สัญญาเลขที่ R2559C221

ลิขสิทธิ์ของ

สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการเรื่องการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุฑิตา สงฆ์จันทร์

สังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 30 ก.ย. 2564
เลขทะเบียน 1041018
เลขเรียกหนังสือ อ TJ 211 .35 ม625ร 2560

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้โดยได้รับความอนุเคราะห์การจัดสรรทุนจากทุนอุดหนุนโครงการวิจัย กองทุนวิจัยของมหาวิทยาลัยนเรศวร สาขาวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2559 ซึ่งได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปค้นคว้าหาข้อมูลในการทำวิจัยรวมถึงค่าวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ผลงานเป็นสิ่งประดิษฐ์ขึ้นมาในครั้งนี้ ทางผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ในโอกาสนี้ต้องขอขอบคุณคณะผู้ช่วยวิจัยทุกคนที่มุ่งมั่น อุตสาหะ และอดทนเพื่อทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จเสร็จสมบูรณ์ และขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และสุดท้ายต้องขอขอบพระคุณกำลังใจจากครอบครัวและเพื่อนสนิทรอบกายที่เป็นกำลังใจสำคัญในการก้าวข้ามผ่านอุปสรรคต่างๆเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มุฑิตา สงฆ์จันทร์

หัวหน้าโครงการวิจัย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง โดยการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีจะใช้หลักการอนุมานแบบแมมดานิ โดยระบบควบคุมแบบฟัซซีนี้มีสองอินพุตคือค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของหุ่นยนต์รถและค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ และมีสองเอาท์พุตคือค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์และค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก หุ่นยนต์รถที่สร้างขึ้นสามารถรับโหลดน้ำหนักได้สูงสุด 5 กิโลกรัม และที่โหลดน้ำหนักค่าสูงสุดหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ที่ความเร็วสูงสุด 0.6 เมตรต่อวินาที กระบวนการทำงานในการควบคุมความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์เริ่มจากโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจรับค่าโหลดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงส่งไปเป็นค่าอินพุตให้กับตัวควบคุมแบบฟัซซี ตัวควบคุมแบบฟัซซีประมวลผลตามกฎและได้ค่าเอาท์พุตที่สามารถนำไปปรับค่าความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงให้คงที่ โดยมีตัวเข้ารหัสเป็นเซนเซอร์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อคำนวณค่าความเร็วของมอเตอร์และแสดงผลบนหน้าจอแอลซีดีพร้อมหลอดไฟแอลอีดีจะแสดงสถานะของหุ่นยนต์รถเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่

จากผลการวิจัยพบว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วเมื่อโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง

ABSTRACT

In this research the fuzzy logic controller is used to control the velocity of the robot when the load is changed. The mamdani inference is chosen in the fuzzy design. The inputs of the fuzzy controller are the change of load and the current load of the robot. The outputs are the change of speed and the constant speed regulator parameter. The robot can carry 5 kilograms maximum weight at the maximum speed 0.6 m/s. The operation for controlling the velocity starts with the change of weight measured by load cell. These inputs are processed via the rule base of fuzzy controller and consequently obtain the outputs to control the speed of motor. The encoder is used to measure the speed of the robot and it is displayed on LCD screen. There is also LED used to indicate the velocity of the robot when it reaches the desired point. The results show that the robot with the fuzzy controller is able to move constantly at the desired velocity when the load is changed in the way of increasing and decreasing. Moreover, when the load is changed the robot is quickly and precisely returned to move at the same speed.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย	4
1.6 ขอบเขตการวิจัย	5
1.7 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 หุ่นยนต์	7
2.1.1 การแบ่งประเภทหุ่นยนต์ตามลักษณะการใช้งาน	7
2.1.2 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	8
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าและเซนเซอร์	12
2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
2.2.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
2.2.3 โหลดเซลล์ (Load cell)	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) 19

2.3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี 22

2.3.2 กฎของฟัซซี (Fuzzy rule) 23

2.3.3 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ 25

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 33

3.1 การออกแบบโครงสร้างและสร้างหุ่นยนต์รถ 33

3.2 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมหุ่นยนต์รถ 35

3.2.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ 35

3.2.2 วงจรขับมอเตอร์ 36

3.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี 37

3.3.1 การกำหนดเซตของตัวแปรอินพุตและเซตของตัวแปรเอาท์พุต 38

3.3.2 การสร้างฐานกฎฟัซซี 42

3.3.3 การประเมินค่ากฎของฟัซซี 44

3.3.4 การทำดีฟัซซี 45

3.4 กระบวนการทำงานของหุ่นยนต์รถโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี 49

บทที่ 4 ผลการวิจัย 52

4.1 การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์รถ 52

4.2 การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 53

4.3 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 55

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 79

5.1 สรุปผล 79

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในขั้นต่อไป	80
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	83

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หุ่นยนต์ชนิดที่ตั้งอยู่กับที่	8
2.2 หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้	8
2.3 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ล้อ	9
2.4 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้สายพาน	10
2.5 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ขา	10
2.6 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยการบิน	11
2.7 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในน้ำ	11
2.8 หุ่นยนต์งู	12
2.9 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้	14
2.10 กราฟแสดงคุณลักษณะของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้	14
2.11 กราฟแสดงคุณลักษณะของการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับค่าแรงดัน	15
2.12 ความกว้างพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดิวตี้ไซเคิลของพัลส์ที่มีความถี่คงที่	16
2.13 การบีบอัดของสเตรนเกจในวงจรวีทสโตนบริดจ์	18
2.14 วงจรบริดจ์เมื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ	19
2.15 การควบคุมโดยตรง	20
2.16 การควบคุมแบบไปข้างหน้า	21
2.17 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว	21
2.18 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี	22
2.19 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ -0.67 °C จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62	25
2.20 อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่ +2.67 °C/นาที ให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.35 และระดับความเป็นสมาชิกของ “บวก” เท่ากับ 0.64	26
2.21 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด	30
2.23 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ +2.67 °C/นาที	30
2.24 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิ	31
3.1 แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์รถ	33
3.2 หุ่นยนต์รถเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์พร้อมวางโหลดน้ำหนัก	34
3.3 ตำแหน่งส่วนประกอบต่างๆของหุ่นยนต์รถ (ก) ภาพถ่ายด้านข้าง (ข) ภาพถ่ายด้านบน	34
3.4 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560	36
3.5 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560	36
3.6 แผงวงจรขับมอเตอร์เบอร์ L298	37
3.7 วงจรขับมอเตอร์สำหรับวงจรรวมเบอร์ L298	37
3.8 รูปแบบการอนุมานอินพุตและเอาท์พุตของฟัซซี	40
3.9 แผนภาพฟัซซีเซตของอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก	40
3.10 แผนภาพฟัซซีเซตของอินพุตค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ	41
3.11 แผนภาพฟัซซีเซตของเอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	42
3.12 แผนภาพฟัซซีเซตของเอาท์พุตค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก	42
3.13 กราฟมุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถ	44
3.14 การประเมินค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตด้วยวิธีตัดยอด	45
3.15 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักที่ลดลง 2.5 กิโลกรัม	46
3.16 ระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	47
3.17 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์	47
3.18 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถที่ 2.5 กิโลกรัม	48
3.19 ระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.20 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าตัวปรับความเร็วมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก 49

3.21 ค่าของกระบวนการดีฟัซซีที่ได้จากโปรแกรมแมทแลป 49

3.22 แผนภาพแสดงการทำงานการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 50

4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น 65

4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม 66

4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าลดลง 76

4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าลดลง 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม 77

4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที ระหว่างการเพิ่มและลดโหลดน้ำหนักค่าต่างๆ 78

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย 6

3.1 เซตของตัวแปรอินพุตและความหมาย 38

3.2 เซตของตัวแปรเอาท์พุตและความหมาย 39

4.1 ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์รถที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก 53

4.2 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม 56

4.3 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม 57

4.4 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม 57

4.5 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัม 58

4.6 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัม 58

4.7 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัม 59

4.8 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3 กิโลกรัม 60

4.9 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3 กิโลกรัม 60

4.10 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3 กิโลกรัม 61

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.11 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4 กิโลกรัม 62

4.12 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4 กิโลกรัม 62

4.13 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4 กิโลกรัม 62

4.14 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 5 กิโลกรัม 63

4.15 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 5 กิโลกรัม 63

4.16 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 5 กิโลกรัม 64

4.17 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม 67

4.18 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม 68

4.19 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม 68

4.20 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 2 กิโลกรัม 69

4.21 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 2 กิโลกรัม 69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.22 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 2 กิโลกรัม 70

4.23 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 3 กิโลกรัม 71

4.24 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 3 กิโลกรัม 71

4.25 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 3 กิโลกรัม 72

4.26 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 4 กิโลกรัม 73

4.27 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 4 กิโลกรัม 73

4.28 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 4 กิโลกรัม 73

4.29 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 5 กิโลกรัม 74

4.30 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 5 กิโลกรัม 74

4.31 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 5 กิโลกรัม 75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันระบบควบคุมแบบอัตโนมัติส่วนมากมักจะเป็นระบบพลวัต (Dynamic system) ซึ่งเป็นระบบที่มีลักษณะความไม่แน่นอนสูงและยากแก่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะหุ่นยนต์ เพราะพฤติกรรมทางด้านพลศาสตร์ของหุ่นยนต์นั้นมีความซับซ้อนและมีความไม่แน่นอนของตัวแปรเกิดขึ้นตลอดเวลาขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องหาวิธีการควบคุมที่สามารถอธิบายลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ได้เป็นอย่างดี และการใช้วิธีการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิกจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในขณะนี้เนื่องจากฟัซซีลอจิกสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบควบคุมที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นและไม่แปรผันตามเวลาได้ โดยวิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกนี้จะนำทฤษฎีฟัซซีเซ็ตมาใช้ในแบบจำลองเพื่อช่วยในการตัดสินใจในทำงานและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่ว่าจะเป็น ความเร็ว ระยะทาง ความไวต่อสิ่งเร้า เป็นต้น ซึ่งจะใช้เกณฑ์หรือเงื่อนไขแบบฟัซซีแทนฟังก์ชันที่มีความซับซ้อน โดยกำหนดตัวแปรในรูปแบบของภาษา เช่น น้อยมาก น้อย ปานกลาง มาก มากที่สุด โดยจะเป็นแนวคิดที่แตกต่างจากตรรกศาสตร์แบบเดิมที่จะมีแค่ถูกกับผิด ใช่กับไม่ใช่ เพราะในความเป็นจริงการอธิบายระบบให้ละเอียดและชัดเจนนั้นจะต้องสามารถอธิบายในลักษณะของตรรกะหลายระดับ ซึ่งทำให้การควบคุมแบบฟัซซีลอจิกมีลักษณะการตัดสินใจที่ชาญฉลาดใกล้เคียงกับมนุษย์มากขึ้น จึงทำให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป

ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ทฤษฎีของฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากโดยทั่วไปแล้วเมื่อหุ่นยนต์ได้รับโหลดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้หุ่นยนต์วิ่งช้าลงและในทางตรงกันข้ามถ้าหุ่นยนต์ได้รับโหลดน้อยหรือปราศจากโหลดจะทำให้หุ่นยนต์วิ่งได้เร็วขึ้น และเพื่อจะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีค่าคงที่ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนสภาวะของโหลดเป็นเช่นไร จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่สามารถตอบสนองต่อสภาวะโหลดที่เพิ่มขึ้นและลดลงในหลายๆระดับที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้นำเสนอหลักการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์

เคลื่อนที่โดยใช้ฟัซซีลอจิก โดยระบบจะควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้คงที่ที่ต้องการตามตัวแปรของน้ำหนักที่เปลี่ยนไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้มีค่าคงที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้ในระดับความเร็วที่ต้องการภายใต้สภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปพัฒนาใช้กับกระบวนการขนส่ง การลำเลียง ในระบบอุตสาหกรรมทำให้ลดเวลาในการขนส่งได้ และยังสามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยที่ได้ในงานประชุมวิชาการหรือตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการต่างๆ เพื่อให้นิสิตและนักศึกษา อาจารย์ รวมทั้งนักวิชาการในหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

1.4 ทฤษฎีและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์ในปัจจุบันนั้นสิ่งสำคัญคือจะต้องออกแบบให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมการทำงานให้ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการเช่น การเคลื่อนที่ในทางลาดชัน การเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวาง การเคลื่อนตัวในการหยิบจับและวางสิ่งของ เป็นต้น ซึ่งหุ่นยนต์จะถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ หุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Fixed robot) และหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) ประเภทแรกคือหุ่นยนต์ที่ตั้งอยู่กับที่ เคลื่อนไหวไปมาได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ หุ่นยนต์ประเภทนี้ได้แก่แขนกลของหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆเช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ และงานด้านการแพทย์เช่นแขนกลที่ใช้ในการผ่าตัด ซึ่งจะเป็นหุ่นที่มีมีลักษณะโครงสร้างใหญ่โตและมีน้ำหนักมาก ส่วนหุ่นยนต์ในประเภทที่สองคือหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนย้ายตัวเองจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้อย่างอิสระหรือมีการเคลื่อนที่ไปมาในสถานที่ต่างๆ เช่น หุ่นยนต์สำรวจ หรือหุ่นยนต์ที่ใช้ในการลำเลียงและขนถ่ายสินค้า ซึ่งหุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็กและมีระบบเคลื่อนที่ไปมาและที่สำคัญต้องมีน้ำหนักไม่มากเพื่อไม่ให้เป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ และสำหรับหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้นี้สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนที่

หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยทั่วไปจะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์จะต้องควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ในเร็ว ช้าหรือสม่ำเสมอคงที่ การควบคุมความเร็วในที่นี้จะใช้ระบบควบคุมความเร็วที่ใช้กลไกการควบคุมแบบเซอร์โว มอเตอร์จึงถูกเรียกว่าเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งการควบคุมความเร็วในลักษณะนี้ประกอบด้วยลูปการควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งลูป โดยเครื่องวัดรอบในลูปแบบป้อนกลับจะวัดความเร็วของมอเตอร์แบบเซอร์โวและจะส่งค่านั้นป้อนกลับมาในรูปของสัญญาณไฟฟ้าซึ่งจะแปรตามความเร็วของเพลาของมอเตอร์ โดยความเร็วจะถูกควบคุมให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งหมายความว่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดมีผลต่อความเร็วของหุ่นยนต์ ดังนั้นจะต้องใช้ตัวตรวจรู้น้ำหนักวัดค่าน้ำหนักหรือโหลดของหุ่นยนต์เพื่อนำมาเป็นสัญญาณส่งให้หุ่นยนต์ในการปรับค่าความเร็ว ตัวตรวจรู้น้ำหนักที่ใช้คือโหลดเซลล์ (Load cell)

โหลดเซลล์คือตัวตรวจรู้หรือเซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ ซึ่งโหลดเซลล์ได้ถูกนำไปใช้ในการอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น การชั่งน้ำหนัก การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยโหลดเซลล์ที่ใช้จะเป็นโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจซึ่งมีหลักการทำงานคือเมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ซึ่งในทางปฏิบัติสำหรับการใช้งานโหลดเซลล์เพียงแค่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลดเซลล์ตามขั้วอินพุตที่กำหนด แรงดันเอาท์พุตที่ได้จะแปรผันตรงกับแรงที่มากระทำต่อโหลดเซลล์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะยังคงมีค่าน้อยอยู่ จึงต้องนำไปผ่านวงจรขยายสัญญาณก่อนเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการต่อไป

การควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่มีความเร็วคงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงนั้นจะใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกซึ่งอินพุตของตัวควบคุมคือค่าน้ำหนักของโหลดที่เปลี่ยนไปและเอาท์พุตคือความเร็วของหุ่นยนต์ โดยตัวควบคุมแบบฟัซซีจะใช้หลักของฟัซซีลอจิกในการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ โดยฟัซซีลอจิกจะคำนวณด้วยคำพูดแทนตัวเลข เช่น มากขึ้นนิดหน่อย หรือ ลดลงเล็กน้อย ไม่ใช่ มากขึ้น 10 หรือ ลดลง 5.2 ดังนั้นตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถจะควบคุมด้วยประโยคแทนที่จะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น อินพุตกำลังลดลงให้ปรับเอาท์พุตมากขึ้นหน่อย ซึ่งการควบคุมแบบฟัซซีจะมีลักษณะการใช้ฐานกฎ (rule base) ที่มาจากการควบคุมด้วยคนจริงๆได้ โดยจะใช้การอนุมานฟัซซีหรือคือการส่งค่าจากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาท์พุตแบบแมมดานิ (Mamdani) กระบวนการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ (1) การทำฟัซซี (fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัว

แปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ โดยในขั้นตอนแรกจะต้องทำการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตของตัวแปรอินพุต ที่ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ในระบบจะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข หลักจากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้นๆจะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก (2) การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) ซึ่งจะเป็นส่วนเงื่อนไข ถ้า...แล้ว ที่จะทำให้เกิดค่าเอาท์พุต ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆกัน เนื่องจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำการของฟัซซีเซตเพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่า (3) การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่าทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาท์พุต (4) การดีฟัซซี (defuzzification) เป็นการเปลี่ยนค่าเอาท์พุตให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาท์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน ดังนั้นการทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ให้เป็นหุ่นยนต์ต้นแบบในการทดลองการควบคุมความเร็วในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานเป็นส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

1. สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้รอบทิศทางโดยใช้ต้นกำลังขับคือเซอร์โวมอเตอร์
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับฟัซซีลอจิกและการใช้วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ประเภทต่างๆ
3. ศึกษาการออกแบบและการวิเคราะห์วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในโปรแกรมแมทแลป
4. สร้างและพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก
5. ทดสอบและปรับปรุงโปรแกรมและทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มีความเร็วคงที่ตามต้องการเมื่อมีการเปลี่ยนค่าโหลดให้กับหุ่นยนต์
6. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ สรุปและจัดทำรายงานเผยแพร่ผลงานสู่สาธารณชน

1.6 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขนาดไม่เกิน 30x30x30 เซนติเมตร ที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนหุ่นยนต์

2. หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะต้องรับน้ำหนักของโหลดได้ตั้งแต่ 0-5 กิโลกรัม

3. ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดูโน่ (Arduino) ผ่านทางโปรแกรมแมทแลป (MATLAB)

4. ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกเพื่อควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

1.7 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัยสามารถแสดงรายละเอียดการทำงานได้**ดังตารางที่** 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการวิจัย

รายละเอียด	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้รอบทิศทางโดยใช้ต้นกำลังขับคือเซอร์โวมอเตอร์	←	—	—	→								
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับฟัซซีลอจิกและการใช้วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ประเภทต่างๆ	←	—	—	—	→							
3. ศึกษาการออกแบบและการวิเคราะห์วิธีการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกในโปรแกรมแมทแลป			←	—	→							
4. สร้างและพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์แขนกลโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก					←	—	—	→				
5. ทดสอบและปรับปรุงโปรแกรมและทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มีความเร็วคงที่ตามต้องการเมื่อมีการเปลี่ยนค่าโหลดให้กับหุ่นยนต์							←	—	—	→		
6. วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ สรุปและจัดทำรายงานเผยแพร่ผลงานสู่สาธารณชน									←	—	—	→

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยเรื่องการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ฟัซซีลอจิกเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนที่สำคัญคือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนของหลักการของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ส่วนที่สองเป็นส่วนของทฤษฎีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าและการวัดค่าน้ำหนักโหลดโดยใช้เซนเซอร์ และส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนของทฤษฎีเกี่ยวกับฟัซซีลอจิก

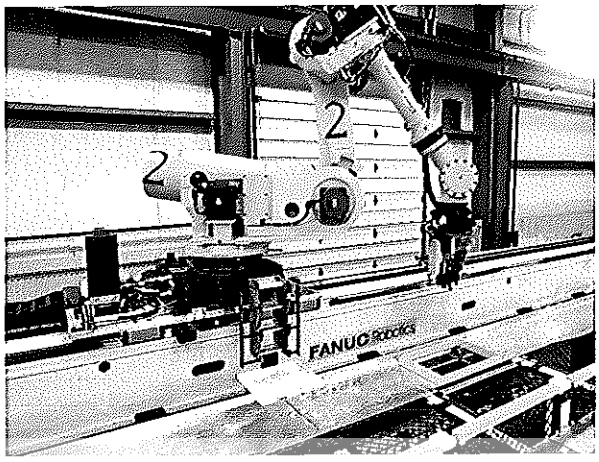
2.1 หุ่นยนต์ (Robot)

หุ่นยนต์คือเครื่องจักรกลชนิดหนึ่ง มีลักษณะโครงสร้างและรูปร่างแตกต่างกัน หุ่นยนต์ในแต่ละประเภทจะมีหน้าที่การทำงานในด้านต่างๆ ตามการควบคุมโดยตรงของมนุษย์ การควบคุมระบบต่างๆ ในการสั่งงานระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์สามารถทำได้โดยทางอ้อมและอัตโนมัติ โดยทั่วไปหุ่นยนต์ถูกสร้างขึ้นสำหรับงานที่มีความยากลำบากเช่น งานสำรวจในพื้นที่บริเวณแคบหรืองานสำรวจดวงจันทร์ ดาวเคราะห์ที่ไม่มีสิ่งมีชีวิต เทคโนโลยีของหุ่นยนต์เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมนุษย์ในด้านต่างๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งแตกต่างจากเมื่อก่อนที่หุ่นยนต์มักถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ แต่ปัจจุบันมีการนำหุ่นยนต์มาใช้ในงานหลากหลายมากขึ้น เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในทางการแพทย์ หุ่นยนต์สำหรับงานสำรวจ หุ่นยนต์ที่ใช้งานในอวกาศ หรือแม้แต่หุ่นยนต์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องเล่นของมนุษย์ จนกระทั่งได้มีการพัฒนาหุ่นยนต์ให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ เพื่อให้อาศัยอยู่ร่วมกันกับมนุษย์ในชีวิตประจำวัน

2.1.1 การแบ่งประเภทหุ่นยนต์ตามลักษณะการใช้งาน

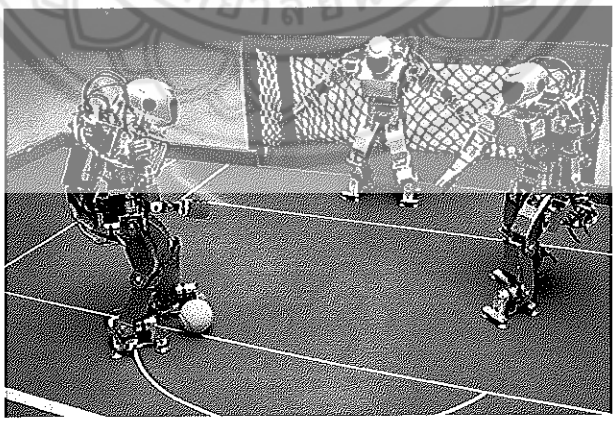
หุ่นยนต์สามารถแบ่งประเภทการใช้งานออกเป็น 2 ประเภทคือ หุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่และหุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้

1. หุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ (fixed robot) เป็นหุ่นยนต์ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปไหนได้ด้วยตัวเอง มีลักษณะเป็นแขนกล สามารถขยับและเคลื่อนไหวได้เฉพาะแต่ละข้อต่อภายในตัวเองเท่านั้น มักจะทำหุ่นยนต์ประเภทนี้ไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานประกอบรถยนต์ ในส่วนงานประกอบ งานเชื่อม งานพ่นสี เป็นต้น



รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์ชนิดที่ตั้งอยู่กับที่

2. หุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้ (mobile robot) หุ่นยนต์ประเภทนี้จะแตกต่างจากหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่กับที่เพราะสามารถเคลื่อนที่ไปไหนมาไหนได้ด้วยตัวเอง โดยการใช้ล้อหรือการใช้ขา ซึ่งหุ่นยนต์ประเภทนี้ในปัจจุบันยังเป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาอยู่ภายในห้องทดลองเพื่อพัฒนาออกมาใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น หุ่นยนต์สำรวจดาวอังคารขององค์กรนาซ่า ปัจจุบันมีการพัฒนาหุ่นยนต์ให้มีลักษณะเป็นสัตว์เลี้ยงอย่างสุนัขเพื่อให้มาเป็นเพื่อนเล่นกับมนุษย์ เช่น หุ่นยนต์ IBO ของบริษัทโซนี่ หรือแม้กระทั่งมีการพัฒนาหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่แบบสองขาได้อย่างมนุษย์ เพื่ออนาคตจะได้สามารถนำไปใช้ในงานที่มีความเสี่ยงต่ออันตรายแทนมนุษย์ได้



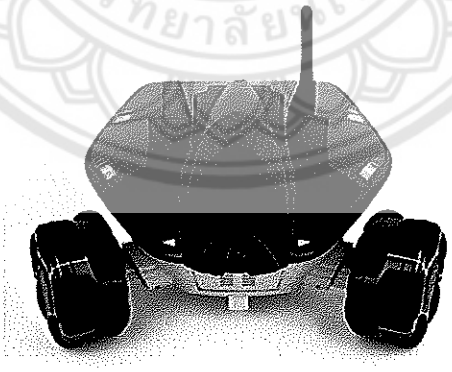
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้

2.1.2 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยหลักแล้วจะพิจารณาออกแบบตามวัตถุประสงค์การใช้งานและสภาพการทำงานของหุ่นยนต์เป็นสำคัญ หากหุ่นยนต์นั้นถูกใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งงานส่วนใหญ่จะเป็นงานที่ทำในขอบเขตจำกัด การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จึงไม่มีความจำเป็น ดังนั้นหุ่นยนต์จึงถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแขนกลชนิดติดตั้งอยู่กับที่ แต่ถ้าหากการทำงานเป็นในเชิงสำรวจ ตรวจการณ์ หรืองานที่มีขอบเขตการทำงานที่กว้าง หุ่นยนต์จำเป็นต้องสามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ในจุดต่างๆ ได้ ดังนั้นหุ่นยนต์ประเภทนี้จึงถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้

การเคลื่อนที่แบบโลโคโมชั่น (locomotion) หมายถึงการกระทำด้วยกำลังเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง และความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) หมายถึงความสามารถของระบบขับเคลื่อนที่จะนำพาหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปในพื้นผิวและสิ่งกีดขวางต่างๆได้ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

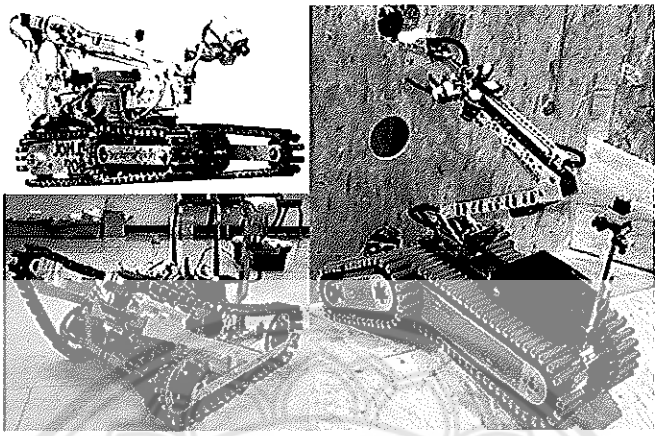
1. การเคลื่อนที่โดยใช้ล้อ (wheel-drive locomotion) คือหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อในการเคลื่อนที่ เหมาะสำหรับหุ่นยนต์ทั่วไปที่ใช้งานบนพื้นราบ โดยมีข้อดีคือหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว การควบคุมง่าย ดังนั้นหุ่นยนต์ส่วนใหญ่จึงถูกสร้างให้เป็นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ล้อ สำหรับข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ลักษณะนี้คือหุ่นยนต์ไม่สามารถจะไปในพื้นที่ต่างระดับได้ การเดินทางในพื้นที่ขรุขระไปได้อย่างยากลำบาก



รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ล้อ

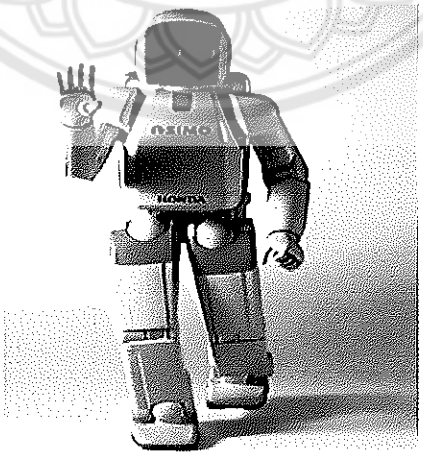
2. การเคลื่อนที่โดยใช้ล้อสายพาน (track-drive locomotion) คือหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อสายพานในการเคลื่อนที่ เหมาะสำหรับหุ่นยนต์ที่ใช้งานในพื้นที่ขรุขระหรือพื้นที่ที่มีความต่างระดับ การควบคุม

สามารถทำได้ง่ายเหมือนหุ่นยนต์ล้อทั่วไป ส่วนข้อจำกัดคือหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้ และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวบริเวณที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปเนื่องจากการตะกรุยของล้อสายพาน



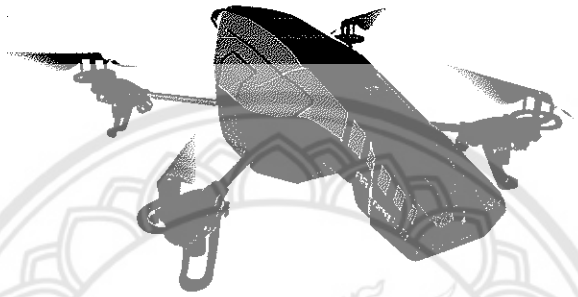
รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้สายพาน

3. การเคลื่อนที่โดยใช้ขา (legged locomotion) คือหุ่นยนต์ที่ใช้ขาในการเคลื่อนที่โดยเลียนแบบมาจากสิ่งมีชีวิต เช่น หุ่นยนต์เดินสี่ขาหรือหุ่นยนต์เดินสองขา ข้อดีของหุ่นยนต์ที่ใช้ขาคือหุ่นยนต์ที่สามารถไปได้ในทุกที่ ทุกสภาพพื้นผิว สามารถที่จะก้าวข้ามผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆได้ มีความสามารถในการเคลื่อนที่ดีกว่าล้อ ส่วนข้อจำกัดคือการเคลื่อนที่ช้าและการควบคุมทำได้ยากลำบากกว่าการเคลื่อนที่แบบใช้ล้อมากและการรักษาสมดุลเป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับหุ่นยนต์ประเภทนี้ โดยเฉพาะหุ่นยนต์ที่ใช้สองขาในการเคลื่อนที่



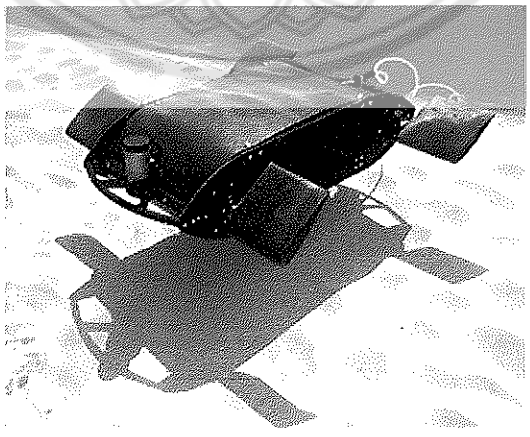
รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ขา

4. การเคลื่อนที่โดยการบิน (flight locomotion) คือหุ่นยนต์ที่ใช้ปีกหรือใบพัดในการเคลื่อนที่ ข้อดีของหุ่นยนต์บินได้คือเคลื่อนที่เร็ว สามารถเข้าไปในพื้นที่เสี่ยงภัยหรือที่เข้าถึงลำบากได้ ซึ่งงานส่วนใหญ่ของหุ่นยนต์ประเภทนี้ก็คือการสำรวจ หรือการตรวจการณ์ ข้อควรระวังของหุ่นยนต์บินคือเนื่องจากหุ่นยนต์บินมีระยะในการปฏิบัติงานได้ค่อนข้างไกล การควบคุมจากระยะไกลจึงเข้ามามีบทบาทอย่างมาก ระบบควบคุมที่ไม่ดีพออาจทำให้เกิดความเสียหายต่อหุ่นยนต์ได้



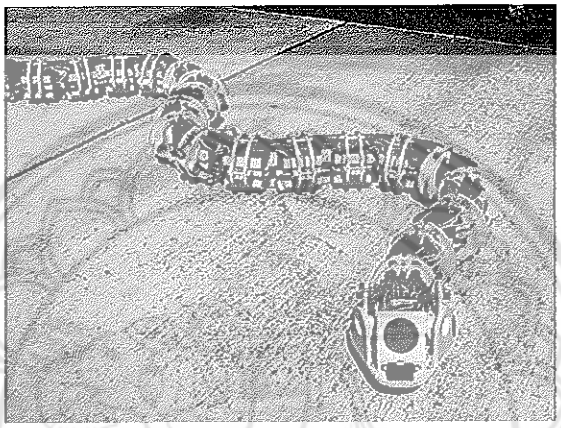
รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยการบิน

5. การเคลื่อนที่ในน้ำ (swimming locomotion) คือหุ่นยนต์ที่ใช้ใบพัดหรือครีบในการเคลื่อนที่ และมีถังอับเฉาในการควบคุมการลอยตัวของหุ่นยนต์ ซึ่งได้แก่หุ่นยนต์ปลาและหุ่นยนต์เรือดำน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในงานสำรวจ ข้อควรระวังของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในน้ำคือเนื่องจากการเคลื่อนที่ใต้น้ำนั้นการควบคุมไม่สามารถนำภาพมาใช้ในการนำทางได้ การควบคุมจึงต้องใช้อุปกรณ์ตรวจรู้อย่างอื่นมานำทางแทน เช่น ระบบการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง การควบคุมจึงต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ในน้ำ

6. การเคลื่อนที่ในรูปแบบอื่น (other locomotion) คือหุ่นยนต์ที่ไม่ใช้ขาและล้อในการเคลื่อนที่ เช่น หุ่นยนต์งูจะใช้การรวมแรงลัพธ์ที่เกิดจากการบิดเคลื่อนที่ไปมาในแต่ละข้อขับดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า ข้อดีของหุ่นยนต์ประเภทนี้คือสามารถไปได้ในทุกสภาพพื้นผิว ขึ้นที่สูงได้ และยังมีความสามารถในการเข้าที่แคบ จึงสามารถปฏิบัติงานได้อย่างหลากหลาย และข้อดีอีกอย่างของหุ่นยนต์ประเภทนี้คือในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ที่ประกอบกันจะเหมือนกัน ดังนั้นถ้ามีบางข้อต่อเกิดความเสียหายขึ้น จะสามารถแทนด้วยข้อต่ออื่นได้ทันที



รูปที่ 2.8 หุ่นยนต์งู

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต้องคำนึงถึงวิธีการหรือรูปแบบของการเคลื่อนที่ด้วยเหตุผลหลายประการ เช่น เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ต่ำที่สุด เพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ หรือเพื่อให้เกิดเสถียรภาพในขณะเคลื่อนที่ เป็นต้น

2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าและเซนเซอร์

มอเตอร์ไฟฟ้าและเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับหุ่นยนต์ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าจะใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์และเซนเซอร์จะเป็นตัวรับรู้เพื่อตรวจจับสัญญาณต่างๆ โดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถรับน้ำหนักโหลดได้ดีเพราะมีแรงบิดสูง สำหรับเซนเซอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้ในการตรวจจับค่าน้ำหนักของโหลดที่บรรทุกในหุ่นยนต์ และเซนเซอร์ที่เลือกใช้ในการตรวจจับค่าน้ำหนักคือโหลดเซลล์

2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้าคือเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบหมุนซึ่งอาศัยสนามแม่เหล็กสองชุดคือสนามแม่เหล็กถาวรและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดตัวนำ โดยหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงคือเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งจะไหลเข้าแปรงถ่านผ่านคอมมิวเตเตอร์เข้าไปในขดลวดอาร์เมเจอร์และสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น กระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปในขดลวดสนามแม่เหล็กและสร้างขั้วเหนือและขั้วใต้ขึ้น ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก 2 สนามในมอเตอร์ ตามคุณสมบัติของเส้นแรงไม่เหล็กจะไม่ตัดกันแต่ทิศทางตรงกันข้ามกันจะหักล้างกันและทิศทางเดียวกันจะเสริมแรงกันทำให้เกิดแรงบิดในขดลวดอาร์-มาเจอร์ซึ่งพันอยู่บนแกนเพลา ซึ่งตัวอาร์มาเจอร์ที่หมุนได้นี้เรียกว่าโรเตอร์ซึ่งหมายความว่าตัวหมุน การที่อำนาจแม่เหล็กทั้งสองมีปฏิกิริยาต่อกันทำให้ขดลวดอาร์มาเจอร์หรือโรเตอร์หมุนไปนั้นเป็นไปตามกฎของเฟลมมิ่ง (Fleming left hand rule)

มอเตอร์กระแสตรงสามารถแบ่งตามลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กและการไหลของกระแสผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กได้เป็น 3 ชนิด

1. มอเตอร์แบบอนุกรม (series motor) คือมอเตอร์ที่ต่อขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมกับขดลวดอาร์มาเจอร์ มีคุณลักษณะที่ดีคือให้แรงบิดสูง นิยมใช้เป็นต้นกำลังของรถไฟฟ้า รถยกของ เครนไฟฟ้า ความเร็วรอบของมอเตอร์อนุกรมเมื่อไม่มีโหลดจะมีความเร็วสูงมาก แต่ถ้ามีโหลดมาต่อ ความเร็วก็จะลดลงตามโหลด

2. มอเตอร์แบบขนาน (shunt motor) คือมอเตอร์ที่ขดลวดสนามแม่เหล็กจะต่อขนานกับขดลวดอาร์มาเจอร์ มอเตอร์แบบขนานมีคุณลักษณะที่มีความเร็วคงที่ แรงบิดเริ่มต้นต่ำแต่ความเร็วรอบคงที่ นิยมใช้กับพัดลมเพราะต้องการความเร็วคงที่และต้องการเปลี่ยนความเร็วได้ง่าย

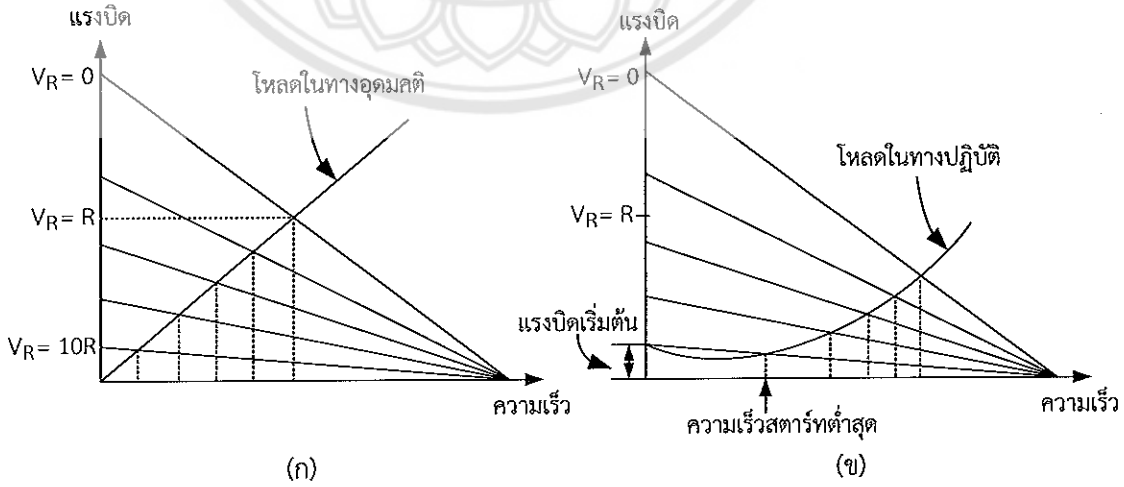
3. มอเตอร์แบบผสม (compound motor) คือมอเตอร์ที่นำคุณลักษณะที่ดีของแบบอนุกรมและแบบขนานมารวมกัน มอเตอร์แบบนี้มีคุณลักษณะพิเศษคือมีแรงบิดสูงแต่ให้ความเร็วรอบที่คงที่ตั้งแต่ยังไม่มีโหลดจนกระทั่งโหลดเต็มที่

2.2.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธีดังต่อไปนี้

1. การควบคุมแบบปรับค่าได้ เป็นการควบคุมความเร็วมอเตอร์รูปแบบพื้นฐานที่สุดของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ วิธีการนี้จะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่ออนุกรมกับมอเตอร์โดยให้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เป็นตัวกำหนดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ การควบคุมความเร็ววิธีนี้มีประสิทธิภาพน้อย เนื่องจากจะมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียไปในตัวต้านทาน วิธีการควบคุมความเร็วแบบนี้มักนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กซึ่งให้คุณสมบัติการสตาร์ทที่ดีคือให้แรงบิดสูงที่ความเร็วรอบต่ำ แต่จะให้ความเร็วสูงมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในสภาวะที่มีโหลดน้อยๆ ดังนั้นการควบคุมความเร็วแบบนี้จะมีประโยชน์เฉพาะที่สภาวะแรงต้านคงที่ เช่น การบังคับความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เป็นต้น รูปที่ 2.9 แสดงวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยตัวต้านทานปรับค่าได้จะนำมาต่ออนุกรมกับมอเตอร์ เมื่อปรับค่าความต้านทานจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลทำให้ความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

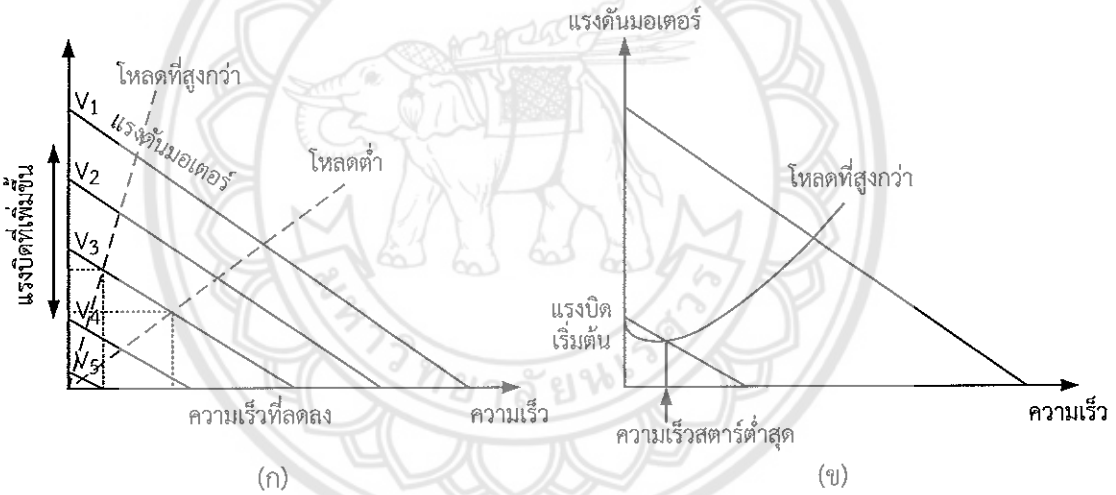
รูปที่ 2.9 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงคุณลักษณะของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้

รูปที่ 2.10 เป็นกราฟที่แสดงคุณสมบัติของวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้มาต่ออนุกรมกับมอเตอร์ กราฟในรูปที่ 2.10(ก) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดเมื่อโหลดเป็นโหลดในทางอุดมคติ ซึ่งจะได้ลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรง แต่ถ้าเป็นโหลดในทางปฏิบัติกราฟที่ได้จะเป็นเส้นโค้งซึ่งหมายความถึงแรงบิดจะมีค่าต่ำที่ความเร็วเริ่มต้น

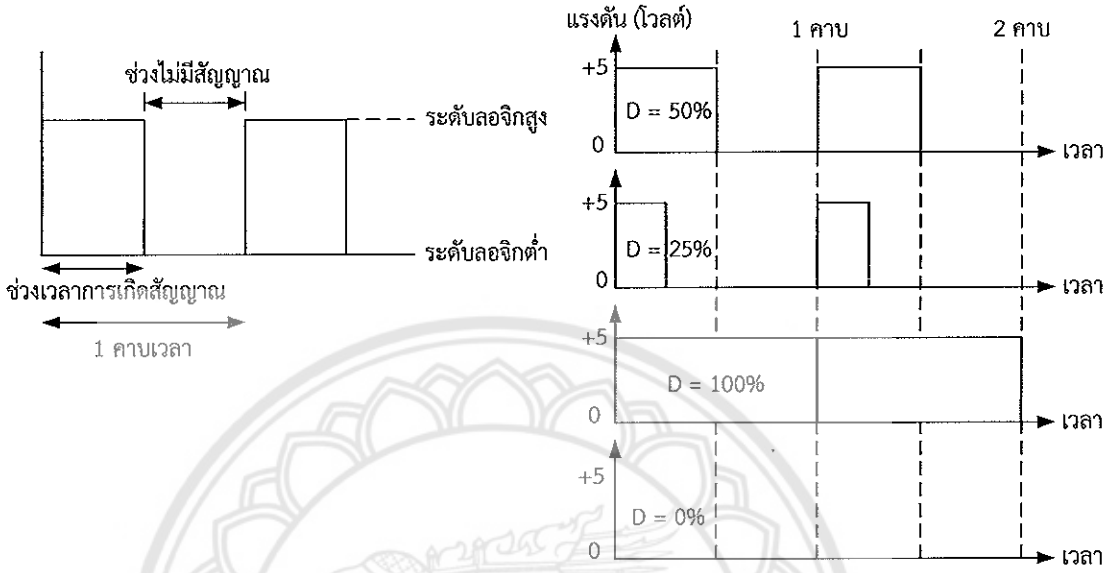
2. การควบคุมด้วยวิธีปรับค่าแรงดัน วิธีการนี้ดีกว่าวิธีการปรับค่าตัวต้านทานแต่จะมีความซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอัตราขยายแบบกำลังสูง และมอเตอร์จะถูกป้อนด้วยแรงดันที่เปลี่ยนแปลงได้จากแหล่งจ่ายที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ข้อดีของวิธีการควบคุมแบบนี้คือถ้าความเร็วลดลงจากผลของแรงบิด แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาระดับความเร็ว ส่วนข้อเสียจากการควบคุมวิธีนี้คือเมื่อมอเตอร์มีความเร็วต่ำจะทำให้แรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะมีค่าต่ำเช่นกัน รูปที่ 2.11 แสดงกราฟคุณลักษณะของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยการปรับค่าแรงดัน



