโลกรัมถึง 4 กิโลกรัมซึ่งระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงความเร็วนั้นมีค่าน้อยมากโดยหุ่นยนต์ทำการปรับความเร็วทันทีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพื้นผิวถนน

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหา

1. คลังโปรแกรม (ไลบรารี) ของเซนเซอร์ความเร่งไจโรสโคปไม่สมบูรณ์ ทำให้ไม่สามารถใช้งานโปรแกรมของเซนเซอร์ความเร่งในการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง

แนวทางการแก้ปัญหา ถ่ายโอนข้อมูลทุกครั้ง ก่อนทำการทดลอง

2. โหลดน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองมีขนาดใหญ่ กลวง และหนา ทำให้ความสูงของตัวหุ่นยนต์สูงขึ้นเมื่อรวมกับ โหลดน้ำหนัก ส่งผลให้เวลาที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในพื้นที่เอียงมีความเสี่ยงต่อการพลิกคว่ำ

แนวทางการแก้ปัญหา หาโหนดน้ำหนักที่มีลักษณะตัน และบางแต่น้ำหนักเทียบเท่ากับ โหนดเดิม

3. ระยะทางของรางที่ใช้ในการทดลอง มีความยาวไม่พอที่จะทำให้พืชซีประมวลผลและรับค่าได้ทัน เนื่องจากโมเมนตัมและการดลที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับมวลและทิศทางความเร็วนี้ด้วย

แนวทางการแก้ปัญหา ปรับขนาดรางให้มีความยาว และความสูงมากขึ้นเพื่อให้การประมวลผลของพืชซีประมวลผลได้ระยะเวลานานขึ้นหรือชนิดของพื้นรางที่ใช้ในการทดลองควรเป็นพื้นผิวที่มีความหนืดเพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน เช่น พื้นยาง

4. สถานที่ที่ใช้ในการทดลองมีพื้นที่ที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองพร้อมกันทั้ง 2 รางได้ การทดลองนี้จึงไม่ราบรื่นเท่าที่ควร

แนวทางการแก้ปัญหา หาพื้นที่ที่เพียงพอต่อการทำการทดลอง

5.3 การนำไปพัฒนาและต่อยอด

1. สามารถสร้างหุ่นยนต์ที่รองรับโหนดน้ำหนักได้มากกว่า 5 กิโลกรัม โดยการเลือกใช้มอเตอร์ที่มีอัตราทดที่มากขึ้น จากเดิมในการทดลองนี้ใช้มอเตอร์ที่มีอัตราทด 50:1 หรือหากต้องการเลือกใช้มอเตอร์ให้ตรงกับการรับ โหนดน้ำหนักในชิ้นงาน สามารถคำนวณได้จาก

$$p = 2\pi \times N \times F \times r \quad (5.1)$$

โดยที่

P = กำลังด้านเอาต์พุต (วัตต์)

N = จำนวนรอบ/วินาที

F = แรง (นิวตัน)

r = รัศมีของแกนมอเตอร์ (เซนติเมตร)

2. สามารถนำไปโปรแกรมไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรกล อุปกรณ์ที่ต้องรองรับโหลดน้ำหนักที่มาก อาทิเช่น บันไดเลื่อนตามสถานที่ที่มีประชากรหนาแน่น



เอกสารอ้างอิง

- [1] นางสาวประภาศรี คำลือ, นายรัฐพงศ์ ไบวุฒิ “การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง”. ปรินญาณิพนธ์ ,2558
- [2] ศศ.ศุภชัย สุรินทร์วงศ์. “มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง”. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2541
- [3] <https://www.academia.edu/7750667> สืบค้นเมื่อ พฤศจิกายน 2559
- [4] [www. http://vrbme.blogspot.com/2010/08/load-cell.html](http://vrbme.blogspot.com/2010/08/load-cell.html) ,สืบค้นเมื่อ ธันวาคม 2559
- [5] <http://www.ee.eng.cmu.ac.th>, สืบค้นเมื่อ ธันวาคม 2559
- [6] S.K.Harisha,Ramkanth Kumar P,M. Krishna, and S.Sharma (2008), **Fuzzy Logic Reasoning to Control Mobile Robot on Pre-defined Strip Path**.World Academy of Science Engineering and technology.
- [7] กัณฑ์ณ พรวี ไชสง.การประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกกับการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี.
- [8] <http://www.thaieasyelec.com> สืบค้นเมื่อ เมษายน 2560
- [9] <http://www.compomax.co.th/product/ultrasonic-theory/> สืบค้นเมื่อ เมษายน 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

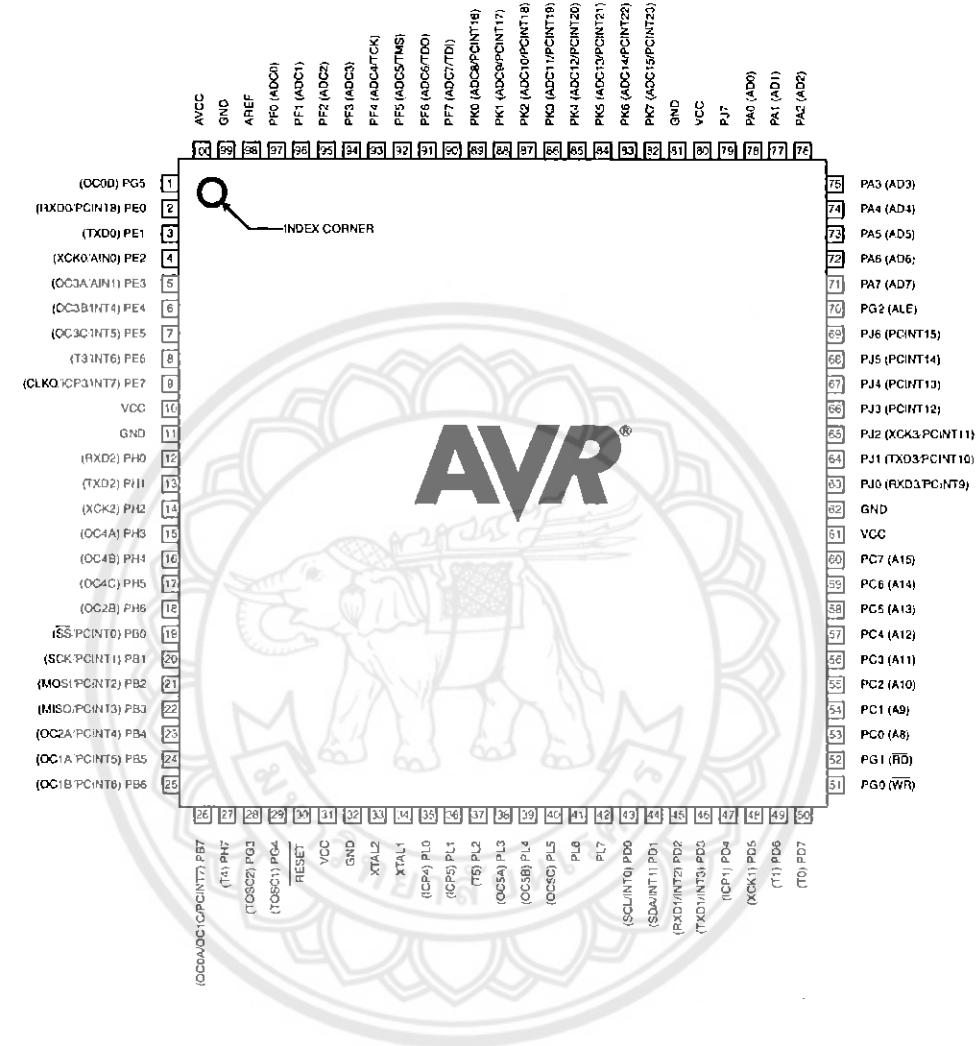
SUMMARY

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 64Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® QTouch® 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 15 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 Wake-up 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
 - 5V/6 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - 64-pad QFN/MLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
 - 100-lead TQFP, 100-ball BGA (ATmega640/1280/2560)
 - RoHS/PAF/Free Green
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 1MHz, 1.8V: 500µA
 - Power-down Mode: 0.1µA at 1.8V
- Speed Grade:
 - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
 - * 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega2560V/ATmega2561V:
 - * 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
 - * 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.6V
 - ATmega2560/ATmega2561:
 - * 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V

