

การควบคุมแบบพีไอดี+ฟัซซีของระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง  
สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร

**PID+FUZZY CONTROL OF THE OBSTACLE AVOIDANCE  
SYSTEM FOR INDOOR MOBILE ROBOTS**

ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมแบบพีไอดี+พีซซีของระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง  
สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร

ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การควบคุมแบบพีไอดี+ฟัซซีของระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร  
PID+Fuzzy Control of the Obstacle Avoidance System for Indoor Mobile Robots

ชื่อ-นามสกุล            นายไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ


สาขาวิชา                วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา        ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr-Ing.


ปีการศึกษา              2558

---

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 15 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2559

|                   |  |
|-------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมแบบพีไอดี+พีซีของระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร |
| ชื่อ-นามสกุล      | นายไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ  |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมเครื่องกล  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr-Ing.  |
| ปีการศึกษา        | 2558   |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมพีไอดีและการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ในระบบคาร์ทีเซียน สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางภายในอาคาร เพื่อควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ โดยทำการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบหุ่นยนต์จริงควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางและเอ็นโค้ดเดอร์ระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์

การทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ในการควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ และส่วนที่สองคือการทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์จริงเคลื่อนที่ภายในตัวอาคารควบคุมให้ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่และไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่

จากผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่และทดสอบการทำงานจริงของหุ่นยนต์พบว่าตัวควบคุมพีไอดี+พีซีสามารถควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ และมีค่าความผิดพลาดสูงสุดระหว่างตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์และเป้าหมายไม่เกิน 0.1 เมตร โดยตัวควบคุมพีซีลอจิกสามารถสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ใหม่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางให้กับหุ่นยนต์ได้ในกรณีที่มีการตรวจพบสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ในเส้นทางหลัก

**คำสำคัญ:** ตัวควบคุมพีซีลอจิก หุ่นยนต์เคลื่อนที่ การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Thesis Title</b>   | PID+Fuzzy Control of the Obstacle Avoidance System for Indoor Mobile Robots |
| <b>Name – Surname</b> | Mr. Kraisak Phothongkum   |
| <b>Program</b>        | Mechanical Engineering  |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assistant Professor Manusak Janthong, Dr.-Ing.                              |
| <b>Academic Year</b>  | 2015  |

## ABSTRACT

The purpose of this research was to design a fuzzy logic controller combined with a PID controller and trajectory planning in the Cartesian system for obstacle avoidance of indoor mobile robots in order to control the robot moving toward the desired target. A motion simulation of the mobile robot using a mathematical model of differential-drive was performed by the MATLAB/Simulink software. In the experiments, the LabVIEW software was used for controlling the real mobile robot equipped with a laser scanner and encoder to detect obstacles and to measure the position of the robot.

The experiments were divided into 2 parts. For the first part, the motion simulation of the robot based on the mathematical model was tested to examine the controller that had been designed to control the robot moving to the target destination. The second part of the experiment was performed in the controlled indoor environment with the real mobile robot moving to the desired targets with and without objects that obstruct the path.

Both simulation and experimental results showed that the PID+Fuzzy controller can control the mobile robot to move along the desired path toward the target point. The maximum distance error measured from the difference between the final robot's position and the desired target position that has been set previously was less than 0.1 meters. The fuzzy logic controller was able to generate a new path for the robot to avoid the obstacles detected in the path.

**Keywords:** fuzzy logic controller, mobile robot, obstacle avoidance

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจน ให้ความช่วยเหลือแนะนำ แนวทางในการทำวิจัย การแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น รวมถึงการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ ในการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง และ ผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย จากมหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้สละเวลาในการให้คำแนะนำ และปรึกษาตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล และบุคลากรทุกท่าน ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ทำให้ผู้วิจัยทำงานได้สะดวกราบรื่น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ญาติพี่น้อง และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ คอยสนับสนุนให้กำลังใจ และให้การช่วยเหลือด้วยดีเสมอมาตลอดการศึกษาในครั้งนี้

ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....  | (3)  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....   | (4)  |
| กิตติกรรมประกาศ .....  | (5)  |
| สารบัญ .....   | (6)  |
| สารบัญตาราง .....  | (8)  |
| สารบัญรูป .....  | (9)  |
| บทที่ 1 บทนำ .....   | 15   |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....                             | 15   |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย .....                                       | 16   |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....  | 16   |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัย .....  | 17   |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....                                  | 17   |
| บทที่ 2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                      | 18   |
| 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....                                      | 18   |
| 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ .....                           | 21   |
| 2.3 ระบบควบคุม (Control System) .....                                | 24   |
| 2.4 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) .....                           | 27   |
| 2.5 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Controller) .....               | 28   |
| 2.6 ตัวควบคุมพีไอดี+ฟัซซีแบบปรับตัวได้ (PID+Fuzzy Self Tuning) ..... | 34   |
| 2.7 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) .....         | 35   |
| 2.8 การหาตำแหน่งและมุมหันเหของหุ่นยนต์ (Dead-Reckoning) .....        | 37   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....   | 39   |
| 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....  | 39   |
| 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....   | 40   |
| 3.3 การหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model).....   | 40   |
| 3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก .....  | 48   |
| 3.5 การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์.....   | 56   |
| 3.6 โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของหุ่นยนต์.....   | 57   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ .....   | 61   |
| 4.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink<br>กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่.....             | 61   |
| 4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink<br>กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 และ 2 ชั้น.....   | 65   |
| 4.3 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW<br>กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ .....          | 71   |
| 4.4 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW<br>กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 และ 2 ชั้น..... | 75   |
| บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....   | 84   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล .....  | 84   |
| 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....  | 85   |
| บรรณานุกรม.....   | 86   |
| ภาคผนวก .....   | 89   |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 93   |



## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....                         | 39   |
| ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์.....                    | 41   |
| ตารางที่ 3.3 กฎที่ใช้ในการควบคุมของ Fuzzy Tracking.....        | 49   |
| ตารางที่ 3.4 กฎที่ใช้ในการควบคุมของ Fuzzy Avoidance .....      | 51   |
| ตารางที่ 3.5 กฎที่ใช้ในการควบคุมของ PID+Fuzzy Self Tuning..... | 55   |



## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 หุ่นยนต์สำรวจของนาซ่า.....  | 15   |
| รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์ Scout-II Robot .....   | 18   |
| รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์ .....                               | 19   |
| รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์รถแทร์คเตอร์ไฮดรอลิก DEDALO .....                                     | 20   |
| รูปที่ 2.4 รูปควบคุมการทำงานด้วยพีซีลจจิกแบบอนุกรม.....                                  | 20   |
| รูปที่ 2.5 แบบจำลองจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ .....  | 21   |
| รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของระบบควบคุม .....   | 24   |
| รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด .....  | 25   |
| รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด .....   | 26   |
| รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ .....   | 27   |
| รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบพีไอดี .....                                     | 28   |
| รูปที่ 2.11 ทรรกแบบจริงเท็จและทรรกแบบพีซีซี .....  | 29   |
| รูปที่ 2.12 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของเซตแบบปกติ และเซตแบบพีซีซี .....                 | 29   |
| รูปที่ 2.13 เงื่อนไขการปฏิบัติการในกฎของพีซีซี .....                                     | 30   |
| รูปที่ 2.14 ยูเนียนของพีซีซีเซต .....  | 31   |
| รูปที่ 2.15 อินเตอร์เซกชันของพีซีซีเซต.....  | 31   |
| รูปที่ 2.16 คอมพลิเมนต์ของพีซีซีเซต.....   | 32   |
| รูปที่ 2.17 ระบบควบคุมแบบพีซีซีลจจิก.....  | 32   |
| รูปที่ 2.18 การทำพีซีซีพีเคชันแปลงอินพุตเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก.....                  | 33   |
| รูปที่ 2.19 ตัวอย่างกฎการควบคุมสำหรับกรณีที่มีค่าอินพุตมากกว่าหนึ่งค่า.....              | 33   |
| รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมพีซีซี-พีไอดี.....                                     | 35   |
| รูปที่ 2.21 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่.....  | 36   |
| รูปที่ 2.22 ไดอะแกรมแสดงระยะทาง, ความเร็ว และความเร่งในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่..... | 37   |
| รูปที่ 3.1 โมเดลของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ .....  | 40   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ Fuzzy Tracking .....  | 48   |
| รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาท์พุตของ Fuzzy Tracking .....  | 49   |
| รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ Fuzzy Avoidance .....   | 50   |
| รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาท์พุตของ Fuzzy Avoidance .....   | 50   |
| รูปที่ 3.6 การแบ่งโซนรับค่าอินพุตระยะของสิ่งกีดขวางจากเลเซอร์สแกนเนอร์ .....   | 52   |
| รูปที่ 3.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ PID+Fuzzy Self Tuning .....   | 53   |
| รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาท์พุตของ PID+Fuzzy Self Tuning .....   | 54   |
| รูปที่ 3.9 ไลอะแกรมการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์.....   | 57   |
| รูปที่ 3.10 โครงสร้างของหุ่นยนต์และอุปกรณ์ต่างๆ .....  | 57   |
| รูปที่ 3.11 ตัวประมวลผลกลาง NI MyRIO.....  | 58   |
| รูปที่ 3.12 เลเซอร์สแกนเนอร์ รุ่น URG-04LX-UG01 .....  | 58   |
| รูปที่ 3.13 มอเตอร์ไคร์ฟ รุ่น ASC-055-18 .....   | 59   |
| รูปที่ 3.14 ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น ZGX38REE .....   | 59   |
| รูปที่ 3.15 แผนผังอุปกรณ์และการควบคุมการทำงาน .....  | 60   |
| รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรง<br>ที่ตำแหน่ง (7, 0) .....  | 61   |
| รูปที่ 4.2 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลอง<br>การเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) .....   | 62   |
| รูปที่ 4.3 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง<br>(Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่<br>จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง(7,0)..... | 62   |
| รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนว<br>เฉียงขึ้นเมื่อเทียบกับด้านหน้าของตัวหุ่นยนต์ ที่ตำแหน่ง (7, 2) .....  | 63   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.5 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน  $x$  และ  $y$  จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวเฉียง ที่ตำแหน่ง  $(7, 2)$ .....63
- รูปที่ 4.6 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง  $(7, 2)$  .....64
- รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 ชั้น ที่ตำแหน่ง  $(2, 0)$  ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง  $(7, 0)$  .....65
- รูปที่ 4.8 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน  $x$  และ  $y$  จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง  $(7, 0)$  .....65
- รูปที่ 4.9 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง  $(7, 0)$ .....66
- รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 ชั้นที่ตำแหน่ง  $(2, 0.5)$  ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง  $(7, 2)$  .....66
- รูปที่ 4.11 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน  $x$  และ  $y$  จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง  $(7, 2)$ ....67
- รูปที่ 4.12 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง  $(7, 2)$ .....67
- รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้น ที่ตำแหน่ง  $(2, 0)$  และ  $(4, 1)$  ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง  $(7, 0)$  .....68
- รูปที่ 4.14 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน  $x$  และ  $y$  จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง  $(7, 0)$ ....68

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 4.15 | ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 0)..... | 69 |
| รูปที่ 4.16 | ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้น ที่ตำแหน่ง (2, 0.5) และ (4, 1.5) ไปเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2) .....   | 69 |
| รูปที่ 4.17 | ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)....   | 70 |
| รูปที่ 4.18 | ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 2)..... | 70 |
| รูปที่ 4.19 | สภาพแวดล้อมการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง.....  | 71 |
| รูปที่ 4.20 | ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการไปยังเป้าหมายในแนวตรงด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 0).....   | 72 |
| รูปที่ 4.21 | ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0).....   | 72 |
| รูปที่ 4.22 | ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) .....                        | 73 |
| รูปที่ 4.23 | ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2).....   | 73 |
| รูปที่ 4.24 | ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงขึ้นที่ตำแหน่ง (7, 2).....   | 74 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.25 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2).....     | 74 |
| รูปที่ 4.26 สภาพแวดล้อมการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น.....  | 75 |
| รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) ไปยังเป้าหมายในแนวตรงด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 0) .....   | 76 |
| รูปที่ 4.28 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0).....   | 76 |
| รูปที่ 4.29 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) .....  | 77 |
| รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0.5) ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2).....  | 77 |
| รูปที่ 4.31 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2).....   | 78 |
| รูปที่ 4.32 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)..... | 78 |
| รูปที่ 4.33 สภาพแวดล้อมการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น.....  | 79 |
| รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) และ (4, 1) ไปยังเป้าหมายในแนวตรงด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 0) .....  | 79 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.35 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) .....  | 80   |
| รูปที่ 4.36 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) .....   | 80   |
| รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0.5) และ (4, 1.5) ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2) .....  | 81   |
| รูปที่ 4.38 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2) .....  | 81   |
| รูปที่ 4.39 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2) ..... | 82   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทและมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งด้านอุตสาหกรรม การวิจัย หรืออื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานเพื่ออำนวยความสะดวกในการขนย้ายสิ่งของวัสดุ หรือแม้กระทั่งใช้ในการปฏิบัติงานแทนมนุษย์ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่ออันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ ซึ่งในหลายประเทศได้มีการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์อย่างต่อเนื่อง โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ หุ่นยนต์แบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปไหนได้ด้วยตัวเอง มีลักษณะเป็นแขนกลเคลื่อนไหวภายในตัวเองเท่านั้น มีข้อจำกัดในเรื่องของขอบเขตของพื้นที่การทำงาน ต่างจากหุ่นยนต์ชนิดที่ 2 คือ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยข้อดีของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ก็คือสามารถเคลื่อนที่ไปไหนมาไหนได้ด้วยตัวเองโดยการใช้ล้อหรือขา



รูปที่ 1.1 หุ่นยนต์สำรวจของนาซ่า [1]

ปัจจุบันยังคงมีการทำวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อยู่เพื่อพัฒนาออกมาในรูปแบบต่างๆ เช่น หุ่นยนต์สำรวจของนาซ่า เป็นต้น โดยปัญหาที่สำคัญสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ก็คือ



การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ และการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ตัวหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปปฏิบัติงานยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ทราบลักษณะที่แน่นอน

ด้วยเหตุดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก 3 ชนิดประกอบด้วย Fuzzy Tracking ใช้สำหรับควบคุมการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อไปยังเป้าหมาย, Fuzzy Avoidance ใช้สำหรับควบคุมการสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางให้กับหุ่นยนต์ และ PID+Fuzzy Self Tuning ใช้สำหรับควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด ซึ่งทั้งหมดนี้จะนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ในระบบคาร์ทีเซียน (Trajectory Planning in Cartesian Space) เพื่อใช้ในการควบคุมและสร้างเส้นทางให้หุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับควบคุมการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายและหลบหลีกสิ่งกีดขวางให้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบตัวควบคุมพีไอดี+ฟัซซีสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้ไปตามเส้นทางที่กำหนด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่

1.3.2 ออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้แก่

1.3.2.1 Fuzzy Tracking สำหรับคำนวณหาเส้นทางของหุ่นยนต์เพื่อไปยังเป้าหมาย

1.3.2.2 Fuzzy Avoidance สำหรับคำนวณหาเส้นทางของหุ่นยนต์เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

1.3.2.3 PID+Fuzzy Self Tuning สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด

1.3.3 จำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จริงด้วยโปรแกรม LabVIEW

1.3.4 หุ่นยนต์เคลื่อนที่มีรูปแบบการขับเคลื่อนสองล้อแบบคิฟเฟอร์เรนเซียลไดรฟ์ มีความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 0.2 เมตรต่อวินาที และใช้เซ็นเซอร์จากล้อในการบอกตำแหน่งและมุมหันเหของหุ่นยนต์

1.3.5 ใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ในระยะไม่เกิน 5 เมตร โดยสิ่งกีดขวางต้องเป็นวัตถุทึบแสงที่มีความสูงและกว้างไม่น้อยกว่า 0.35 เมตรและ 0.05 เมตร ตามลำดับ และมีระยะเริ่มการหลบหลีกสิ่งกีดขวางไม่ต่ำกว่า 1 เมตร

1.3.6 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อยู่ภายใต้ข้อจำกัดว่าล้อขับเคลื่อนทั้งสองข้างต้องไม่มีการลื่นไถล และเคลื่อนที่บนพื้นผิวเรียบภายในตัวอาคาร

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 วิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ และออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก

1.4.3 ทดสอบจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.4 ประกอบอุปกรณ์และติดตั้งเซ็นเซอร์ต่างๆ เข้ากับตัวหุ่นยนต์

1.4.5 ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมตัวหุ่นยนต์จริงด้วยโปรแกรม LabVIEW

1.4.6 ทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์

1.4.7 วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

1.4.8 สรุปผลการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ตัวควบคุมพีชชีลอจิกเพื่อใช้สำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในตัวอาคาร

1.5.2 ได้ทราบถึงวิธีการหลักการควบคุมและการแก้ปัญหาในระบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

1.5.3 ได้พัฒนาทักษะในการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวาง

## บทที่ 2

### วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Mohammed Faisal และคณะ [2] ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขนย้ายสิ่งของในคลังสินค้าแบบอัตโนมัติ โดยใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจจับสิ่งกีดขวางเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกและเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างปลอดภัยในการทำงานจะใช้หุ่นยนต์ Scout-II Robot ของบริษัท Dr Robot Inc. ทดสอบการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่ และสิ่งกีดขวางที่กำลังเคลื่อนที่ด้วย



รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์ Scout-II Robot [2]

Chi-Wen Lo และคณะ [3] ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ทำงานร่วมกับ Q-learning Algorithm โดยตัวมันจะทำหน้าที่เลือกใช้กฎการควบคุมของฟัซซีที่เหมาะสม สำหรับควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่สำรวจภายในบ้านแบบอัตโนมัติ โดยที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้เองแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้เซ็นเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์ติดตั้งที่ตัวหุ่นยนต์เพื่อใช้สำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์ [3]

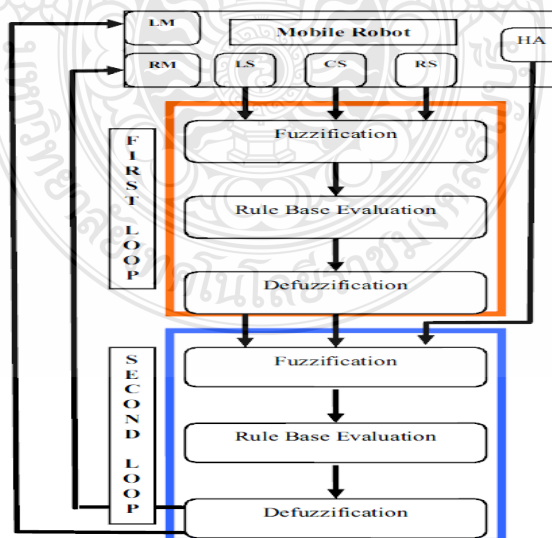
กันตภณ พริ้วโรตง [4] นำเสนอการประยุกต์ใช้ฟuzzyลอจิกกับการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ โดยใช้การเรียนรู้กฎฟuzzyและเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จากการรับข้อมูลด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรดในการตรวจจับระยะของวัตถุเพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้กฎของฟuzzyในการตัดสินใจ

D. Martín และคณะ [5] ทำการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสำหรับหุ่นยนต์รถแทรีคเตอร์ไร้คนขับ ในการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วย Fuzzy Logic Toolbox ของโปรแกรม MATLAB โดยจะใช้ตัวควบคุมฟuzzyในการควบคุมมุมเลี้ยวล้อด้านหน้าของตัวรถ มีการตรวจจับตำแหน่งของสิ่งกีดขวางด้วยเซ็นเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์ และบอกตำแหน่งของหุ่นยนต์ด้วยเซ็นเซอร์จีพีเอส ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์รถแทรกเตอร์ไฮดรอลิก DEDALO [5]