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงคุณลักษณะของการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบปรับค่าแรงดัน

3. การควบคุมความเร็วโดยใช้การมอดูเลชั่นทางความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM) วิธีการควบคุมความเร็วแบบนี้เป็นการปรับเปลี่ยนสัดส่วนความกว้างของสัญญาณพัลส์โดยที่ความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือที่เรียกว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ซึ่งค่าดิวตี้ไซเคิลคือคือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูงโดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลมีเค่าท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ จะหมายความว่าในหนึ่งลูกคลื่นของสัญญาณพัลส์จะมีช่วงกว้างของสัญญาณที่มีสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่งและจะมีช่วงกว้างของสถานะลอจิกต่ำอยู่อีกครึ่งหนึ่ง ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามากจะหมายถึงค่าความกว้างพัลส์ของ

สัญญาณที่มีสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้น และถ้าค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าในสัญญาณพัลส์หนึ่งลูกคลื่นจะไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย



รูปที่ 2.12 ความกว้างพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดิวตี้ไซเคิลของพัลส์ที่มีความถี่คงที่

2.2.3 โหลดเซลล์ (Load cell)

โหลดเซลล์คือเซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุหรือโลหะ เช่น การทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ หรืองานด้านวิศวกรรมโยธา เช่นการทดสอบคอนกรีต

โหลดเซลล์ที่ใช้งานโดยทั่วไปมีหลายประเภท ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเพียง 5 ประเภทดังนี้

1. โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก ลักษณะการทำงานของโหลดเซลล์ประเภทนี้จะวัดน้ำหนักจากการเปลี่ยนแปลงความดันของของเหลวภายในระบบเมื่อมีแรงมากระทำที่แท่นรับน้ำหนักในโหลดเซลล์แบบไฮดรอลิกที่มีแผ่นไดอะแฟรม โดยแรงจะถูกส่งผ่านลูกสูบเป็นผลทำให้ของเหลวภายในช่องแผ่นไดอะแฟรมถูกกดอัด ซึ่งการวัดแรงที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้จากความดันของของเหลว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับแรงดันของของเหลวนี้มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นและไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณของ

ของเหลวในกระบอกสูบ โดยปกติโหลดเซลล์แบบนี้จะมีความแม่นยำในการวัดอยู่ที่ประมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์

2. โหลดเซลล์แบบนิวแมติก โหลดเซลล์ประเภทนี้จะทำงานโดยใช้หลักการสมดุลแรงเช่นเดียวกับแบบไฮดรอลิก แต่แตกต่างกันที่โหลดเซลล์แบบนี้จะมีความแม่นยำกว่าแบบไฮดรอลิกมากเพราะว่ามีการใช้ช่องว่างหลายช่องในการหน่วงความดันของของเหลวเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน โหลดเซลล์แบบนี้มักจะใช้วัดสิ่งของที่มีน้ำหนักไม่มากในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะอาดและปลอดภัยสูง จุดเด่นของโหลดเซลล์แบบนี้คือสามารถทนแรงกระแทกได้สูงและไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นอกจากนี้ในระบบนิวแมติกจะไม่ใช้ของเหลวในเครื่องมือวัดเหมือนกับระบบไฮดรอลิกทำให้ไม่มีของเหลวมาปนเปื้อนโดนสิ่งที่ต้องการจะวัดในกรณีที่ไดอะแฟรมมีการแตกร้าว

3. โหลดเซลล์แบบเปียโซรีซิสทีฟ (piezoresistive) โหลดเซลล์แบบนี้มีการทำงานเหมือนกับเกจวัดความเครียด แต่เปียโซรีซิสทีฟนี้สามารถผลิตสัญญาณออกมาได้ในระดับสูง จึงเหมาะสำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักที่ไม่ซับซ้อนในการวัดเนื่องจากสามารถต่อเข้าโดยตรงกับส่วนแสดงผล แต่เครื่องมือวัดลักษณะนี้ได้รับความนิยมลดลงเรื่อยๆ เพราะตัวขยายสัญญาณที่มีคุณภาพดีนั้นมีราคาถูกลง นอกจากนี้โหลดเซลล์แบบเปียโซรีซิสทีฟมีข้อเสียคือความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ออกมากับน้ำหนักที่วัดได้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ความเร็วในการตอบสนองต่ำและยังต้องใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่สะอาด ปลอดความชื้นและยังต้องควบคุมอากาศหรือไนโตรเจนภายในเครื่องให้เหมาะสม

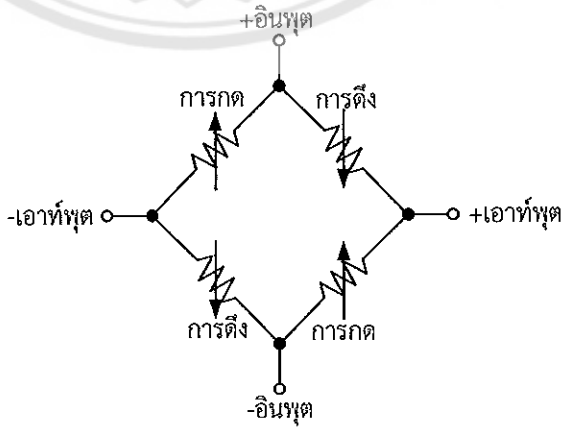
4. โหลดเซลล์แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (magnetostrictive) การทำงานของโหลดเซลล์แบบนี้ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงในการแผ่สัญญาณแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่อยู่ภายใต้แรงที่มากระทำ การกระทำของแรงทำให้เกิดการผิดรูปของสนามแม่เหล็กและจะให้เกิดสัญญาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อแรงที่มากระทำ ซึ่งใช้หลักการการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์ลักษณะนี้จะตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแกนแม่เหล็กและวัดการเหนี่ยวนำของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป โดยการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กจะแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักที่วัดได้ สำหรับโหลดเซลล์ประเภทนี้มีความทนทานมากและยังใช้อยู่ในอุตสาหกรรมรีดโลหะ มีข้อดีคือสามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่อันตราย เช่น ในโรงงานที่มีวัตถุไวไฟต่างๆ เนื่องจากโหลดเซลล์แบบนี้ไม่ต้องใช้ไฟฟ้าในการวัด

5. โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (strain gauge) หลักการของโหลดเซลล์ประเภทนี้คือเมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มา

กระทำ ซึ่งโดยปกติจะใช้เกจวัดความเครียดทั้งหมด 4 ตัว การวัดโดยเกจตัวต้านทานทั้งสี่ตัวตัวจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวต้านทานไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง และจะส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ต่อโวลต์ (mV/V) หมายความว่าถ้าจ่ายแรงดันขนาด 10 โวลต์ให้กับโหลดเซลล์ที่มีพิกัด 2 มิลลิโวลต์/โวลต์ที่โหลดเต็มพิกัด (full load) สมมุติให้น้ำหนักมีขนาด 2,000 กิโลกรัม เมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ที่น้ำหนักโหลดเต็มพิกัด สัญญาณที่ได้จะได้มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิโวลต์

การใช้งานโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจในทางปฏิบัตินั้นสามารถทำได้เพียงแค่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลดเซลล์ตามขั้วอินพุตที่กำหนดไว้ในโหลดเซลล์ แรงดันเอาท์พุตที่ได้จะแปรผันตรงกับแรงที่มากระทำต่อโหลดเซลล์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าน้อยจึงต้องนำไปผ่านวงจรขยายสัญญาณก่อนเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการต่อไป โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจที่จำหน่ายในปัจจุบันมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปใช้งานแบบไหน เช่น โหลดเซลล์แบบลิงค์ (link-type) ใช้ในงานประเภทรับแรงดึง โหลดเซลล์แบบวงแหวน (ring-type) ใช้ในงานประเภทรับแรงกด โหลดเซลล์แบบเชียร์เวบ (shear-web type) ใช้ในงานประเภทรับแรงเฉือน และโหลดเซลล์แบบคาน (beam-type) ใช้ในงานประเภทคานรับแรง ซึ่งเป็นโหลดเซลล์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

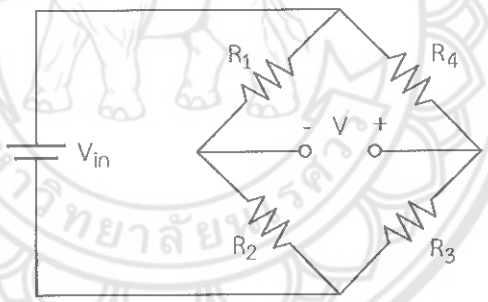
โหลดเซลล์แบบคานประกอบด้วยสเตรนเกจสองตัวติดอยู่ที่คานด้านบนและอีกสองตัวติดอยู่ที่คานด้านล่าง โดยที่สเตรนเกจทั้งสี่ตัวต่อกันเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ (wheatstone bridge circuit) เนื่องจากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของสเตรนเกจมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมนำสเตรนเกจมาใช้งานโดยต่อวงจรแบบวีทสโตนบริดจ์ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การบิบอัดของสเตรนเกจในวงจรวีทสโตนบริดจ์

รูปที่ 2.14 แสดงวงจรบริดจ์เมื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ เมื่อป้อนแรงดันให้วงจรบริดจ์ระหว่างขั้วอินพุตบวกและอินพุตลบในสภาวะที่ยังไม่มีแรงมากระทำหรือยังไม่มีน้ำหนักมากระทำต่อโหลดเซลล์ ค่าความต้านทานของสเตรนเกจภายในจะมีค่าเท่ากันซึ่งจะทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะสมดุล แรงดันเอาท์พุตที่ออกมาระหว่างขั้วเอาท์พุตบวกและเอาท์พุตลบจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อมีแรงมากระทำหรือมีน้ำหนักมากระทำต่อโหลดเซลล์จะทำให้สเตรนเกจยืดออกหรืองอเข้า ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานภายในสเตรนเกจของแต่ละตัวเปลี่ยนค่า ทำให้วงจรบริดจ์อยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุลและทำให้สามารถวัดค่าแรงดันที่เอาท์พุตออกมาได้ ยิ่งมีน้ำหนักหรือวัตถุมากระทำต่อโหลดเซลล์มากเท่าใดจะทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจเปลี่ยนค่าไปมากขึ้นและทำให้แรงดันเอาท์พุตมีค่ามากขึ้นด้วย แต่แรงดันเอาท์พุตที่ได้จากวงจรบริดจ์มีค่าน้อยมากจึงต้องอาศัยวงจรขยายสัญญาณเพื่อเพิ่มแรงดันเอาท์พุตให้มีค่ามากขึ้น แรงดันเอาท์พุตภายในวงจรวีทสโตนบริดจ์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$V = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] V_{in} \qquad (2.1)$$



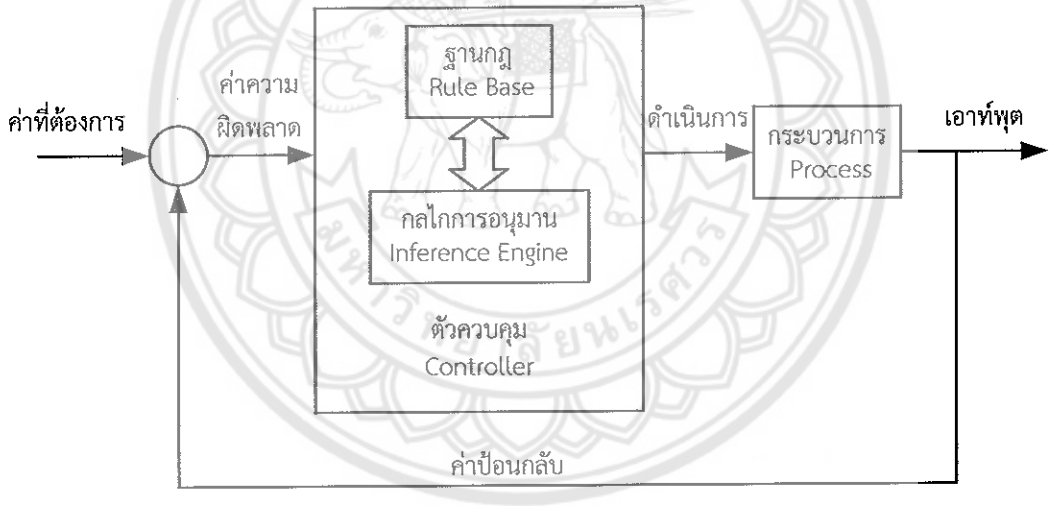
รูปที่ 2.14 วงจรบริดจ์เมื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ

2.3 ตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic)

ตัวควบคุมแบบฟัซซีได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่นเครื่องซักผ้า กล้องวิดีโอ หม้อหุงข้าว ตู้เย็น รวมไปถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมแบบต่างๆ ตัวควบคุมแบบฟัซซีใช้หลักของฟัซซีลอจิกในการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ โดยที่ตัวของฟัซซีลอจิกเองสามารถคำนวณด้วยคำพูดแทนตัวเลข เช่น “มากขึ้นนิด” หรือ “ลดลงหน่อย” ไม่ใช่ “มากขึ้น 10” หรือ “ลดลง 5.2” เป็นต้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถควบคุมด้วยประโยคแทนที่จะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น “อินพุตกำลังลดลงให้ปรับเอาท์พุตให้มากขึ้นหน่อย” ไม่ใช่ “อินพุตมีค่าเท่ากับ 2 ให้

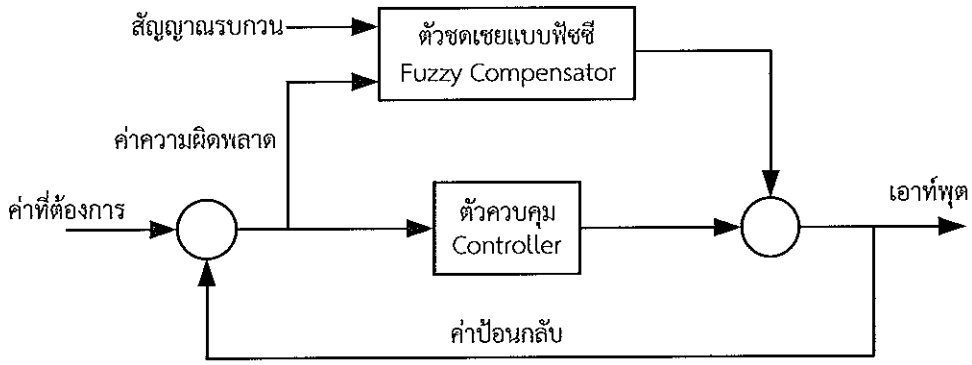
ปรับเอาท์พุตเท่ากับ 7" จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีมีลักษณะของการใช้ฐานกฎ (rule base) ที่มาจากการควบคุมด้วยคนจริงๆ ได้ ตัวควบคุมแบบนี้จึงมีประโยชน์มากในการประยุกต์ใช้กับงานเชิงปฏิบัติการจริงด้วยผู้เชี่ยวชาญ กลยุทธในการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบภาษาธรรมชาติ เหมือนที่ผู้ควบคุมใช้พูดสั่งงาน กฎต่างๆ ที่ใช้จึงต้องถูกคัดแยกออกจากส่วนที่เป็นสมการคณิตศาสตร์ ตัวควบคุมแบบฟัซซีมีรูปแบบการใช้งานหลายรูปแบบดังนี้

1. การควบคุมโดยตรง (direct control) ตัวควบคุมแบบฟัซซีที่เป็นการควบคุมโดยตรงนี้สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีจะอยู่ในส่วนหน้าก่อนที่เอาท์พุตจะถูกป้อนกลับเอาท์พุตที่ได้จากกระบวนการจะถูกเปรียบเทียบกับค่าอินพุตที่ตั้งไว้ ถ้ามีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นคือเอาท์พุตไม่ตรงหรือไม่สอดคล้องกับค่าอินพุตที่ต้องการ ตัวควบคุมจะดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งตามกลวิธีที่กำหนดหรือที่ได้ออกแบบไว้ในตัวควบคุม ตัวควบคุมแบบฟัซซีในรูปนี้ถูกใช้แทนตัวควบคุมแบบ PID แบบดั้งเดิม



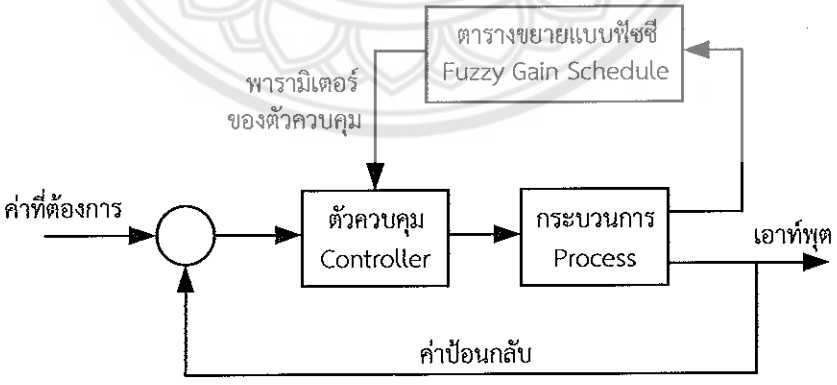
รูปที่ 2.15 การควบคุมโดยตรง

2. การควบคุมแบบไปข้างหน้า (feedforward control) การนำเอาฟัซซีลอจิกมาเป็นตัวชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมแบบไปข้างหน้าสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.16 ตัวชดเชยแบบฟัซซีใช้สัญญาณรบกวนเป็นข้อมูลในการตัดสินใจว่าจะทำการชดเชยให้กับตัวควบคุมขนาดไหน ตัวควบคุมในระบบอาจจะเป็นตัวควบคุม PID แบบเชิงเส้น ในขณะที่ตัวชดเชยแบบฟัซซีจะทำการชดเชยการทำงานของตัวควบคุมในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.16 การควบคุมแบบไปข้างหน้า

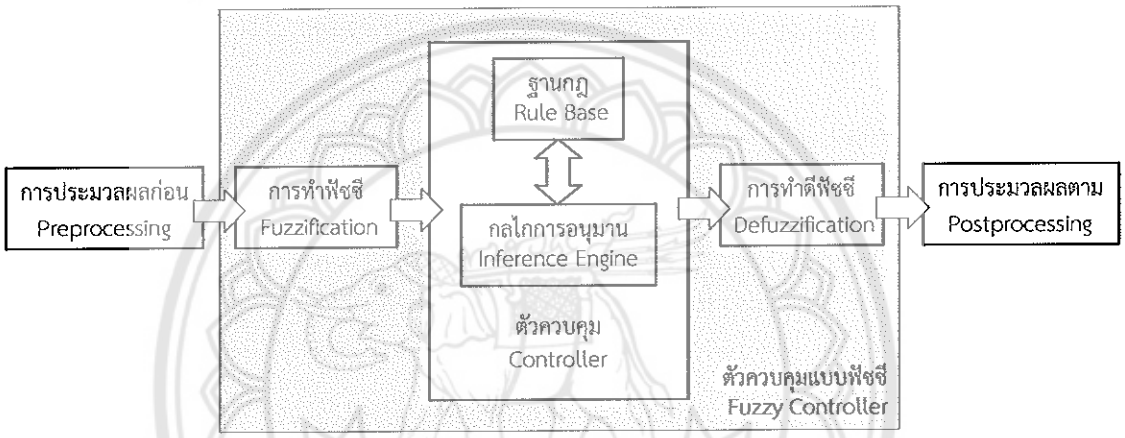
3. การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (parameter adaptive control) ในกรณีที่ระบบไม่เป็นเชิงเส้นมีจุดทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้นที่ตั้งไว้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับจุดทำงานใหม่ได้ด้วยการจัดตารางการขยายแบบฟัซซี (fuzzy gain scheduling) ตัวควบคุมที่มีการจัดตารางการขยายแบบฟัซซีจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ซึ่งมีค่าของพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจากจุดทำงานเดิม อินพุตที่วัดจากตัวตรวจจับจะถูกใช้เป็นตัวแปรการจัดตาราง (scheduling variable) ที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเดิม การปรับค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปของตารางค้นหา (look-up table) รูปที่ 2.17 แสดงแผนผังทั่วไปของการควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัวแบบฟัซซี



รูปที่ 2.17 การควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว

2.3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบเพื่อใช้เป็นตัวควบคุมเชิงเส้นซึ่งมีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นจะต้องทำการคำนวณเหมือนกับเช่นวิธีราก-โลคัส (root locus) วิธีผลตอบสนองความถี่ (frequency response) หรือวิธีวางตำแหน่งโพล (pole placement) กฎที่ใช้ในตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถไม่เป็นเชิงเส้นได้ รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซี องค์ประกอบในการประมวลผลก่อนและหลังเป็นการปรับสภาพอินพุตและเอาท์พุตที่จะใช้กับตัวควบคุมแบบฟัซซีให้มีความเหมาะสม ซึ่งรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

1. การประมวลผลก่อน (preprocessing) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการเตรียมอินพุตจากโลกจริงให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับตัวควบคุมในโลกของฟัซซี โดยปกติแล้วอินพุตของระบบจะเป็นค่าเชิงตัวเลขที่วัดหรือออกมาจากเครื่องมือวัดต่างๆ และไม่ได้มีค่าในรูปภาษา จึงจำเป็นจะต้องมีการประมวลผลก่อนเพื่อปรับค่าอินพุตเหล่านี้ให้มีความเหมาะสม ตัวอย่างของการประมวลผลก่อนเช่น แปลงค่าจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานในย่านเฉพาะที่ต้องการ กรองหรือกำจัดสัญญาณรบกวน คำนวณหาค่าอนุพันธ์หรือปริพันธ์

ขั้นตอนการประมวลผลก่อนมีผลต่อประสิทธิภาพหรือการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีโดยตรง ค่าสัญญาณดิจิตอลที่ละเอียดจะทำให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างราบเรียบกว่าค่าที่หยาบ การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานอาจส่งผลต่อการกำหนดตัวแปรในระบบฟัซซีได้

2. การทำฟัซซี (fuzzification) ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความเป็นสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตนั้นตามเงื่อนไขที่ถูกออกแบบไว้

3. ฐานกฎ (rule base) กฎในระบบฟัซซีถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุม กฎดังกล่าวสามารถมาจากเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมไปถึงสามารถให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าหนึ่งผลลัพธ์ได้ ตัวควบคุมที่มีอินพุตและเอาท์พุตมากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) ในขณะที่ตัวควบคุมที่มีเพียงหนึ่งอินพุตและหนึ่งเอาท์พุตจะเรียกว่า SISO (Single-Input Single-Output) ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่มีหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาท์พุตจะทำการควบคุมสัญญาณค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว แนวคิดของการใช้ฐานกฎในฟัซซีลอจิกทำให้ระบบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของมนุษย์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง

4. กลไกการอนุมาน (inference engine) กฎต่างๆ ที่กำหนดไว้จะถูกอนุมานเป็นผลลัพธ์ในการตัดสินใจของระบบ เมื่อระบบตัดสินใจได้แล้ว การดำเนินการที่สอดคล้องกับการตัดสินใจนั้นก็จะดำเนินต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ระบบตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ที่ 1 กำลัง "ร้อนขึ้น" อย่าง "รวดเร็ว" ระบบจะทำการพิจารณาค่าอินพุตพร้อมกับตรวจสอบกับกฎการทำงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวแล้วทำการอนุมานหรือตัดสินใจว่าจะทำการเปิดเครื่องทำความเย็น "แรงที่สุด" เป็นต้น ผลลัพธ์การตัดสินใจที่ได้ยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษาที่ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าที่ใช้งานจริงด้วยขั้นตอนต่อไป