1. Pin Configurations

Figure 1-1. TQFP-pinout ATmega640/1280/2560



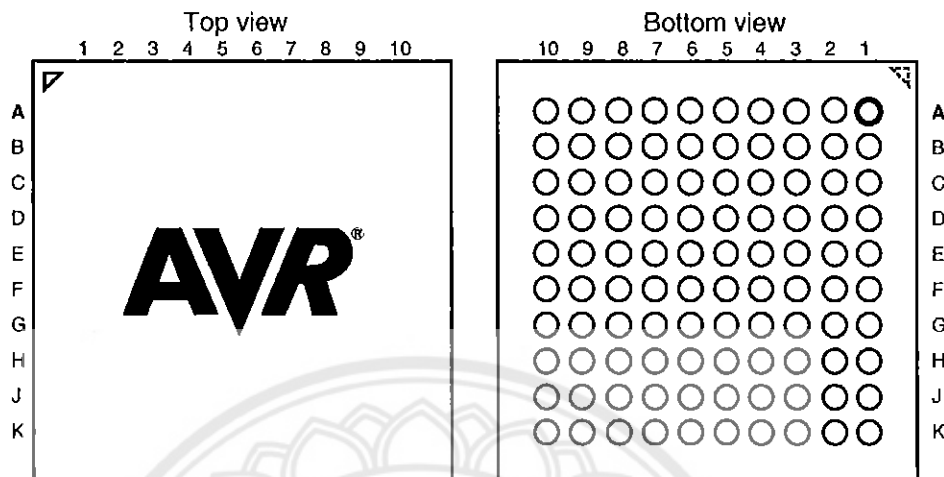
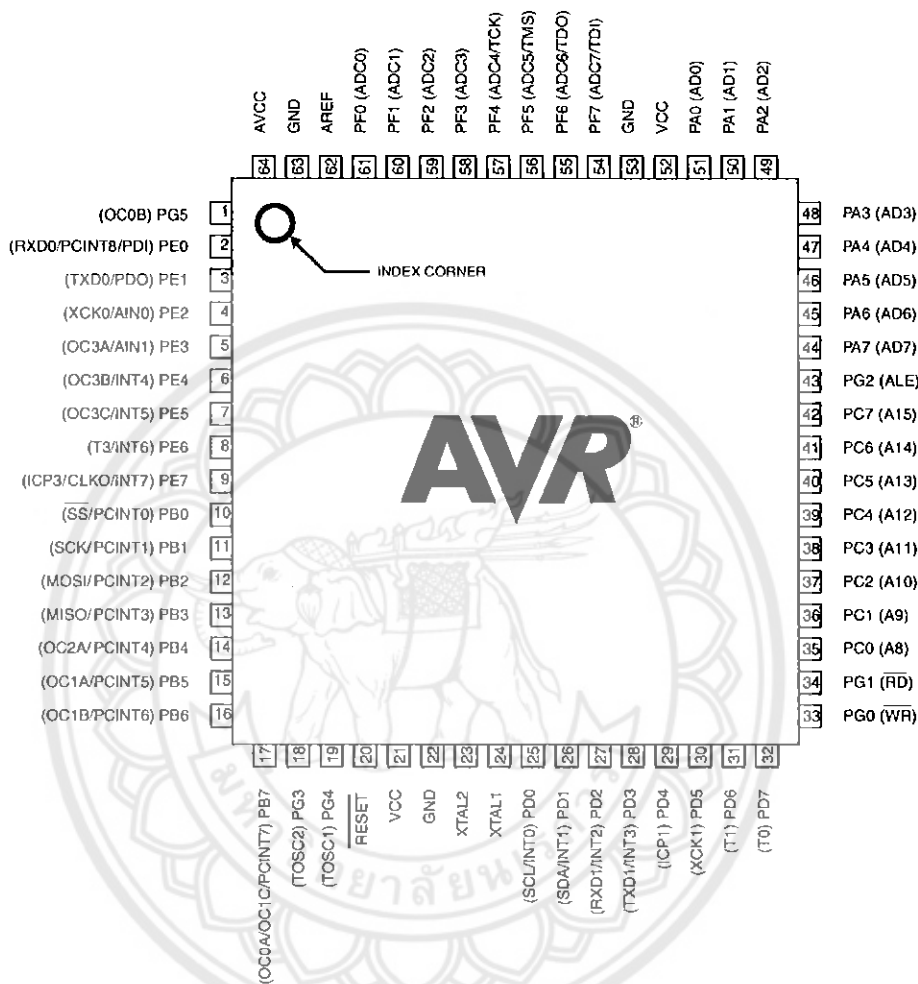


Table 1-1. CBGA-pinout ATmega640/1280/2560

	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



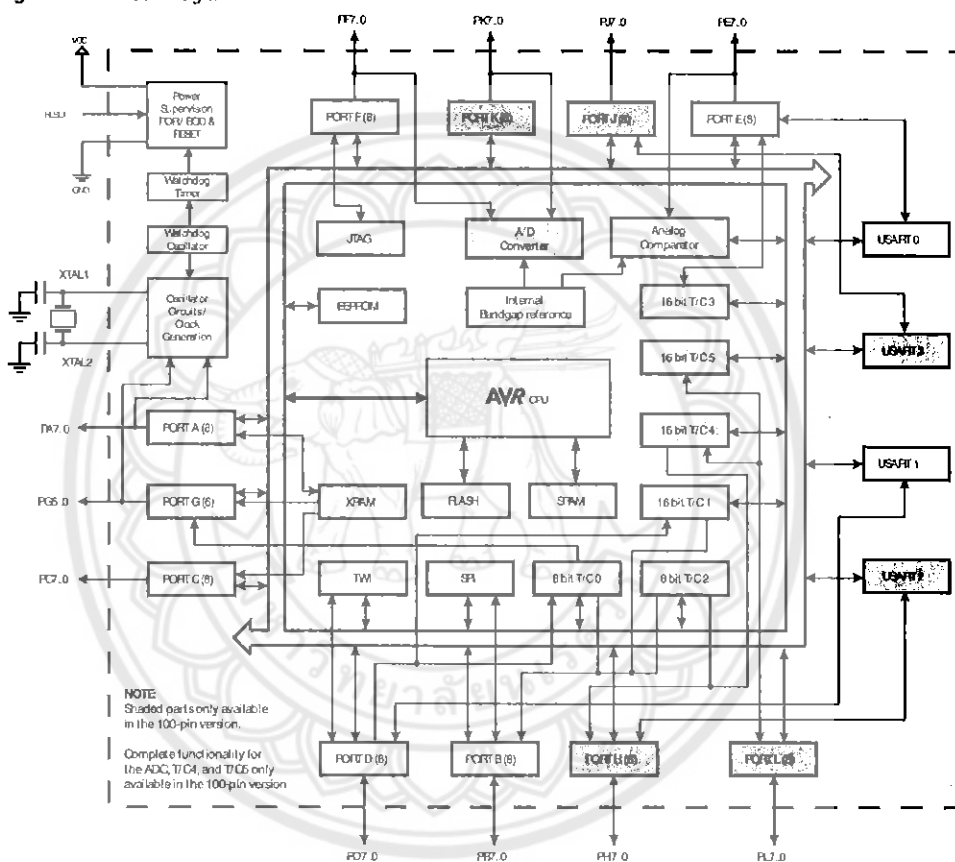
Note: The large center pad underneath the QFN/MLF package is made of metal and internally connected to GND. It should be soldered or glued to the board to ensure good mechanical stability. If the center pad is left unconnected, the package might loosen from the board.