Umar Farooq และคณะ [6] นำเสนอการออกแบบและทดสอบการทำงานของฟัซซีลอจิกสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยอาศัยการทำงานแบบอนุกรมกันของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก 2 แบบ เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย รับสัญญาณระยะของสิ่งกีดขวางและมุมหันเหของหุ่นยนต์จากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก และเข็มทิศดิจิทัล เพื่อนำไปประมวลผล

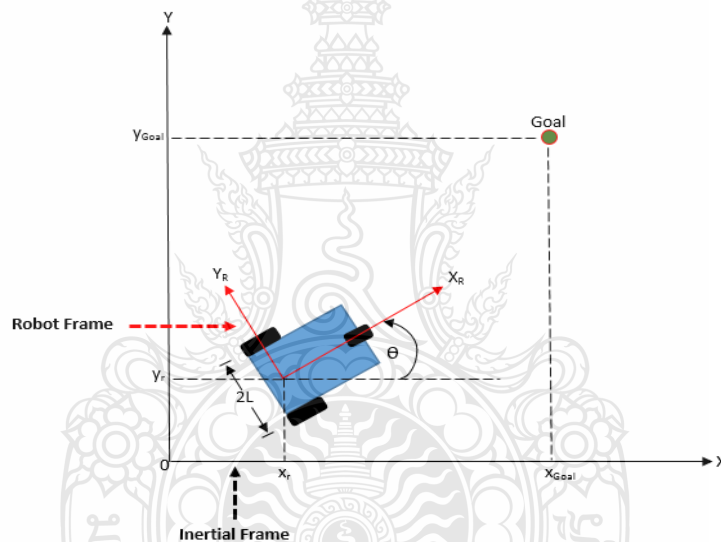


รูปที่ 2.4 ลูปควบคุมการทำงานด้วยฟัซซีลอจิกแบบอนุกรม [6]

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์

### 2.2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Kinematics Model) [7]

จากลักษณะของตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 2.5 ประกอบไปด้วยเฟรมอ้างอิงหลักที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Inertial Frame)  $\{X, Y\}$  และเฟรมของตัวหุ่นยนต์ (Robot Frame)  $\{X_R, Y_R\}$  ที่มีจุด Origin อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้าง โดยที่แกน  $x$  ชี้ไปทางด้านหน้าของหุ่นยนต์และมีการเคลื่อนที่หรือหมุนตามไปกับตัวของหุ่นยนต์ด้วย ตัวหุ่นยนต์จะประกอบไปด้วยล้อขับเคลื่อนด้านหลัง 2 ล้อที่เป็นอิสระต่อกัน และมีล้อด้านหน้าเพื่อใช้สำหรับการสมมูลตัวหุ่นยนต์ (Differential Drive Mobile Robot) ซึ่งแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แสดงดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.5 แบบจำลองจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= v \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y}_r &= v \cdot \sin(\theta) \\ \dot{\theta}_r &= \omega \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $x_r$  คือ ตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับแกน  $x$  ของเฟรมอ้างอิง  
 $y_r$  คือ ตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับแกน  $y$  ของเฟรมอ้างอิง  
 $\theta_r$  คือ มุมหันเหของหุ่นยนต์เมื่อวัดเทียบกับแกน  $x$  ของเฟรมอ้างอิง

$v$  คือ ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของหุ่นยนต์

จากสมการที่ 2.1 สามารถเขียนแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วเชิงมุมล้อขับเคลื่อนซ้ายและขวาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x}_r &= \left( \frac{R \cdot (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L)}{2} \right) \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y}_r &= \left( \frac{R \cdot (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L)}{2} \right) \cdot \sin(\theta) \\ \dot{\theta}_r &= \frac{R(\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)}{2L}\end{aligned}\tag{2.2}$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R \cdot \cos(\theta) & R \cdot \cos(\theta) \\ R \cdot \sin(\theta) & R \cdot \sin(\theta) \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix}\tag{2.3}$$

โดยที่

$$v = \frac{R \cdot (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L)}{2}$$

$$\omega = \frac{R \cdot (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)}{2L}$$

เมื่อ

$\dot{\theta}_R$  คือ ความเร็วเชิงมุมล้อขับเคลื่อนด้านขวา

$\dot{\theta}_L$  คือ ความเร็วเชิงมุมล้อขับเคลื่อนด้านซ้าย

$L$  คือ ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อทั้ง 2 ข้าง

$R$  คือ รัศมีล้อขับเคลื่อนของหุ่นยนต์

## 2.2.2 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model)

ในการหาสมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์จะใช้สมการลากรางจ์ (Lagrange's Equation) [8] โดยสามารถคำนวณหาได้จากพลังงานศักย์ (Potential Energy) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ของระบบ แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i \quad (2.4)$$

โดยที่  $L = T - V \quad (2.5)$

- เมื่อ
- $L$  คือ สมการลากรางจ์ (Lagrangian)
  - $T$  คือ พลังงานจลน์รวมของระบบ (Total Kinetic Energy)
  - $V$  คือ พลังงานศักย์รวมของระบบ (Total Potential Energy)
  - $q_i$  คือ ระบบพิกัดที่สนใจ (Generalized Coordinate System)
  - $Q_i$  คือ แรงในระบบพิกัดที่สนใจ (Generalized Force)
  - $i$  คือ อันดับของระบบ (System Order)

จากสมการที่ 2.5 สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \quad (2.6)$$

เมื่อพิจารณาระบบและจัดรูปจะได้สมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์เป็น

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- $M(q)$  คือ Inertia Matrix เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับที่สองของ  $q$
  - $V(q, \dot{q})$  คือ Coriolis Matrix เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ  $q$

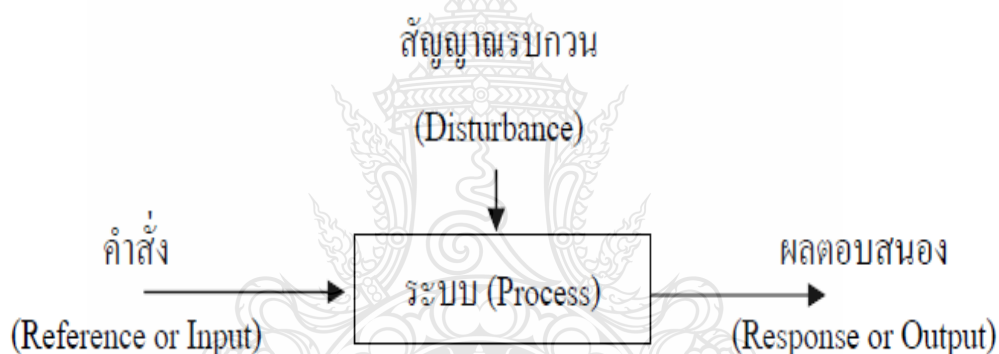


$B(q)$  คือ Input Matrix เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับค่าอินพุตของระบบ

$\tau$  คือ เจเนอรัลไลซ์ฟอร์ซ (Generalized Force) ที่เป็นอินพุตของระบบ

### 2.3 ระบบควบคุม (Control System) [9]

ระบบควบคุมคือตัวระบบ (System) ที่มีกระบวนการในการบังคับหรือสั่งการควบคุมเอาต์พุตที่ได้ให้มีค่าตามที่เรต้องการ โดยการป้อนค่าอินพุตที่เหมาะสมให้ ซึ่งสามารถแบ่งพัฒนาการของระบบควบคุมตามยุคสมัยได้ 2 ยุคคือ ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม และ ระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ อีกทั้งยังแบ่งรูปแบบของการควบคุมได้ 2 ชนิด คือ ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด และระบบควบคุมแบบวงรอบปิด



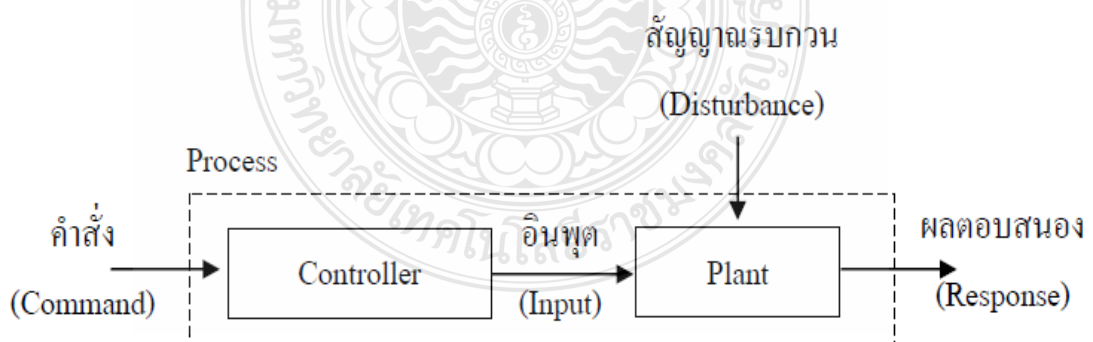
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของระบบควบคุม [9]

2.3.1 ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control Systems) เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆ ที่มีการนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักมาใช้ควบคุมระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ก็จะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ ระบบควบคุมพีไอดี (PID Controllers) เส้นทางการเคลื่อนที่ (Root Locus) แผนภาพโบด (Bode Plot) และแผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Plot) เป็นต้น

2.3.2 ระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ (Modern Control) เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงหลังๆ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้งานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ที่จำกัดการนำไปใช้

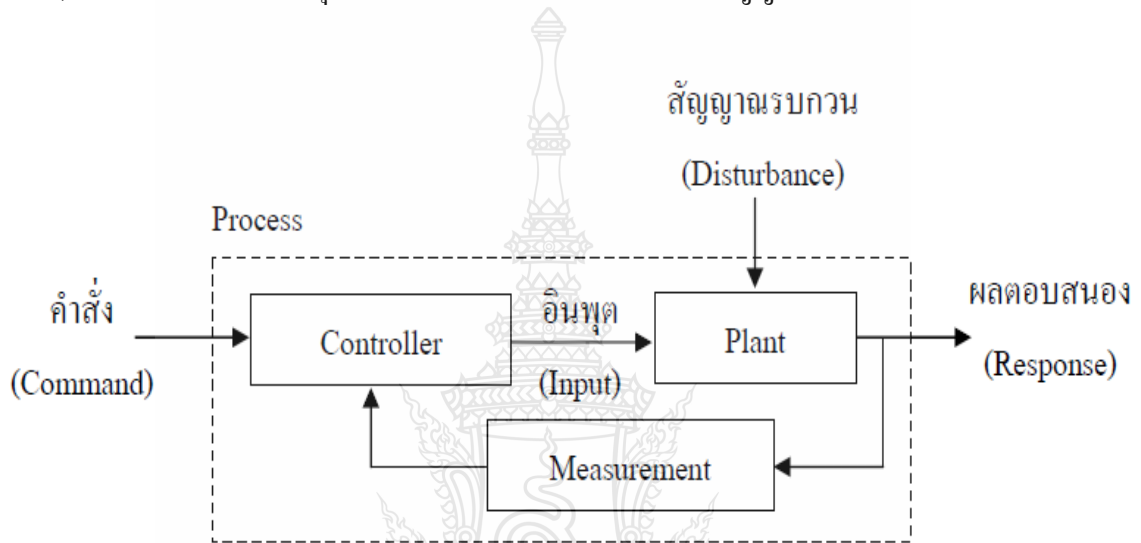
งานกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วระบบมักจะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Systems) และแปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-variant Systems) โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมมักมีข้อจำกัดในการใช้งานกับระบบประเภทนี้ จึงได้มีการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการควบคุมรูปแบบใหม่ๆ ขึ้นมา ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ ได้แก่ ระบบที่อาศัยรูปแบบของสมการสเตท (State Variable) ในการคำนวณ ระบบควบคุมความเหมาะสม (Optimal Control) ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ระบบควบคุมลูกผสม (Hybrid Control) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นต้น

2.3.3 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control) ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งในการควบคุมแบบวงรอบเปิด ตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or Reference) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่าเมื่อสิ่งที่ต้องการควบคุมได้รับสัญญาณป้อนแล้วนั้น ก็จะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้ได้ตามที่คาดหมายไว้โดยไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตจริงว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่ โดยตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบเปิดได้แก่ ตู้อบไมโครเวฟที่มีลักษณะการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า โดยที่ไม่มีการตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมาในรูปของสัญญาณ ไมโครเวฟนั้นว่าเป็นเท่าใดกันแน่ หรือออกมาได้เท่ากับที่ปรับตั้งไว้หรือไม่ ลักษณะการทำงานจึงเป็นวงรอบเปิด



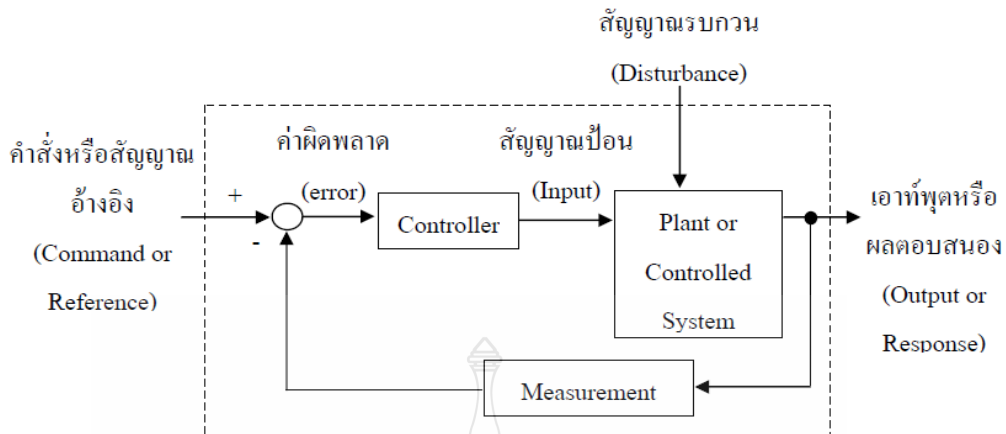
รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด [9]

2.3.4 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control) ลักษณะของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or Sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System under Controlled or Plant) เพื่อที่จะให้ผลผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด [9]

ซึ่งระบบควบคุมแบบวงรอบปิดนี้อาจจะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) โดยจะเป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ แล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้ในการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม ตัวอย่างของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดได้แก่ เตารีด ตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น เตารีดมีสวิตช์เป็นใบเมทัลที่โค้งตัวเมื่ออุณหภูมิรอบๆตัวมันสูงขึ้นและใช้การโค้งตัวนี้เป็นสวิตช์ตัดต่อการทำงานของฮีตเตอร์ การทำงานจึงเป็นวงรอบปิด ส่วนตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศก็เช่นกัน มีเทอร์โมสแตทเป็นตัววัดอุณหภูมิภายในตู้และตัวเทอร์โมสแตทเองก็เป็นสวิตช์ควบคุมการตัดต่อคอมเพรสเซอร์ให้ทำงาน เมื่อคอมเพรสเซอร์ทำงานก็ทำให้เกิดความเย็นเป็นไปตามที่เทอร์โมสแตทตั้งค่าไว้



รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [9]

## 2.4 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) [10]

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับรูปแบบหนึ่ง ซึ่งใช้การควบคุมในระบบวงปิด (Closed Loop Control) มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวาง โดยค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่มาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ (Input) โดยตัวควบคุมจะพยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ โดยวิธีการคำนวณของตัวควบคุมพีไอดีจะขึ้นอยู่กับ 3 ตัวแปรคือค่าสัดส่วน, ค่าปริพันธ์ และค่าอนุพันธ์

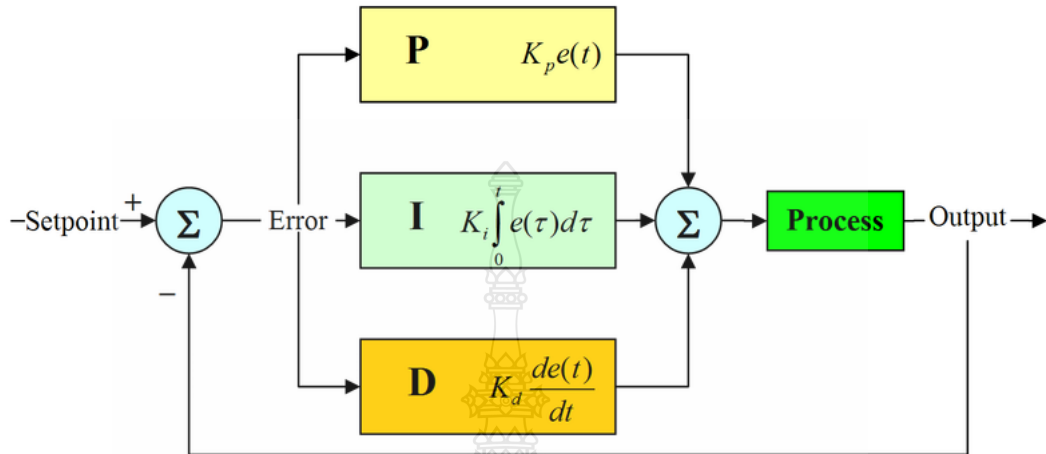
2.4.1 การควบคุมสัดส่วน (Proportional,  $K_p$ ) เป็นการควบคุมสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าความผิดพลาดปัจจุบันที่ถูกป้อนเข้ามาเพื่อลดปริมาณค่าความผิดพลาดของสัญญาณขาออก

2.4.2 การควบคุมปริพันธ์ (Integral,  $K_i$ ) กำหนดจากผลรวมของค่าความผิดพลาดในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งเป็นการควบคุมเพื่อลดหรือกำจัดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว แต่จะส่งผลทำให้ผลตอบสนองชั่วขณะมีประสิทธิภาพลดลง

2.4.3 การควบคุมอนุพันธ์ (Derivative,  $K_d$ ) กำหนดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการควบคุมเพื่อลดโอเวอร์ชูตและลดเวลาในการเข้าสู่สมดุลของระบบ

สำหรับค่าสัญญาณขาออก (Output) ของตัวควบคุมแบบพีไอดีกำหนดให้เป็น  $u(t)$  สามารถหาได้จากการรวมกันของเทอมสัดส่วน, ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ตามสมการที่ 2.8

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.8)$$

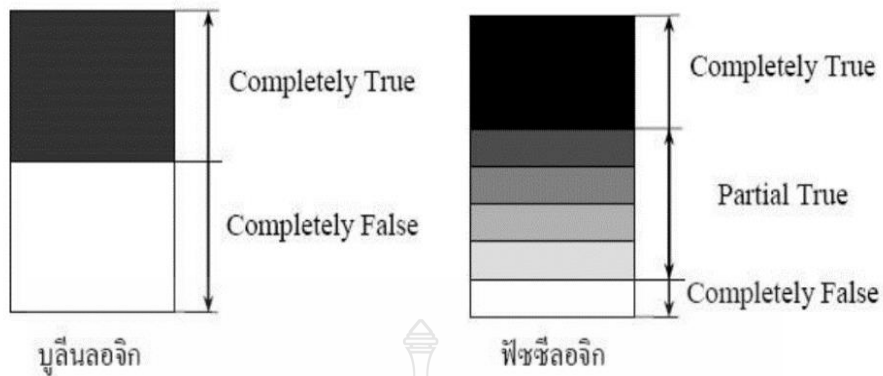


รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบพีไอดี [10]