5. การทำดีฟัซซี (defuzzification) ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานจะอยู่ในรูป เช่น เปิดเครื่องทำความเย็น "แรงที่สุด" หรือลดเครื่องทำความร้อน "ลงพอประมาณ" ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่น เปิดเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้น 25% เป็นต้น

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

2.3.2 กฎของฟัซซี (Fuzzy rule)

กฎของฟัซซีเป็นวิธีการนำเอาความรู้ของมนุษย์มาใส่ในระบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซีคือกลุ่มของประโยคเงื่อนไข *ถ้า-แล้ว* (IF - THEN) ในรูปแบบต่อไปนี้

IF x is A

THEN y is B

หรือ ถ้า x เท่ากับ A

แล้ว y เท่ากับ B

โดยที่ x และ y เป็นตัวแปรภาษา และ A และ B เป็นค่าเชิงภาษา โดยปกติแล้วกฎของฟัซซีจะครอบคลุมค่าของตัวแปรที่อยู่ในส่วนเงื่อนไข IF ยกตัวอย่างเช่นระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าของตัวแปรอุณหภูมิที่เป็นไปได้คือ "เย็น" "กำลังดี" และ "ร้อน" ดังนั้นเงื่อนไขของฟัซซีที่ครอบคลุมค่าดังกล่าวจะเป็น

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

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

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

แล้ว p เท่ากับ D และ q เท่ากับ E

ทุกเงื่อนไขใน "ถ้า" จะถูกประเมินพร้อมๆ กันและรวมกันด้วยปฏิบัติการทางเซต เช่น แอนด์ (AND) หรือ ออร์ (OR) โดยปกติแล้วจะจำกัดจำนวนค่าเงื่อนไขในระบบไม่ให้มีมากเกินไปโดยการเลือกใช้กฎที่จำเป็น

1041018

30 มิ.ย. 2564
วิ
211
.35
ม16ร
2560

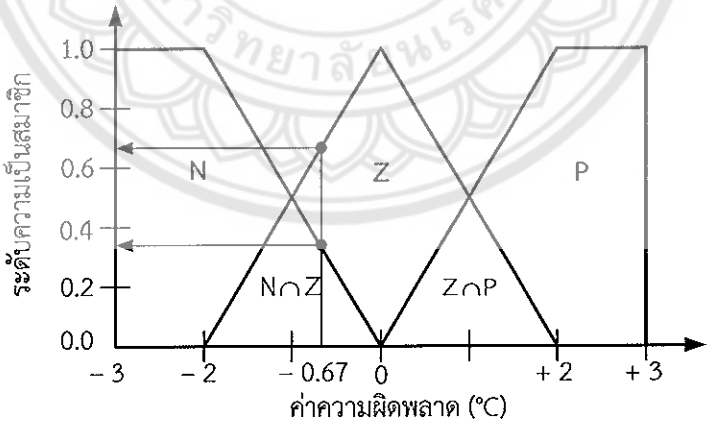
เท่านั้นเนื่องจากจะทำให้เพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซีเพราะบางกฎอาจไม่สามารถมีโอกาสเกิดได้ จะสังเกตว่าจำนวนเงื่อนไขจะขึ้นอยู่กับค่าของตัวแปรภาษาภายในระบบ

2.3.3 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ (Mamdani-style inference)

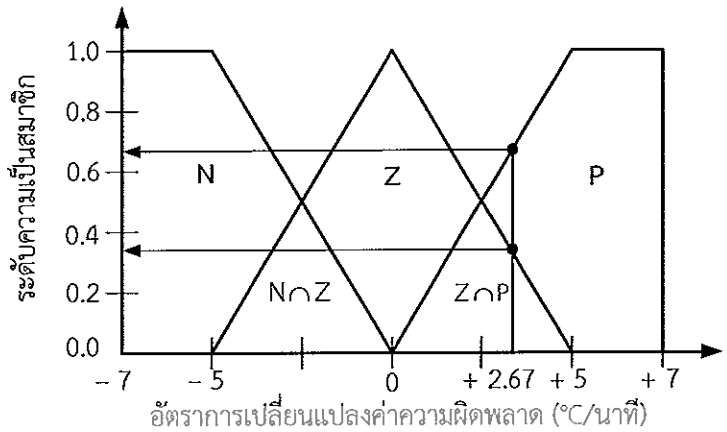
การอนุมานฟัซซีสามารถนิยามว่าเป็นการส่งค่า (mapping) จากค่าอินพุตของระบบไปยังเอาท์พุตโดยใช้หลักการของทฤษฎีเซต การนุมานฟัซซีมีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้คือ แบบแมมดานิ (Mamdani) และแบบซูกิโน (Sugeno) โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการออกแบบดังจะแสดงในรายละเอียดต่อไปนี้

การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือการทำฟัซซี การประเมินกฎของฟัซซี การรวมกฎและการทำดีฟัซซี

1. การทำฟัซซี (fuzzification) คือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตของตัวแปรอินพุต ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ระบบจะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลข จากนั้นค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้นๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก การทำฟัซซีของตัวแปรอินพุตจะขึ้นอยู่กับกฎของฟัซซีด้วยเนื่องจากสำหรับอินพุตค่าหนึ่งๆ จะมีผลต่อกฎของฟัซซีบางข้อเท่านั้น พิจารณาการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตจากรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาดที่ -0.67 °C จะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ “ลบ” เท่ากับ 0.36 และระดับความเป็นสมาชิกของ “ศูนย์” เท่ากับ 0.62



รูปที่ 2.20 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 ค่านี้มีทั้งความเป็นศูนย์และความเป็นบวกคือเป็นค่าที่อยู่ทั้งในเซต Z และเซต P ด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.35 และ 0.64 ตามลำดับ ซึ่งค่าระดับความเป็นสมาชิกบ่งบอกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด +2.67 °C/นาที มีความเป็นบวกมากกว่าความเป็นศูนย์ สรุปค่าระดับความเป็นสมาชิกของทั้งสองอินพุตในรูปฟังก์ชันสมาชิกได้ดังนี้

μ(ค่าความผิดพลาด = N)(-0.67) = 0.36

μ(ค่าความผิดพลาด = Z)(-0.67) = 0.62

μ(ค่าความผิดพลาด = P)(-0.67) = 0.00

μ(ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = N)(2.67) = 0.00

μ(ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z)(2.67) = 0.35

μ(ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P)(2.67) = 0.64

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้โดยใช้กฎของฟัซซี การ

ประเมินค่ากฎจะเป็นส่วนของ “ถ้า” โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าค่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องถูกกระทำในส่วนของ “แล้ว” ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆ กันได้ เนื่องจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง เช่นที่กล่าวมาแล้วคือค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น แอนด์และออร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าในส่วน “แล้ว” ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาท์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำการออร์จากทฤษฎีเซตจะได้ว่า

$$\mu_{A\cup B}(x) = \max\left[\mu_A(x), \mu_B(x)\right] \tag{2.2}$$

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

$$\begin{aligned}\mu_{A\cup B}(x) &= probor\left[\mu_A(x), \mu_B(x)\right] \\ &= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\times\mu_B(x)\end{aligned} \tag{2.3}$$

เช่นเดียวกับตัวกระทำแอนด์ ในกล่องเครื่องมือฟัซซีลอจิกในแมทแลปมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน min และฟังก์ชันผลคูณ prod ดังนี้

$$\mu_{A\cap B}(x) = \min\left[\mu_A(x), \mu_B(x)\right] \tag{2.4}$$

หรือ

$$\begin{aligned}\mu_{A\cap B}(x) &= prod\left[\mu_A(x), \mu_B(x)\right] \\ &= \mu_A(x)\times\mu_B(x)\end{aligned} \tag{2.5}$$

ในบางกรณีการใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกันอาจจะให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้ หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งเงื่อนไขในส่วนของ “ถ้า” แล้ว ผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่ากฎข้อใดที่ต้องถูกพิจารณาในส่วน “แล้ว” ต่อไป พิจารณาตัวอย่างระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีกฎของฟัซซีทั้งหมด 9 ข้อ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่หนึ่งได้แก่ ค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ N และ Z ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์และอยู่ในส่วน “ถ้า” ของกฎข้อที่ 1 2 4 5 7 และ 8 ในขณะที่เงื่อนไขของอินพุตตัวที่สองได้แก่อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ +2.67 °C/นาที ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Z และ P ที่ไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ในส่วนของ “ถ้า” ของกฎข้อที่ 4 5 6 7 8 และ 9 เมื่อทำการแอนด์โดย

ใช้ฟังก์ชัน min กับเงื่อนไขทั้งสองแล้วจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองที่มีค่าไม่เป็นศูนย์คือเงื่อนไขในข้อ 4 5 7 และ 8 กฎของฟัซซีทั้ง 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

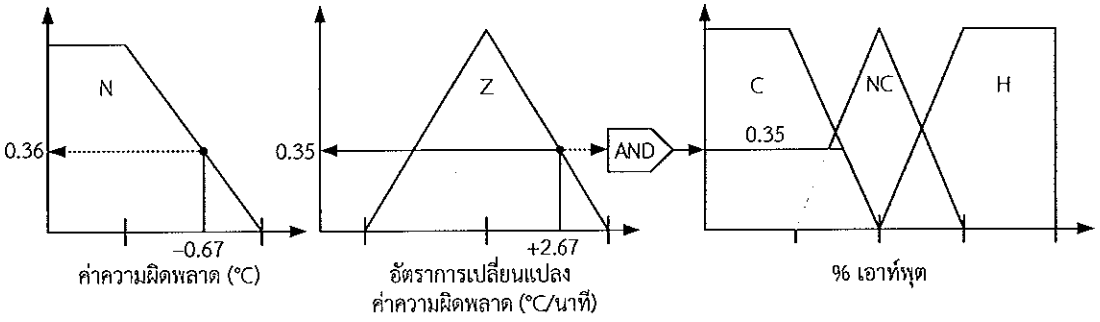
8. IF (ค่าผิดพลาด = Z) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เอาท์พุต = C

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

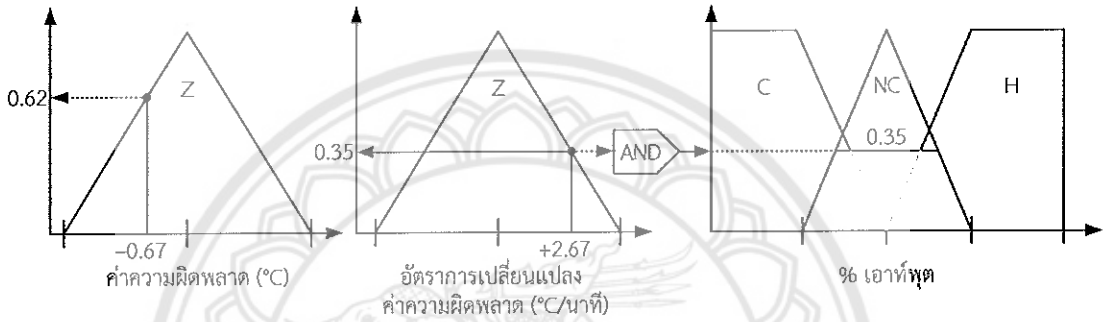
9. IF (ค่าผิดพลาด = P) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เอาท์พุต = H

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

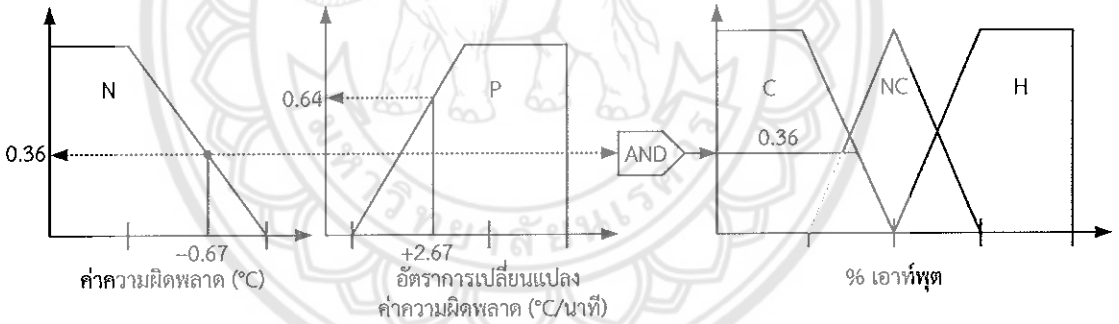
จากค่าผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ +2.67 °C/นาที มีผลให้ส่วนของ “แล้ว” ซึ่งก็คือตัวแปรเอาท์พุตของกฎข้อ 4 5 7 และ 8 จะถูกประเมินค่าในขั้นตอนต่อไป ค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุตในส่วนของ “ถ้า” จะเป็นตัวบอกว่าตัวแปรเอาท์พุตจะมีรูปร่างของระดับความเป็นสมาชิกอย่างไร โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลค่าระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุตใน “ถ้า” ดังแสดงในรูปที่ 2.21



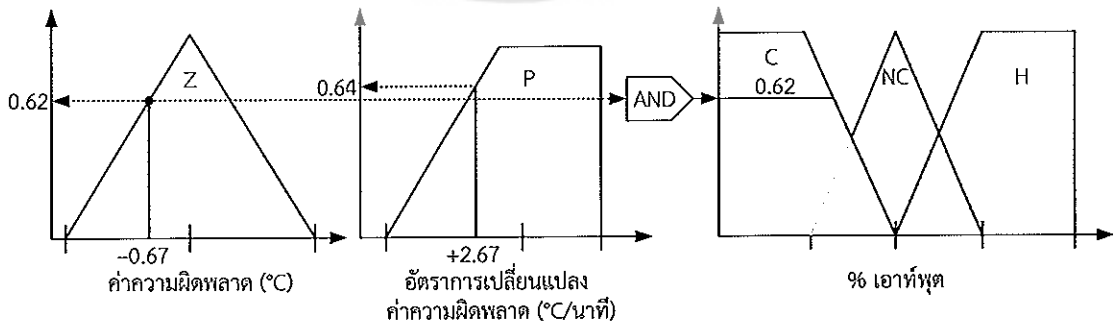
กฎ 4) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = Z) THEN เอาท์พุต = C



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



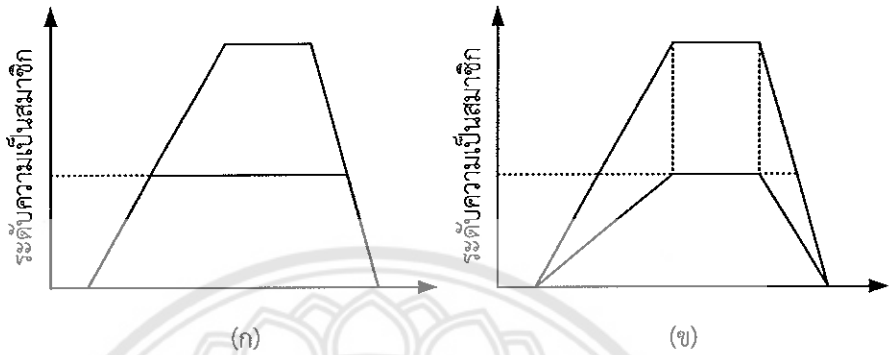
กฎ 7) IF (ค่าความผิดพลาด = N) AND (อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด = P) THEN เอาท์พุต = C



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

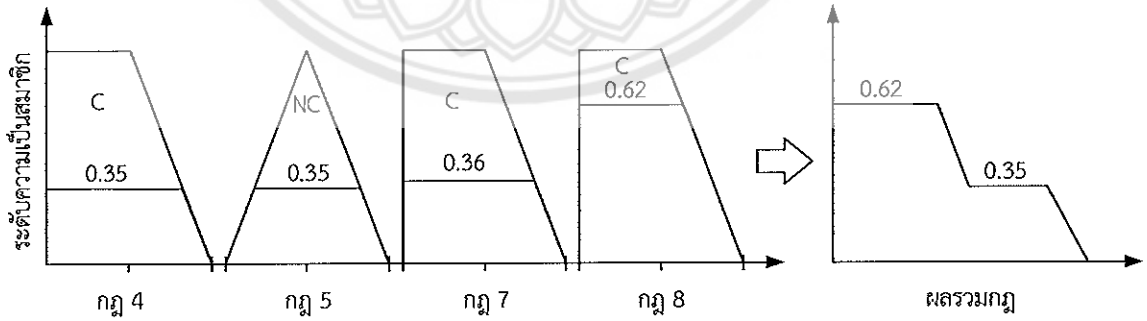
รูปที่ 2.21 การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานี

ถึงแม้ว่าวิธีการตัดยอดเอาท์พุตจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน แต่เป็นวิธีที่เร็วและง่ายสำหรับการคำนวณรวมไปถึงการนำไปใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัดยอดและวิธีการปรับขนาด



รูปที่ 2.22 การประเมินค่าฟังก์ชันสมาชิก (ก) วิธีตัดยอด (ข) วิธีปรับขนาด

3. การรวมกฎ (aggregation) หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (โดยวิธีการตัดยอดหรือการปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาท์พุต โดยการรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน รูปที่ 2.23 แสดงการรวมกฎจากระบบควบคุมอุณหภูมิที่มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ +2.67 °C/นาที โดยในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดี่ยวเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล



รูปที่ 2.23 ผลการรวมกฎของค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67 °C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ +2.67 °C/นาที

4. การทำดีฟัซซี (defuzzification) จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ ค่าต่างๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาท์พุต แต่ค่าของเอาท์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม เป็นต้น ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาท์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน

วิธีการทำดีฟัซซีมีหลายแบบ วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีหาจุดศูนย์ถ่วง (centriod หรือ center of gravity, COG) ค่าจุดศูนย์ถ่วงของฟัซซีเซต A ในช่วง [a, b] สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x)x\,dx}{\int_a^b \mu_A(x)\,dx} \tag{2.6}$$

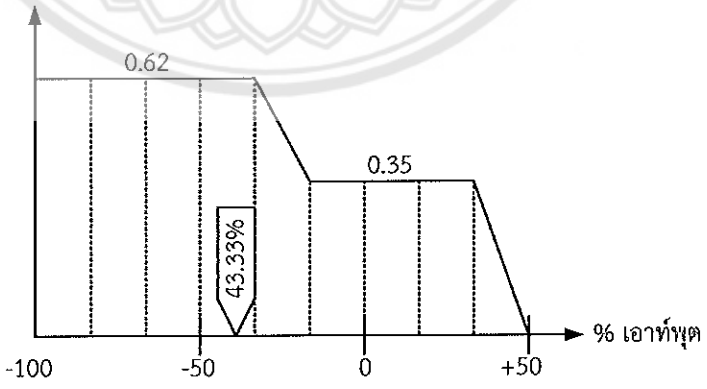
ในทางปฏิบัติการคำนวณค่าจุดศูนย์ถ่วงสามารถหาได้จากข้อมูลการชักตัวอย่างดังนี้

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^{b} \mu_A(x)x}{\sum_{x=a}^{b} \mu_A(x)} \tag{2.7}$$

พิจารณาเอาท์พุตของระบบควบคุมอุณหภูมิในรูปที่ 2.23 ค่าจุดศูนย์ถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

$$= -43.33$$



รูปที่ 2.24 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของระบบควบคุมอุณหภูมิ

ค่าเอาท์พุตที่ได้จากการทำดีฟัซซีเท่ากับ -43.33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่าระบบต้องเปิดเครื่องทำความเย็นที่ระดับ 43.33 เปอร์เซ็นต์ การทำดีฟัซซีของระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.24

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 3

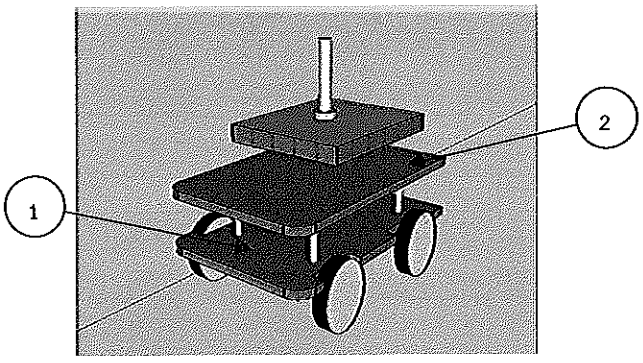
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยตลอดจนขั้นตอนการทำงานต่างๆ ของหุ่นยนต์ควบคุมความเร็วให้มีค่าคงที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีเมื่อน้ำหนักโหลดของหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลง งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยและพัฒนาโดยมุ่งเน้นไปในเรื่องการสร้างชิ้นงานขึ้นมาใหม่ผสมผสานกับทฤษฎีของการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีเพื่อควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้มีค่าคงที่ ดังนั้นขั้นตอนวิธีในการดำเนินการวิจัยจึงต้องแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปด้วยความเรียบร้อยและตรงตามแผนที่ตั้งไว้ โดยมีหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

1. การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์รถและสร้างหุ่นยนต์รถที่สามารถรับน้ำหนักได้ 5 กิโลกรัม
2. การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมหุ่นยนต์รถ
3. การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี
4. กระบวนการทำงานของหุ่นยนต์รถโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี

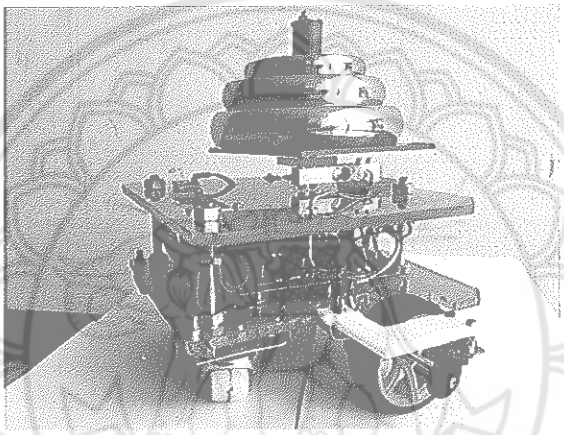
3.1 การออกแบบโครงสร้างและสร้างหุ่นยนต์รถ

โครงสร้างของหุ่นยนต์รถถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ได้สามทิศทางคือเดินหน้า เลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวา โดยใช้สองล้อหน้าในการเคลื่อนที่อิสระและสองล้อหลังเป็นล้อต้นกำลังในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 โวลท์ 7 วัตต์ ที่มีความเร็วรอบมอเตอร์เท่ากับ 200 รอบต่อวินาที และสามารถรับโหลดน้ำหนักได้สูงสุด 10 กิโลกรัม แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์รถนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