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.





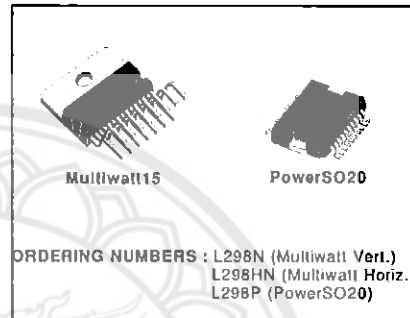
L298

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)

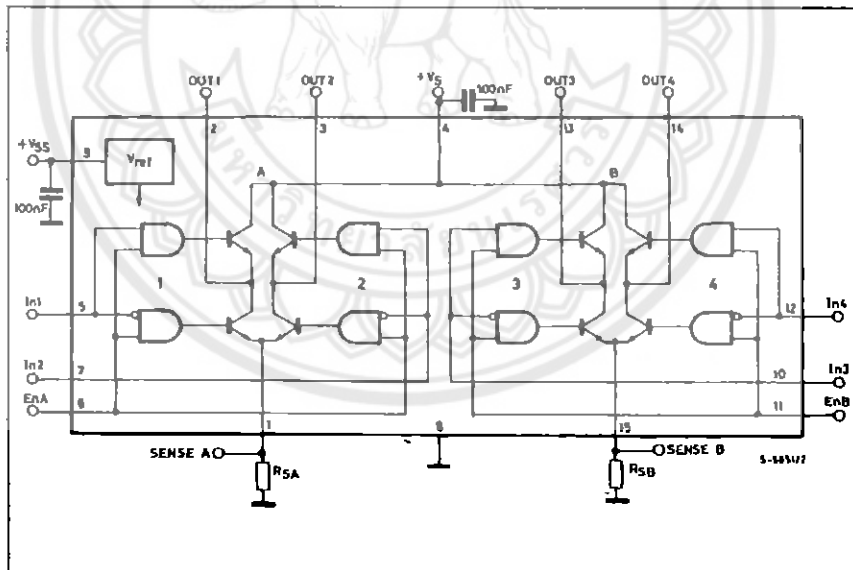
DESCRIPTION

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

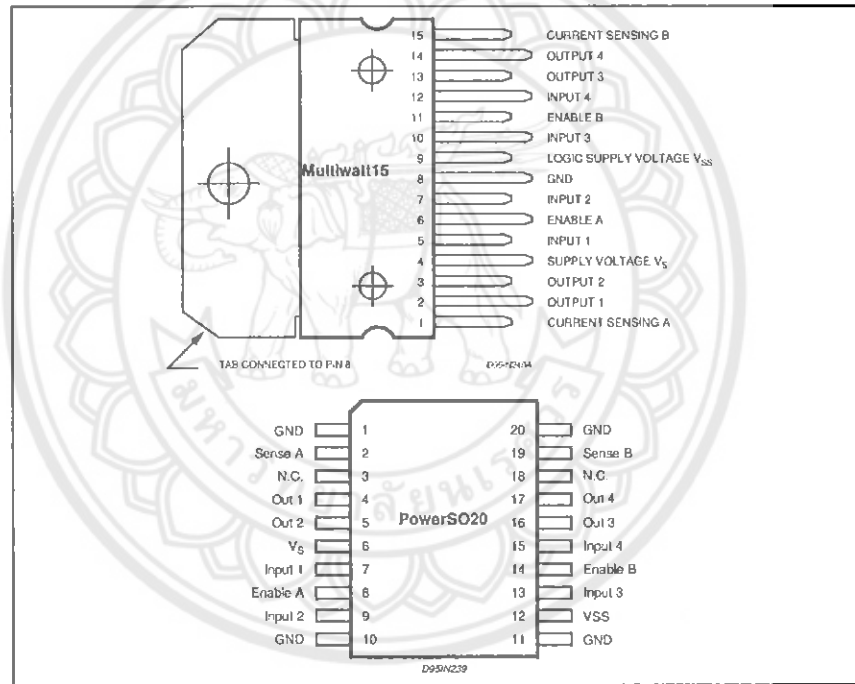


L298

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 = 100µs) - 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°C)	25	W
T _{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	°C
T _{stg} , T _J	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	°C

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	PowerSO20	Multiwatt15	Unit
R _{th(j-case)}	Thermal Resistance Junction-case	Max. -	3	°C/W
R _{th(j-amb)}	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 13 (*)	35	°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 _S	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 _{SS}	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_S = 42V; V_{SS} = 5V; T_J = 25°C; unless otherwise specified)

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





LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

Low Offset Voltage Dual Comparators

The LM393 series are dual independent precision voltage comparators capable of single or split supply operation. These devices are designed to permit a common mode range-to-ground level with single supply operation. Input offset voltage specifications as low as 2.0 mV make this device an excellent selection for many applications in consumer, automotive, and industrial electronics.

Features

- Wide Single-Supply Range: 2.0 Vdc to 36 Vdc
- Split-Supply Range: ± 1.0 Vdc to ± 18 Vdc
- Very Low Current Drain Independent of Supply Voltage: 0.4 mA
- Low Input Bias Current: 25 nA
- Low Input Offset Current: 5.0 nA
- Low Input Offset Voltage: 5.0 mV (max) LM293/393
- Input Common Mode Range to Ground Level
- Differential Input Voltage Range Equal to Power Supply Voltage
- Output Voltage Compatible with DTL, ECL, TTL, MOS, and CMOS Logic Levels
- ESD Clamps on the Inputs Increase the Ruggedness of the Device without Affecting Performance
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable
- These Devices are Pb-Free, Halogen Free/BFR Free and are RoHS Compliant

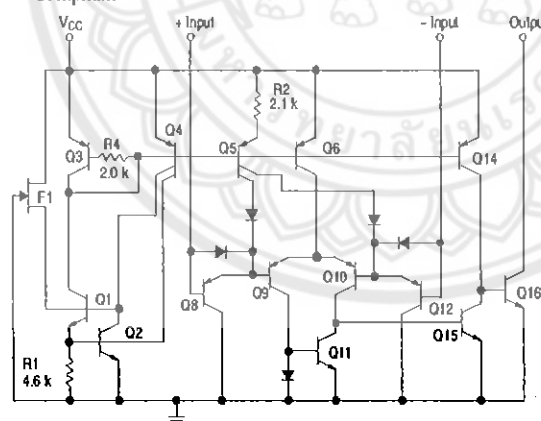
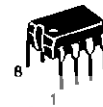


Figure 1. Representative Schematic Diagram
(Diagram shown is for 1 comparator)



ON Semiconductor®

www.onsemi.com



PDIP-8
N SUFFIX
CASE 626

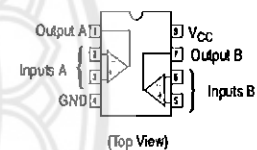


SOIC-8
D SUFFIX
CASE 751



Micro8™
DM SUFFIX
CASE B46A

PIN CONNECTIONS



DEVICE MARKING AND ORDERING INFORMATION

See detailed marking information and ordering and shipping information on pages 6 and 7 of this data sheet.

LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	V_{CC}	+36 or ±18	V
Input Differential Voltage	V_{IDR}	36	V
Input Common Mode Voltage Range (Note 1)	V_{ICR}	-0.3 to +36	V
Output Voltage	V_O	36	V
Output Short Circuit-to-Ground Output Sink Current (Note 2)	I_{SC} I_{Sink}	Continuous 20	mA
Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D $1/R_{\theta JA}$	570 5.7	mW mW/°C
Operating Ambient Temperature Range LM293 LM393, LM393E LM2903, LM2903E LM2903V, NCV2903 (Note 3)	T_A	-25 to +85 0 to +70 -40 to +105 -40 to +125	°C
Maximum Operating Junction Temperature LM393, LM393E, LM2903, LM2903E, LM2903V LM293, NCV2903	$T_{J(max)}$	150 150	°C
Storage Temperature Range	T_{Stg}	-65 to +150	°C

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

- For supply voltages less than 36 V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
- The maximum output current may be as high as 20 mA, independent of the magnitude of V_{CC} , output short circuits to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction.
- NCV2903 is qualified for automotive use.

ESD RATINGS

Rating	HBM	MM	Unit
ESD Protection at any Pin (Human Body Model - HBM, Machine Model - MM)			
NCV2903 (Note 3)	2000	200	V
LM393E, LM2903E	1500	150	V
LM393DG/DR2G, LM2903DG/DR2G	250	100	V
All Other Devices	1500	150	V

LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 5.0$ Vdc, $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LM293, LM393, LM393E			LM2903E/V, NCV2903			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage (Note 5) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$	V_{IO}	-	± 1.0	± 5.0	-	± 2.0	± 7.0 ± 15	mV
Input Offset Current $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$	I_{IO}	-	± 5.0	± 50	-	± 5.0	± 50 ± 200	nA
Input Bias Current (Note 6) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$	I_{IB}	-	20	250	-	20	250	nA
Input Common Mode Voltage Range (Note 6) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$	V_{ICR}	0	-	$V_{CC} - 1.5$	0	-	$V_{CC} - 1.5$	V
Voltage Gain $R_L \geq 15$ k Ω , $V_{CC} = 15$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$	A_{VOL}	50	200	-	25	200	-	V/mV
Large Signal Response Time $V_{in} =$ TTL Logic Swing, $V_{rel} = 1.4$ Vdc $V_{NL} = 5.0$ Vdc, $R_L = 5.1$ k Ω , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	-	300	-	-	300	-	ns
Response Time (Note 8) $V_{RL} = 5.0$ Vdc, $R_L = 5.1$ k Ω , $T_A = 25^\circ\text{C}$	t_{RLH}	-	1.3	-	-	1.5	-	μs
Input Differential Voltage (Note 9) All $V_{in} \geq$ GND or V- Supply (if used)	V_{ID}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	V
Output Sink Current $V_{in} \geq 1.0$ Vdc, $V_{in+} = 0$ Vdc, $V_O \leq 1.5$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$	I_{SINK}	6.0	16	-	6.0	16	-	mA
Output Saturation Voltage $V_{in} \geq 1.0$ Vdc, $V_{in+} = 0$, $I_{SINK} \leq 4.0$ mA, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$	V_{OL}	-	150	400	-	-	400	mV
Output Leakage Current $V_{in-} = 0$ V, $V_{in+} \geq 1.0$ Vdc, $V_O = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{in-} = 0$ V, $V_{in+} \geq 1.0$ Vdc, $V_O = 30$ Vdc, $T_{low} \leq T_A \leq T_{high}$	I_{OL}	-	0.1	-	-	0.1	-	nA
Supply Current $R_L = \infty$ Both Comparators, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_L = \infty$ Both Comparators, $V_{CC} = 30$ V	I_{CC}	-	0.4	1.0	-	0.4	1.0	mA

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

LM293 $T_{low} = -25^\circ\text{C}$, $T_{high} = +85^\circ\text{C}$

LM393, LM393E $T_{low} = 0^\circ\text{C}$, $T_{high} = +70^\circ\text{C}$

LM2903, LM2903E $T_{low} = -40^\circ\text{C}$, $T_{high} = +105^\circ\text{C}$

LM2903V & NCV2903 $T_{low} = -40^\circ\text{C}$, $T_{high} = +125^\circ\text{C}$

NCV2903 is qualified for automotive use.

- The maximum output current may be as high as 20 mA. Independent of the magnitude of V_{CC} , output short circuits to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction.
- At output switch point, $V_O = 1.4$ Vdc, $R_S = 0$ Ω with V_{CC} from 5.0 Vdc to 30 Vdc, and over the full input common mode range (0 V to $V_{CC} = -1.5$ V).
- Due to the PNP transistor inputs, bias current will flow out of the inputs. This current is essentially constant, independent of the output state, therefore, no loading changes will exist on the input lines.
- Input common mode of either input should not be permitted to go more than 0.3 V negative of ground or minus supply. The upper limit of common mode range is $V_{CC} - 1.5$ V.
- Response time is specified with a 100 mV step and 5.0 mV of overdrive. With larger magnitudes of overdrive faster response times are obtainable.
- The comparator will exhibit proper output state if one of the inputs becomes greater than V_{CC} , the other input must remain within the common mode range. The low input state must not be less than -0.3 V of ground or minus supply.

LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

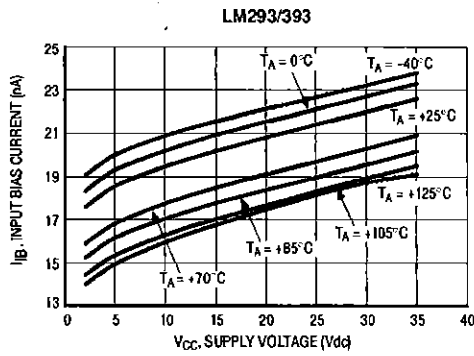


Figure 2. Input Bias Current versus Power Supply Voltage

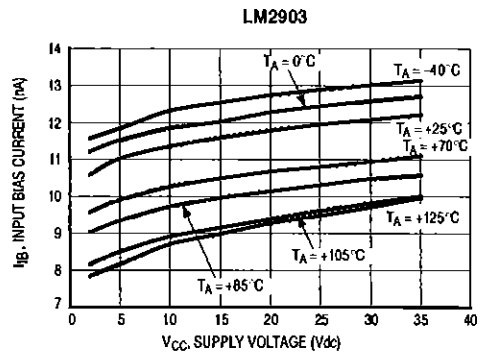


Figure 3. Input Bias Current versus Power Supply Voltage

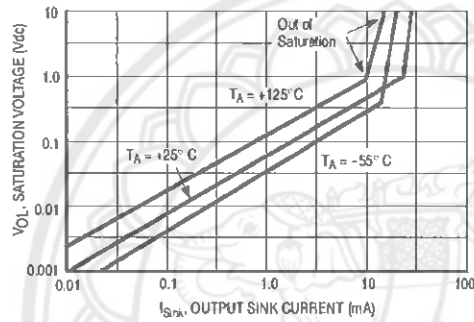


Figure 4. Output Saturation Voltage versus Output Sink Current

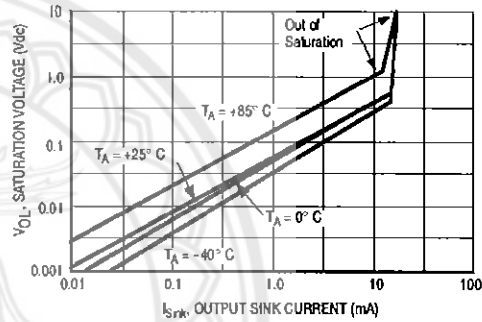


Figure 5. Output Saturation Voltage versus Output Sink Current

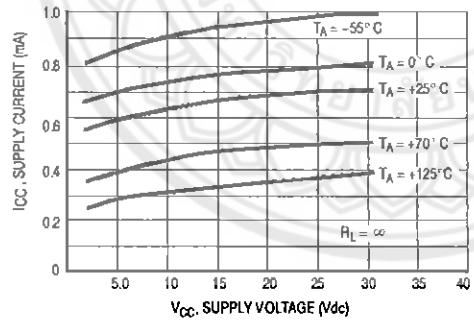


Figure 6. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

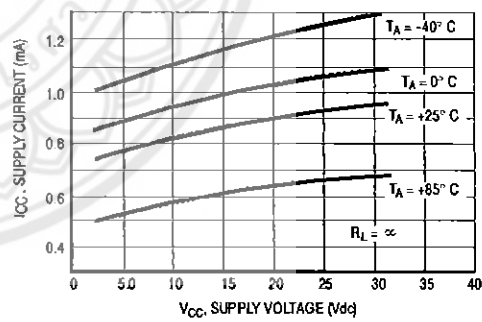


Figure 7. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

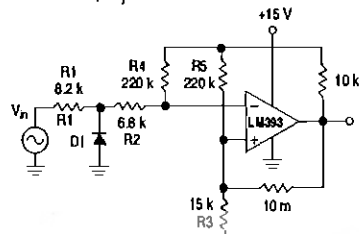
LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

APPLICATIONS INFORMATION

These dual comparators feature high gain, wide bandwidth characteristics. This gives the device oscillation tendencies if the outputs are capacitively coupled to the inputs via stray capacitance. This oscillation manifests itself during output transitions (V_{OL} to V_{OH}). To alleviate this situation, input resistors $< 10\text{ k}\Omega$ should be used.

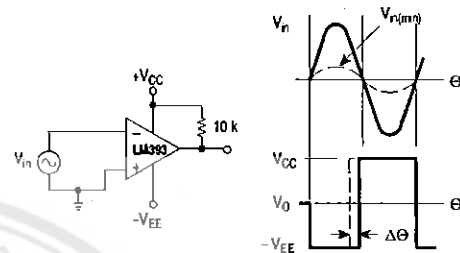
The addition of positive feedback ($< 10\text{ mV}$) is also recommended. It is good design practice to ground all unused pins.

Differential input voltages may be larger than supply voltage without damaging the comparator's inputs. Voltages more negative than -0.3 V should not be used.



D1 prevents input from going negative by more than 0.6 V.
 $R1 + R2 = R3$
 $R3 \leq \frac{R5}{10}$ for small error in zero crossing.

Figure 8. Zero Crossing Detector (Single Supply)



$V_{n(\min)} \approx 0.4\text{ V}$ peak for 1% phase distortion ($\Delta\theta$).

Figure 9. Zero Crossing Detector (Split Supply)

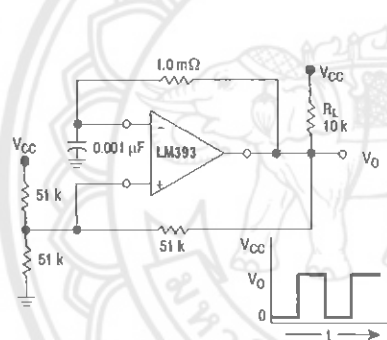


Figure 10. Free-Running Square-Wave Oscillator

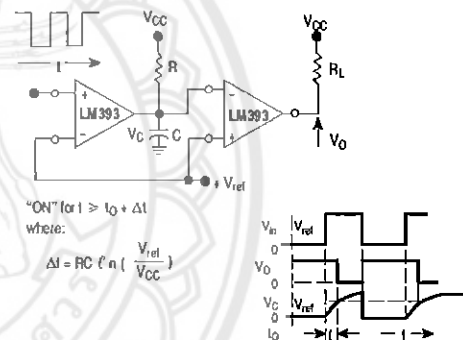


Figure 11. Time Delay Generator

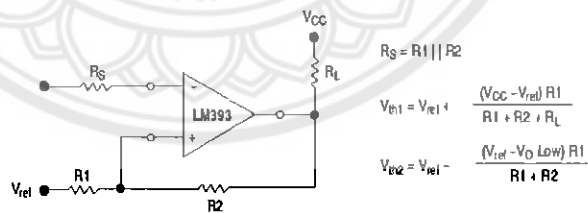
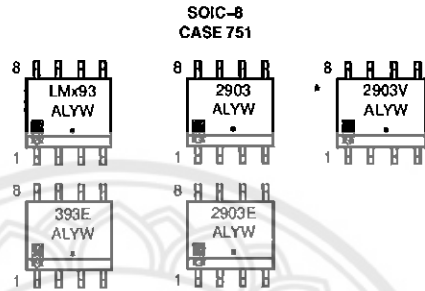
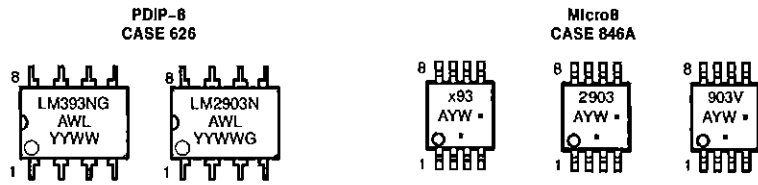


Figure 12. Comparator with Hysteresis

LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

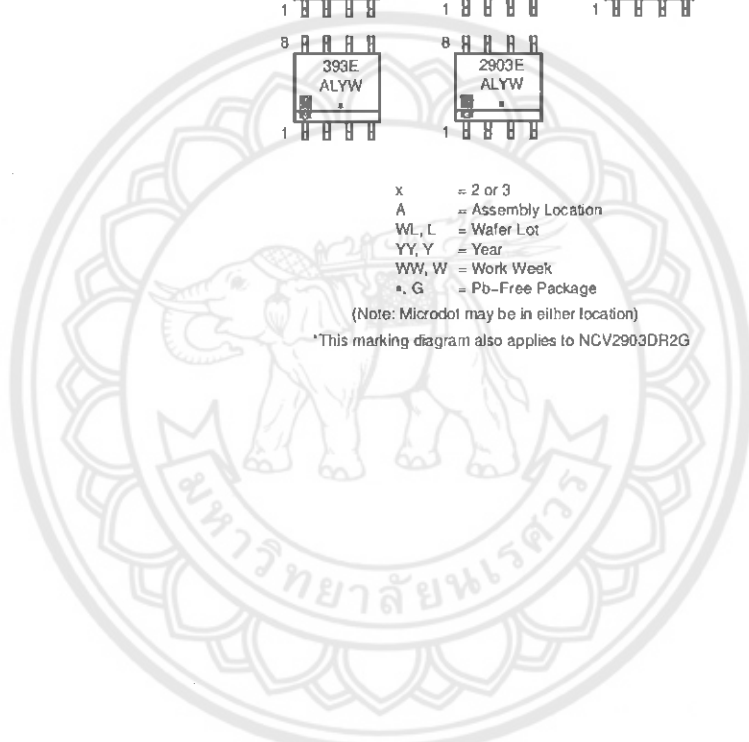
MARKING DIAGRAMS



- x = 2 or 3
- A = Assembly Location
- WL, L = Wafer Lot
- YY, Y = Year
- WW, W = Work Week
- *, G = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