## 2.5 ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Controller) [11]

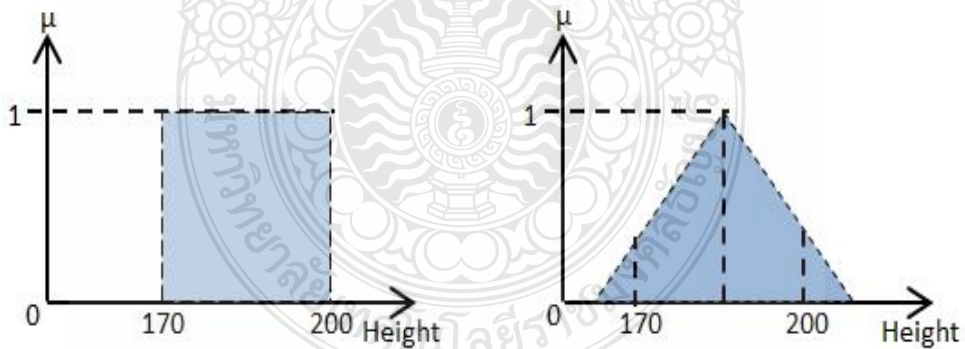
ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) เป็นศาสตร์ด้านการคำนวณที่เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในวงการวิจัยด้านคอมพิวเตอร์ และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการทหาร ด้านธุรกิจ ด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ถูกคิดค้นโดย L. A. Zadeh ในปี ค.ศ. 1965 ซึ่งเป็นผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ฟัซซีลอจิกเป็นตรรกะที่อยู่บนพื้นฐานความเป็นจริงที่ว่า ทุกสิ่งบนโลกแห่งความเป็นจริงไม่ใช่มีเฉพาะสิ่งมีความแน่นอนเท่านั้น แต่มีหลายสิ่งหลายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่เที่ยงและไม่แน่นอน อาจเป็นสิ่งที่คลุมเครือไม่ใช่ชัดเจน ซึ่งเป็นลักษณะของความไม่แน่นอนทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั่วไป โดยการจะบอกความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนเช่นนี้จะถูกสร้างขึ้นเป็นฟังก์ชันหรือเซตเรียกว่าฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

2.5.1 ตรรกะแบบฟัซซี (Fuzzy Logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูล โดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ใช้หลักเหตุผลที่คล้ายการเขียนแบบวิธีความคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์ ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกะแบบจริงเท็จ (Boolean logic) เป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial True) โดยค่าความจริงจะอยู่ในช่วงระหว่างจริง (Completely True) กับเท็จ (Completely False) ส่วนตรรกศาสตร์เดิมจะมีค่าเป็นจริงกับเท็จเท่านั้น



รูปที่ 2.11 ตรรกะแบบจริงเท็จและตรรกะแบบฟัซซี [11]

2.5.2 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัซซีเซตจะครอบคลุม ทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ในโลกแห่ง ความเป็นจริงเซตไม่มีเฉพาะเซตแบบเท่านั้น จะมีเซตแบบฟัซซีด้วย โดยฟัซซีเซตจะมีขอบเขตแบบ ฟัซซีไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากขาวเป็นดำ ยกตัวอย่างเกี่ยวกับความสูง โดยนิยามคำว่าคนสูง กำหนดให้เป็นคนที่มีส่วนสูงตั้งแต่ 170 ถึง 200 เซนติเมตร โดยนิยามแบบฟัซซีเซตอาจจะกำหนดเป็น คนที่มีความสูงประมาณ 180 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการนิยามที่ไม่แสดงถึงขอบเขตที่แน่นอน



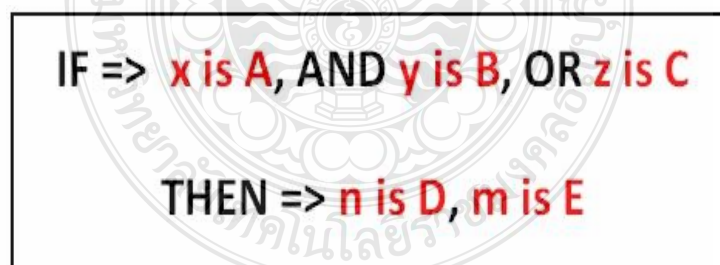
รูปที่ 2.12 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของเซตแบบปกติ และเซตแบบฟัซซี

2.5.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับ ความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอนและคลุมเครือ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี เพราะ

รูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรหรือสมมาตรกันทุกประการก็ได้ โดยชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิดเช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function), ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function), ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-Shape Membership Function) เป็นต้น โดยการเลือกชนิดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมาใช้งานนั้น จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและครอบคลุมข้อมูลอินพุตทั้งหมดที่รับเข้ามาเพื่อให้ดำเนินการได้อย่างราบเรียบ

2.5.4 ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable) จะใช้ในการอธิบายค่าของตัวแปรเช่นเดียวกับเซตแบบดั้งเดิม เช่น ปริมาณของค่าความผิดพลาดที่บอกเป็นจำนวนมากหรือน้อยดังนี้ Very High, High, Medium, Low และ Very Low เป็นตัวแปรภาษา ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญมากในตรรกะแบบฟัซซี ตัวแปรภาษาช่วยกำหนดค่าของสิ่งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพ โดยใช้พจน์ภาษา (Linguistic Term) และในรูปปริมาณ โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งมีประโยชน์ในการจัดการกับอินพุตที่เป็นข้อมูลในเชิงของตัวเลข

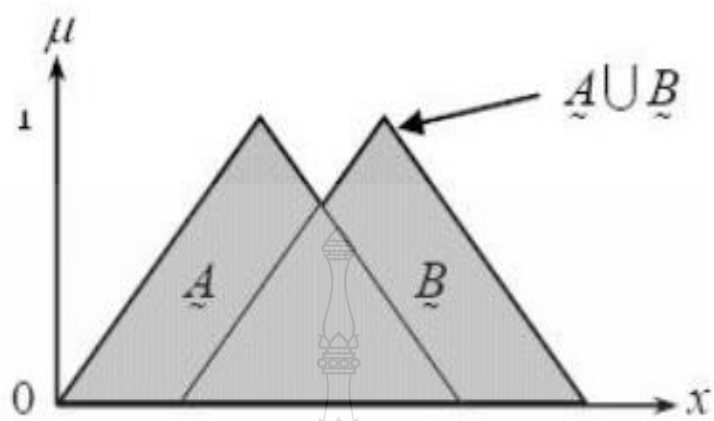
2.5.5 กฎฟัซซี (Fuzzy Rules) คือระบบของเงื่อนไขในการปฏิบัติการอยู่ในรูปของ IF-THEN (ถ้า - แล้ว) โดยหลักการทำงานก็คือถ้าในส่วนเงื่อนไขเริ่มต้นที่ IF เป็นจริง ส่วนของ THEN จะถูกประเมินด้วยค่าระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งค่าอินพุต (IF) และเอาต์พุต (THEN) นั้นสามารถมีได้หลายค่า สำหรับทุกๆเงื่อนไขของ IF จะถูกประเมินพร้อมๆกันแล้วนำไปรวมกันด้วยตัวปฏิบัติการทางเซต เช่น AND หรือ OR แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เงื่อนไขการปฏิบัติการในกฎของฟัซซี

2.5.6 การดำเนินการทางฟัซซี (Fuzzy Operation) จะมีคุณสมบัติเหมือนกับการดำเนินการทางเซตโดยทั่วไป ประกอบด้วย ยูเนียน (Union), อินเตอร์เซกชัน (Intersection) และคอมพลีเมนต์ (Complement)

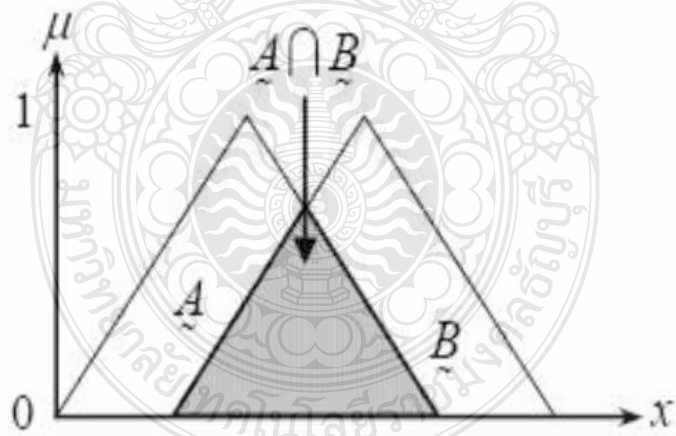
1) ยูเนียน (Union) ของฟัซซีเซตจะเป็น OR Operation แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ยูเนียนของฟัซซีเซต [11]

2) อินเตอร์เซกชัน (Intersection) ของฟัซซีเซตจะเป็น AND Operation แสดงดังรูปที่

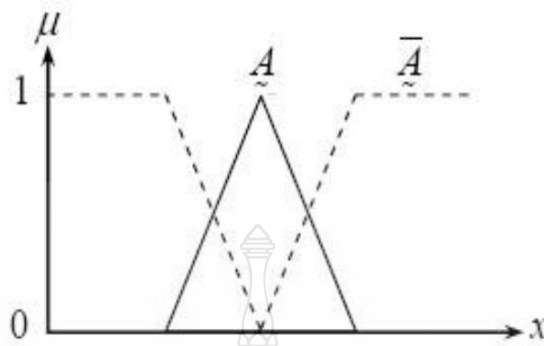
2.15



รูปที่ 2.15 อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต [11]

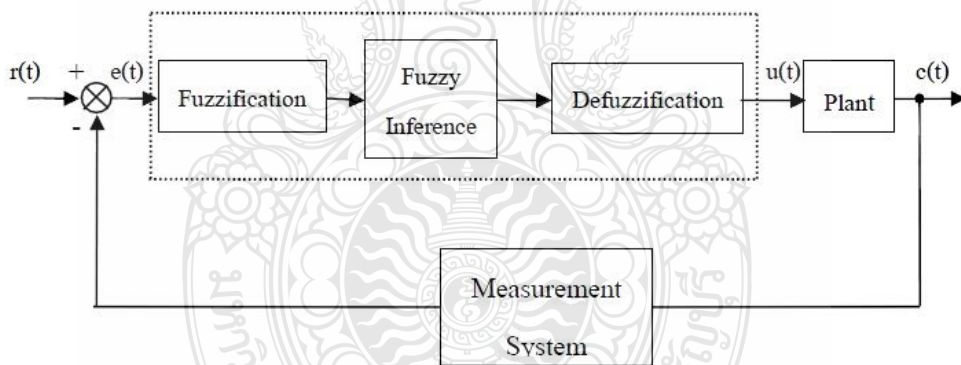


3) คอมพลิเมนต์ (Complement) ของฟังก์ชันเซต แสดงดังรูปที่ 2.16



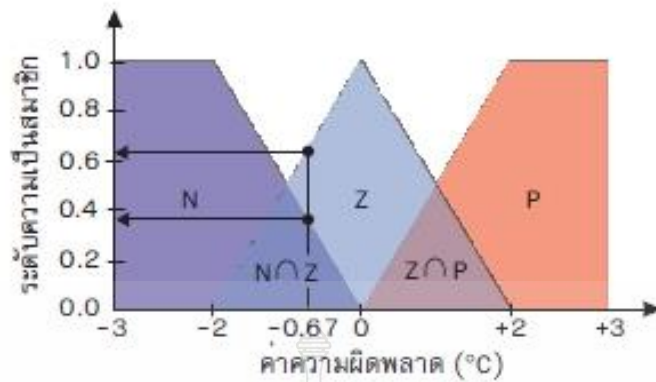
รูปที่ 2.16 คอมพลิเมนต์ของฟังก์ชันเซต [11]

2.5.7 ฟังก์ชันลอจิกสำหรับการควบคุม จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ระบบควบคุมแบบฟังก์ชันลอจิก [12]

1) ฟังก์ชันฟิเคชัน (Fuzzification) ขั้นตอนนี้จะเป็นการแปลงข้อมูลอินพุตที่ฟังก์ชันรับเข้ามา อยู่ในรูปแบบของค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกซึ่งจะแทนด้วยตัวแปรภาษา โดยจะเป็นการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรภาษา จากอินพุตที่เป็นค่าเชิงตัวเลข



รูปที่ 2.18 การทำฟัซซีฟิเคชันแปลงอินพุตเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก [13]

2) การวินิจฉัย (Fuzzy Inference) เป็นส่วนของการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟัซซีและวิเคราะห์อินพุตตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดเอาไว้ สำหรับการควบคุมนั้นจะอยู่ในลักษณะของกฎ IF-THEN Rules ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนอินพุต (IF) และส่วนเอาต์พุต (THEN) โดยผลเอาต์พุตที่ได้จากแต่ละกฎของการควบคุมจะถูกนำมารวมกันเพื่อให้ได้เอาต์พุตที่มีเพียงค่าเดียว

| E <sub>c</sub> | E  |    |    |    |    |    |    |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|
|                | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB             | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NM             | NB | NB | NM | NS | NS | ZO | ZO |
| NS             | NB | NM | NS | NS | ZO | PS | PS |
| ZO             | NM | NM | NS | ZO | PS | PM | PM |
| PS             | NM | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| PM             | ZO | ZO | PS | PS | PM | PB | PB |
| PB             | ZO | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างกฎการควบคุมสำหรับกรณีมีค่าอินพุตมากกว่าหนึ่งค่า [14]

3) ดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) จากขั้นตอนของการวินิจฉัยนั้นค่าที่ได้จากกฎการควบคุมเป็นค่าฟัซซี จึงต้องทำการแปลงค่าเอาต์พุตของระบบให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้งานสำหรับการควบคุมได้ ซึ่งการทำดีฟัซซีฟิเคชัน คือการแปลงค่าจากผลการรวมเอาต์พุตของแต่ละกฎให้อยู่ในรูปของค่าที่ชัดเจน แสดงดังสมการที่ 2.9

$$Y = \frac{\sum \mu_n y_n}{\sum \mu_n} \quad (2.9)$$

โดยที่  $Y$  คือ เอาท์พุทของระบบ

$\mu_n$  คือ เอาท์พุทที่ได้จากแต่ละกฎ

$y_n$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเอาท์พุท

2.5.8 ข้อดีของฟัซซีลอจิก มีหลายอย่างที่เป็นลักษณะเด่นซึ่งได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆมากมาย โดยเฉพาะงานทางด้านระบบควบคุม

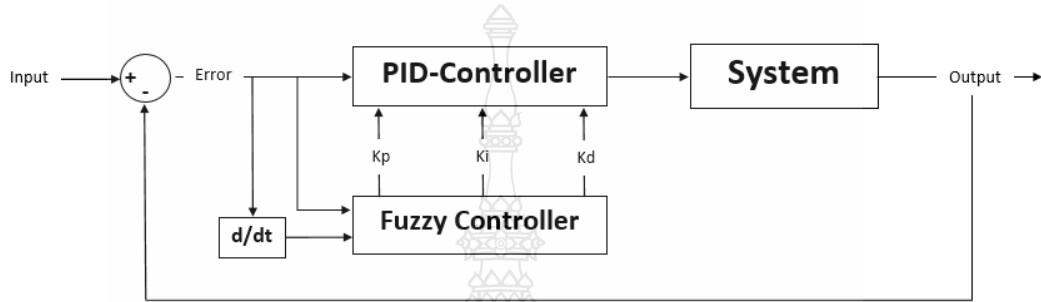
- 1) เป็นระบบที่มีเสถียรภาพสูงสามารถรองรับอินพุทที่มีความคลุมเครือได้หลากหลาย
- 2) มีความสะดวกในการปรับแต่งกฎที่ใช้ในการควบคุมเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นสำหรับการควบคุมให้มากยิ่งขึ้น
- 3) ไม่มีข้อจำกัดในส่วนของจำนวนอินพุทและเอาท์พุท ซึ่งทำให้สามารถออกแบบระบบได้อย่างหลากหลาย และมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีกด้วย

## 2.6 ตัวควบคุมพีไอดี+ฟัซซีแบบปรับตัวได้ (PID+Fuzzy Self Tuning) [15]

ส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญของระบบควบคุมอัตโนมัติ คือ ตัวควบคุม (Controller) ซึ่งก็มีมากมายหลายชนิดให้เลือกใช้งาน แต่ตัวควบคุมที่ยังคงได้รับความนิยมอย่างสูงก็คือตัวควบคุมแบบ พีไอดี (PID Controller) สาเหตุที่ทำให้ตัวควบคุมชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้ก็เนื่องจากความเรียบง่ายของโครงสร้างตัวควบคุม และความสามารถในการลดค่าความผิดพลาดได้หลายชนิดในตัวควบคุมเดียว ซึ่งมันจะทำงานได้ดีในช่วงการทำงานที่เราตั้งค่าไว้ แต่เมื่อใดก็ตามถ้าจุดทำงานของเราเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงหรือว่าค่าพารามิเตอร์บางตัวมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่แน่นอนเช่น มวลของระบบ, ความยาว และอื่นๆ จะทำให้ตัวควบคุมที่เราออกแบบไว้นั้นเริ่มทำงานไม่ได้หรือไม่สามารถทำงานได้เลย

ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหานี้ก็คือการที่จะทำให้สามารถปรับค่าอัตราขยายตัวควบคุมได้อย่างอัตโนมัติเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะต้องได้ค่าอัตราขยายในการควบคุมที่เหมาะสม โดยวิธีที่จะปรับค่านี้อาจต้องสัมพันธ์กับหลักการปรับค่าแบบแมนวลด้วย วิธีหนึ่งที่สามารถ

ทำได้คือการใช้หลักการของฟัซซีลอจิกเข้ามาช่วย เนื่องจากฟัซซีลอจิกเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถจำลองแนวคิดหรือพฤติกรรมของมนุษย์มาเป็นอัลกอริทึมทางคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี โดยมีหลักการทำงานก็คือจะมีการนำเอาค่าความผิดพลาดที่ได้จากระบบมาเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ และเมื่อมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นในส่วนนี้จะมีผลทำให้ค่าอัตราขยายของระบบมีการปรับตัวโดยอัตโนมัติ

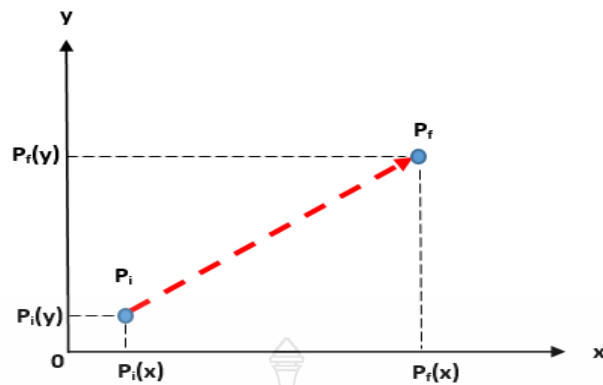


รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดี

หลักการงานของตัวควบคุมปรับค่าได้แบบฟัซซี-พีไอดี เริ่มจากทำการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี ให้ได้ค่าที่เหมาะสมก่อน จากนั้นตัวควบคุมฟัซซีจะรับค่าอินพุตเป็นค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดจากระบบมาทำการคำนวณหาอัตราขยายใหม่ และนำไปใช้กับตัวควบคุมพีไอดี โดยเมื่อระบบมีค่าความผิดพลาดเปลี่ยนแปลงไป ค่าอัตราขยายที่ได้ก็จะมีการปรับตามโดยอัตโนมัติเพื่อความเหมาะสมสำหรับการควบคุมในขณะนั้น

## 2.7 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) [16]

การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ในส่วนนี้จะใช้สำหรับกำหนดเส้นทางหลักซึ่งเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางระหว่างตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมายในแนวตรง โดยไม่ได้พิจารณาถึงสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ สำหรับสมการที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นของแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ ซึ่งในกรณีของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะพิจารณาเพียง 2 มิติเท่านั้น  $(x, y)$



รูปที่ 2.21 การสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ [16]

เริ่มจากการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์ ( $P_i$ ), ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ ( $P_f$ ), ความเร็วสูงสุด ( $V_{\max}$ ) และความเร่งสูงสุดที่ต้องการ ( $a_{\max}$ ) จากนั้นทำการคำนวณหาระยะทางระหว่าง 2 ตำแหน่ง ( $L$ ) ดังสมการที่ 2.10 และคำนวณหาระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่สำหรับช่วงการเร่ง ( $T_s$ ) และเวลาที่ใช้ทั้งหมด ( $T$ ) ดังสมการที่ 2.11 – 2.12