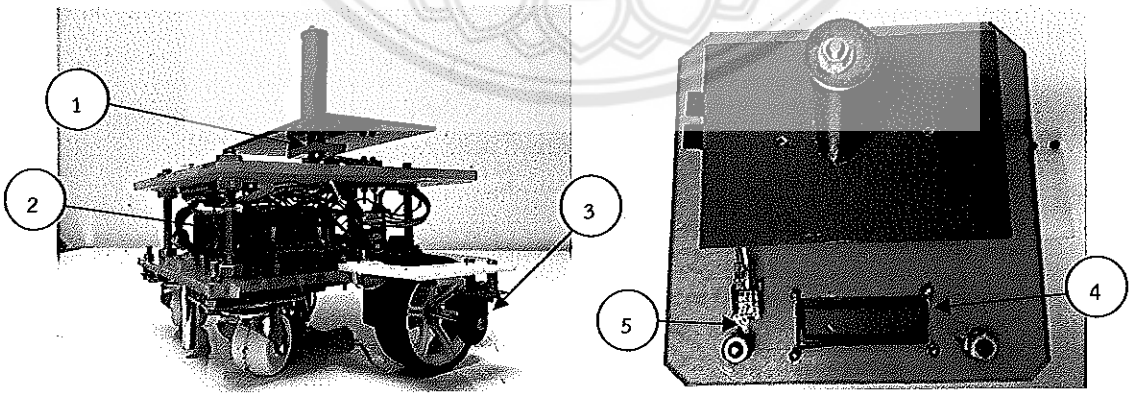
รูปที่ 3.1 แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์รถ

จากรูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์รถซึ่งถูกออกแบบโดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งที่อยู่ด้านล่างจะเป็นส่วนที่ใช้วางวงจรควบคุมต่างๆ และแบตเตอรี่ ส่วนที่สองที่อยู่ด้านบนเป็นส่วนที่ใช้ติดตั้งตัวรับรู้ชนิดโหลดเซลล์และใช้วางน้ำหนักโหลดให้กับหุ่นยนต์รถ โครงสร้างของหุ่นยนต์รถทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร ขนาด 27 x 21 เซนติเมตร จำนวนสองแผ่นประกอบเข้าด้วยกันด้วยเหล็กเกลียวยึดด้วยน็อต แผ่นอะคริลิกที่อยู่ด้านบนเจาะรูเพื่อติดตั้งจอแอลซีดีขนาด 2 บรรทัดและหลอดไฟแอลอีดีเพื่อแสดงสถานะการทำงานของหุ่นยนต์ ชั้นด้านบนสุดติดแท่งพลาสติกบนฐานเหล็กเพื่อใช้ใส่โหลดน้ำหนักแบบที่มีรูตรงกลาง เมื่อประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันจะได้หุ่นยนต์รถดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หุ่นยนต์รถเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์พร้อมวางโหลดน้ำหนัก

องค์ประกอบต่างๆ ที่แต่ละตำแหน่งของหุ่นยนต์รถสามารถแสดงรายละเอียดได้ในรูปที่ 3.3



(ก) ภาพถ่ายด้านข้าง (ข) ภาพถ่ายด้านบน

รูปที่ 3.3 ตำแหน่งส่วนประกอบต่างๆ ของหุ่นยนต์รถ (ก) ภาพถ่ายด้านข้าง (ข) ภาพถ่ายด้านบน

จากรูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งขององค์ประกอบต่างๆ ของหุ่นยนต์รถโดยมีรายละเอียดดังนี้

หมายเลข 1 คือตำแหน่งของตัวรับรู้ชนิดโหลดเซลล์ที่ติดอยู่กับแท่นวางโหลดน้ำหนัก

หมายเลข 2 คือตำแหน่งของวงจรควบคุมต่างๆ และแบตเตอรี่

หมายเลข 3 คือตำแหน่งของตัวเข้ารหัสซึ่งติดไว้ที่ล้อหลังด้านซ้ายของหุ่นยนต์รถเพื่อใช้ในการวัดความเร็วของหุ่นยนต์รถ

หมายเลข 4 คือจอแอลอีดีขนาด 2 บรรทัดใช้แสดงค่าโหลดน้ำหนักและค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถ

หมายเลข 5 คือหลอดไฟแอลอีดีใช้แสดงสถานการณ์ทำงานของหุ่นยนต์รถ

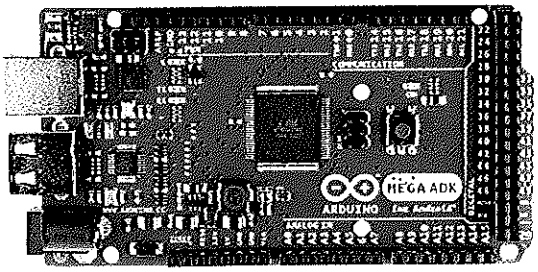
3.2 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมหุ่นยนต์รถ

วงจรควบคุมสำหรับหุ่นยนต์รถเพื่อให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีซีซีจะมีวงจรควบคุมหลักอยู่ 2 วงจรคือ

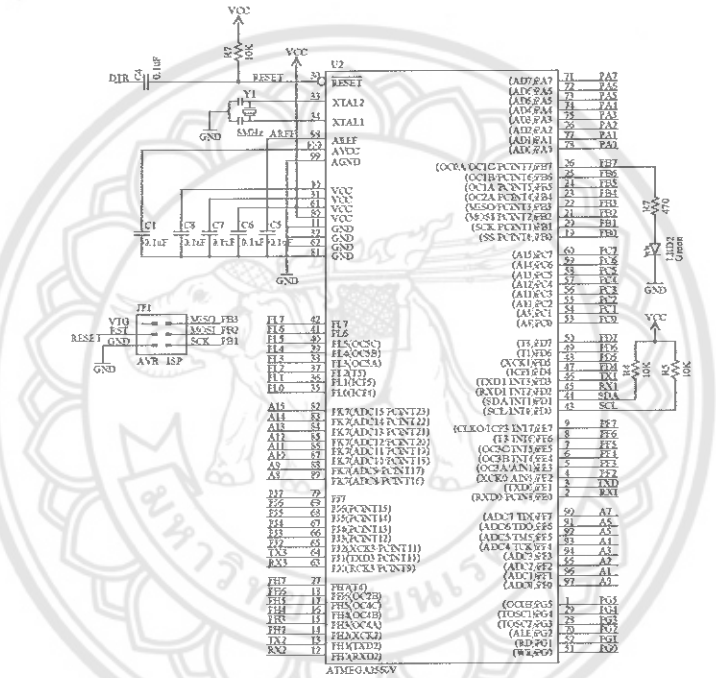
1. วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์
2. วงจรขับมอเตอร์

3.2.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูลเอวีอาร์ (AVR) ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถนำมาประยุกต์ในการใช้งานได้อย่างสะดวกและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลเอวีอาร์ที่เลือกใช้คือเบอร์ ATmega2560 เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้มีรูปแบบของอินพุต/เอาท์พุตขั้นพื้นฐานและมีจำนวนที่เพียงพอกับการใช้งาน อีกทั้งยังมีชุดคำสั่งที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างง่ายในการควบคุมพอร์ตอินพุต/เอาท์พุต ไม่ว่าจะเป็นพอร์ตอินพุต/เอาท์พุตแบบดิจิตอลหรือแอนะลอก พีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) รวมไปถึงพอร์ตอนุกรม และยังมีโมดูลการทำงานต่างๆ ที่หลากหลายให้ผู้ใช้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ตรงกับความต้องการ แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยตัวแผงวงจรนี้ประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แบบซิพเดี่ยว วงจรจ่ายไฟ และวงจรเชื่อมต่อต่างๆ สำหรับวงจรภายในของไมโครคอนโทรเลอร์เบอร์ ATmega2560 แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ประโยชน์ของการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คือสามารถรับส่งสัญญาณจากภายนอกและนำไปควบคุมอุปกรณ์ต่อพ่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.4 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560

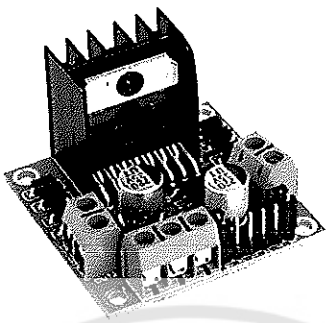


รูปที่ 3.5 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560

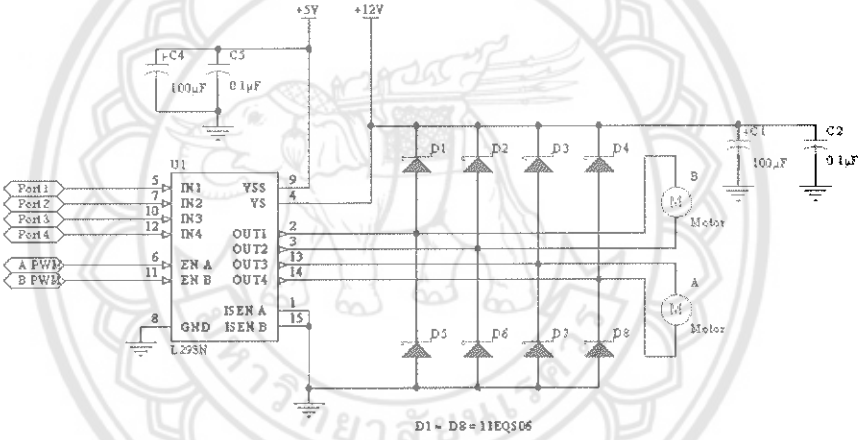
3.2.2 วงจรขับมอเตอร์

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์กระแสตรงในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์รถ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรขับมอเตอร์เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับส่งสัญญาณกับมอเตอร์ได้ โดยวงจรขับมอเตอร์ที่ใช้นี้เป็นวงจรสำเร็จรูปที่ใช้วงจรรวมเบอร์ L298 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 คุณสมบัติของวงจรขับมอเตอร์เบอร์ L298 จะใช้ในการขับมอเตอร์ที่ความร้อนต่ำ และมีวงจรปรับระดับแรงดันภายในตัวเอง จะใช้ขับมอเตอร์กระแสตรงได้พร้อมกันสองตัว และยังสามารถควบคุมการหมุนกลับทิศทางของมอเตอร์ได้อย่างอิสระ

สามารถรองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ในช่วงกว้าง 7-35 โวลต์ และทนกระแสได้สูงสุด 2 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถใช้ได้คือ 20 วัตต์ ซึ่งมีวงจรการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แผงวงจรขับมอเตอร์เบอร์ L298



รูปที่ 3.7 วงจรขับมอเตอร์สำหรับวงจรรวมเบอร์ L298

3.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี

การควบคุมหุ่นยนต์รถให้มีความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงจะใช้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้มีค่าคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผู้วิจัยมีความเห็นว่าค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโหลดสามารถพิจารณาเป็นปริมาณแบบคลุมเคลือได้ โดยในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิ และแบ่งการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีออกเป็น 4 ขั้นตอนหลักดังนี้

1. การกำหนดเซตของตัวแปรอินพุตและเซตของตัวแปรเอาท์พุต

2. การสร้างฐานกฎฟัซซี

3. การประเมินค่ากฎของฟัซซี

4. การทำดีฟัซซี

3.3.1 การกำหนดเซตของตัวแปรอินพุตและเซตของตัวแปรเอาท์พุต

สำหรับการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้มีค่าคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีนี้จะกำหนดให้มีตัวแปรอินพุต 2 ตัวคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก และค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ และกำหนดให้มีตัวแปรเอาท์พุต 2 ตัวคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ และค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก ซึ่งได้กำหนดตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาท์พุตและค่าเชิงภาษาในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 เซตของตัวแปรอินพุตและความหมาย

ชื่อตัวแปร	เซตของตัวแปร	ความหมาย
1. ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก (The change of weight)	Negative Very Large (NVL)	น้ำหนักลดลงมากที่สุด
	Negative Large (NL)	น้ำหนักลดลงมาก
	Negative Medium (NM)	น้ำหนักลดลงปานกลาง
	Negative Small (NS)	น้ำหนักลดลงน้อย
	Negative Very Small (NVS)	น้ำหนักลดลงน้อยที่สุด
	Positive Very Small (PVS)	น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อยมาก
	Positive Small (PS)	น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อย
	Positive Medium (PM)	น้ำหนักเพิ่มขึ้นปานกลาง
	Positive Large (PL)	น้ำหนักเพิ่มขึ้นมาก
	Positive Very Large (PVL)	น้ำหนักเพิ่มขึ้นมากที่สุด

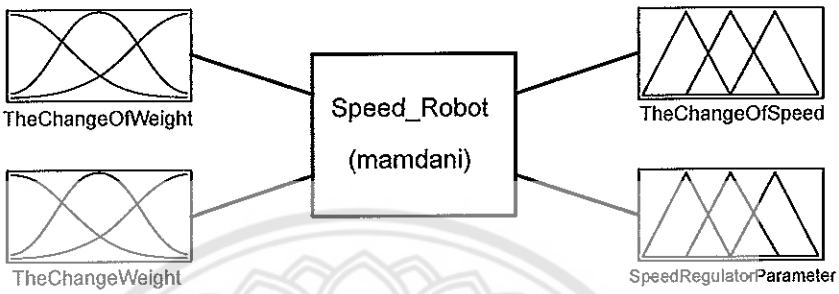
ตารางที่ 3.1 เซตของตัวแปรอินพุตและความหมาย (ต่อ)

ชื่อตัวแปร	เซตของตัวแปร	ความหมาย
2. ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ (The current weight)	W0	โหลดน้ำหนักน้อยที่สุด
	W1	โหลดน้ำหนักน้อยมาก
	W2	โหลดน้ำหนักน้อย
	W3	โหลดน้ำหนักปานกลาง
	W4	โหลดน้ำหนักมาก
	W5	โหลดน้ำหนักมากที่สุด

ตารางที่ 3.2 เซตของตัวแปรเอาท์พุตและความหมาย

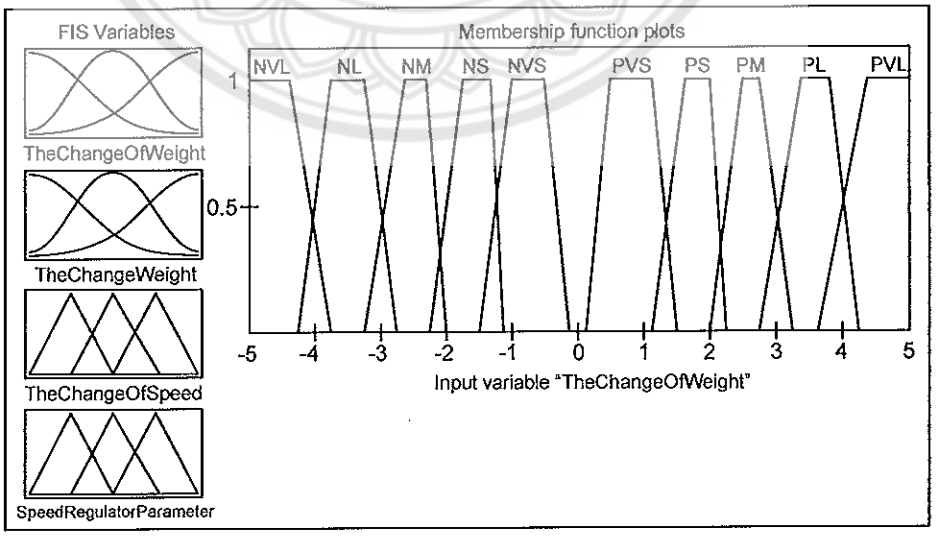
ชื่อตัวแปร	เซตตัวแปร	ความหมาย
1. ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ (The change of speed)	Negative Maximum (NMAX)	ความเร็วลดลงมากที่สุด
	Negative Large (NL)	ความเร็วลดลงมาก
	Negative Medium (NMED)	ความเร็วลดลงปานกลาง
	Negative Small (NS)	ความเร็วลดลงน้อย
	Negative Minimum (NMIN)	ความเร็วลดลงน้อยมาก
	Positive Minimum (PMIN)	ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อยมาก
	Positive Small (PS)	ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อย
	Positive Medium (PMED)	ความเร็วเพิ่มขึ้นปานกลาง
	Positive Large (PL)	ความเร็วเพิ่มขึ้นมาก
	Positive Maximum (PMAX)	ความเร็วเพิ่มขึ้นมากที่สุด
2. ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก (Speed Regulator Parameter)	P0	ที่ระดับน้ำหนักน้อยที่สุด
	P1	ที่ระดับน้ำหนักน้อยมาก
	P2	ที่ระดับน้ำหนักน้อย
	P3	ที่ระดับน้ำหนักปานกลาง
	P4	ที่ระดับน้ำหนักมาก
	P5	ที่ระดับน้ำหนักมากที่สุด

การทำงานของระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีนี้ถูกออกแบบด้วยโปรแกรมแมทแลปเพื่อจำลองการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ โดยมีการรับค่าอินพุตผ่านกระบวนการควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซีโดยใช้กฎการอนุมานแบบแมมดานิแล้วได้เอาท์พุตออกมา ดังแสดงในรูปแบบการอนุมานฟัซซีในรูปที่ 3.8



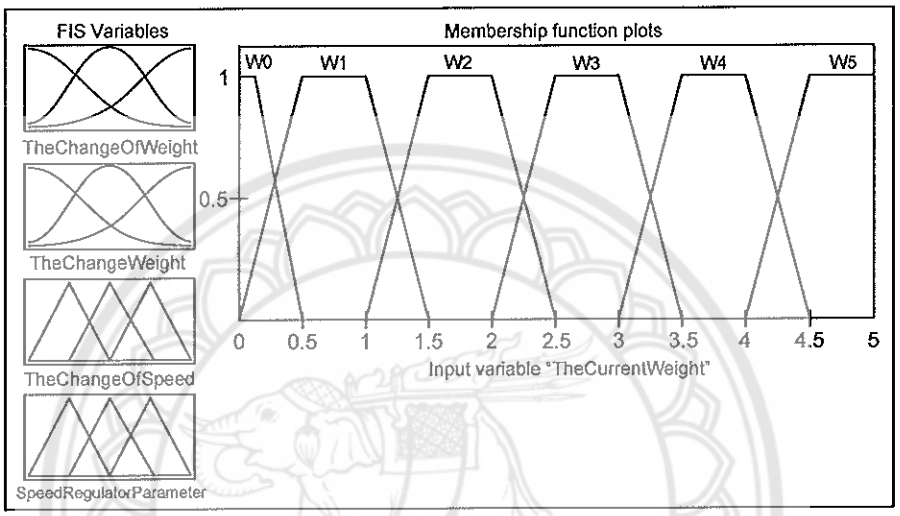
รูปที่ 3.8 รูปแบบการอนุมานอินพุตและเอาท์พุตของฟัซซี

จากตารางที่ 3.1 อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักถูกออกแบบให้ประกอบด้วยฟัซซีเซตจำนวนทั้งหมด 10 เซต ซึ่งแทนด้วยตัวแปรเชิงภาษาเป็น น้ำหนักลดลงมากที่สุด (Negative Very Large; NVL) น้ำหนักลดลงมาก (Negative Large; NL) น้ำหนักลดลงปานกลาง (Negative Medium; NM) น้ำหนักลดลงน้อย (Negative Small; NS) และ น้ำหนักลดลงน้อยที่สุด (Negative Very Small; NVS) ซึ่งมีขอบเขตของการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนักตั้งแต่ 0-5 กิโลกรัม แผนภาพฟัซซีเซตของอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนภาพฟัซซีเซตของอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก

สำหรับอินพุตค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถประกอบด้วยฟัซซีเซตทั้งหมด 6 เซตคือ โหลดน้ำหนักน้อยที่สุด (W0) โหลดน้ำหนักน้อยมาก (W1) โหลดน้ำหนักน้อย (W2) โหลดน้ำหนักปานกลาง (W3) โหลดน้ำหนักมาก (W4) และ โหลดน้ำหนักมากที่สุด (W5) โดยมีขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ 0-5 แผนภาพฟัซซีเซตของอินพุตค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

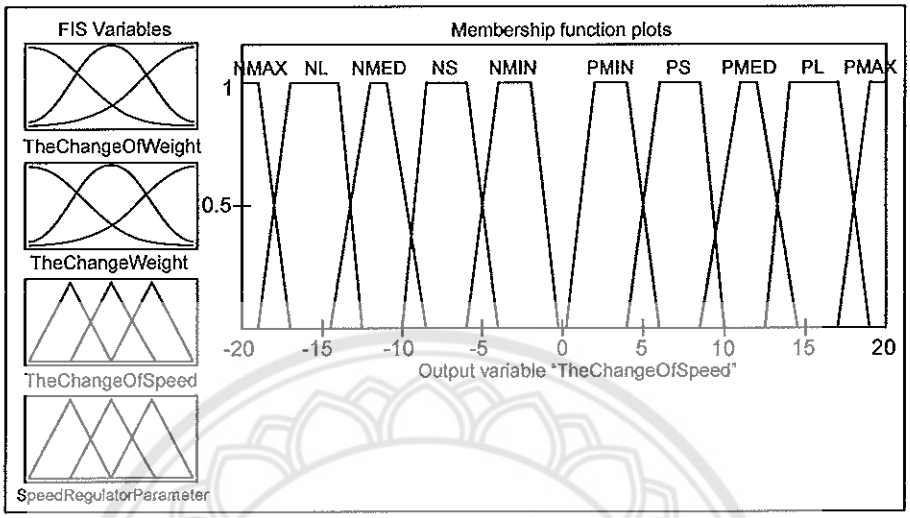


รูปที่ 3.10 แผนภาพฟัซซีเซตของอินพุตค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ

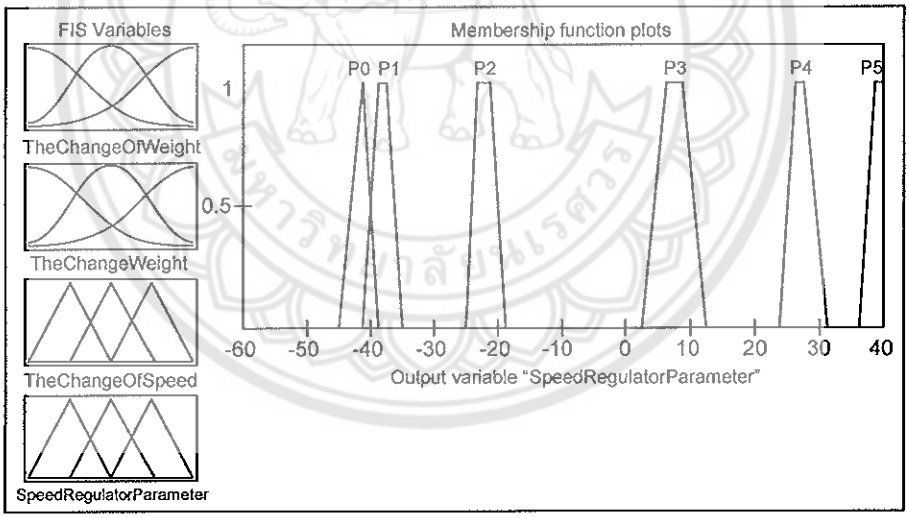
จากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าฟัซซีเซตของเอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ประกอบด้วยฟัซซีเซตทั้งหมด 10 เซตคือ ความเร็วลดลงมากที่สุด (Negative Maximum; NMAX) ความเร็วลดลงมาก (Negative Large; NL) ความเร็วลดลงปานกลาง (Negative Medium; NMED) ความเร็วลดลงน้อย (Negative Small; NS) ความเร็วลดลงน้อยมาก (Negative Minimum; NMIN) ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อยมาก (Positive Minimum; PMIN) ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อย (Positive Small; PS) ความเร็วเพิ่มขึ้นปานกลาง (Positive Medium; PMED) ความเร็วเพิ่มขึ้นมาก (Positive Large; PL) และ ความเร็วเพิ่มขึ้นมากที่สุด (Positive Maximum; PMAX) ซึ่งมีขอบเขตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วตั้งแต่ -20 ถึง 20 ดังแสดงในแผนภาพฟัซซีเซตในรูปที่ 3.11