*This marking diagram also applies to NCV2903DR2G



LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package	Shipping [†]
LM293DG	-25°C to +85°C	SOIC-8 (Pb-Free)	98 Units / Rail
LM293DR2G			2500 / Tape & Reel
LM293DMR2G		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape and Reel
LM393DG	0°C to +70°C	SOIC-8 (Pb-Free)	98 Units / Rail
LM393DR2G			2500 / Tape & Reel
LM393EDR2G		SOIC-8 (Pb-Free)	2500 / Tape & Reel
LM393NG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
LM393DMR2G		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape and Reel
LM2903DG	-40°C to +105°C	SOIC-8 (Pb-Free)	98 Units / Rail
LM2903DR2G			2500 / Tape & Reel
LM2903EDR2G		SOIC-8 (Pb-Free)	2500 / Tape & Reel
LM2903DMR2G		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape and Reel
LM2903NG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
LM2903VDG	-40°C to +125°C	SOIC-8 (Pb-Free)	98 Units / Rail
LM2903VDR2G			2500 / Tape & Reel
LM2903VNG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
NCV2903DR2G*		SOIC-8 (Pb-Free)	2500 / Tape & Reel
NCV2903DMR2G*		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape & Reel

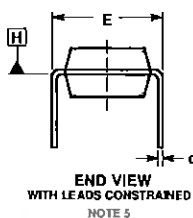
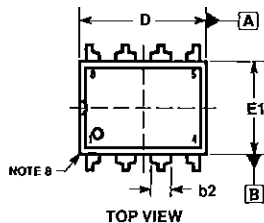
[†]For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our [Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D](#).

*NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

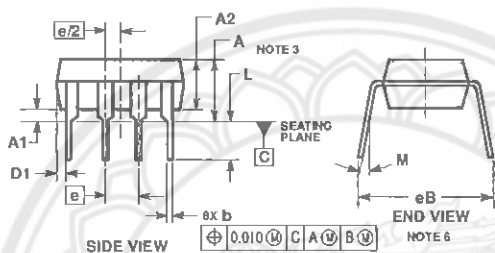
LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

PACKAGE DIMENSIONS

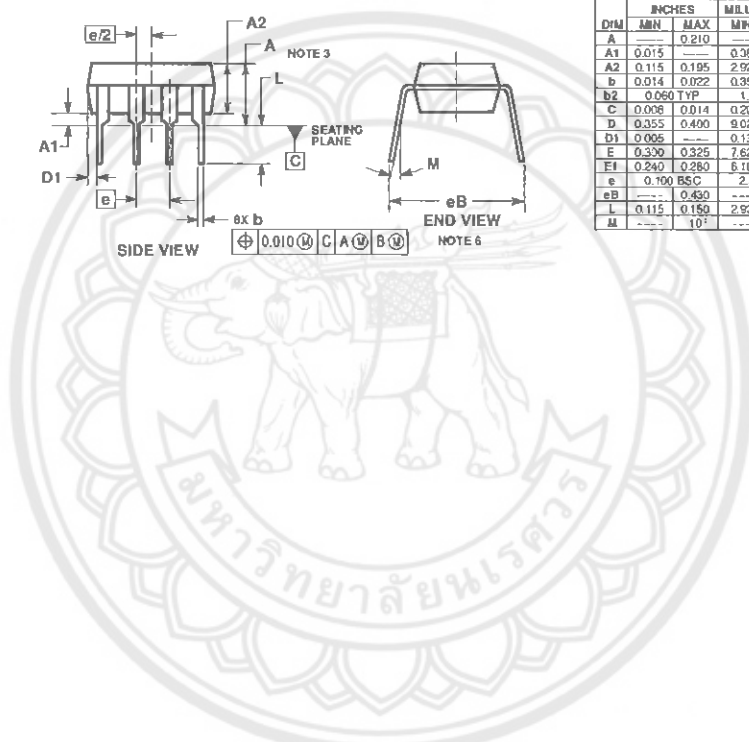
PDIP-8
N, AN, VN SUFFIX
CASE 626-05
ISSUE P



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCHES.
 3. DIMENSIONS A, A1 AND L ARE MEASURED WITH THE PACKAGE SEATED IN JEDEC SEATING PLANE GAUGE GS-3.
 4. DIMENSIONS D, D1 AND E1 DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS ARE NOT TO EXCEED 0.10 INCH.
 5. DIMENSION E IS MEASURED AT A POINT 0.015 BELOW DATUM PLANE H WITH THE LEADS CONSTRAINED PERPENDICULAR TO DATUM C.
 6. DIMENSION eB IS MEASURED AT THE LEAD TIPS WITH THE LEADS UNCONSTRAINED.
 7. DATUM PLANE H IS COINCIDENT WITH THE BOTTOM OF THE LEADS, WHERE THE LEADS EXIT THE BODY.
 8. PACKAGE CONTOUR IS OPTIONAL (ROUNDED OR SQUARE CORNERS).



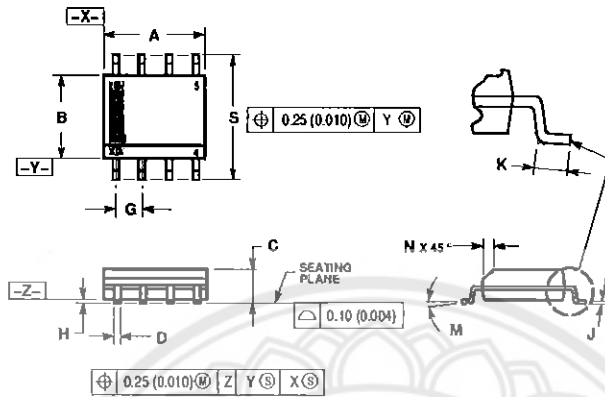
DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	---	0.210	---	5.33
A1	0.015	---	0.38	---
A2	0.115	0.195	2.92	4.95
b	0.014	0.022	0.35	0.56
b2	0.060 TYP	---	1.52 TYP	---
C	0.008	0.014	0.20	0.36
D	0.355	0.400	9.02	10.16
D1	0.006	---	0.13	---
E	0.330	0.325	7.62	8.26
E1	0.240	0.280	6.10	7.11
e	0.100 BSC	---	2.54 BSC	---
eB	---	0.430	---	10.92
L	0.115	0.150	2.92	3.81
M	---	10°	---	10°



LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

PACKAGE DIMENSIONS

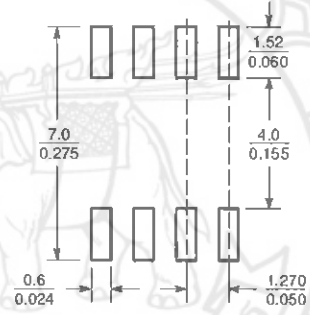
SOIC-8 NB
CASE 751-07
ISSUE AK



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
 3. DIMENSION A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
 4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
 5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
 6. 751-01 THRU 751-06 ARE OBSOLETE. NEW STANDARD IS 751-07.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.80	5.00	0.189	0.197
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.52	1.75	0.059	0.069
D	0.33	0.51	0.013	0.020
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
H	0.10	0.25	0.004	0.010
J	0.19	0.25	0.007	0.010
K	0.40	1.27	0.016	0.050
M	0 [±]	8 [±]	0 [±]	8 [±]
N	0.25	0.50	0.010	0.020
S	0.50	0.20	0.228	0.234

SOLDERING FOOTPRINT*



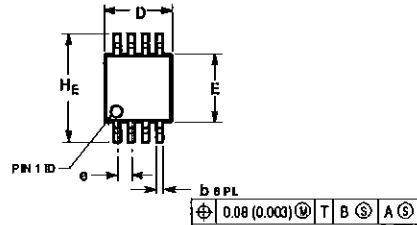
SCALE 6:1 (mm/inches)

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

LM393, LM393E, LM293, LM2903, LM2903E, LM2903V, NCV2903

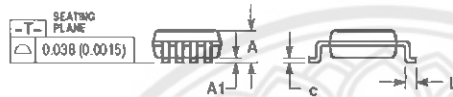
PACKAGE DIMENSIONS

Micro8™
CASE 846A-02
ISSUE J

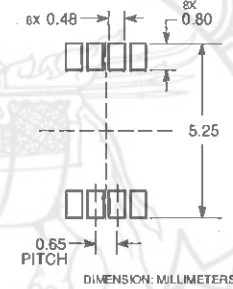


- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
 3. DIMENSION A DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS. MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS SHALL NOT EXCEED 0.15 (0.006) PER SIDE.
 4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION. INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION SHALL NOT EXCEED 0.25 (0.010) PER SIDE.
 5. 846A-01 OBSOLETE, NEW STANDARD 846A-02.