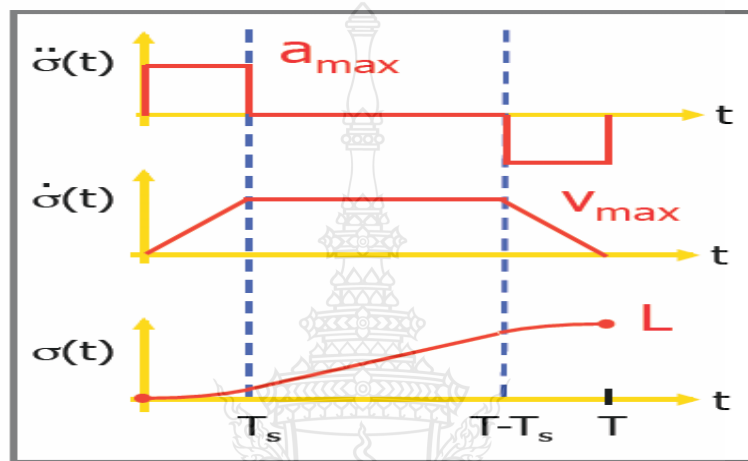
$$L = \|P_f - P_i\| \quad (2.10)$$

$$T_s = \frac{V_{\max}}{a_{\max}} \quad (2.11)$$

$$T = \frac{L \cdot a_{\max} + V_{\max}^2}{a_{\max} \cdot V_{\max}} \quad (2.12)$$

จากนั้นคำนวณหาค่าระยะทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ( $\sigma$ ) โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาคือ ที่  $t = 0$  ถึง  $T_s$ ,  $t = T_s$  ถึง  $T - T_s$  และ  $t = T - T_s$  ถึง  $T$  แสดงดังสมการที่ 2.13

$$\sigma(t) = \begin{cases} a_{\max} \cdot \frac{t^2}{2} & ; t \in [0, T_s] \\ V_{\max} \cdot t - \frac{V_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T_s, T - T_s] \\ -a_{\max} \cdot \frac{(t-T)^2}{2} + V_{\max} \cdot T - \frac{V_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T - T_s, T] \end{cases} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.22 ไคอะแกรมแสดงระยะทาง, ความเร็ว และความเร่งในการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ [16]

จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราในการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ (S) ดังสมการที่ 2.14 และจะได้สมการการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย เพื่อนำไปใช้งานกับหุ่นยนต์ แสดงดังสมการที่ 2.15

$$S = \frac{\sigma}{L} \quad (2.14)$$

$$P(s) = P_i + S \cdot (P_f - P_i) \quad (2.15)$$

## 2.8 การหาตำแหน่งและมุมหันของหุ่นยนต์ (Dead-Reckoning) [17]

Dead-Reckoning เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการคำนวณหาตำแหน่ง และมุมหันของหุ่นยนต์ โดยการอ้างอิงจากตำแหน่งและมุมหันเดิมของตัวหุ่นยนต์ กำหนดให้เป็นทีเวลาเท่ากับ k เพื่อใช้ใน

การบอกตำแหน่งใหม่ที่เวลาเท่ากับ  $k+1$  โดยใช้สมการการประมาณของออยเลอร์ (Euler Approximation) แสดงดังสมการที่ 2.16

$$\begin{aligned}x(k+1) &= x(k) + v(k)T_s \cdot \cos(\theta(k)) \\y(k+1) &= y(k) + v(k)T_s \cdot \sin(\theta(k)) \\ \theta(k+1) &= \theta(k) + \omega(k)T_s\end{aligned}\tag{2.16}$$

เมื่อ  $T_s$  คือ ระยะเวลาที่เปลี่ยนไปจากการคำนวณในรอบที่แล้ว โดย  $T_s = T_{k+1} - T_k$

จากสมการที่ 2.16 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งและมุมการหันเหได้จากมุมการหมุนของล้อหรือการนับจำนวนพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder's Pulse) ที่ติดตั้งอยู่กับมอเตอร์ล้อขับเคลื่อนทั้งสองข้างของหุ่นยนต์ แสดงดังสมการที่ 2.17

$$\begin{aligned}x(k+1) &= x(k) + \left( \frac{\pi D}{2} \cdot \frac{(\Delta T_L + \Delta T_R)}{T_w} \right) \cdot \cos(\theta(k)) \\y(k+1) &= y(k) + \left( \frac{\pi D}{2} \cdot \frac{(\Delta T_L + \Delta T_R)}{T_w} \right) \cdot \sin(\theta(k)) \\ \theta(k+1) &= \theta(k) + \left( \frac{\pi D}{dst} \cdot \frac{(\Delta T_R - \Delta T_L)}{T_w} \right)\end{aligned}\tag{2.17}$$

เมื่อ  $\Delta T_L$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ของมอเตอร์ที่ล้อขับเคลื่อนด้านซ้าย  
 $\Delta T_R$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ของมอเตอร์ที่ล้อขับเคลื่อนด้านขวา  
 $T_w$  คือ จำนวนนับของเอ็นโค้ดเดอร์เมื่อมอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ  
 $dst$  คือ ระยะระหว่างล้อขับเคลื่อนทั้งสองข้างของหุ่นยนต์  
 $D$  คือ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อขับเคลื่อน

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

| ขั้นตอนการดำเนินงาน                                       | เดือน-ปี          |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
|---|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
|   | ก.ย.-ต.ล.<br>2557 | พ.ย.-ธ.ล.<br>2557 | ม.ค.-<br>ก.พ.<br>2558 | มี.ค.-<br>เม.ย.<br>2558 | พ.ค.-<br>มิ.ย.<br>2558 | ก.ค.-<br>ส.ค.<br>2558 | ก.ย.-ต.ล.<br>2558 | พ.ย.-ธ.ล.<br>2558 | ม.ค.-<br>ก.พ.<br>2558 |
| ศึกษาและรวบรวมข้อมูล                                      |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| วิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์                    |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| ออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก                                 |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| ทดสอบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink             |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| สร้างโปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมการทำงานจริงด้วยโปรแกรม LabVIEW |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| ทดสอบการทำงานจริง   |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| วิเคราะห์และแก้ไขปัญหา                                    |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |
| สรุปผลและจัดพิมพ์เล่มรายงาน                               |                   |                   |                       |                         |                        |                       |                   |                   |                       |

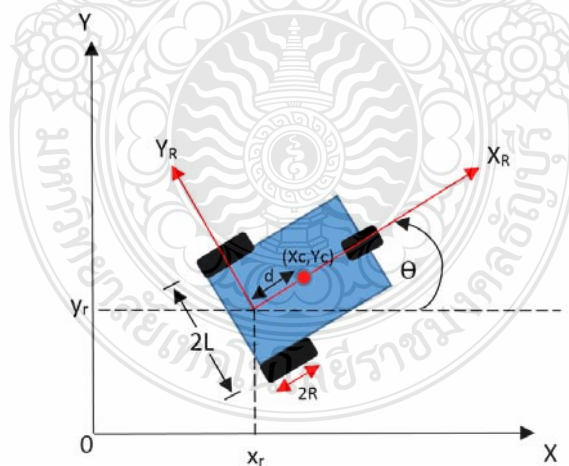


### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล
- 3.2.2 วิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์และสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
- 3.2.3 ออกแบบตัวควบคุมพีซีลอจิก
- 3.2.4 ทดสอบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
- 3.2.5 ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานจริงด้วยโปรแกรม LabVIEW
- 3.2.6 ทดสอบการทำงานจริง
- 3.2.7 วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น
- 3.2.8 สรุปผลการทดลอง

### 3.3 การหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model)

ในการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์จะใช้สมการลากรางจ์ โดยสามารถคำนวณหาได้จากพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ จากนั้นจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของสมการโมเดลของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.1 โมเดลของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์

| ตัวแปร | คำอธิบาย  | ขนาด                  | หน่วย             |
|--------|---|-----------------------|-------------------|
| $m_c$  | มวลของหุ่นยนต์                                  | 8                     | kg                |
| $m_w$  | มวลล้อของหุ่นยนต์                               | 0.6                   | kg                |
| $I_c$  | โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตั้งของหุ่นยนต์          | 0.48                  | kg·m <sup>2</sup> |
| $I_m$  | โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตั้งของล้อ               | $8.43 \times 10^{-4}$ | kg·m <sup>2</sup> |
| $I_w$  | โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนของล้อ               | 0.0017                | kg·m <sup>2</sup> |
| $d$    | ระยะจากศูนย์กลางระหว่างล้อถึงจุด CG ของหุ่นยนต์ | 0.15                  | m                 |
| $L$    | ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อทั้ง 2 ข้าง  | 0.25                  | m                 |
| $R$    | รัศมีของล้อ                                     | 0.075                 | m                 |

สมการลากรางจ์แสดงดังสมการที่ 3.1

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = B(q) \cdot \tau \quad (3.1)$$

กำหนดให้

$$q_1 = x_r = \text{ตำแหน่งของหุ่นยนต์บนแกน } x \text{ ของเฟรมอ้างอิง}$$

$$q_2 = y_r = \text{ตำแหน่งของหุ่นยนต์บนแกน } y \text{ ของเฟรมอ้างอิง}$$

$$q_3 = \theta = \text{มุมหันเหของหุ่นยนต์เทียบกับแกน } x \text{ ของเฟรมอ้างอิง}$$

$$q_4 = \theta_R = \text{มุมล้อขับเคลื่อนด้านขวาของหุ่นยนต์}$$

$$q_5 = \theta_L = \text{มุมล้อขับเคลื่อนด้านซ้ายของหุ่นยนต์}$$

โดยที่ค่า  $L$  หาได้จากสมการที่ 3.2

$$L = T - V \quad (3.2)$$

จากสมมุติฐานที่ว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นเรียบภายในตัวอาคารและไม่มีกำลังไถล ดังนั้น จะไม่เกิดพลังงานศักย์ของระบบ (Potential Energy) จึงพิจารณาให้  $V = 0$  จะได้สมการลากรางจ์ที่เป็นฟังก์ชันของ  $q$  ดังสมการที่ 3.3

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) = T_c + T_{wR} + T_{wL} \quad (3.3)$$

โดยที่  $T_c, T_{wR}$  และ  $T_{wL}$  คือ พลังงานจลน์ของตัวหุ่นยนต์, ล้อขับเคลื่อนด้านขวา และ ล้อขับเคลื่อนด้านซ้าย

พลังงานจลน์ของตัวหุ่นยนต์แสดงดังสมการที่ 3.4

$$T_c = \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}^2 \quad (3.4)$$

และพลังงานจลน์ล้อทั้ง 2 ข้างของหุ่นยนต์แสดงดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$T_{wR} = \frac{1}{2} m_w v_{wR}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_R^2 \quad (3.5)$$

$$T_{wL} = \frac{1}{2} m_w v_{wL}^2 + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_L^2 \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\dot{\theta}, \dot{\theta}_R$  และ  $\dot{\theta}_L$  คือ ความเร็วเชิงมุมของตัวหุ่นยนต์, ล้อขับเคลื่อนด้านขวา และ ล้อขับเคลื่อนด้านซ้าย

$v_c, v_{wR}$  และ  $v_{wL}$  คือ ความเร็วเชิงเส้นของตัวหุ่นยนต์, ล้อขับเคลื่อนด้านขวา และ ล้อขับเคลื่อนด้านซ้าย

ความเร็วทั้งหมด ( $v_c, v_{wR}, v_{wL}$ ) แสดงเป็นฟังก์ชันของ  $q$  โดยใช้สมการความเร็วของหุ่นยนต์ในเฟรมอ้างอิง (Inertial Frame) เข้ามาช่วย แสดงดังสมการที่ 3.7

$$v_i^2 = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 \quad (3.7)$$

เพราะฉะนั้นได้เป็น

$$\begin{aligned}x_c &= x_r + d \cdot \cos(\theta) \\y_c &= y_r + d \cdot \sin(\theta) \\x_{wR} &= x_r + L \cdot \sin(\theta) \\y_{wR} &= y_r - L \cdot \cos(\theta) \\x_{wL} &= x_r - L \cdot \sin(\theta) \\y_{wL} &= y_r + L \cdot \cos(\theta)\end{aligned}\tag{3.8}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 3.8 ได้เป็น

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= \dot{x}_r - d \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta} \\\dot{y}_c &= \dot{y}_r + d \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta} \\\dot{x}_{wR} &= \dot{x}_r + L \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta} \\\dot{y}_{wR} &= \dot{y}_r + L \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta} \\\dot{x}_{wL} &= \dot{x}_r - L \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta} \\\dot{y}_{wL} &= \dot{y}_r - L \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta}\end{aligned}\tag{3.9}$$

แทนค่าสมการที่ 3.9 ลงในสมการที่ 3.7 ได้

$$\begin{aligned}v_c^2 &= \dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 \\&= (\dot{x}_r - d \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + (\dot{y}_r + d \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 \\v_{wR}^2 &= \dot{x}_{wR}^2 + \dot{y}_{wR}^2 \\&= (\dot{x}_r + L \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + (\dot{y}_r + L \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 \\v_{wL}^2 &= \dot{x}_{wL}^2 + \dot{y}_{wL}^2 \\&= (\dot{x}_r - L \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + (\dot{y}_r - L \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2\end{aligned}\tag{3.10}$$

นำสมการที่ 3.10 แทนค่าลงในสมการที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 ได้เป็น

$$\begin{aligned}
T_c &= \frac{1}{2} m_c \left\{ (\dot{x}_r - d \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + (\dot{y}_r + d \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 \right\} \\
&\quad + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}^2 \\
T_{wR} &= \frac{1}{2} m_w \left\{ (\dot{x}_r + L \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + (\dot{y}_r + L \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 \right\} \\
&\quad + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_R^2 \\
T_{wL} &= \frac{1}{2} m_w \left\{ (\dot{x}_r - L \cdot \cos(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 + (\dot{y}_r - L \cdot \sin(\theta) \cdot \dot{\theta})^2 \right\} \\
&\quad + \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_L^2
\end{aligned} \tag{3.11}$$

ทำการกระจายเทอมกำลังสองและจัดรูปสมการที่ 3.11 ได้

$$\begin{aligned}
T_c &= \frac{1}{2} m_c (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2) + m_c d \dot{\theta} (\dot{y}_r \cdot \cos(\theta) - \dot{x}_r \cdot \sin(\theta)) \\
&\quad + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 (m_c d^2 + I_c) \\
T_{wR} &= \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2) + m_w L \dot{\theta} (\dot{x}_r \cdot \cos(\theta) - \dot{y}_r \cdot \sin(\theta)) \\
&\quad + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 (m_w L^2 + I_m) + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_R^2 \\
T_{wL} &= \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2) + m_w L \dot{\theta} (-\dot{x}_r \cdot \cos(\theta) - \dot{y}_r \cdot \sin(\theta)) \\
&\quad + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 (m_w L^2 + I_m) + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_L^2
\end{aligned} \tag{3.12}$$

หาพลังงานจลน์รวม (Total Kinetic Energy) ของระบบได้

$$\begin{aligned}
T &= T_c + T_{wR} + T_{wL} \\
T &= \frac{1}{2} m (\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2) + m_c d \dot{\theta} (\dot{y}_r \cdot \cos(\theta) - \dot{x}_r \cdot \sin(\theta)) \\
&\quad + \frac{1}{2} I_w (\dot{\theta}_R^2 + \dot{\theta}_L^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2
\end{aligned} \tag{3.13}$$

เมื่อ  $m = m_c + 2m_w$   
 $I = I_c + m_c d^2 + 2m_w L^2 + 2I_m$

แทนค่าสมการที่ 3.13 ( $L = T$ ) ลงในสมการที่ 3.1 ได้

$$\begin{aligned}
 q_1 = x_r : \quad m\ddot{x}_r - md\ddot{\theta} \cdot \sin(\theta) - md\dot{\theta}^2 \cdot \cos(\theta) &= 0 \\
 q_2 = y_r : \quad m\ddot{y}_r - md\ddot{\theta} \cdot \cos(\theta) - md\dot{\theta}^2 \cdot \sin(\theta) &= 0 \\
 q_3 = \theta : \quad I\ddot{\theta} - md\ddot{x}_r \sin(\theta) + md\ddot{y}_r \cos(\theta) &= 0 \\
 q_4 = \theta_R : \quad I_w \ddot{\theta}_R &= \tau_R \\
 q_5 = \theta_L : \quad I_w \ddot{\theta}_L &= \tau_L
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

เมื่อทำการคำนวณหาค่าต่างๆ แทนค่าในสมการลากรางจ์และจัดเรียงเทอมใหม่ทำให้ได้สมการโมเดลของหุ่นยนต์ดังสมการที่ 3.15

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q) \cdot \tau \tag{3.15}$$

โดยที่

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -md \cdot \sin(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & m & md \cdot \cos(\theta) & 0 & 0 \\ -md \cdot \sin(\theta) & md \cdot \cos(\theta) & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -md\dot{\theta} \cdot \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -md\dot{\theta} \cdot \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการกำหนดเวกเตอร์  $\eta$  ดังสมการที่ 3.16

$$\eta = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

จากสมการ โมเดลจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Kinematics Model) สามารถเขียนอธิบายได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R \cdot \cos(\theta) & R \cdot \cos(\theta) \\ R \cdot \sin(\theta) & R \cdot \sin(\theta) \\ R & -R \\ \frac{L}{2} & \frac{L}{2} \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้นดังนี้

$$\dot{q} = S(q) \cdot \eta \quad (3.18)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 3.18 ได้

$$\ddot{q} = \dot{S}(q) \cdot \eta + S(q) \cdot \dot{\eta} \quad (3.19)$$

แทนค่าสมการที่ 3.18 และ 3.19 ลงในสมการที่ 3.15 ได้สมการใหม่คือ

$$M(q) \cdot [\dot{S}(q) \cdot \eta + S(q) \cdot \dot{\eta}] + V(q, \dot{q}) [S(q) \cdot \eta] = B(q) \cdot \tau \quad (3.20)$$

ทำการกระจายเทอมต่างๆ ในสมการที่ 3.20 ได้เป็น

$$M(q) \cdot S(q) \cdot \dot{\eta} + [M(q) \cdot \dot{S}(q) + V(q, \dot{q}) \cdot S(q)] \cdot \dot{\eta} = B(q) \cdot \tau \quad (3.21)$$

และจัดรูปสมการที่ 3.21 โดยการคูณด้วย  $S^T(q)$  ได้

$$S^T(q) \cdot M(q) \cdot S(q) \cdot \dot{\eta} + S^T(q) \cdot [M(q) \cdot \dot{S}(q) + V(q, \dot{q}) \cdot S(q)] \cdot \dot{\eta} = S^T(q) \cdot B(q) \cdot \tau \quad (3.22)$$

จากสมการที่ 3.22 กำหนดให้

$$\begin{aligned} \bar{M}(q) &= S^T(q) \cdot M(q) \cdot S(q) \\ \bar{V}(q, \dot{q}) &= S^T(q) \cdot M(q) \cdot \dot{S}(q) + S^T(q) V(q, \dot{q}) \cdot S(q) \\ \bar{B}(q) &= S^T(q) \cdot B(q) \end{aligned} \quad (3.23)$$

เพราะฉะนั้นได้สมการโมเดลพลศาสตร์ของหุ่นยนต์เป็น

$$\bar{M}(q) \cdot \dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q}) \cdot \eta = \bar{B}(q) \cdot \tau \quad (3.24)$$

โดยที่

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{R^2}{4L^2} (mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2} (mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2} (mL^2 - I) & I_w + \frac{R^2}{4L^2} (mL^2 + I) \end{bmatrix}$$