สำหรับฟัซซีเซตของเอาท์พุตของค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนักประกอบด้วยฟัซซีเซตทั้งหมด 6 เซต ดังนี้ ที่ระดับน้ำหนักน้อยที่สุด (P0) ที่ระดับน้ำหนักน้อยมาก (P1) ที่ระดับน้ำหนักน้อย (P2) ที่ระดับน้ำหนักปานกลาง (P3) ที่ระดับน้ำหนักมาก (P4) และ ที่ระดับน้ำหนัก

มากที่สุด (P5) ซึ่งมีขอบเขตของค่าการปรับความเร็วตั้งแต่ -60 ถึง 40 ดังแสดงในแผนภาพฟัซซีเซตในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แผนภาพฟัซซีเซตของเอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์



รูปที่ 3.12 แผนภาพฟัซซีเซตของเอาท์พุตค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก

3.3.2 การสร้างฐานกฎฟัซซี

เมื่อกำหนดตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาท์พุตแล้ว ขั้นตอนสำคัญต่อไปคือต้องสร้างฐานกฎฟัซซีขึ้นเพื่อเชื่อมโยงปริมาณอินพุตไปยังปริมาณเอาท์พุต โดยจะเป็นการตีความและวิเคราะห์อินพุตตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยกฎการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

"IF input is A THEN output is B"

"ถ้า อินพุต เท่ากับ A แล้ว เอาท์พุต เท่ากับ B"

กฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง สามารถเขียนกฎการควบคุมได้ทั้งหมด 10 กฎ คือ

1. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักลดลงมากที่สุด) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วลดลงมากที่สุด)
2. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักลดลงมาก) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วลดลงมาก)
3. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักลดลงปานกลาง) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วลดลงปานกลาง)
4. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักลดลงน้อย) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วลดลงน้อย)
5. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักลดลงน้อยมาก) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วลดลงน้อยมาก)
6. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อยมาก) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อยมาก)
7. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อย) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อย)
8. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักเพิ่มขึ้นปานกลาง) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นปานกลาง)
9. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักเพิ่มขึ้นมาก) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นมาก)
10. ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักเพิ่มขึ้นมากที่สุด) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นมากที่สุด)

และกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถสามารถเขียนกฎการควบคุมได้ทั้งหมด 6 กฎ คือ

11. ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักน้อยที่สุด) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักน้อยที่สุด)

12. ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักน้อยมาก) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักน้อยมาก)

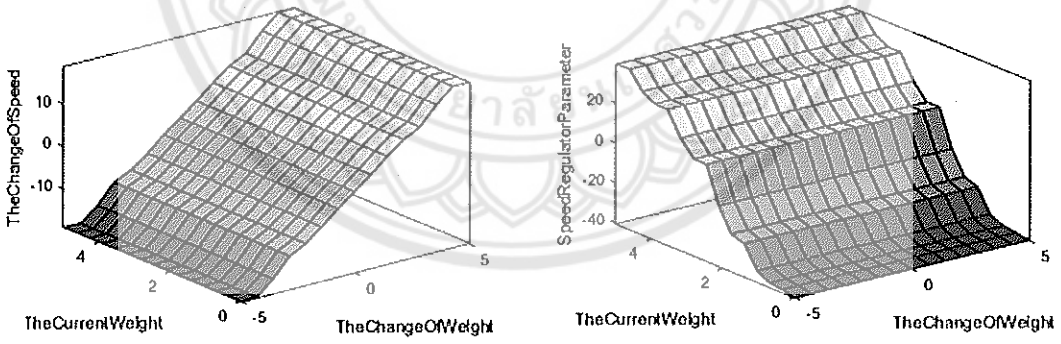
13. ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักน้อย) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักน้อย)

14. ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักปานกลาง) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักปานกลาง)

15. ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักมาก) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักมาก)

16. ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักมากที่สุด) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักมากที่สุด)

จากกฎการควบคุมทั้งหมดที่สร้างขึ้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาท์พุตแต่ละตัวกับอินพุตทั้งสองตัวในรูปของกราฟมุมมองพื้นผิวจากโปรแกรมแมทแลปได้ดังในรูปที่ 3.13

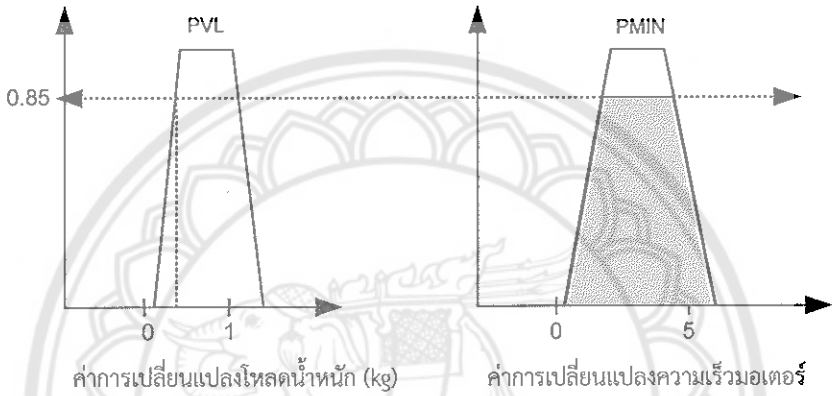


รูปที่ 3.13 กราฟมุมมองพื้นผิวของกฎการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถ

3.3.3 การประเมินค่ากฎของฟัซซี

การประเมินค่ากฎของฟัซซีคือการประเมินค่าตัวแปรที่ได้โดยใช้กฎของฟัซซีที่ได้ออกแบบไว้ โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุตในส่วนของ “ถ้า” จะเป็นตัวกำหนดว่าตัวแปรเอาท์พุตจะมีค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่าไหร่ จากกฎการควบคุมฟัซซีทั้งหมด 16 กฎ โดยมีกฎการควบคุมความเร็วเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง 10 กฎ และมีกฎการควบคุมความเร็วที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์

อีก 6 กฎ เมื่อใส่โหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถจะได้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่าหนึ่ง จากนั้นจะใช้กฎการควบคุมฟัซซีที่สร้างขึ้นประเมินค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุต โดยค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตจะถูกพิจารณาโดยใช้ลักษณะการตัดยอด (clipped) ยกตัวอย่างเช่น จากกฎการควบคุมข้อที่ 6 ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักเพิ่มขึ้นน้อยมาก) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วเพิ่มขึ้นน้อยมาก) จะสามารถหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การประเมินค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตด้วยวิธีตัดยอด

3.3.4 การทำดีฟัซซี

เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตในขั้นตอนที่ผ่านมานั้นยังอยู่ในรูปแบบของค่าฟัซซี ซึ่งไม่สามารถนำค่านี้ไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ ดังนั้นจึงต้องนำค่าที่ได้ไปผ่านกระบวนการแปลงค่าจากเอาท์พุตแบบฟัซซีให้เป็นเอาท์พุตค่าเดียวที่นำไปใช้ควบคุม วิธีการทำดีฟัซซีนั้นมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าวิธีนั้นเหมาะสมกับงานนั้นมากน้อยเพียงใดและยังขึ้นอยู่กับความถนัดของผู้ออกแบบอีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.1

$$COG = \frac{\sum x_n y_n}{\sum x_n} \qquad (3.1)$$

เมื่อ x_n คือ ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเอาท์พุต

y_n คือ ค่าเอาท์พุตที่ได้จากแต่ละกฎแต่ละกฎ

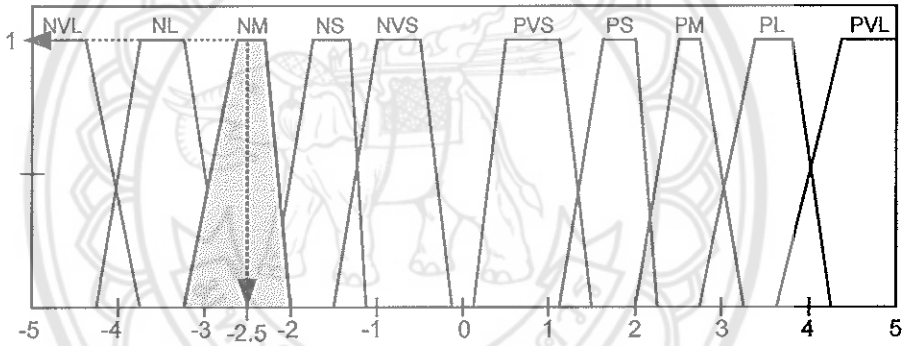
ยกตัวอย่างการคำนวณกรณีที่มีการเอาโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถออก 2.5 กิโลกรัมจากเดิมที่หุ่นยนต์รถมีน้ำหนัก 5 กิโลกรัม

ในกรณีนี้จะได้ว่า 1) โหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถมีค่าลดลง 2.5 กิโลกรัม

2) โหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถจะเป็น 2.5 กิโลกรัม

1) สำหรับอินพุตโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถมีค่าลดลง 2.5 กิโลกรัม

1. การทำฟัซซี อินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถมีค่าลดลง 2.5 กิโลกรัม ซึ่งค่าที่ลดลงกำหนดให้มีเครื่องหมายเป็นลบ เพราะฉะนั้นจะได้ค่าอินพุตคือ -2.5 ทำให้อินพุตค่านี้อยู่ในเซตของ น้ำหนักลดลงปานกลาง (Negative Medium) และจากการอออกแบบฟัซซีเซตของอินพุตค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักที่แสดงในรูปที่ 3.8 จะได้ค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.15

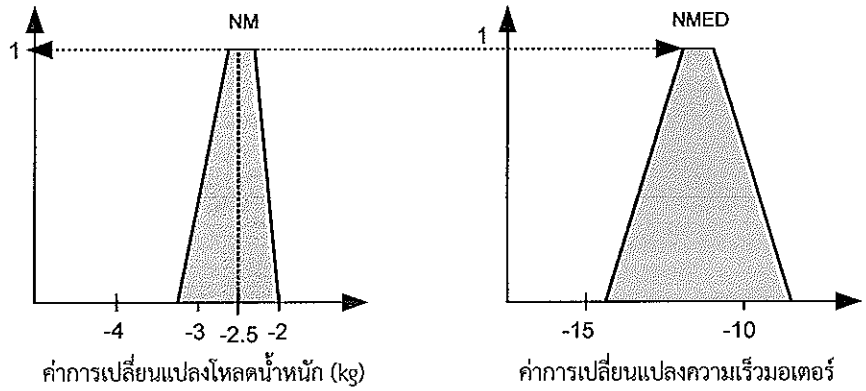


รูปที่ 3.15 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักที่ลดลง 2.5 กิโลกรัม

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี เมื่อได้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตแล้วจะนำมาหาค่าเอาท์พุตโดยใช้กฎการควบคุมของฟัซซีที่ได้ออกแบบไว้ และใช้วิธีตัดยอดของเอาท์พุตเพื่อให้ได้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุต ซึ่งสำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนักที่ลดลง 2.5 กิโลกรัม ซึ่งอยู่ในฟัซซีเซตของอินพุตคือ โหลดน้ำหนักลดลงปานกลาง จะใช้กฎการควบคุมฟัซซีข้อที่ 3 ที่ว่า

ถ้า (ค่าการเปลี่ยนแปลงของโหลดน้ำหนัก คือ น้ำหนักลดลงปานกลาง) แล้ว (ค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ คือ ความเร็วลดลงปานกลาง)

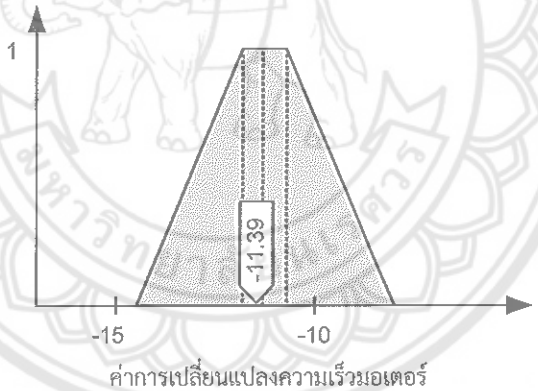
ดังนั้นจะได้เอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วอยู่ในเซตของ ความเร็วลดลงปานกลาง ซึ่งมีค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

3. การทำดีฟัซซี จะใช้วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วงจากสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาแผนภาพเอาท์พุตที่ได้จากการตัดยอดแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้ดังนี้

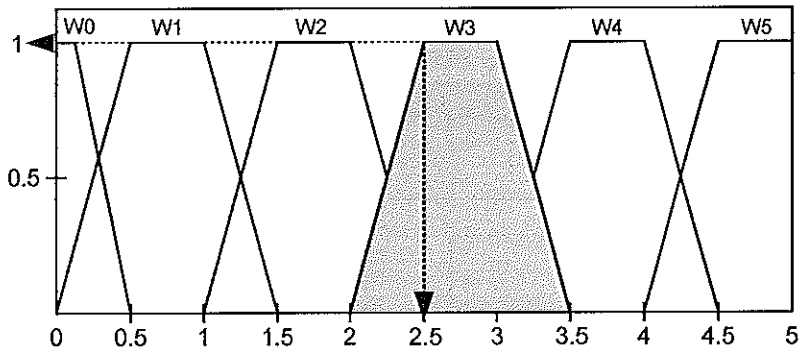
$$COG_1 = \frac{((-10.925)+(-11.125)+(-12.125))\times 1}{1+1+1} = -11.39 \qquad (3.2)$$



รูปที่ 3.17 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

2) สำหรับอินพุตโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถที่มีค่าเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม

1. การทำฟัซซี อินพุตค่าโหลดปัจจุบันของหุ่นยนต์หลักจากที่นำโหลดน้ำหนักออกจะมีค่าเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม ทำให้อินพุตค่านี้อยู่ในเซตของ โหลดน้ำหนักปานกลาง (W3) และจากการอออกแบบฟัซซีเซตของอินพุตค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถดังแสดงในรูปที่ 3.10 จะได้ค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.18

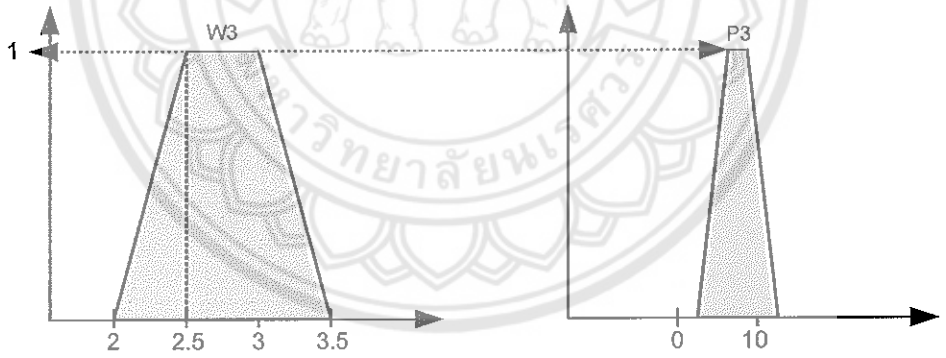


รูปที่ 3.18 ระดับความเป็นสมาชิกของค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถที่ 2.5 กิโลกรัม

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี สำหรับค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถที่ 2.5 กิโลกรัม จะอยู่ในฟัซซีเซตของอินพุตคือ โหลดน้ำหนักปานกลาง ซึ่งจะใช้กฎการควบคุมฟัซซีข้อที่ 14 ที่ว่า

ถ้า (ค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถ คือ โหลดน้ำหนักปานกลาง) แล้ว (ค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก คือ ที่ระดับน้ำหนักปานกลาง)

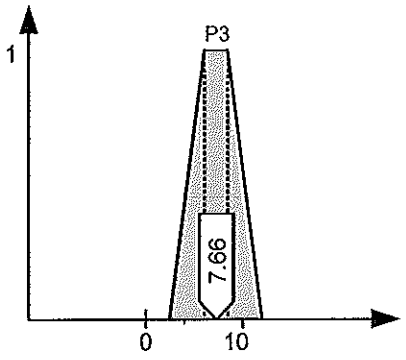
ดังนั้นจะได้เอาท์พุตค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนักอยู่ในเซตของ ที่ระดับน้ำหนักปานกลาง ซึ่งมีค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ระดับความเป็นสมาชิกของเอาท์พุตค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก

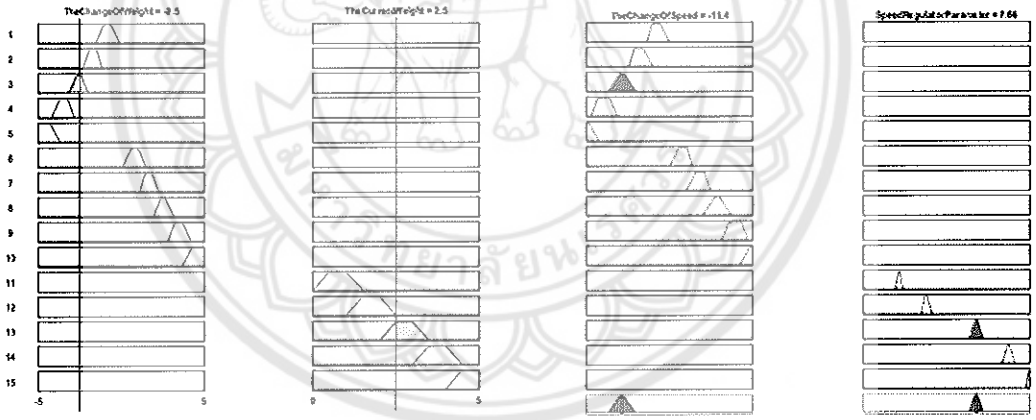
3. การทำดีฟัซซี จะใช้วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วงจากสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาแผนภาพเอาท์พุตที่ได้จากการตัดยอดแล้วดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้ดังนี้

$$COG_2 = \frac{(6.65 + 8.67) \times 1}{1+1} = 7.66 \qquad (3.3)$$



รูปที่ 3.20 การทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาจุดศูนย์ถ่วงของค่าตัวปรับความเร็วของมอเตอร์ที่แต่ละโหลดน้ำหนัก

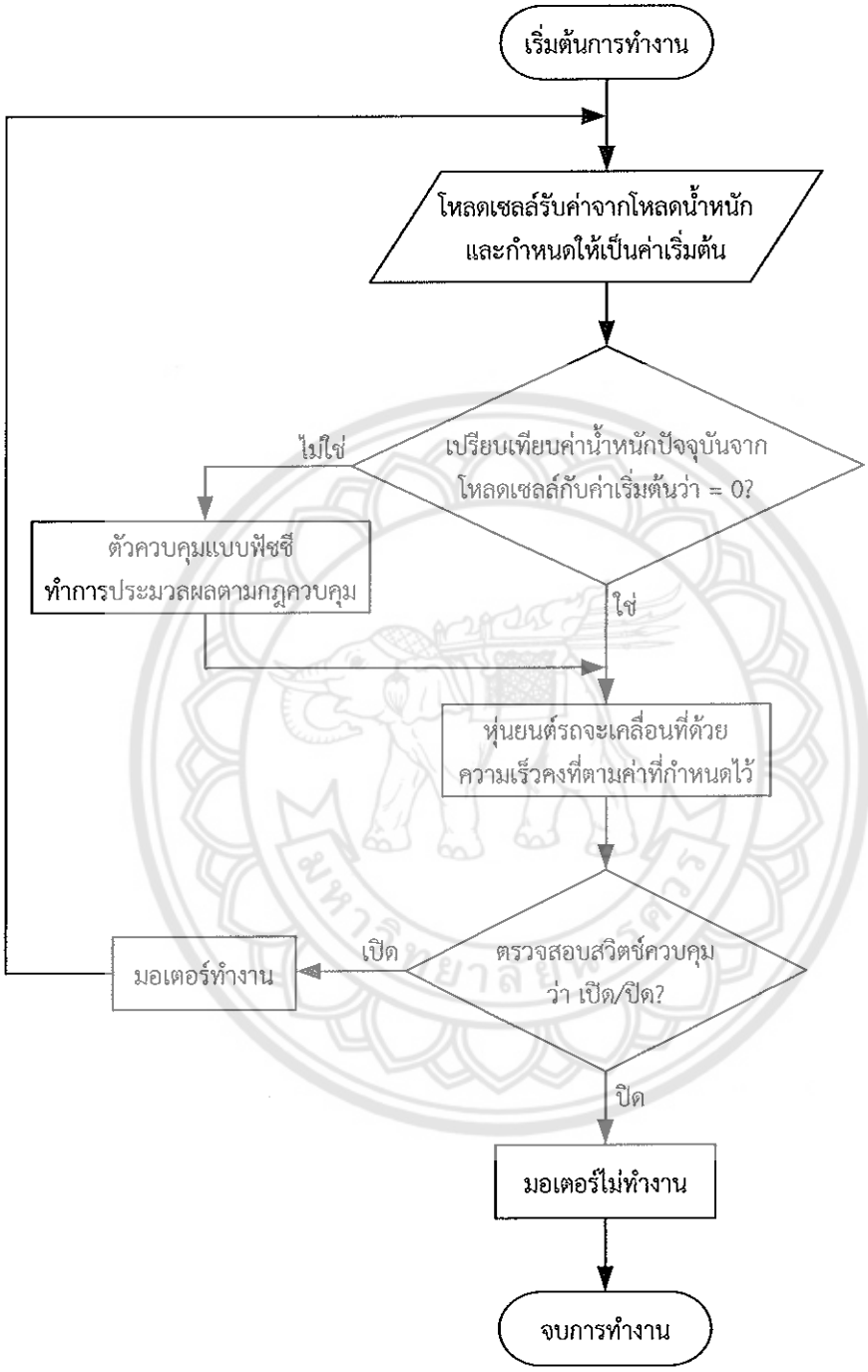
จากในกรณีที่มีการเอาโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถออก 2.5 กิโลกรัมจากเดิมที่หุ่นยนต์รถมีน้ำหนัก 5 กิโลกรัมนี้จะได้ค่าที่นำไปปรับความกว้างของพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์มีค่าเท่ากับ COG_1+COG_2 = -3.73 ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณที่แสดงให้ดูนั้นจะได้ผลลัพธ์เท่ากับค่าที่ได้จากโปรแกรมแมทแลปในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ค่าของกระบวนการดีฟัซซีที่ได้จากโปรแกรมแมทแลป

3.4 กระบวนการทำงานของหุ่นยนต์รถโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี

กระบวนการทำงานในการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถเขียนแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนภาพแสดงการทำงานการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

แผนภาพในรูปที่ 3.22 แสดงการทำงานของการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี กระบวนการทำงานจะเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าความเร็วคงที่ที่ต้องการให้หุ่นยนต์รถเคลื่อนที่และตัวรับรู้ชนิดโหลดเซลล์รับค่าโหลดน้ำหนักขณะนั้นและกำหนดให้เป็นค่าโหลดน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นตัวรับรู้ชนิดโหลดเซลล์จะรับค่าโหลดน้ำหนักที่หุ่นยนต์รถตลอดเวลา นำค่าโหลดน้ำหนักปัจจุบันของหุ่นยนต์รถมาเปรียบเทียบกับค่าโหลดน้ำหนักเริ่มต้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ คือตรวจสอบว่าค่าที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่ ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง หุ่นยนต์รถก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิม แต่ถ้าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถมีการเปลี่ยนแปลงเช่น ถูกเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป หรือนำโหลดน้ำหนักออกจากหุ่นยนต์รถ จะทำให้ค่าเปรียบเทียบกับค่าโหลดน้ำหนักเริ่มต้นไม่เท่ากับศูนย์ ถ้าค่าที่ได้ไม่เท่ากับศูนย์ ค่านี้จะถูกส่งเข้าไปเป็นอินพุตของระบบควบคุมแบบฟัซซีและประมวลผลตามกฎควบคุมเพื่อให้ได้ค่าความเร็วคงที่ที่ต้องการ และกระบวนการจะทำงานแบบนี้ไปเรื่อยๆ โดยที่จะมีการตรวจสอบสถานะการทำงานของสวิตช์ปิด/เปิดการทำงานของหุ่นยนต์รถ ถ้าสวิตช์ยังเปิดใช้งานอยู่ มอเตอร์จะยังคงทำงานอยู่ แต่ถ้าสวิตช์อยู่ในสถานะปิด มอเตอร์จะหยุดทำงาน และจะสิ้นสุดการทำงานของระบบควบคุม