DIM	MILLIMETERS			INCHES		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
A	—	—	1.10	—	—	0.043
A1	0.05	0.06	0.15	0.002	0.003	0.006
b	0.25	0.33	0.40	0.010	0.013	0.016
c	0.13	0.18	0.23	0.005	0.007	0.009
D	2.90	3.00	3.10	0.114	0.118	0.122
E	2.90	3.00	3.10	0.114	0.118	0.122
e	0.65 BSC			0.026 BSC		
L	0.40	0.56	0.70	0.016	0.021	0.028
HE	4.75	4.90	5.05	0.187	0.193	0.199



RECOMMENDED SOLDERING FOOTPRINT*



*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

Micro8 is a trademark of International Rectifier.

ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (d/b/a ON Semiconductor) or its subsidiaries in the United States and/or other countries. ON Semiconductor owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of ON Semiconductor's product patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marketing.pdf. ON Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. ON Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does ON Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using ON Semiconductor products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by ON Semiconductor. "Typical" parameters which may be provided in ON Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. ON Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. ON Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use ON Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold ON Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that ON Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part. ON Semiconductor is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5617-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

LM393/D



ภาคผนวก ง
รายละเอียดข้อมูลของ GY-521

Accelerometers & Gyroscope GY-521



ข้อมูลเบื้องต้น (Introduction / Overview)

GY-521 เป็นโมดูล Accelerometers & Gyroscope ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้ง 2 อย่างในเวลาเดียวกัน ใช้ในการตรวจสอบทิศทางการเคลื่อนที่ และสามารถใช้ในการตรวจสอบความเร็วในการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ของแกน XYZ ได้ ยกตัวอย่าง ถ้าวัตถุเกิดการเคลื่อนที่หรือเอียง Output ของ Accelerometer จะบอกค่าของการเอียงว่าสถานะปัจจุบันค่าของ XYZ อยู่ที่เท่าไร แต่ Gyroscope จะวัดค่าได้ตอนที่กำลังเอียงหรือตอนที่กำลังเคลื่อนไหวเท่านั้น เมื่อวัตถุหยุดนิ่ง ค่าของ Gyroscope จะวัดไม่ได้เพราะไม่มีการเคลื่อนไหว

คุณสมบัติ (Features)

- ใช้ไฟเลี้ยง +3.3 ถึง +5 V
- ชิป MPU6050
- เชื่อมต่อผ่านบัส I2C

การนำไปประยุกต์ใช้งาน (Application Ideas)

ตรวจสอบทิศทางการเคลื่อนที่ เคลื่อนไหวต่างๆของวัตถุ

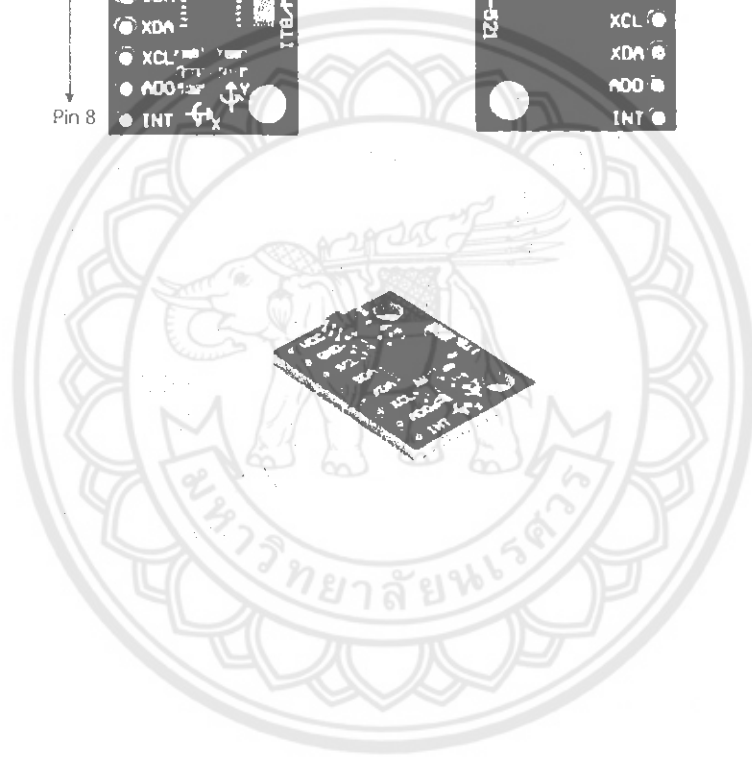
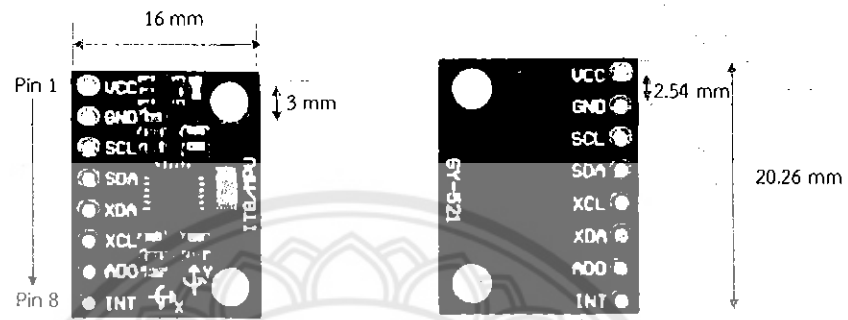
ข้อควรระวังในการใช้งาน (Caution / Warning)

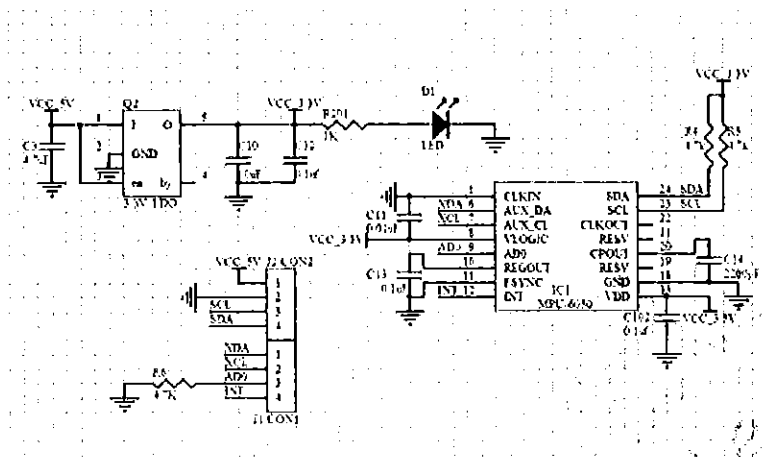
- ควรหลีกเลี่ยงการต่อวงจรให้เกิดการลัดวงจร
- ควรอ่านเอกสารก่อนการต่อวงจรจริง
- ไม่ควรใช้ไฟเกินตามที่เอกสารกำหนด

คุณลักษณะ (Specification)