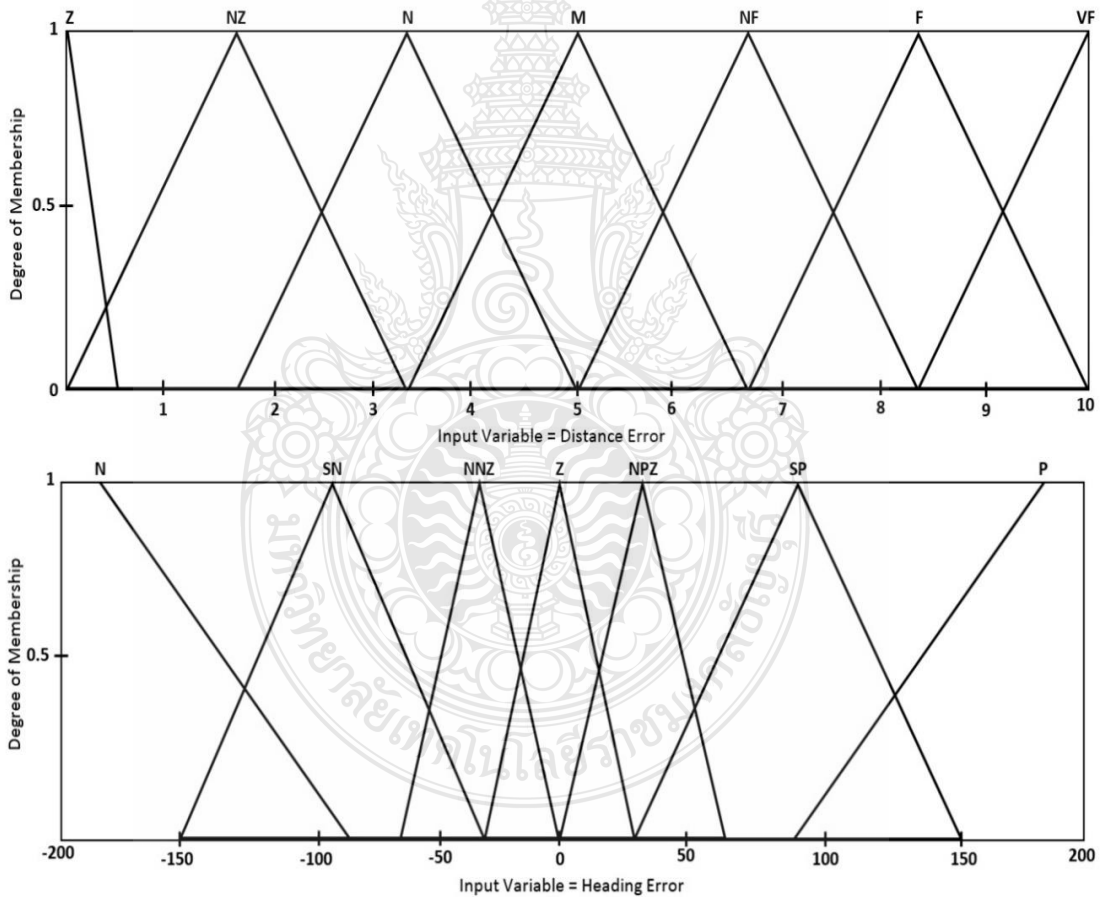
$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L} m_c d \dot{\theta} \\ -\frac{R^2}{2L} m_c d \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}, \dot{\eta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix}$$

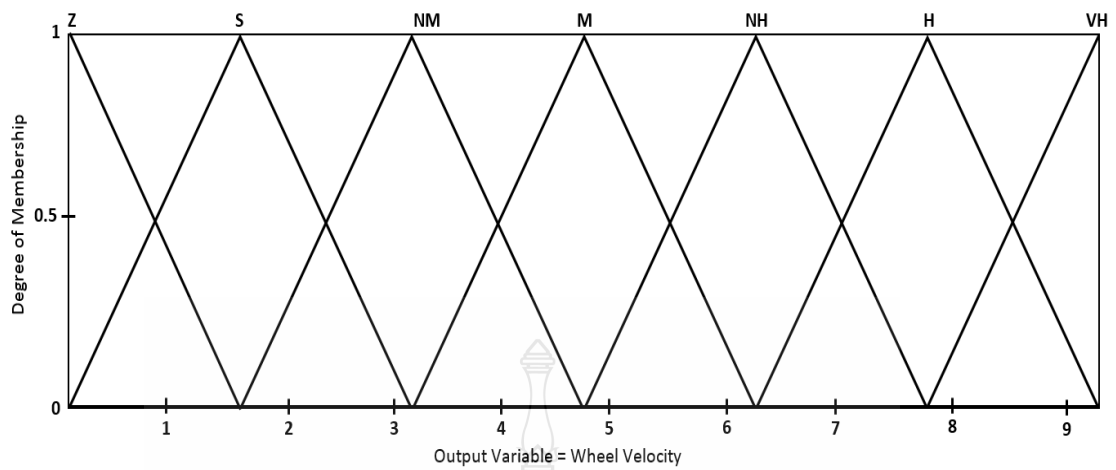


### 3.4 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

3.4.1 Fuzzy Tracking ใช้ในการควบคุมการสร้างเส้นทางเพื่อไปยังเป้าหมายให้กับหุ่นยนต์ โดยมีค่าอินพุต 2 ตัว คือค่าความผิดพลาดของระยะทางระหว่างหุ่นยนต์กับเป้าหมาย (Distance Error) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 7 ตัวประกอบด้วย Z, NZ, N, M, NF, F, VF และอินพุตตัวที่ 2 คือค่าความผิดพลาดของมุมระหว่างหุ่นยนต์กับเป้าหมาย (Heading Error) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 7 ตัว ประกอบด้วย N, SN, NNZ, Z, NPZ, SP, P แสดงดังรูปที่ 3.2 เมื่อประมวลผลแล้วจะได้ค่าเอาต์พุตออกมาเป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนซ้ายและขวา ( $V_R, V_L$ ) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 7 ตัวประกอบด้วย Z, S, NM, M, NH, H, VH แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ Fuzzy Tracking

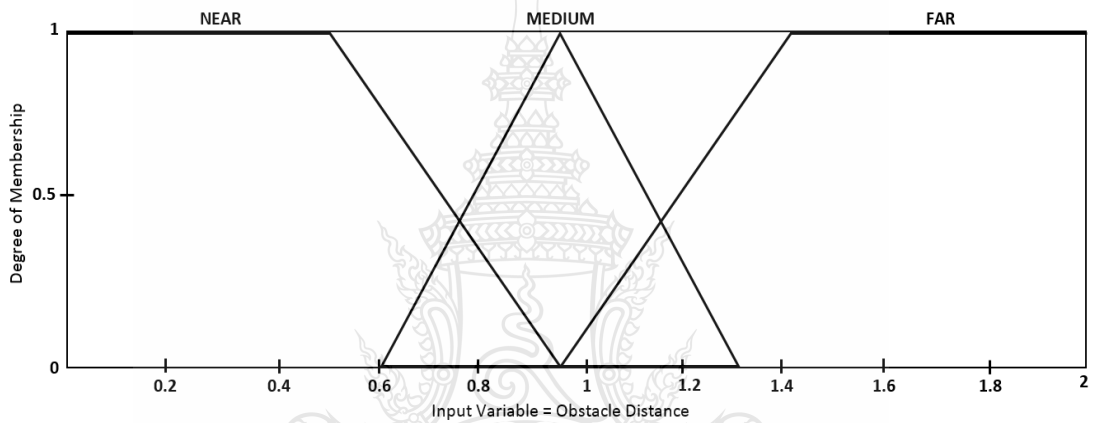


รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอ้าท์พุทของ Fuzzy Tracking

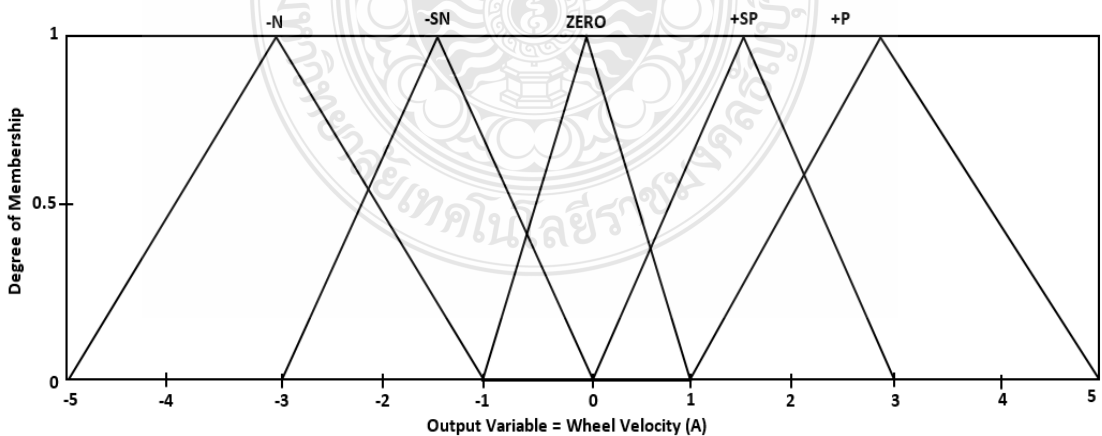
ตารางที่ 3.3 กฎที่ใช้ในการควบคุมของ Fuzzy Tracking

| Angle Error | N    | SN   | NNZ  | Z    | NPZ  | SP   | P    |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Dis. Error  |      |      |      |      |      |      |      |
| Z           | L=Z  | L=Z  | L=Z  | L=Z  | L=NM | L=NM | L=M  |
|             | R=M  | R=NM | R=NM | R=Z  | R=Z  | R=Z  | R=Z  |
| NZ          | L=S  | L=S  | L=Z  | L=S  | L=M  | L=NH | L=H  |
|             | R=H  | R=NH | R=M  | R=S  | R=Z  | R=S  | R=S  |
| N           | L=S  | L=S  | L=S  | L=NM | L=NH | L=H  | L=VH |
|             | R=VH | R=H  | R=NH | R=NM | R=S  | R=S  | R=S  |
| M           | L=S  | L=S  | L=S  | L=M  | L=H  | L=H  | L=VH |
|             | R=VH | R=H  | R=H  | R=M  | R=S  | R=S  | R=S  |
| NF          | L=S  | L=S  | L=NM | L=NH | L=NH | L=H  | L=VH |
|             | R=VH | R=H  | R=NH | R=NH | R=NM | R=S  | R=S  |
| F           | L=S  | L=S  | L=M  | L=H  | L=NH | L=H  | L=VH |
|             | R=VH | R=H  | R=NH | R=H  | R=M  | R=S  | R=S  |
| VF          | L=S  | L=S  | L=NM | L=VH | L=NH | L=H  | L=VH |
|             | R=VH | R=H  | R=NH | R=VH | R=NM | R=S  | R=S  |

3.4.2 Fuzzy Avoidance จะใช้ในการควบคุมเพื่อสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ใหม่ให้กับหุ่นยนต์ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ โดยมีค่าอินพุตเป็นระยะของสิ่งกีดขวางที่ตรวจพบได้ (Obstacle Distance) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ด้านหน้า, ด้านซ้าย และด้านขวาของหุ่นยนต์ แสดงดังรูปที่ 3.6 มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 3 ตัวประกอบด้วย NEAR, MEDIUM, FAR แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยจะได้เอาที่พุดออกมาเป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนซ้ายและขวา ( $V_R, V_L$ ) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 5 ตัว ประกอบด้วย P+, SP+, ZERO, SN-, N- แสดงดังรูปที่ 3.5



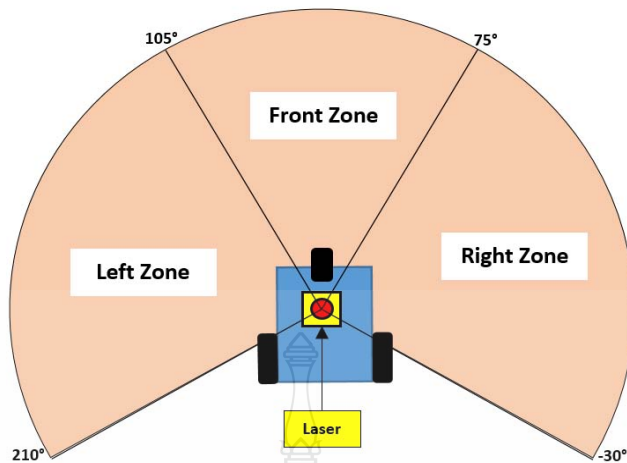
รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ Fuzzy Avoidance



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุดของ Fuzzy Avoidance

ตารางที่ 3.4 กฎที่ใช้ในการควบคุมของ Fuzzy Avoidance

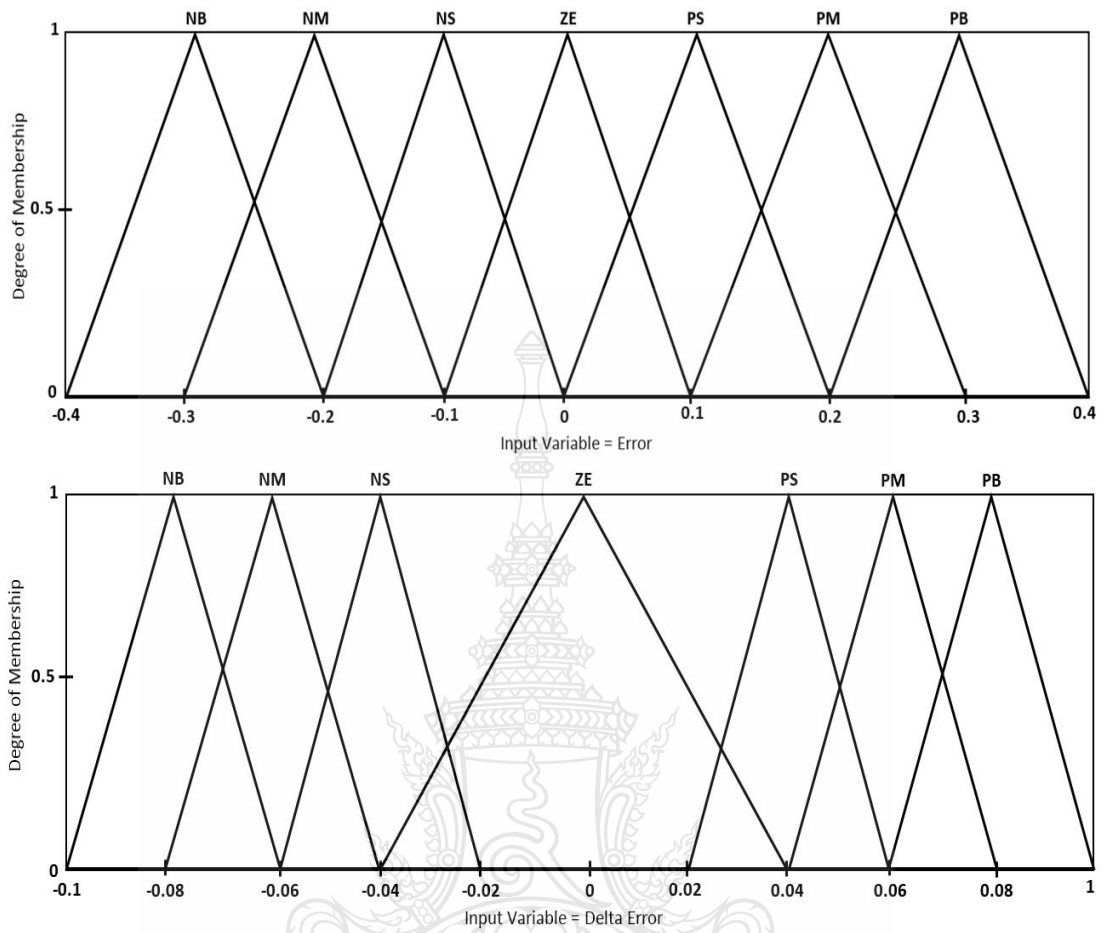
| Input Obstacle Distance |       |       | Output Wheel Vel. |            |
|-------------------------|-------|-------|-------------------|------------|
| LEFT                    | FRONT | RIGHT | LEFT Vel.         | RIGHT Vel. |
| N                       | N     | N     | N                 | N          |
| N                       | N     | M     | SP                | SN         |
| N                       | N     | F     | SP                | N          |
| N                       | M     | N     | SN                | SN         |
| N                       | M     | M     | SP                | SN         |
| N                       | M     | F     | SP                | Z          |
| N                       | F     | N     | SN                | SP         |
| N                       | F     | M     | SP                | Z          |
| N                       | F     | F     | SP                | Z          |
| M                       | N     | N     | SN                | SP         |
| M                       | N     | M     | N                 | SN         |
| M                       | N     | F     | Z                 | N          |
| M                       | M     | N     | Z                 | SP         |
| M                       | M     | M     | Z                 | SP         |
| M                       | M     | F     | SP                | Z          |
| M                       | F     | N     | Z                 | SP         |
| M                       | F     | M     | SP                | SP         |
| M                       | F     | F     | P                 | SP         |
| F                       | N     | N     | N                 | SP         |
| F                       | N     | M     | N                 | Z          |
| F                       | N     | F     | N                 | P          |
| F                       | M     | N     | Z                 | SP         |
| F                       | M     | M     | Z                 | SP         |
| F                       | M     | F     | Z                 | P          |
| F                       | F     | N     | Z                 | P          |
| F                       | F     | M     | SP                | P          |
| F                       | F     | F     | P                 | P          |



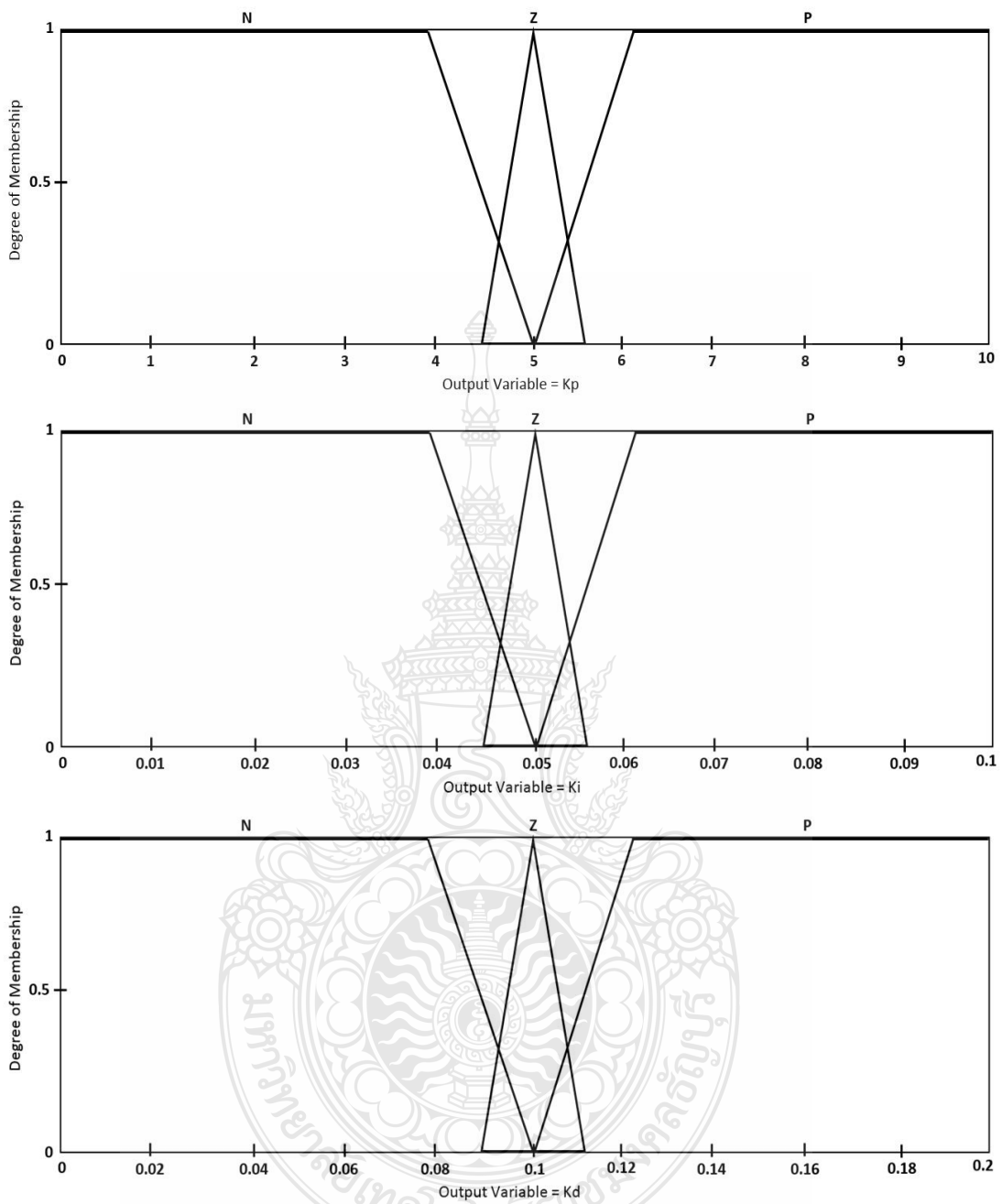
รูปที่ 3.6 การแบ่งโซนรับค่าอินพุตระยะของสิ่งกีดขวางจากเลเซอร์สแกนเนอร์