บทที่ 4

ผลการวิจัย

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์รถให้คงที่เพื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีนั้น รายงานวิจัยบทนี้จึงแสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์การทำงานของหุ่นยนต์รถในรูปแบบของการตรวจสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถว่าทำได้หรือไม่ถ้าโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง และในรูปแบบของการตรวจสอบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์รถว่าเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงแล้วนั้นหุ่นยนต์รถสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงได้ดีเพียงใดโดยพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 การทดลองคือ

1. การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์รถ
2. การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง
3. การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

4.1 การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์รถ

การทดลองหาค่าความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์รถที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนักนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์รถสามารถเคลื่อนที่ได้ที่แต่ละโหลดน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ในการกำหนดค่าความเร็วคงที่ที่หุ่นยนต์รถสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อโหลดน้ำหนักเปลี่ยน โดยโหลดน้ำหนักที่เลือกใช้อยู่ในช่วง 0-5 กิโลกรัม ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เปิดสวิตช์ให้หุ่นยนต์รถเริ่มเคลื่อนที่โดยยังไม่มีการใส่โหลดน้ำหนักใดๆ โดยให้หุ่นยนต์รถเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่งไปจนกว่าความเร็วของหุ่นยนต์รถจะมีค่าคงที่ โดยอ่านจากจอแอลซีดี
2. บันทึกค่าความเร็วที่อ่านได้
3. ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง สำหรับกรณีที่ไม่มีการใส่โหลดน้ำหนัก แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยแล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.1

4. ทำการใส่โหลดน้ำหนักให้หุ่นยนต์รถเพิ่มขึ้นเป็น 1 กิโลกรัม แล้วทำการทดลองเหมือนกับในข้อ 1, ข้อ 2 และ ข้อ 3
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถทีละ 1 กิโลกรัม จนครบ 5 กิโลกรัม จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์รถที่แต่ละค่าโหลดน้ำหนัก

โหลดน้ำหนัก (กิโลกรัม)	ความเร็วสูงสุด (เฉลี่ย) (เมตร/วินาที)
0	0.78
1	0.76
2	0.70
3	0.68
4	0.62
5	0.60

จากตารางผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์รถสามารถเคลื่อนที่ได้โหลดน้ำหนักแต่ละค่ามีค่าแตกต่างกัน โดยที่ค่าโหลดน้ำหนักที่มีค่ามากจะทำให้หุ่นยนต์รถเคลื่อนที่ได้ช้า และที่ค่าโหลดน้ำหนักที่มีค่าน้อยจะทำให้หุ่นยนต์รถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า เนื่องจากโหลดน้ำหนักที่มากกว่าจะทำให้เกิดแรงเสียดทานที่มีค่ามากส่งผลให้รถเคลื่อนที่ได้ช้าลง และค่าความเร็วที่ได้จากตารางจะนำไปกำหนดความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถได้ไม่เกิน 0.6 เมตรต่อวินาที ถ้าใช้โหลดน้ำหนักสูงสุดที่ 5 กิโลกรัม

4.2 การทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทดสอบความสามารถของหุ่นยนต์รถว่ายังสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนดไว้ได้อยู่หรือไม่ถ้าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความจริงที่ว่าเมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นจะทำให้การเคลื่อนที่ช้าลง และในทางกลับกันถ้าน้ำหนักลดลงก็จะทำให้การเคลื่อนที่เร็วขึ้น ดังนั้นจึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถของหุ่นยนต์รถที่ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีในการควบคุมความเร็วให้คงที่ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. กำหนดค่าความเร็วคงที่ที่ต้องการ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.7 เมตรต่อวินาที

2. เปิดสวิตช์ให้หุ่นยนต์รถเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปจนกว่าหุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่ได้ตั้งค่าไว้ โดยสังเกตจากหลอดไฟแอลอีดีโดยถ้าหุ่นยนต์รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่หลอดไฟแอลอีดีจะติดสว่าง
3. ใส่โหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถตั้งแต่ 1-5 กิโลกรัม
4. เมื่อใส่โหลดน้ำหนักลงไปหุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่ช้าลง และหลอดไฟแอลอีดีจะดับลงซึ่งเป็นการแจ้งว่าหุ่นยนต์รถไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ตั้งไว้แล้ว
5. จากนั้นให้สังเกตว่าหุ่นยนต์รถสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยดูจากการติดของหลอดไฟแอลอีดี แล้วบันทึกผลการสังเกต
6. จากนั้นเปลี่ยนการทดลองเป็นการนำโหลดน้ำหนักออกจากหุ่นยนต์รถ โดยให้นำออกในช่วง 1-5 กิโลกรัม เมื่อนำโหลดน้ำหนักออกหุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น และจะทำให้หลอดไฟแอลอีดีดับลง ให้สังเกตว่าหุ่นยนต์รถสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนดไว้หรือไม่โดยดูจากการติดของหลอดไฟแอลอีดี แล้วบันทึกผลการสังเกต

จากผลการสังเกตที่ได้จากการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

- กรณีที่ใส่โหลดน้ำหนักเพิ่มเข้าไปให้หุ่นยนต์รถ

จากการสังเกตพบว่า ขณะที่หุ่นยนต์รถกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่กำหนดไว้นั้น เมื่อทำการเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป 1 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถจะยังเคลื่อนที่ต่อไปแต่มีความเร็วช้าลงและหลอดไฟแอลอีดีดับ แต่เมื่อเวลาผ่านไปไม่นานนัก หลอดไฟแอลอีดีกลับมาติดสว่างอีกครั้ง แสดงว่าหุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทำนองเดียวกัน เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไปอีกทีละ 1 กิโลกรัม เรื่อยๆ ยังได้ผลเหมือนเดิมคือหุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วช้าลง และจะกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่อีกครั้ง

- กรณีที่นำโหลดน้ำหนักออกจากหุ่นยนต์รถ

จากการสังเกตพบว่า ขณะที่หุ่นยนต์รถกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่กำหนดไว้นั้น เมื่อทำการนำโหลดน้ำหนักออกจากหุ่นยนต์รถ 1 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถจะยังคงเคลื่อนที่ต่อไปแต่มีความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและหลอดไฟแอลอีดีดับ แต่เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน หลอดไฟแอลอีดีกลับมาติดสว่างอีกครั้ง แสดงว่าหุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ในทำนองเดียวกัน เมื่อนำโหลดน้ำหนักออกอีก

ครั้งละ 1 กิโลกรัม ผลการสังเกตที่ได้ยังเหมือนเดิมคือหุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นจะกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่อีกครั้ง

กล่าวโดยสรุปคือการควบคุมหุ่นยนต์รถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีนี้ หุ่นยนต์รถสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ได้แม้ว่าโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะอยู่ในกรณีของการเพิ่มโหลดน้ำหนัก หรือแม้แต่กรณีของการลดโหลดน้ำหนัก ทั้งนี้ความเร็วคงที่ที่กำหนดจะต้องมีค่าไม่เกิน 0.6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากถ้าใช้โหลดน้ำหนักค่าสูงสุดที่ 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ความเร็วสูงสุดที่ 0.6 เมตรต่อวินาที ตามผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.1

4.3 การทดลองหาระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์รถว่าเมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงไปแล้วนั้น หุ่นยนต์รถสามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนดไว้ได้ดีมากน้อยเพียงใด โดยวัดจากเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมที่กำหนดไว้ โดยในการทดลองนี้จะทดลองโดยใช้ค่าความเร็วคงที่เริ่มต้นที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 ค่า คือ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เปิดสวิตช์ให้หุ่นยนต์รถทำงานโดยเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปจนกระทั่งหุ่นยนต์รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที ตามที่กำหนดไว้ โดยสังเกตการติดสว่างของหลอดแอลอีดี
2. ทำการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้หุ่นยนต์รถดังนี้
   ก. เพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม
   ข. เพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 2 กิโลกรัม
   ค. เพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 3 กิโลกรัม
   ง. เพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 4 กิโลกรัม
   จ. เพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 5 กิโลกรัม
3. เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้หุ่นยนต์รถแล้วให้เริ่มจับเวลาทันที โดยขณะนี้หลอดไฟแอลอีดีดับ

4. ให้สังเกตหลอดไฟแอลอีดีว่าติดสว่างหรือยัง ถ้าเห็นหลอดไฟแอลอีดีติดสว่างให้หยุดจับเวลา ซึ่งแสดงว่าหุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่อีกครั้งแล้ว และบันทึกค่าเวลาที่อ่านได้ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง
5. ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย และบันทึกค่าเฉลี่ยลงในตาราง
6. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งตั้งแต่ข้อ 1 จนถึงข้อ 5 โดยเปลี่ยนค่าความเร็วคงที่เริ่มต้นเป็น 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมดโดยเปลี่ยนเป็นกรณีของการลดโหลดน้ำหนักแทน

ผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นดังตารางต่อไปนี้ โดยจะแบ่งตามการเพิ่มโหลดน้ำหนัก เริ่มต้นที่การเพิ่มครั้งละ 1 กิโลกรัม จากนั้นจะเป็นการเพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยแต่ละกรณีของการเพิ่มโหลดน้ำหนักจะแบ่งออกเป็นกรณีย่อยๆ อีก 3 กรณีตามค่าความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถที่กำหนดให้คือ 0.45, 0.52 และ 0.60 ตามลำดับ

ก. กรณีเพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	1	1.09	1.11	1.17	1.12	1.16	1.13
1	2	1.30	1.25	1.18	1.23	1.19	1.23
2	3	1.20	1.13	1.17	1.24	1.21	1.19
3	4	1.21	1.25	1.29	1.27	1.28	1.26
4	5	1.35	1.36	1.28	1.27	1.29	1.31

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	1	1.11	1.16	1.19	1.18	1.10	1.15
1	2	1.23	1.19	1.23	1.18	1.17	1.20
2	3	1.25	1.31	1.29	1.24	1.26	1.27
3	4	1.21	1.22	1.17	1.19	1.16	1.19
4	5	1.30	1.35	1.32	1.37	1.31	1.33

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	1	1.23	1.22	1.17	1.18	1.25	1.21
1	2	1.28	1.30	1.27	1.32	1.28	1.29
2	3	1.22	1.20	1.18	1.16	1.19	1.19
3	4	1.34	1.33	1.28	1.31	1.29	1.31
4	5	1.35	1.38	1.39	1.34	1.39	1.37

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถทีละ 1 กิโลกรัม สำหรับค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 1.23 วินาที สำหรับ

ค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.23 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.27 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป 1 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 1.24 วินาที

ข. กรณีเพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 2 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	2	1.61	1.58	1.55	1.57	1.54	1.57
1	3	1.44	1.49	1.49	1.52	1.46	1.48
2	4	1.56	1.51	1.50	1.54	1.49	1.52
3	5	1.62	1.58	1.59	1.61	1.65	1.61

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.6 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	2	1.62	1.58	1.60	1.61	1.54	1.59
1	3	1.51	1.44	1.43	1.46	1.51	1.47
2	4	1.55	1.51	1.49	1.53	1.52	1.52
3	5	1.62	1.65	1.61	1.60	1.67	1.63

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.7 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	2	1.54	1.58	1.55	1.56	1.62	1.57
1	3	1.44	1.42	1.41	1.42	1.46	1.43
2	4	1.66	1.62	1.61	1.65	1.61	1.63
3	5	1.53	1.50	1.48	1.52	1.52	1.51

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถทีละ 2 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 0, 1, 2, 3 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 4 และ 5 กิโลกรัมได้ เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักขึ้นอีก 2 กิโลกรัม จะทำให้หุ่นยนต์รถรับโหลดน้ำหนักเกินพิกัดของหุ่นยนต์รถ) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 1.55 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.55 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.54 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป 2 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 1.55 วินาที

ค. กรณีเพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 3 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.8 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	3	2.21	2.28	2.32	2.30	2.24	2.27
1	4	2.22	2.18	2.19	2.21	2.15	2.19
2	5	2.36	2.33	2.32	2.36	2.38	2.35

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.9 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	3	2.24	2.20	2.19	2.25	2.17	2.21
1	4	2.35	2.32	2.31	2.34	2.33	2.33
2	5	2.36	2.39	2.34	2.39	2.42	2.38

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	3	2.19	2.21	2.20	2.26	2.24	2.22
1	4	2.38	2.33	2.36	2.31	2.32	2.34
2	5	2.29	2.26	2.30	2.24	2.31	2.28

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถทีละ 3 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 0, 1, และ 2 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 3, 4 และ 5 กิโลกรัมได้ เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักขึ้นอีก 3 กิโลกรัม จะทำให้หุ่นยนต์รถรับโหลดน้ำหนักเกินพิกัดของหุ่นยนต์รถ) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 2.27 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.30 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.28 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป 3 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 2.28 วินาที

ง. กรณีเพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 4 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.11 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	4	2.68	2.72	2.71	2.68	2.66	2.69
1	5	2.75	2.71	2.72	2.77	2.75	2.74

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.12 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	4	2.68	2.70	2.65	2.69	2.63	2.67
1	5	2.77	2.79	2.80	2.74	2.80	2.78

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.13 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 4 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	4	2.63	2.66	2.67	2.66	2.63	2.65
1	5	2.74	2.70	2.72	2.75	2.69	2.72

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถทีละ 4 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลด 0 และ 1 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัมได้ เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักขึ้นอีก 4 กิโลกรัม จะทำให้หุ่นยนต์รถรับโหลดน้ำหนักเกินพิกัดของหุ่นยนต์รถ) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 2.72 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.73 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.68 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป 4 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 2.71 วินาที

จ. กรณีเพิ่มโหลดน้ำหนักครั้งละ 5 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.14 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 5 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	5	3.09	3.16	3.13	3.15	3.17	3.14

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.15 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 5 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	5	3.08	3.11	3.09	3.07	3.10	3.09

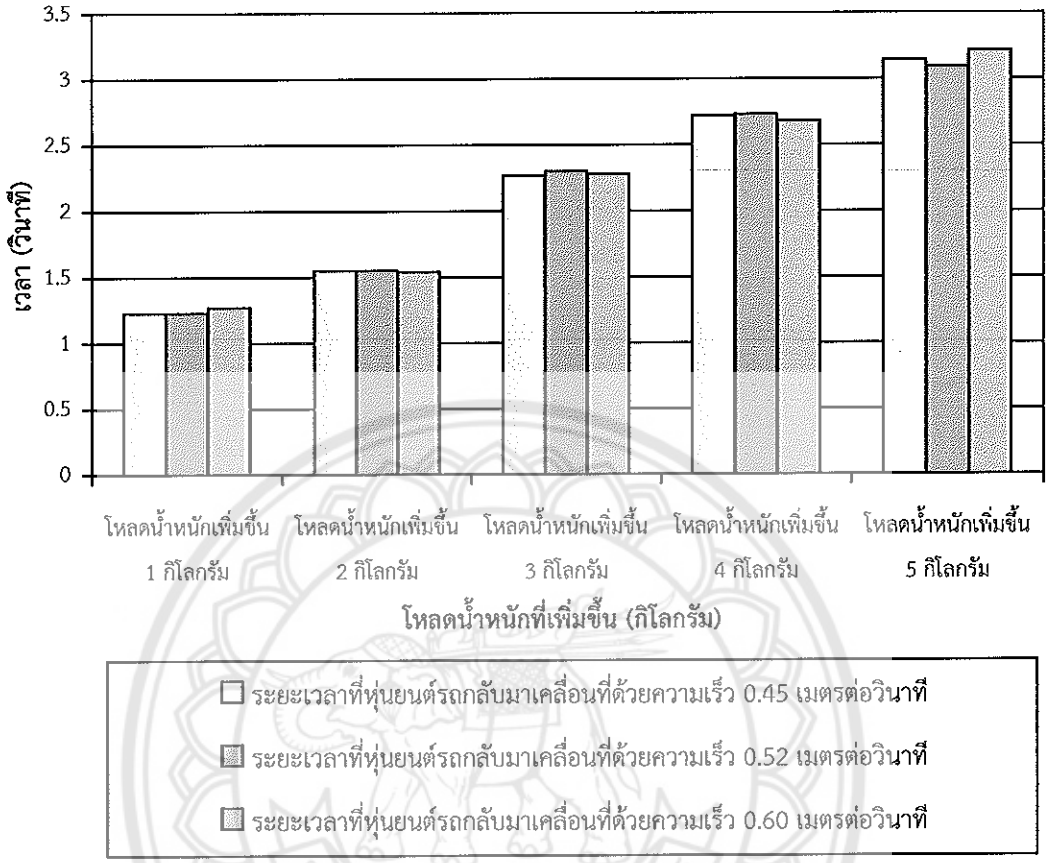
<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.16 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักเพิ่มขึ้น 5 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	5	3.16	3.19	3.23	3.23	3.24	3.21

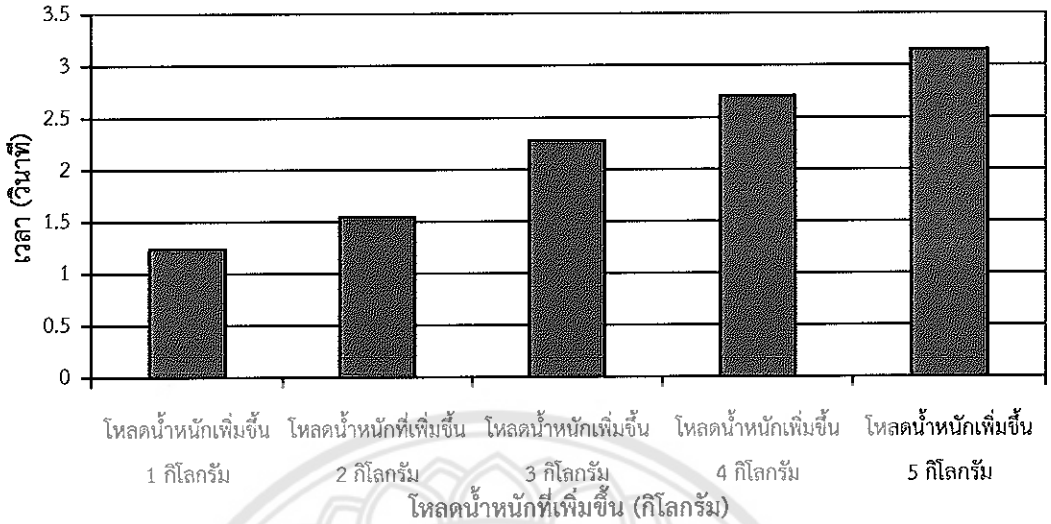
จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถทีละ 4 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลด 0 และ 1 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัมได้ เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักขึ้นอีก 5 กิโลกรัม จะทำให้หุ่นยนต์รถรับโหลดน้ำหนักเกินพิกัดของหุ่นยนต์รถ) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 3.14 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 3.09 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 3.21 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป 5 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 3.15 วินาที

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่แต่ละค่าความเร็วคงที่ที่กำหนดไว้คือ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที และที่แต่ละค่าการเพิ่มโหลดน้ำหนัก 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม แสดงได้ดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

และเพื่อแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นสำหรับค่าระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักที่แตกต่างกันที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม กราฟรูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ที่แต่ละการเพิ่มโหลดน้ำหนัก



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม

จากกราฟในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าที่การเพิ่มขึ้นของโหลดน้ำหนักที่ระดับเดียวกันแต่ใช้ความเร็วคงที่ที่กำหนดแตกต่างกันจะได้ค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถจะกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิมนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนโหลดน้ำหนักที่ระดับเดียวกันจะส่งผลให้ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปของหุ่นยนต์รถมีค่าใกล้เคียงกันจนเกือบจะเท่ากัน ดังนั้นหุ่นยนต์รถจึงใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกันในการที่จะกลับมาเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่ค่าเดิม และที่ความเร็วคงที่ที่กำหนดเท่ากัน การเพิ่มค่าโหลดน้ำหนักที่มากขึ้นจะทำให้หุ่นยนต์รถใช้เวลามากขึ้นในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากกราฟรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิมเมื่อค่าโหลดน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มค่าโหลดน้ำหนักที่มากขึ้น จะทำให้ความเร็วของหุ่นยนต์รถลดลงมากกว่าการเพิ่มค่าโหลดน้ำหนักที่มีค่าน้อย ดังนั้นหุ่นยนต์รถจะต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อเร่งความเร็วมอเตอร์ให้หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนด

ผลการทดลองต่อไปนี้ จะเป็นการทดลองในลักษณะเหมือนที่ผ่านมาแต่จะเป็นการลดโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถโดยนำโหลดน้ำหนักออก โดยจะแบ่งตามการลดโหลดน้ำหนัก เริ่มต้นที่การลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม จากนั้นจะเป็นการลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยแต่ละกรณีของการลดโหลดน้ำหนักจะแบ่งออกเป็นกรณีย่อยๆ อีก 3 กรณีตามค่าความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์รถที่กำหนดให้คือ 0.45, 0.52 และ 0.60 ตามลำดับ

ฉ. กรณีลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 1 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.17 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อ**วินาที** เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วย**ความเร็วคงที่** ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
5	4	1.03	1.02	1.05	1.01	1.03	1.03
4	3	0.95	0.95	0.99	0.98	0.99	0.97
3	2	0.93	0.95	0.98	0.95	0.99	0.96
2	1	0.93	0.91	0.94	0.95	0.91	0.93
1	0	0.94	0.94	0.95	0.95	0.94	0.94

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.18 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	4	1.05	1.02	1.05	1.01	1.04	1.03
4	3	0.99	0.98	1.01	0.98	1.02	1.00
3	2	0.98	0.99	0.95	0.95	0.98	0.97
2	1	0.98	0.95	1.01	0.98	0.96	0.98
1	0	0.96	0.98	0.95	0.99	0.98	0.97

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.19 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 1 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	4	1.05	1.04	1.04	1.03	1.05	1.04
4	3	1.00	0.99	1.01	0.98	0.99	0.99
3	2	0.98	0.99	0.98	1.01	0.99	0.99
2	1	0.98	0.97	0.99	1.00	0.98	0.98
1	0	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.98

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 จะเห็นว่าเมื่อลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถโดยลดลงครั้งละ 1 กิโลกรัม สำหรับค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 0.97

วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 0.99 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.00 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อลดโหลดน้ำหนักลง 1 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 0.99 วินาที

ช. กรณีลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 2 กิโลกรัม

กรณีที่ 1 การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.20 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 2 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	3	1.45	1.48	1.50	1.51	1.48	1.48
4	2	1.51	1.48	1.47	1.48	1.50	1.49
3	1	1.48	1.45	1.48	1.49	1.45	1.47
2	0	1.44	1.45	1.44	1.45	1.46	1.45