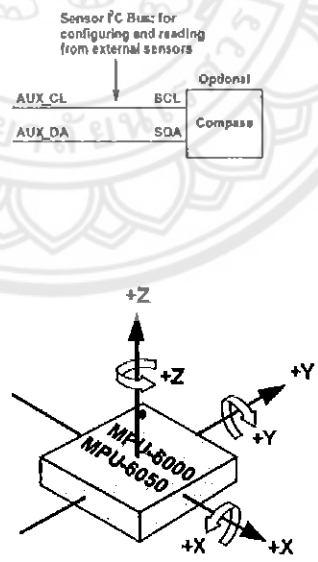
- อุณหภูมิที่รองรับ -40 to +85 °C
- รองรับแรงดัน 3.3 – 5 V
- ทดสอบการตกกระแทกที่ 1.8 เมตร
- ขนาด: 16 mm * 20 mm

โครงสร้าง (Dimension)





ขาที่	ชื่อ	คำอธิบาย
1	VCC_IN	ขารับไฟ +5 โวลต์ไปที่ Regulate 3.3 โวลต์
2	3.3V	ขาไฟ 3.3 โวลต์
3	GND	กราวด์
4	SCL	ขาสัญญาณนาฬิกา บนบัส I2C
5	SDA	ขาสัญญาณข้อมูล บนบัส I2C
6	XDA(AUX_SDA)	ขาสัญญาณข้อมูล บนบัส I2C (ใช้สำหรับ Modbus RTU)
7	XCL(AUX_SCL)	ขาสัญญาณนาฬิกา บนบัส I2C (ใช้สำหรับ Modbus RTU)
8	INT	Interrupt

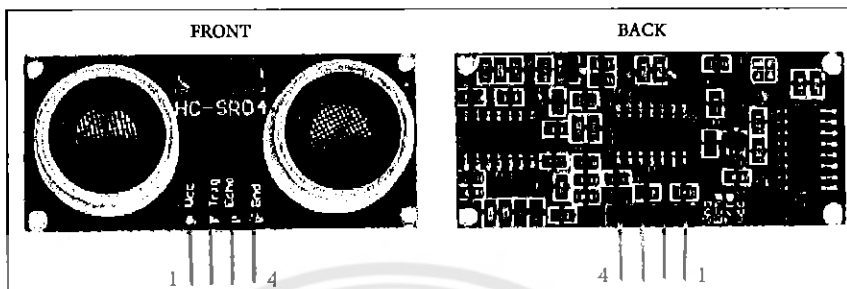


รูปแบบการทำงานทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y, Z



ภาคผนวก จ
รายละเอียดข้อมูลของ HC-SR04

3. Product Views



4. Module Pin Assignments

	Pin Symbol	Pin Function Description
1	VCC	5V power supply
2	Trig	Trigger Input pin
3	Echo	Receiver Output pin
4	GND	Power ground

5. Electrical Specifications

WARARNING

Do Not connect Module with Power Applied! Always apply power after connecting Connect "GND" Terminal first

Electrical Parameters	HC-SR04 Ultrasonic Module
Operating Voltage	5VDC
Operating Current	15mA
Operating Frequency	40KHz
Max. Range	4m
Nearest Range	2cm
Measuring Angle	15 Degrees
Input Trigger Signal	10us min. TTL pulse
Output Echo Signal	TTL level signal, proportional to distance
Board Dimensions	1-13/16" X 13/16" X 5/8"
Board Connections	4 X 0.1" Pitch Right Angle Header Pins

6. Module Operation

Set Trig and Echo Low to initialize module. Place a minimum 10us High level pulse to "Trigger" (module will automatically send eight 40KHz acoustic bursts). At the same time, Gate the microcontroller timer to start timing.

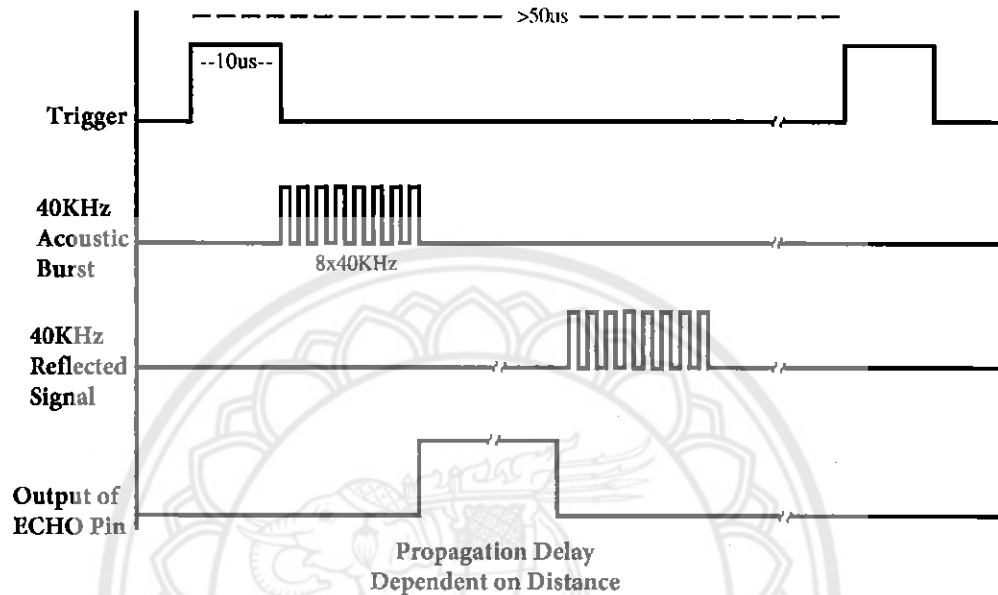
Wait to capture the rising edge output of ECHO port to stop the timer. Now read the time of the counter, which is the ultrasonic propagation time in the air. According to the formula: $\text{Distance} = (\text{ECHO high level time} \times \text{ultrasonic velocity (Speed of Sound in air 340m/sec)}) / 2$, you can calculate the distance to the obstacle.

For best results and maximum range, the Object should be larger than 0.5M² the nearer the target object, the smaller it may be



7. Module Timing

HC-SR04 ULTRASONIC MODULE



Trigger 10us min. start measurement from microcontroller.

Max Rep. Rate: 50us

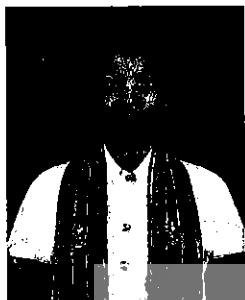
ECHO Output pulse to microcontroller, width is the time from last of 8 40KHz bursts to detected reflected signal (microcontroller Timer gate signal)

Distance in cm = echo pulse width in $\mu\text{s}/58$

Distance in inch = echo pulse width in $\mu\text{s}/148$

Information obtained from or supplied by Mpja.com or Marlin P. Jones and Associates inc. is supplied as a service to our customers and accuracy is not guaranteed nor is it definitive of any particular part or manufacturer. Use of information and suitability for any application is at users own discretion and user assumes all risk.

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวบุญพิทักษ์ เชียรพันธ์พงศ์
 ภูมิลำเนา 88/115 ม.6 แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน
 ถนนพระรามที่2 จ.กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน
รัตนโกสินทร์สมโภชบางขุนเทียน
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้น
ปีที่4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: boonpitakt56@email.nu.ac.th



ชื่อ นางสาววิริยภรณ์ ศรีภูมิมา
 ภูมิลำเนา 45 ม.8 ต.เชียงม่วน อ.เชียงม่วน
 จ. พะเยา

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน
เชียงม่วนวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้น
ปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: wiriyaporns56@email.nu.ac.th



ชื่อ นายอรรถพล ปิณฑูร
 ภูมิลำเนา 12/2 ม.2 ต.น่านกกก อ.ลับแล
 จ.อุตรดิตถ์

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน
อุตรดิตถ์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้น
ปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Email: attaponp56@email.nu.ac.th