3.4.3 PID+Fuzzy Self Tuning ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมตัวหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้อย่างถูกต้องมากขึ้น โดยทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี (PID-Controller) ซึ่งตัวมันจะนำค่าความผิดพลาด (Error) ของระบบเข้ามาคำนวณซึ่งเมื่อระบบมีค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนไปตัวควบคุมจะทำการปรับค่าอัตราขยายโดยอัตโนมัติ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการปรับขยายหรือลดสัญญาณที่จะนำไปควบคุมหุ่นยนต์ต่อไป

ค่าอินพุตของ PID+Fuzzy Self Tuning มี 2 ตัวคือค่าความผิดพลาด (Error) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB และอินพุตตัวที่ 2 คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด (Delta Error) ตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB แสดงดังรูปที่ 3.7 สำหรับเอาต์พุตที่ได้จากระบบจะเป็นค่าเกน ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) เพื่อนำไปใช้กับตัวควบคุมพีไอดี (PID-Controller) มีตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 3 ตัวคือ N, Z, P แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ PID+Fuzzy Self Tuning



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอ้าท์พุทของ PID+Fuzzy Self Tuning

ตารางที่ 3.5 กฎที่ใช้ในการควบคุมของ PID+Fuzzy Self Tuning

| Delta-<br>Error | Error | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|-----------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|
|                 | Kp    |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Ki    |    |    |    |    |    |    |    |
|                 | Kd    |    |    |    |    |    |    |    |
| NB              | P     | Z  | N  | N  | N  | Z  | P  |    |
|                 | N     | P  | P  | N  | P  | P  | N  |    |
|                 | P     | Z  | N  | N  | N  | Z  | P  |    |
| NM              | P     | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |    |
|                 | N     | Z  | P  | P  | P  | Z  | N  |    |
|                 | P     | Z  | Z  | N  | Z  | Z  | P  |    |
| NS              | P     | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |    |
|                 | N     | N  | Z  | P  | Z  | N  | N  |    |
|                 | P     | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |    |
| ZE              | P     | P  | P  | Z  | P  | P  | P  |    |
|                 | N     | N  | N  | Z  | N  | N  | N  |    |
|                 | P     | P  | P  | Z  | P  | P  | P  |    |
| PS              | P     | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |    |
|                 | N     | N  | Z  | P  | Z  | N  | N  |    |
|                 | P     | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |    |
| PM              | P     | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |    |
|                 | N     | Z  | P  | P  | P  | Z  | N  |    |
|                 | P     | Z  | Z  | N  | Z  | Z  | P  |    |
| PB              | P     | Z  | N  | N  | P  | Z  | P  |    |
|                 | N     | P  | P  | P  | N  | P  | N  |    |
|                 | P     | Z  | N  | N  | P  | Z  | P  |    |



### 3.5 การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

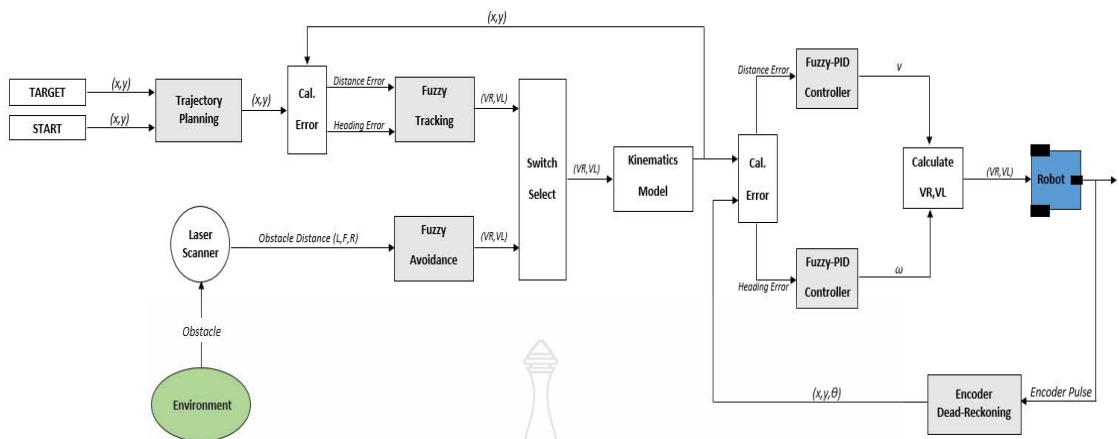
ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เริ่มจากกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและเป้าหมายที่ต้องการเข้าไปคำนวณเพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับหุ่นยนต์ (Trajectory Planning) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความผิดพลาดของระยะทาง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์ตามสมการที่ 3.25 และ 3.26

$$\text{Distance Error} = \sqrt{(x_{ref} - x_{cur})^2 + (y_{ref} - y_{cur})^2} \quad (3.25)$$

$$\text{Heading Error} = \text{atan2}((y_{ref} - y_{cur}), (x_{ref} - x_{cur})) - \theta_{cur} \quad (3.26)$$

เมื่อ  $x_{ref}, y_{ref}$  คือ ตำแหน่งอ้างอิงของเส้นทางการเคลื่อนที่  
 $x_{cur}, y_{cur}, \theta_{cur}$  คือ ตำแหน่งและมุมหันเหปัจจุบันของหุ่นยนต์

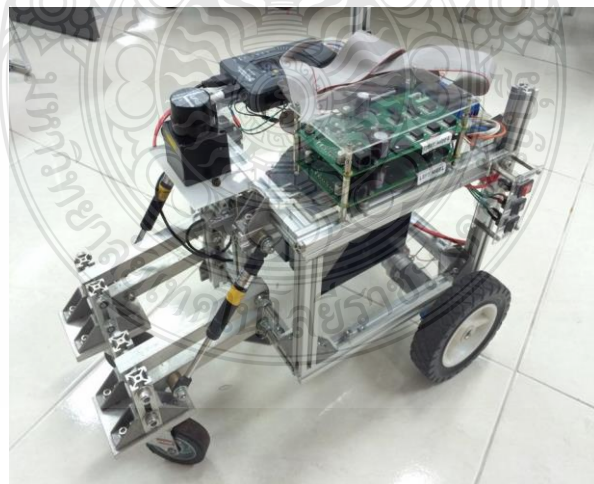
ค่าความผิดพลาดของระยะทางและมุมหันเหจะถูกนำไปใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Tracking) ซึ่งจะได้เอาต์พุตออกมาเป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้างของหุ่นยนต์ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นตัวควบคุมฟัซซีสำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Fuzzy Avoidance) รับสัญญาณเป็นระยะของสิ่งกีดขวางจากเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยเอาต์พุตจะได้เป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้างเช่นเดียวกัน ตัวควบคุมฟัซซีทั้ง 2 ตัวนี้จะทำงานและส่งเอาต์พุตที่ได้ไปยังโมเดลจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Kinematics Model) เพื่อคำนวณหาตำแหน่งและมุมหันเหสำหรับนำไปใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตาม และเมื่อได้ตำแหน่งและมุมหันเหอ้างอิงจากโมเดลจลนศาสตร์ (Kinematics Model) แล้วจะนำไปคำนวณหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) เทียบกับตัวหุ่นยนต์จริงอีกครั้ง แล้วนำค่าความผิดพลาดไปเป็นอินพุตของตัวควบคุมพีไอดี+ฟัซซี (PID+Fuzzy Self Tuning) จะได้เป็นความเร็วแบบเชิงเส้น ( $v$ ) และเชิงมุมของหุ่นยนต์ ( $\omega$ ) จากนั้นทำการแปลงให้เป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนด้านซ้ายและขวาเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ โดยไดอะแกรมการควบคุมการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ไลอะแกรมการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

### 3.6 โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของหุ่นยนต์

ลักษณะโครงสร้างและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวหุ่นยนต์และมอเตอร์ (Zhengke) ที่ติดตั้งอยู่กับล้อขับเคลื่อน 2 ข้าง, ตัวประมวลผลกลาง (NI MyRIO), เซ็นเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์ (Hokuyo), มอเตอร์ไคร์ฟ (Accelus) และแบตเตอรี่สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของหุ่นยนต์และอุปกรณ์ต่างๆ

3.5.1 ตัวประมวลผลกลาง เป็นของบริษัท National Instrument รุ่น NI MyRIO ภายในประกอบด้วย Dual-Core ARM Cortex A9 เป็นเรียลไทม์โปรเซสเซอร์ และ Xilinx FPGA โดยสามารถเชื่อมต่อผ่านบัสต่างๆ และ เซ็นเซอร์ภายนอกได้ มีพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณดิจิทัล, อนาล็อก, PWM, เอ็น-โค้ดเดอร์ และการสื่อสารด้วยโปรโตคอล SPI, I2C หรือ UART สามารถโปรแกรมการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW และสื่อสารกับคอมพิวเตอร์หลักผ่าน Wifi ได้



รูปที่ 3.11 ตัวประมวลผลกลาง NI MyRIO [18]

3.5.2 เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner) เป็นของบริษัท HOKUYO AUTOMATIC CO., LTD. รุ่น URG-04LX-UG01 เป็นเลเซอร์สแกนเนอร์ขนาดเล็กใช้สำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวาง มีช่วงการสแกนอยู่ที่ 20 – 5600 มิลลิเมตร, 240 องศา และความละเอียด 0.36 องศา เชื่อมต่อและส่งข้อมูลด้วย USB Cable ที่ความเร็วสูงสุด 10 Hz



รูปที่ 3.12 เลเซอร์สแกนเนอร์ รุ่น URG-04LX-UG01 [19]

3.5.3 มอเตอร์ไคร์ฟ เป็นของบริษัท Copley Controls รุ่น ASC-055-18 ใช้แรงดันไฟ 20-55 โวลท์ สามารถควบคุมตำแหน่ง ความเร็วและแรงบิดได้ละเอียด โดยจะรับสัญญาณการควบคุมมาจาก หน่วยประมวลผลกลาง จากนั้นมอเตอร์ไคร์ฟจะควบคุมการจ่ายสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์เพื่อ ควบคุมความเร็ว



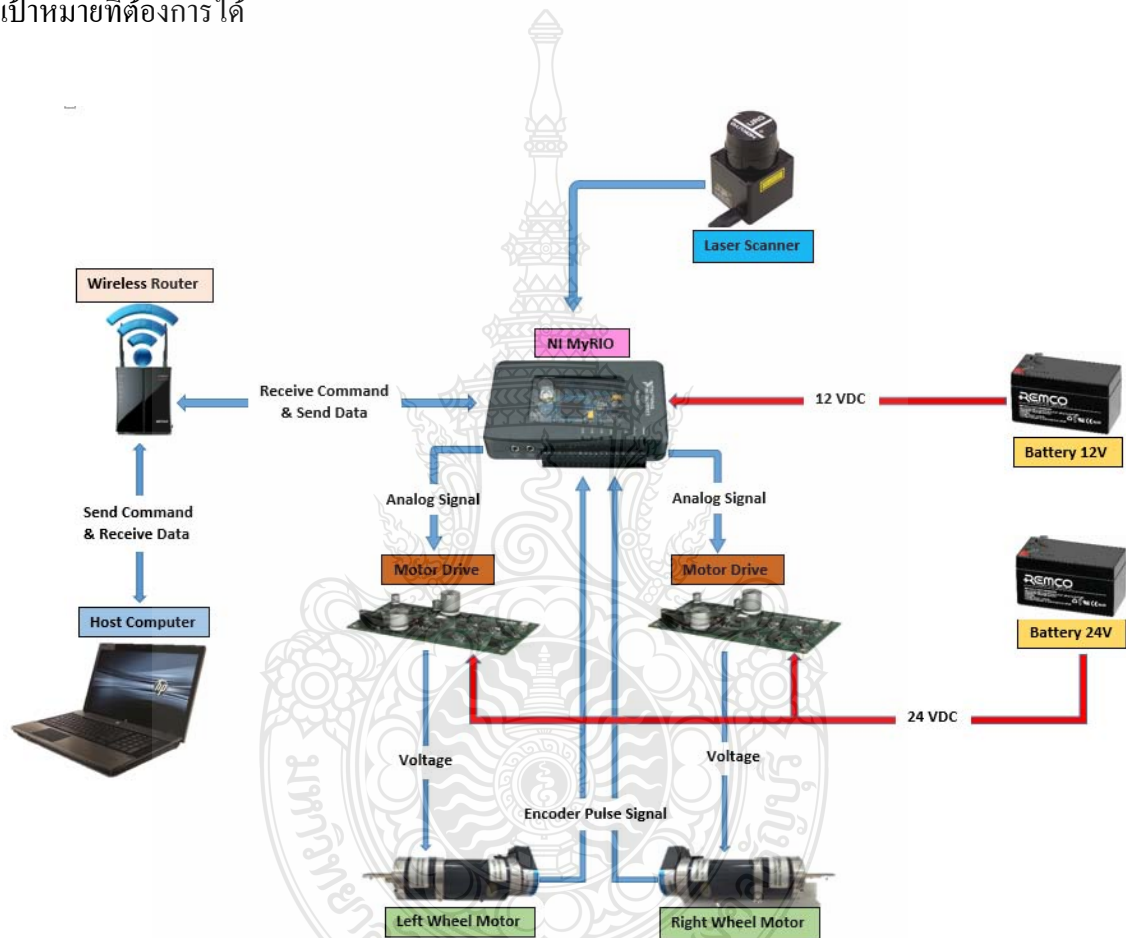
รูปที่ 3.13 มอเตอร์ไคร์ฟ รุ่น ASC-055-18 [20]

3.5.4 ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ เป็นของบริษัท Zhengke รุ่น ZGX38REE ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 24 โวลท์ในการขับเคลื่อน ความเร็วรอบสูงสุด 5500 รอบต่อนาที อัตราทดเกียร์ 22 : 1 พร้อมทั้งติดตั้ง เ็นโค้ดเดอร์รุ่น HKT3006-301C1-500B-5E ความละเอียด 500 พัลส์ต่อรอบ เพื่อใช้ในการวัด ตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 3.14 ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น ZGX38REE [21]

3.5.5 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยคอมพิวเตอร์หลักจะใช้ในการเขียน โปรแกรมควบคุมและติดต่อสื่อสารกับตัวประมวลผลกลางของหุ่นยนต์ ผ่าน Wireless Router ซึ่งตัวประมวลผลกลางจะรับสัญญาณตำแหน่งของสิ่งกีดขวางจากเลเซอร์สแกนเนอร์เพื่อนำมาประมวลผลสำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง จากนั้นจะส่งสัญญาณควบคุมไปยังมอเตอร์ไครฟ์เพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนของล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้าง เพื่อให้ตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้



รูปที่ 3.15 แผนผังอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานของหุ่นยนต์

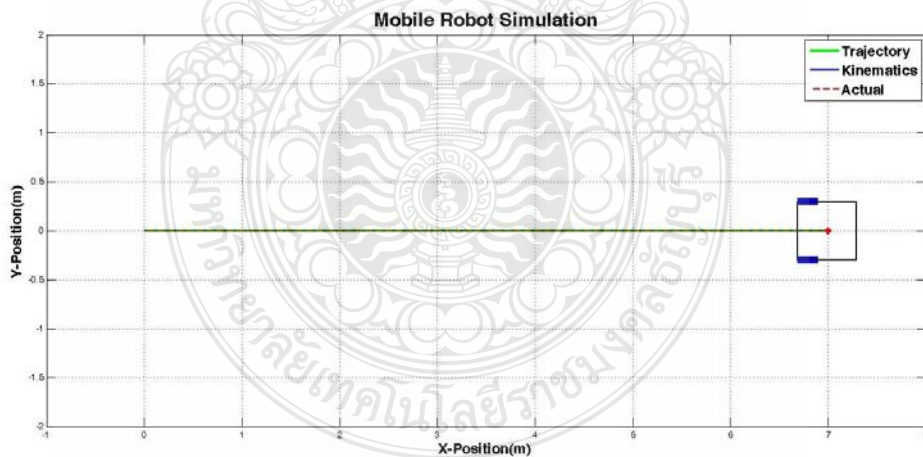
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

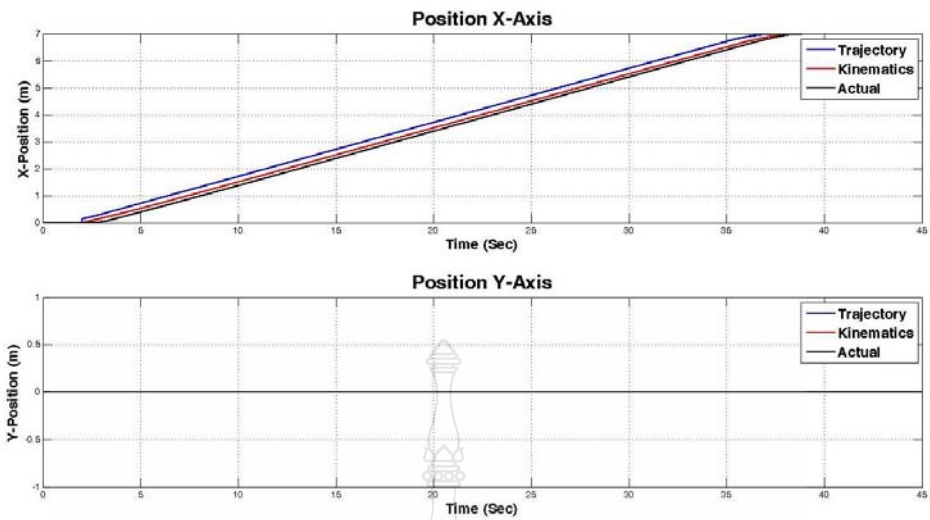
สำหรับการทดสอบการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์นั้นแบ่งออกเป็นการจำลองจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของตัวหุ่นยนต์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink และการทดสอบกับตัวหุ่นยนต์จริงโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ในการควบคุม ซึ่งเป็นการทดสอบทั้งแบบมีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่

#### 4.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่

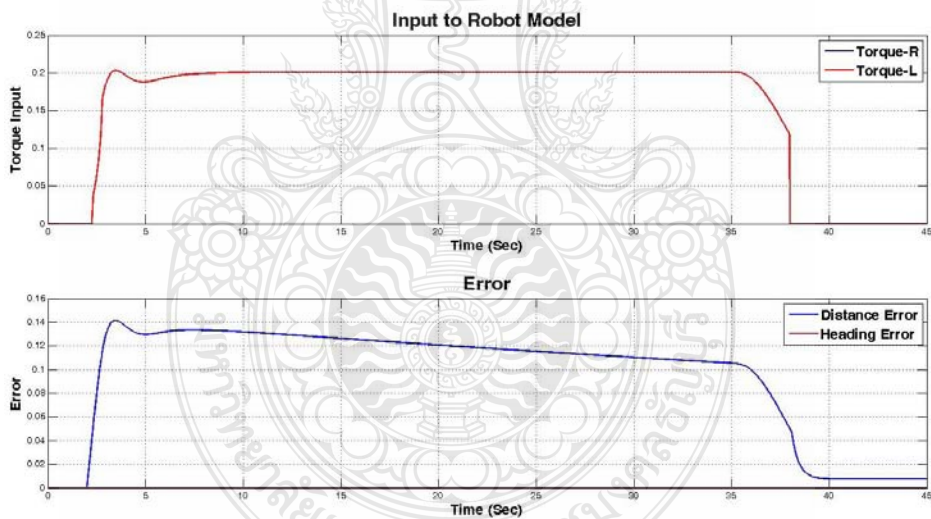
4.1.1 การทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านของหุ่นยนต์ในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์อยู่ที่ (0, 0)