กรณีที่ 2 การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.21 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 2 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	3	1.50	1.51	1.49	1.51	1.48	1.50
4	2	1.50	1.51	1.49	1.50	1.51	1.50
3	1	1.48	1.50	1.51	1.48	1.49	1.49
2	0	1.50	1.48	1.49	1.50	1.49	1.49

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.22 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 2 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	3	1.48	1.50	1.51	1.48	1.51	1.50
4	2	1.49	1.51	1.48	1.50	1.48	1.49
3	1	1.50	1.48	1.49	1.48	1.48	1.49
2	0	1.49	1.48	1.47	1.49	1.49	1.48

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 จะเห็นว่าเมื่อลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลงครั้งละ 2 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 5, 4, 3, 2 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 1 กิโลกรัมได้ การลดโหลดน้ำหนักลง 2 กิโลกรัม เป็นไปไม่ได้) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 1.47 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.50 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 1.49 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อลดโหลดน้ำหนักลง 2 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 1.49 วินาที

ซ. กรณีลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 3 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.23 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 3 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	2	2.12	2.11	2.14	2.12	2.15	2.13
4	1	2.14	2.12	2.15	2.12	2.14	2.13
3	0	2.14	2.14	2.13	2.11	2.12	2.13

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.24 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 3 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	2	2.18	2.17	2.15	2.18	2.16	2.17
4	1	2.16	2.17	2.15	2.18	2.20	2.17
3	0	2.15	2.16	2.19	2.15	2.16	2.16

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.25 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 3 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	2	2.19	2.20	2.21	2.20	2.18	2.20
4	1	2.19	2.21	2.21	2.20	2.20	2.20
3	0	2.20	2.19	2.19	2.20	2.19	2.19

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.23, 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่าเมื่อลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลงครั้งละ 3 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 5, 4, และ 3 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 2 และ 1 กิโลกรัมได้ เนื่องจากการลดโหลดน้ำหนักลง 3 กิโลกรัม ไม่สามารถทำได้) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 2.13 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.17 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.20 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อลดโหลดน้ำหนักลง 3 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 2.16 วินาที

ฌ. กรณีลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 4 กิโลกรัม

<u>กรณีที่ 1</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.26 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 4 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	1	2.55	2.59	2.59	2.56	2.58	2.57
4	0	2.59	2.61	2.58	2.58	2.59	2.59

<u>กรณีที่ 2</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.27 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 4 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	1	2.59	2.62	2.60	2.61	2.59	2.60
4	0	2.60	2.62	2.60	2.59	2.61	2.60

<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.28 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 4 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	1	2.61	2.60	2.62	2.59	2.61	2.61
4	0	2.59	2.61	2.60	2.59	2.59	2.60

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.26, 4.27 และ 4.28 จะเห็นว่าเมื่อลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลงครั้งละ 4 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลดน้ำหนักที่ 5 และ 4 กิโลกรัมตามลำดับ (ไม่สามารถใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 3, 2 และ 1 กิโลกรัมได้ เนื่องจากการลดโหลดน้ำหนักลง 4 กิโลกรัม ไม่สามารถทำได้) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 2.58 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.60 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 2.61 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อลดโหลดน้ำหนักลง 4 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 2.60 วินาที

ญ. กรณีลดโหลดน้ำหนักครั้งละ 5 กิโลกรัม

กรณีที่ 1 การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.45 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.29 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 5 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	0	2.95	2.99	3.01	3.01	2.99	2.99

กรณีที่ 2 การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.52 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.30 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 5 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	0	3.01	2.99	3.02	3.02	3.00	3.00

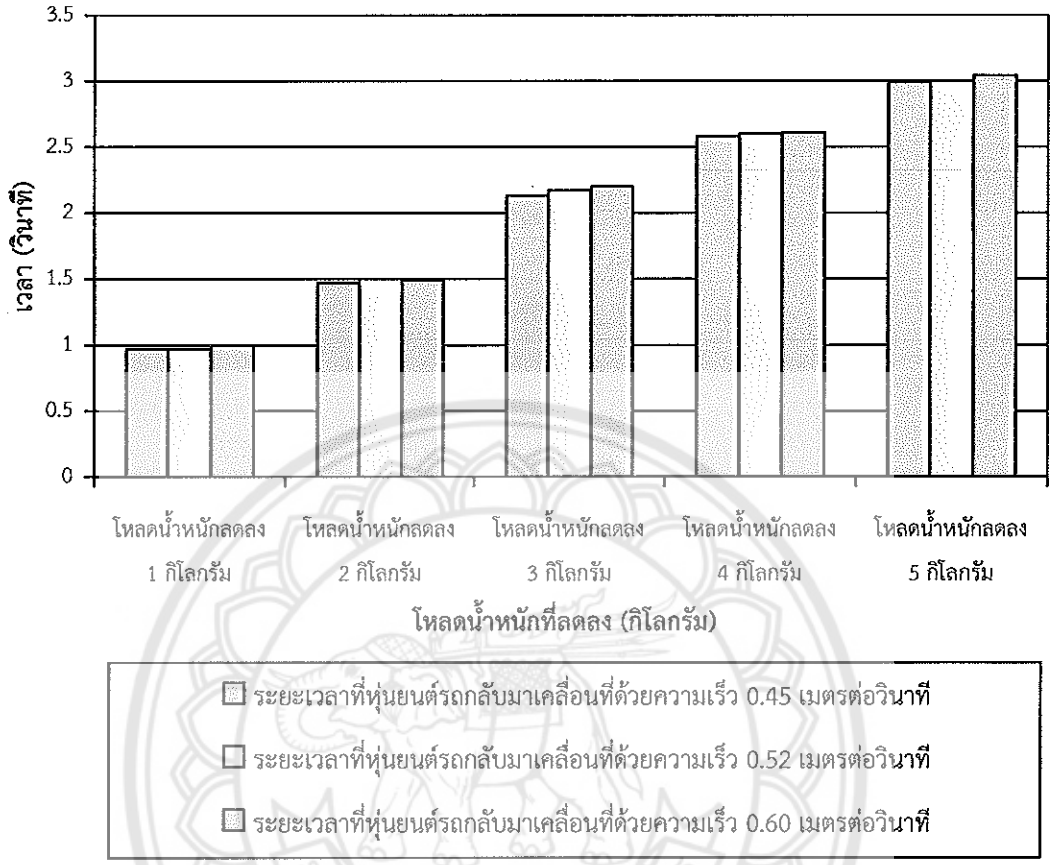
<u>กรณีที่ 3</u> การทดลองที่ความเร็วคงที่ 0.60 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.31 ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักลดลง 5 กิโลกรัม

โหลดน้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	โหลดน้ำหนักรวม (กิโลกรัม)	ระยะเวลาที่หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตร/วินาที (วินาที)					
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
5	0	3.05	3.07	3.03	3.01	3.03	3.04

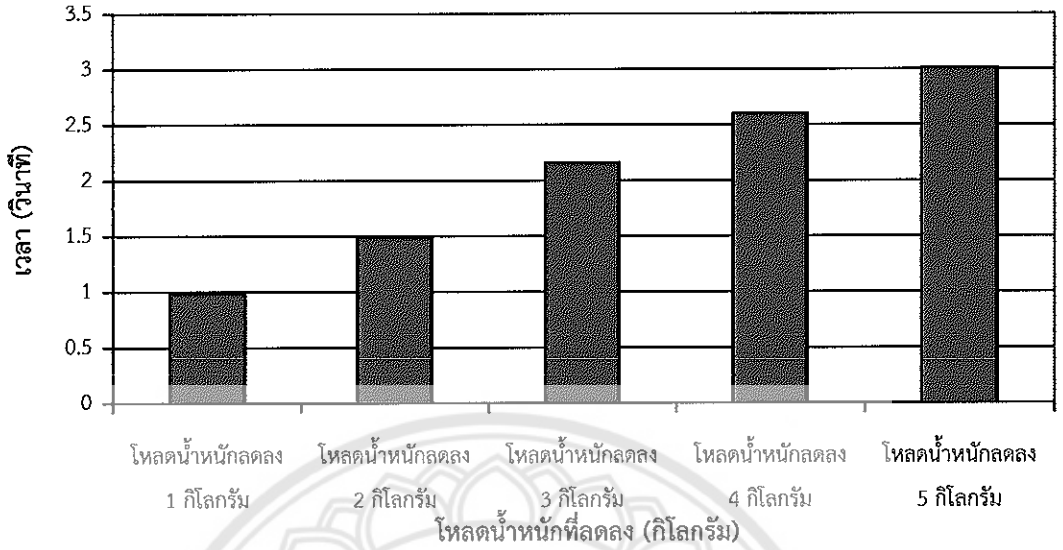
จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.29, 4.30 และ 4.31 จะเห็นว่าเมื่อลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลงครั้งละ 5 กิโลกรัม โดยเริ่มจากโหลดน้ำหนัก 5 กิโลกรัม (การทดลองนี้จะใช้โหลดน้ำหนักเริ่มต้นเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่เป็นไปได้) เมื่อกำหนดค่าความเร็วของหุ่นยนต์รถคงที่ที่กำหนดไว้ที่ 0.45 เมตรต่อวินาที จะได้ระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 2.99 วินาที สำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 3.00 วินาที และสำหรับค่าความเร็วคงที่ที่ 0.60 เมตรต่อวินาทีจะใช้เวลาเฉลี่ย 3.04 วินาที ดังนั้นระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมตามที่กำหนดไว้เมื่อลดโหลดน้ำหนักลง 5 กิโลกรัมจะอยู่ที่ 3.01 วินาที

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่แต่ละค่าความเร็วคงที่ที่กำหนดไว้คือ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที และที่แต่ละค่าการลดโหลดน้ำหนัก 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม แสดงได้ดังในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.45, 0.52 และ 0.60 เมตรต่อวินาที เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าลดลง

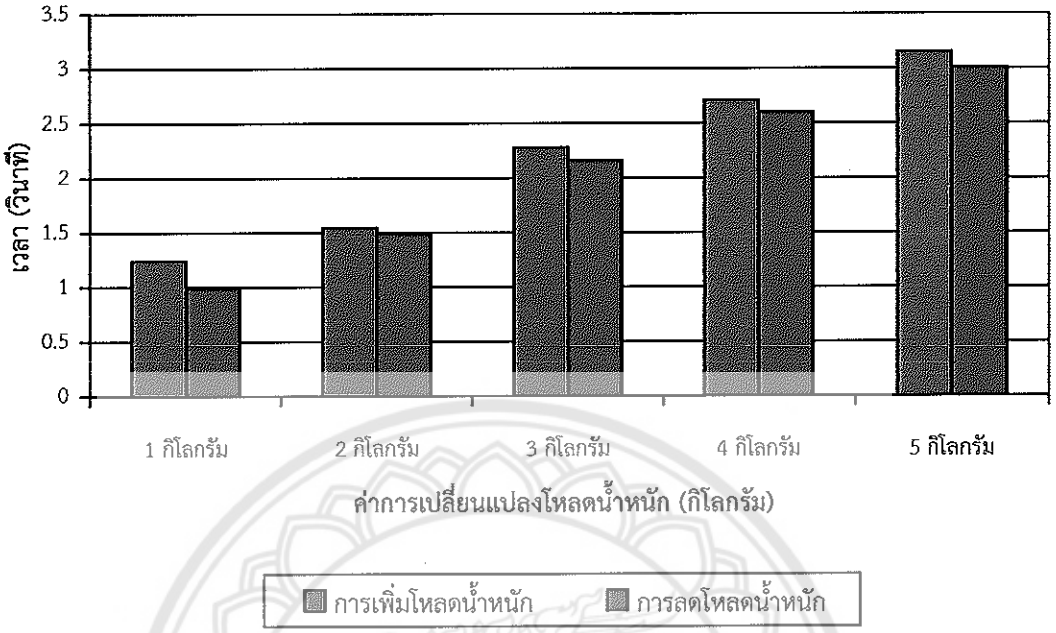
และเพื่อแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นสำหรับค่าระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อทำการลดโหลดน้ำหนักที่แตกต่างกันที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม ดังนั้นกราฟรูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถใช้ที่แต่ละการลดค่าโหลดน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อโหลดน้ำหนักมีค่าลดลง 1, 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม

จากกราฟในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าที่การลดลงของโหลดน้ำหนักที่ระดับเดียวกันแต่ใช้ความเร็วคงที่ที่กำหนดแตกต่างกันจะได้ค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถจะกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิมนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนโหลดน้ำหนักที่ระดับเดียวกันจะส่งผลให้ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปของหุ่นยนต์รถมีค่าใกล้เคียงกันจนเกือบจะเท่ากัน ดังนั้นหุ่นยนต์รถจึงใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกันในการที่จะกลับมาเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่ค่าเดิม และที่ความเร็วคงที่ที่กำหนดเท่ากัน การลดค่าโหลดน้ำหนักลงมากๆจะทำให้หุ่นยนต์รถใช้เวลามากขึ้นในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระยะเวลาที่หุ่นยนต์รถใช้ในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิมเมื่อค่าโหลดน้ำหนักที่ลดลงมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะการลดค่าโหลดน้ำหนักลงด้วยค่ามากๆนั้นจะทำให้ความเร็วของหุ่นยนต์รถเพิ่มขึ้นมากกว่าการลดค่าโหลดน้ำหนักที่มีค่าน้อย ดังนั้นหุ่นยนต์รถจะต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อลดความเร็วมอเตอร์ให้หุ่นยนต์กลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่กำหนด

และมีข้อสังเกตเพิ่มขึ้นคือที่ค่าความเร็วคงที่เริ่มต้นที่เท่ากันการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถจะใช้เวลามากกว่าการลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถ ดังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นในกราฟรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที ระหว่างการเพิ่มและลดโหลดน้ำหนักค่าต่างๆ

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาทีระหว่างการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์และการลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถในรูปที่ 4.5 นั้นจะสังเกตเห็นว่าการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถ 1 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถใช้เวลาในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่มากกว่าการลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลง 1 กิโลกรัมเป็นค่า 0.25 วินาที ในทำนองเดียวกันกับการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถ 2, 3, 4 และ 5 กิโลกรัม จะใช้เวลามากกว่าการลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถนั้น หุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่ช้าลงเพราะมีน้ำหนักมากขึ้นทำให้เกิดแรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อรถมากขึ้นด้วย ซึ่งหุ่นยนต์รถจะต้องทำการเร่งความเร็วเพื่อให้ความเร็วกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามเดิมจึงต้องใช้เวลาในการเร่งความเร็วของมอเตอร์มากขึ้นระยะหนึ่ง แตกต่างจากการลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถ หุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น การที่หุ่นยนต์รถจะกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามเดิมนั้นเพียงแค่ชะลอความเร็วของมอเตอร์เท่านั้น ทำให้ใช้เวลาน้อยกว่า

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นบทสรุปของโครงการวิจัยเรื่องการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง รวมไปถึงข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาผลงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

5.1 สรุปผล

จากการที่ได้นำหลักการของฟัซซีลอจิกมาออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์เมื่อโหลดน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงนั้นก่อให้เกิดผลลัพธ์ซึ่งสามารถสรุปได้เป็นข้อหลักๆ ได้ 2 ข้อดังนี้

1. เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถหรือลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์ลง ตั้งแต่ 1 กิโลกรัมถึง 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถสามารถกลับมาเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่ที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ค่าความเร็วคงที่ที่สามารถกำหนดให้หุ่นยนต์รถเคลื่อนที่นั้นจะอยู่ในช่วง 0.40-0.60 เมตรต่อวินาที เนื่องจากถ้ากำหนดค่าความเร็วคงที่ต่ำกว่า 0.40 เมตรต่อวินาที เมื่อหุ่นยนต์รถมีน้ำหนักโหลดรวมมากกว่า 4 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถจะไม่สามารถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิมได้เพราะค่าการประมวลผลฟัซซีไม่สามารถใช้งานได้ และถ้ากำหนดค่าความเร็วคงที่ให้มากกว่า 0.60 เมตรต่อวินาที ก็จะทำให้หุ่นยนต์รถไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เช่นกันเนื่องจากความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์รถสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีโหลดน้ำหนัก 5 กิโลกรัมคือ 0.60 เมตรต่อวินาทีเท่านั้น

2. เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถ ตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถควบคุมให้หุ่นยนต์รถกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าโหลดน้ำหนักที่มีการเปลี่ยนแปลงนั้นมีค่ามากน้อยเท่าไหร่ ซึ่งสรุปได้จากการทดลองในบทที่ 4 ได้ว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถที่มีค่ามาก หุ่นยนต์รถจะใช้เวลาในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมมาก และถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโหลดน้ำหนักค่าน้อย ก็จะใช้เวลาน้อยกว่าในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิม ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วคงที่ที่ 0.52 เมตรต่อวินาที เมื่อมีการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถ 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถจะใช้เวลาในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เป็น 3.09 วินาที ซึ่งมากกว่าเมื่อมีการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถ 1 กิโลกรัมที่ใช้เวลา

เพียง 1.23 วินาที การลดค่าโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์รถลงก็ให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันคือ เมื่อนำโหลดน้ำหนักออกจากหุ่นยนต์รถ 5 กิโลกรัม หุ่นยนต์จะกลับไปเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมโดยใช้เวลา 3.00 วินาที ในขณะที่ถ้านำโหลดน้ำหนักออกจากหุ่นยนต์รถเพียง 1 กิโลกรัมจะใช้เวลาเพียง 0.99 วินาที ในภารกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิม ซึ่งใช้เวลาลดลงไปถึง 67 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักที่มากทำให้หุ่นยนต์รถมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วที่มากขึ้นตามไปด้วย เช่น ถ้าเพิ่มโหลดน้ำหนักเข้าไป หุ่นยนต์รถจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วน้อยลง และถ้าลดโหลดน้ำหนักลง หุ่นยนต์รถก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากขึ้น ยิ่งถ้าเพิ่มโหลดน้ำหนักมากขึ้น หุ่นยนต์รถก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วน้อยลงมาก ในทำนองเดียวกันถ้าลดโหลดน้ำหนักลง หุ่นยนต์รถก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากขึ้นไปอีก ทำให้การกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมที่ตั้งไว้นั้นต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น และถ้าเปรียบเทียบการใช้เวลาในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่าเดิมระหว่างการเพิ่มโหลดน้ำหนัก กับการลดโหลดน้ำหนักนั้น จะพบกว่าการเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถ หุ่นยนต์รถจะใช้เวลามากกว่าในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิม ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่าความเร็วคงที่ที่เท่ากันที่ 0.52 วินาที เมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์รถ 3 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถจะใช้เวลา 2.30 วินาทีในการกลับมาเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิม ในขณะที่เมื่อลดโหลดน้ำหนักลง 3 กิโลกรัม หุ่นยนต์รถจะใช้เวลา 2.17 วินาที มีค่าลดลง 5.65 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มโหลดน้ำหนัก หุ่นยนต์รถจะวิ่งช้าลง การที่จะเร่งความเร็วมอเตอร์ให้มีค่ากลับมาที่ค่ามากกว่าจะใช้เวลามากกว่าการที่มอเตอร์จะลดความเร็วลงมายังค่าที่ต่ำกว่าในกรณีที่ลดโหลดน้ำหนักของหุ่นยนต์

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในขั้นต่อไป

1. ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้สร้างหุ่นยนต์รถที่รองรับโหลดน้ำหนักได้สูงสุดเพียงแค่ 5 กิโลกรัม และที่โหลดน้ำหนักสูงสุด หุ่นยนต์รถนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ที่ความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที สำหรับงานวิจัยที่จะต้องพัฒนาต่อไปคือสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบที่สามารถรองรับโหลดน้ำหนักได้มากขึ้นและสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากขึ้นเพื่อจะได้นำไปใช้งานได้จริงในระบบโรงงานอุตสาหกรรม

2. การควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ตัวแปรเพียงตัวเดียวคือการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดน้ำหนัก สำหรับงานวิจัยที่จะต้องพัฒนาต่อไปคือ หุ่นยนต์จะต้องสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ในสภาพการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่นๆ ได้เช่น เมื่อพื้นระนาบมีความขันหรือความลาดที่เปลี่ยนแปลงไป

3. การควบคุมหุ่นยนต์รถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่นี้ควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใดๆ ทางผู้เขียนโปรแกรมจะต้องบรรจุโปรแกรมลงไปในชิพทุกครั้ง ซึ่งในการพัฒนาขั้นต่อไป การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรใดๆ สามารถกระทำผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ทันทีโดยใช้ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ เช่น โปรแกรมแลปวิว หรือแมทแลป โดยสามารถระบุค่าความเร็วคงที่ที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ทันที

บรรณานุกรม

[1] A. Saffiotti, The uses of fuzzy logic in autonomous robot navigation , *Soft Comput*, vol.1, pp. 180 197.

[2] L. A. Zadeh, Fuzzy Sets , *Informal Control*, vol.8, pp. 338 353.

[3] L. A. Zadeh, Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision processes , *IEEE Trans. Syst*, Man Cybern, vol. SMC-3, pp. 28 44.

[4] H. Li and S. X. Yang, A behavior-based mobile robot with a visual land-mark recognition system , *IEEE Trans. Mechatronics*, vol. 8, no. 3, pp. 390 400.

[5] S. Kumar Pradhan, D. Ramakrushna Parhi, and A. Kumar Panda, Fuzzy logic techniques for navigation of several mobile robots , *Applied Soft Computing*, vol. 9, no. 1, pp. 290 300.

[6] V. Raudonis and R. Maskeliunas, Trajectory based fuzzy controller for indoor navigation , *Computational Intelligence and Informatics* (CINTI). pp. 69 72.

[7] M. Faisal, R. Hedjar, M. A. Sulaiman, and K. Al-Mutib, Fuzzy logic navigation and obstacle avoidance by a mobile robot in an unknown dynamic environment , *International Journal of Advanced Robotic systems*, vol. 10, no. 37.

[8] P. Rusu, E. M. Petriu, T. E. Whalen, A. Cornell, and H. J. W. Spoelder, Behavior-based neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation , *IEEE Trans. Instrum. Meas*, vol. 52, no.4, pp. 1335 1340.

[9] Anmin Zhu, and Simon X. Yang, Neuro fuzzy based approach to mobile robot navigation in unknown environments , *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, vol. 37, no. 4.

[10]Y. A. Almatheel and A. Abdelrahman, Speed control of DC motor using fuzzy logic controller , *International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)*, pp. 1 8.

[11] Salim, J. Ohri, and Naveen, Speed control of DC motor using fuzzy logic based on LabVIEW , *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 6.

[12] ผศ.ดร.ปริญญา สงวนสัตย์, *คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์*, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด, 2556

[13] บุญธรรม ภัทราจารุกุล, *หุ่นยนต์อุตสาหกรรม*, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2555

[14] Jerry Mendel, Hani Hagras, Woei-Wan Tan, William W. Melek, and Hao Ying, *Introduction to type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications*, Wiley-IEEE Press, 2014

[15] Guanrong Chen and Trung Tat Pham, *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, 2000

[16] Sohail Iqbal, Nora Boumella, and Juan Carlos Figueroa Garcia, *Fuzzy Controllers-Recent Advances in Theory and Applications*, InTech, Chapters published, 2012