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

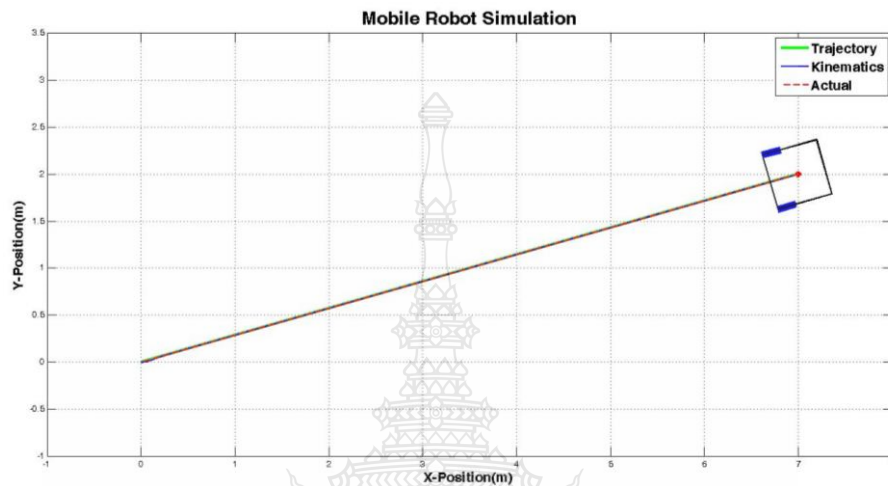


รูปที่ 4.2 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

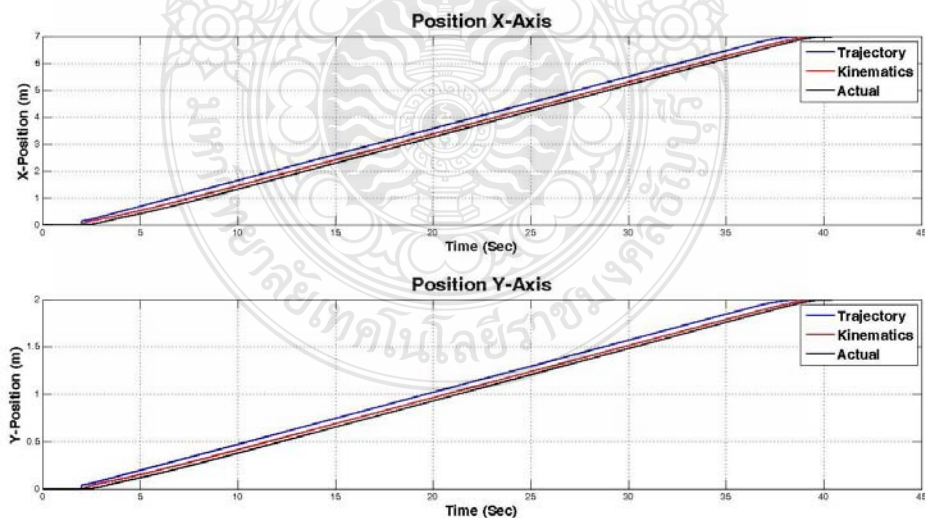


รูปที่ 4.3 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่ จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 0)

4.1.2 การทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่เฉียงขึ้นเมื่อเทียบกับด้านหน้าตัวหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2) กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์อยู่ที่ (0, 0)

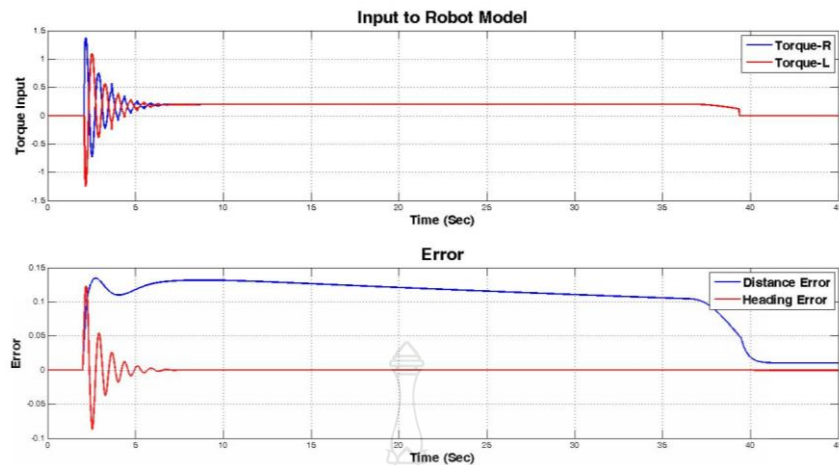


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงขึ้นเมื่อเทียบกับด้านหน้าของตัวหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.5 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)



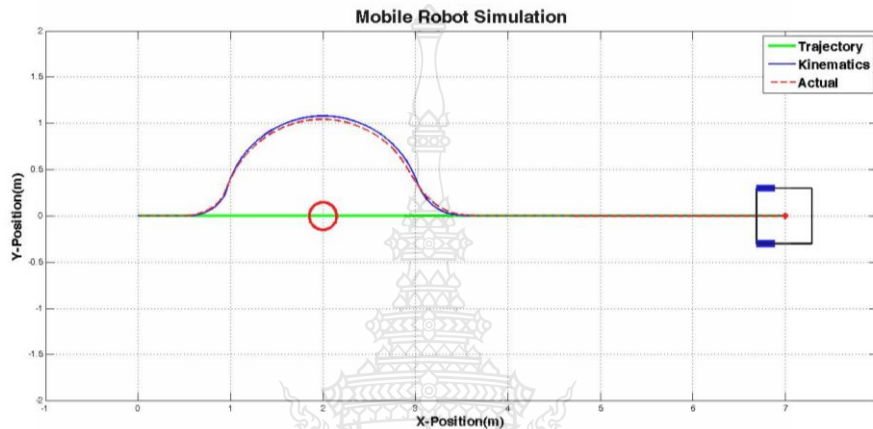


**รูปที่ 4.6** ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จากผลการจำลอง การเคลื่อนที่กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 2)

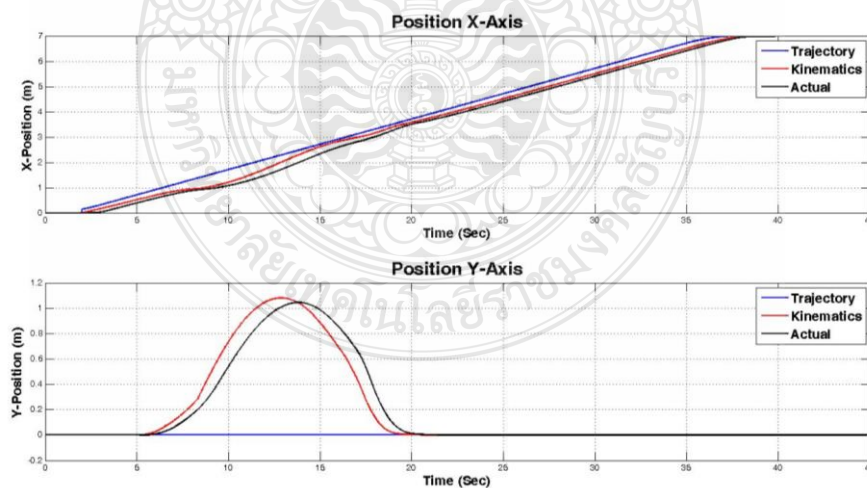
จากรูปที่ 4.1 และ 4.4 แสดงผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบไม่มีสิ่งกีดขวางการไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยแสดงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory) กำหนดความเร็วสูงสุดและความเร่งสูงสุดในการสร้างเส้นทางเป็น  $0.2 \text{ m/s}$  และ  $0.07 \text{ m/s}^2$  ตามลำดับ, เส้นทางที่ได้จากตัวควบคุมพีชซีลอจิก และเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ (Actual) โดยรูปที่ 4.2 และ 4.5 แสดงตำแหน่งของการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมและตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์จริงเทียบกับเวลา ซึ่งเห็นได้ว่าจะมีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่หลักก่อนจากนั้นตัวควบคุมพีชซีลอจิกจะสร้างเส้นทางตามเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย สังเกตได้จากค่าของตำแหน่งในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับเวลา ซึ่งหุ่นยนต์จะเข้าถึงและหยุดยังตำแหน่งเป้าหมาย และรูปที่ 4.3 และ 4.6 แสดงค่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Dynamics Model) เทียบกับเวลา โดยเมื่อตำแหน่งเป้าหมายอยู่ในแนวตรงค่าอินพุตที่ให้กับล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้างจะเพิ่มขึ้นเท่าๆกัน สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่เดินทางในแนวตรงของหุ่นยนต์และค่อยๆลดลงเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมาย และเมื่อเป้าหมายอยู่ในแนวเฉียงขณะเริ่มเคลื่อนที่จะมีการปรับค่าอินพุตของล้อทั้ง 2 ข้างให้แตกต่างกันเพื่อหันเหตัวหุ่นยนต์ให้ไปตามเส้นทางที่สร้างขึ้น รวมถึงค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) เทียบกับเวลา โดยเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางค่าความผิดพลาดจะคงที่ประมาณ  $0.15 \text{ m}$  และค่อยๆลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าถึงเป้าหมายที่ต้องการ

## 4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 และ 2 ชั้น

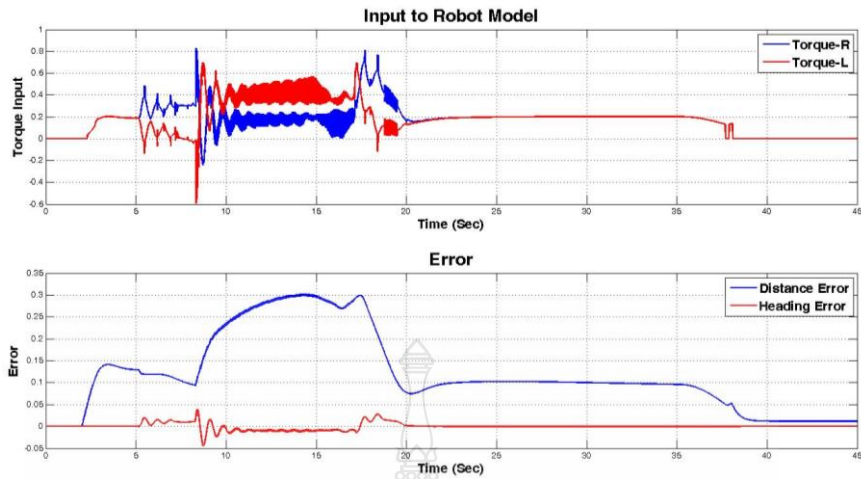
4.2.1 การทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านของหุ่นยนต์ในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 ชั้น ที่ตำแหน่ง (2, 0) ไปเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

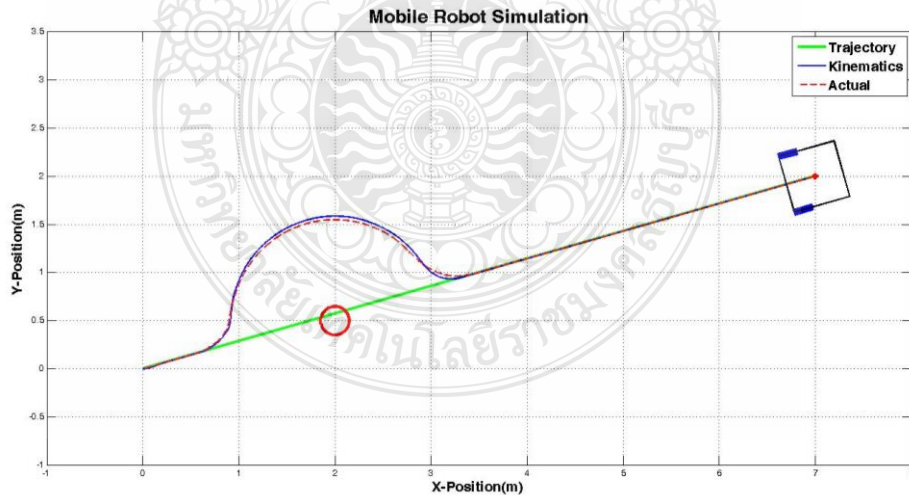


รูปที่ 4.8 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

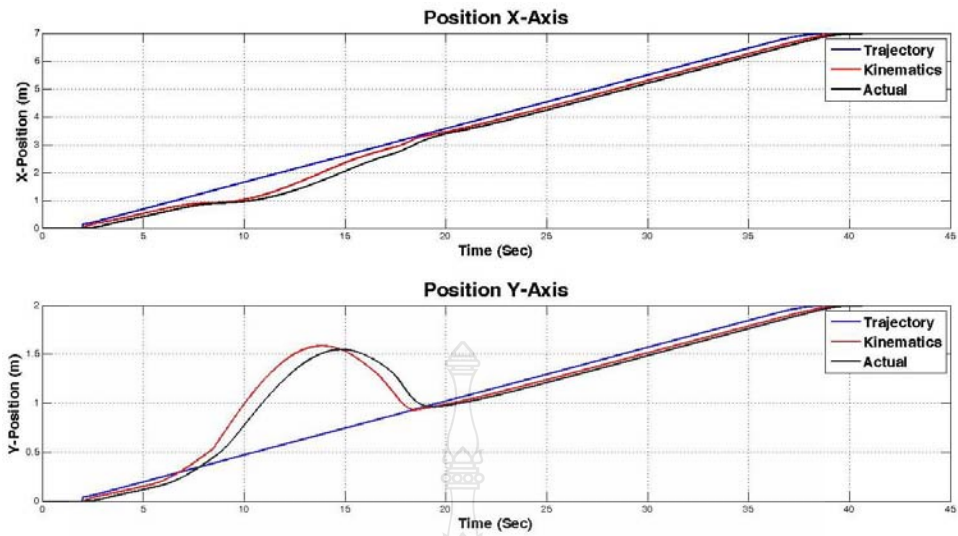


รูปที่ 4.9 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จากผลการจำลอง การเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 0)

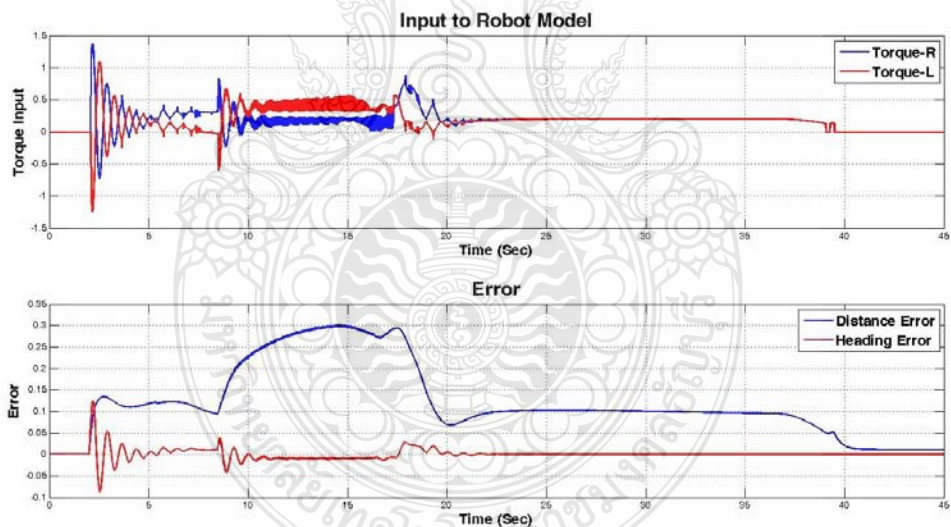
4.2.2 การทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 ชั้น ที่ตำแหน่ง (2, 0.5) โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่เฉยขึ้นเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 ชั้น ที่ตำแหน่ง (2, 0.5) ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)

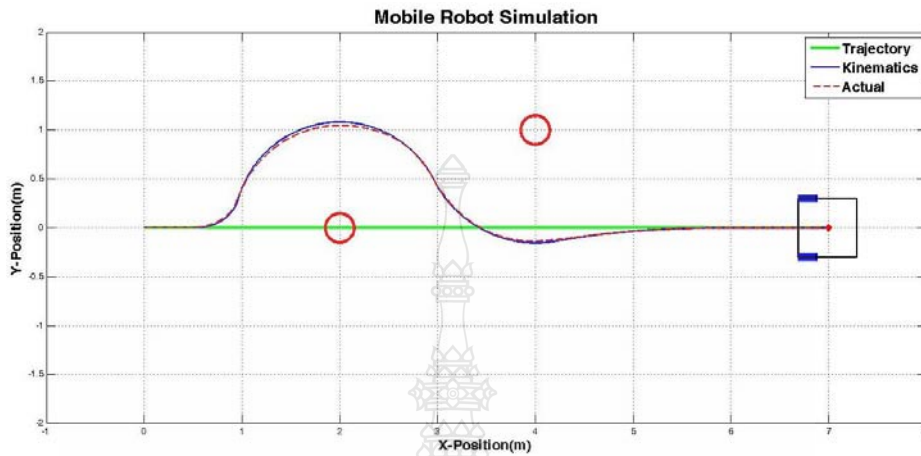


รูปที่ 4.11 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลอง การเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชิ้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)

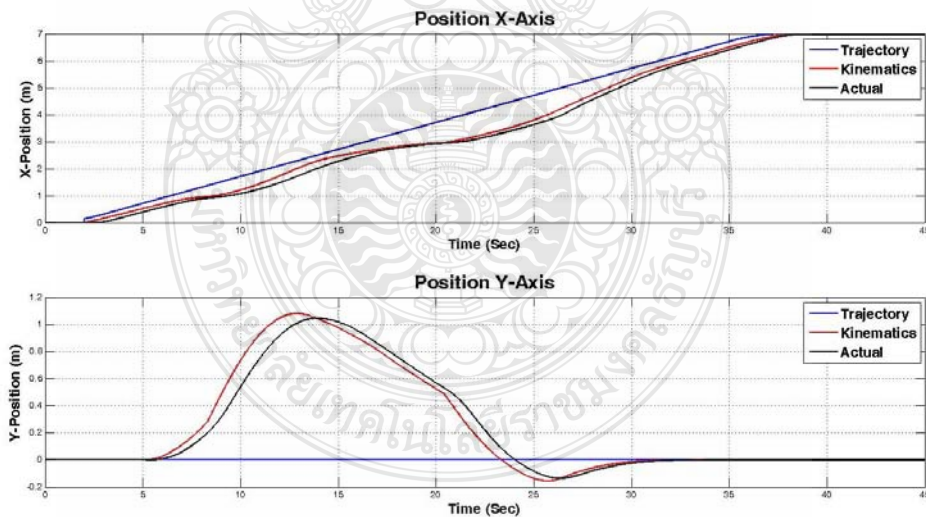


รูปที่ 4.12 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จาก ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชิ้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 2)

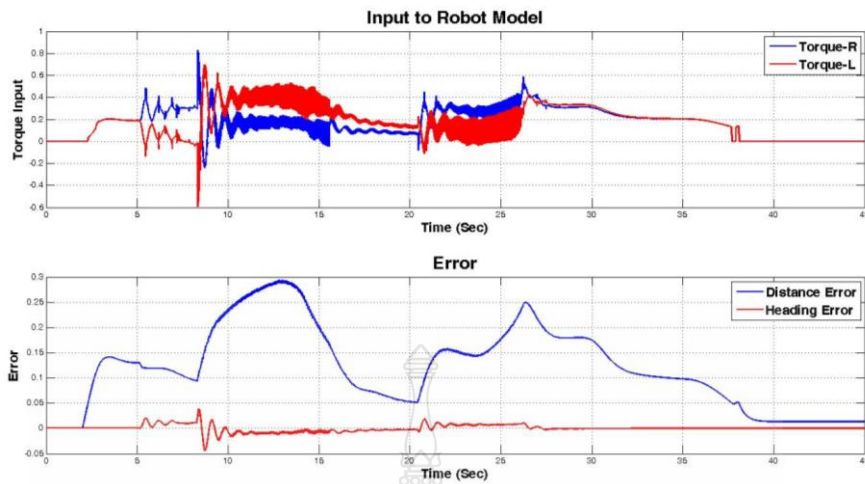
4.2.3 การทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) และ (4, 1) โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านของหุ่นยนต์ในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้น ที่ตำแหน่ง (2, 0) และ (4, 1) ไปเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

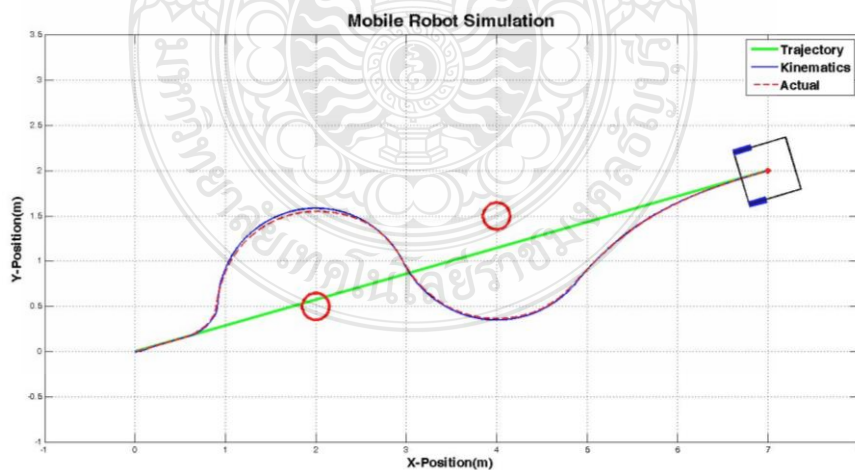


รูปที่ 4.14 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

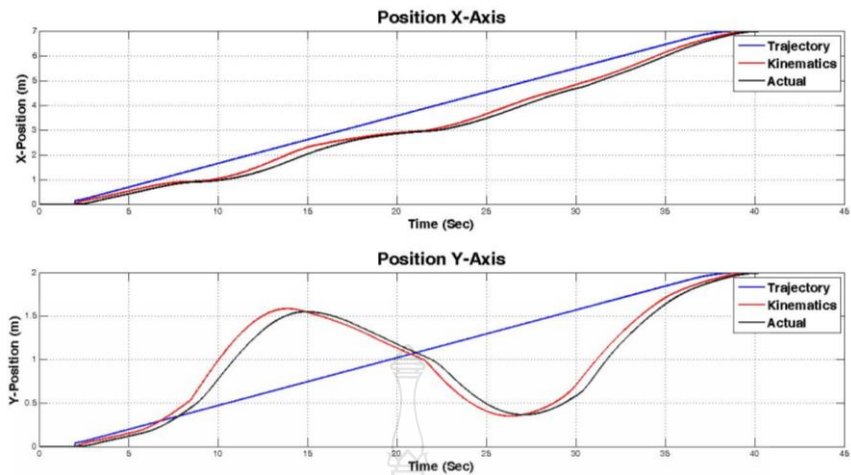


รูปที่ 4.15 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 0)

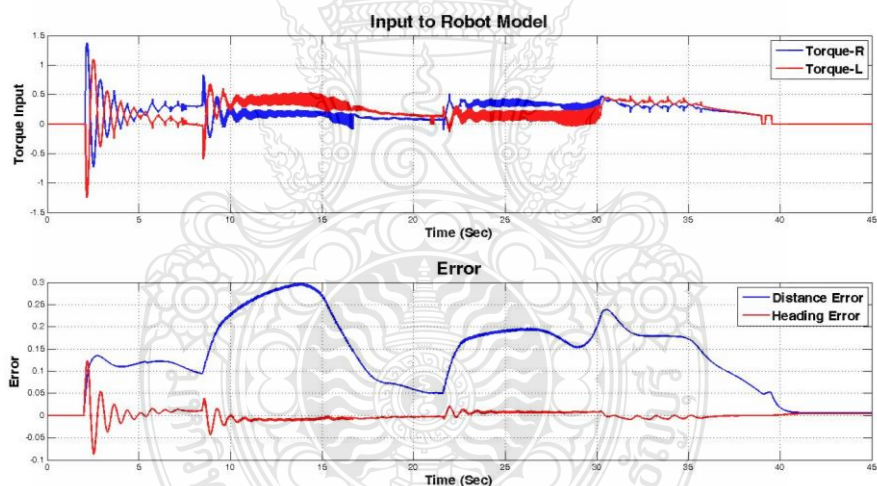
4.2.4 การทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0.5) และ (4, 1.5) โดยมีตำแหน่งเป้าหมายเฉียงขึ้นเมื่อเทียบกับด้านของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้น ที่ตำแหน่ง (2, 0.5) และ (4, 1.5) ไปเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.17 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการจำลอง การเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)

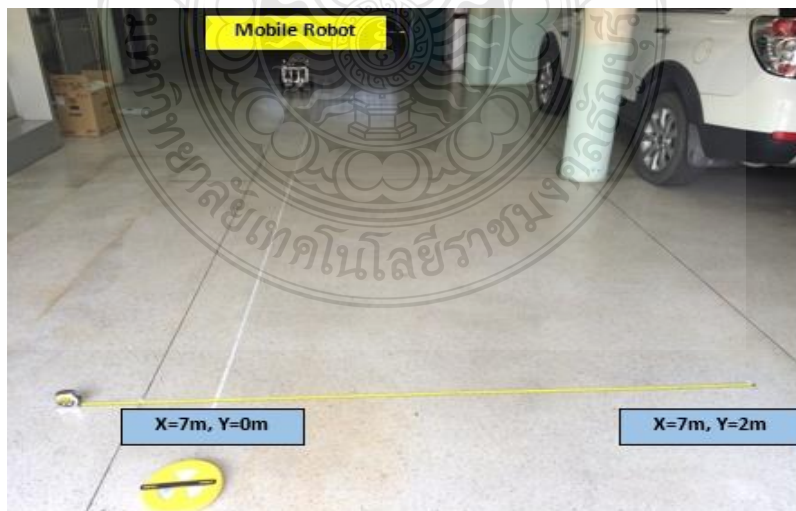


รูปที่ 4.18 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับ โมเดลของหุ่นยนต์ (Torque) และค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) ของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่จาก ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (7, 2)

จากรูปที่ 4.7, 4.10, 4.13 และ 4.16 แสดงผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แบบมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 และ 2 ชั้น ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยแสดงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory) กำหนดความเร็วสูงสุดและความเร่งสูงสุดในการสร้างเส้นทางเป็น 0.2 m/s

และ  $0.07 \text{ m/s}^2$  ตามลำดับ, เส้นทางที่ได้จากตัวควบคุมพีชซีลอจิก ซึ่งเมื่อมีการตรวจพบสิ่งกีดขวางจะมีการสร้างเส้นทางใหม่เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเพื่อหลบหลีก และเส้นทางเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ (Actual) โดยรูปที่ 4.8, 4.11, 4.14 และ 4.17 แสดงตำแหน่งของการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่จากตัวควบคุมและตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์จริงเทียบกับเวลา ซึ่งขณะเริ่มต้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามเส้นทางหลักก่อน และเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางจะมีการสร้างเส้นทางใหม่เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตาม และเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางแล้วจะกลับเข้าสู่เส้นทางหลักเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมาย, รูปที่ 4.9, 4.12, 4.15 และ 4.18 แสดงค่าสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับโมเดลของหุ่นยนต์ (Dynamics Model) เทียบกับเวลาโดยค่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเข้าใกล้สิ่งกีดขวางเพื่อควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางใหม่ที่สร้างขึ้นสำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้น สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 4.7, 4.10, 4.13 และ 4.16 จากนั้นกลับเข้าสู่เส้นทางหลักเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางแล้วและค่าสัญญาณอินพุตจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าถึงตำแหน่งเป้าหมาย รวมถึงค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่ (Distance Error) เทียบกับเวลา ซึ่งขณะหุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางจะมีค่าสูงขึ้นและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการ

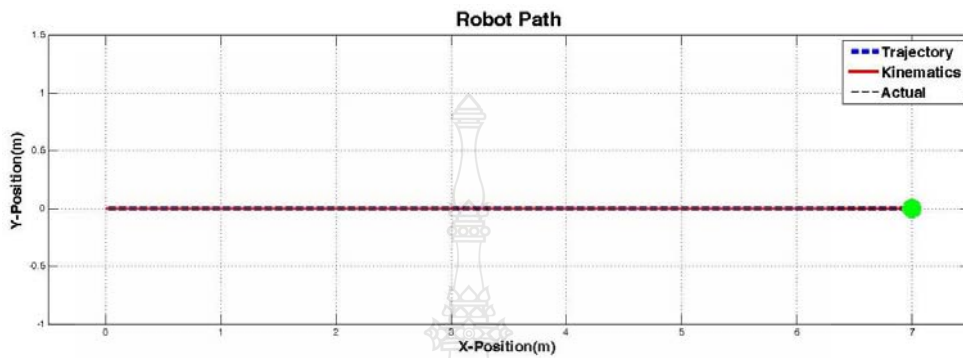
#### 4.3 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่



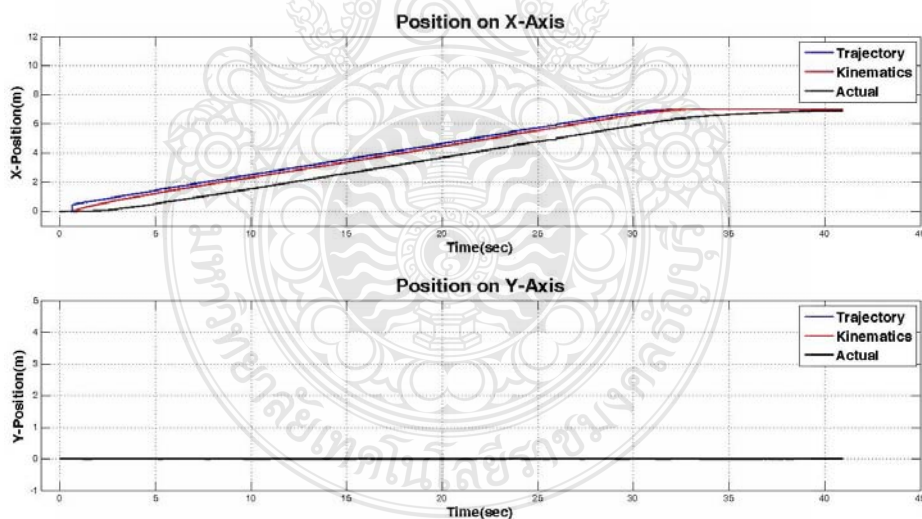
รูปที่ 4.19 สภาพแวดล้อมการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



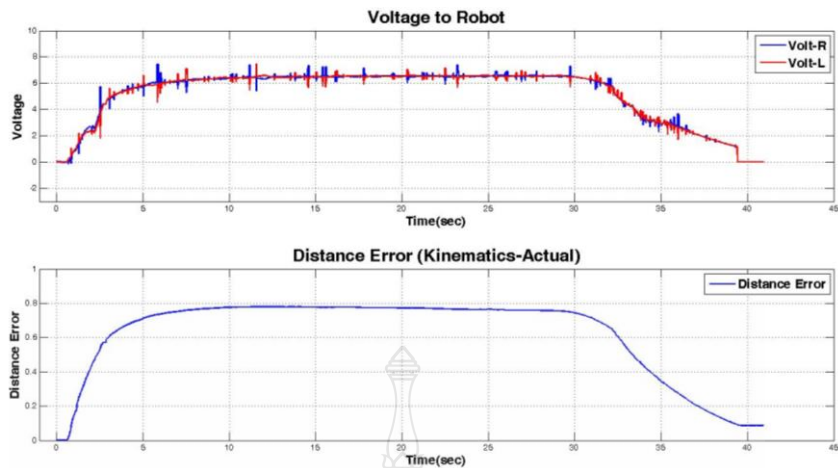
4.3.1 การทดสอบเคลื่อนที่จริงไปยังตำแหน่งเป้าหมายกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหน้าของตัวหุ่นยนต์ในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0) กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์อยู่ที่ (0, 0)



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการไปยังเป้าหมายในแนวตรงด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 0)

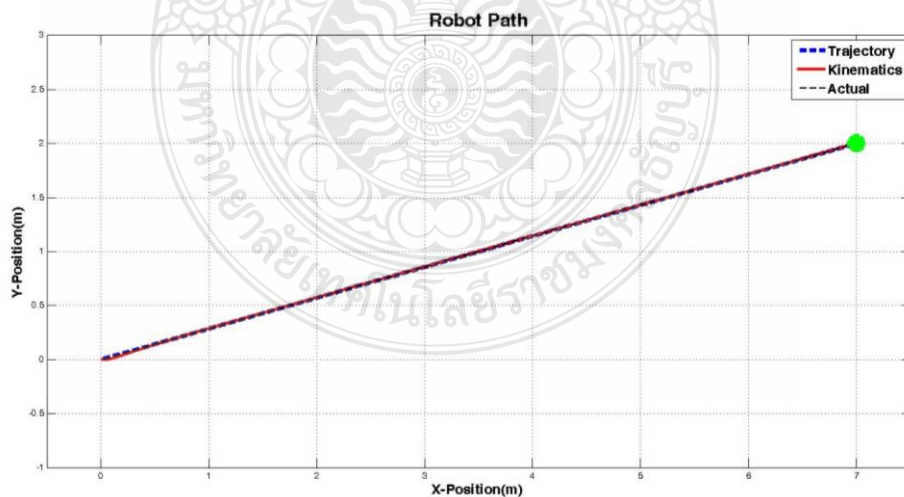


รูปที่ 4.21 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

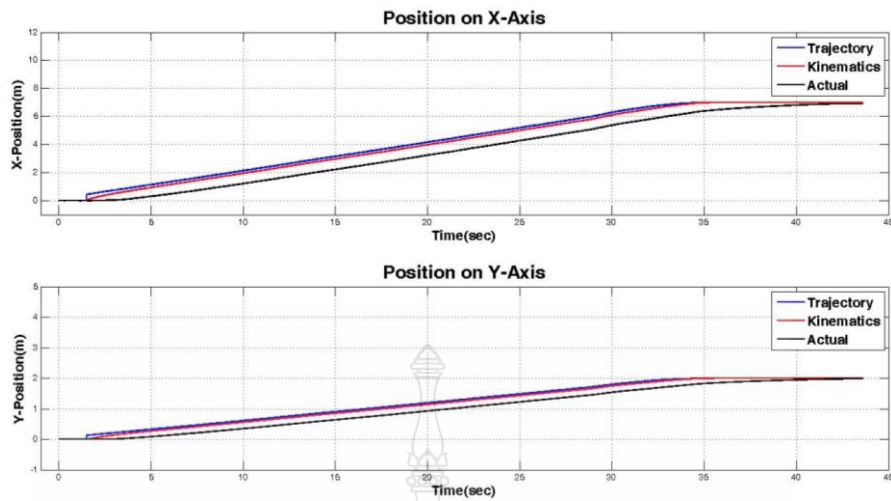


รูปที่ 4.22 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

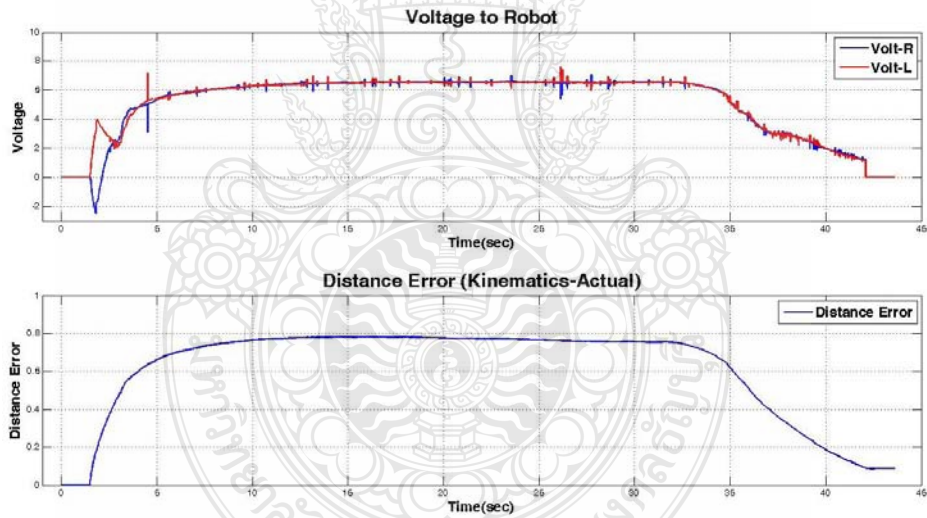
4.3.2 การทดสอบเคลื่อนที่จริงไปยังตำแหน่งเป้าหมายกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง โดยมีตำแหน่งเป้าหมายอยู่เฉียงขึ้นเมื่อเทียบกับด้านหน้าของตัวหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2) กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์อยู่ที่ (0, 0)



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางการไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.24 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบ การเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงขึ้นที่ตำแหน่ง (7, 2)

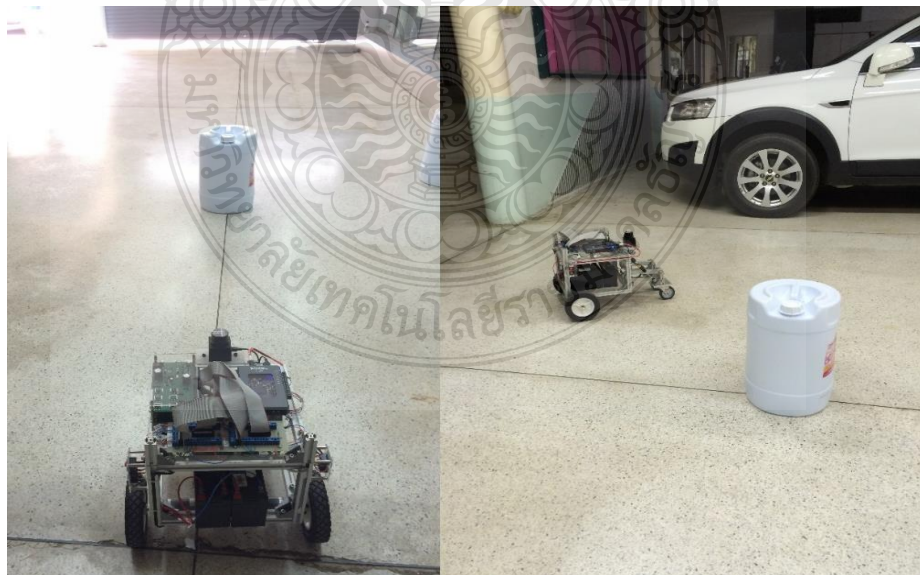


รูปที่ 4.25 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของ หุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีไม่มี สิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)

จากรูปที่ 4.19 แสดงสภาพแวดล้อมจริงบริเวณภายในอาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ พร้อมทั้งมีการวัดระยะตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการไว้ที่

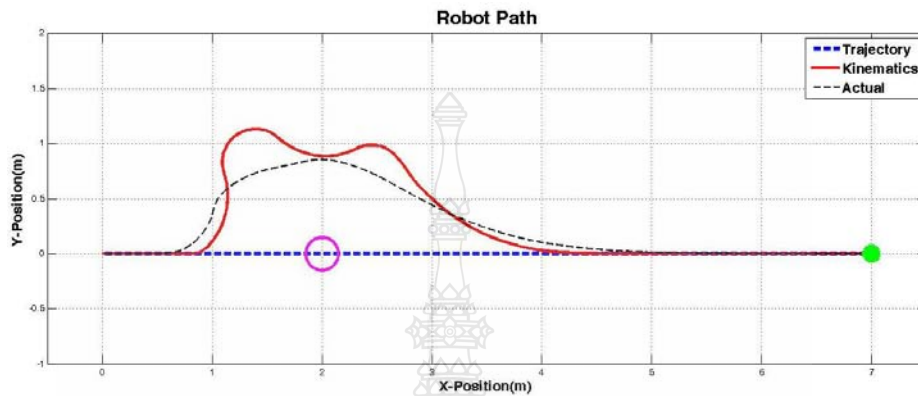
(7, 0) และ (7, 2) ซึ่งรูปที่ 4.20 และ 4.23 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์แบบไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยแสดงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory), เส้นทางที่ได้จากตัวควบคุมพีซีลอคจิก และเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ (Actual) ซึ่งทำการเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์เอ็นโคไดเซอร์ที่ติดตั้งไว้กับตัวหุ่นยนต์และทำการแปลงให้เป็นตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์ (Dead-Reckoning) เทียบกับตำแหน่งเริ่มต้น โดยรูปที่ 4.21 และ 4.24 แสดงตำแหน่งของการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมและตำแหน่งจริงของตัวหุ่นยนต์บนแกน x และ y เทียบกับเวลา โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามเส้นทางหลักจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมายที่ต้องการ และรูปที่ 4.22 และ 4.25 แสดงค่าอะนาล็อกอินพุตที่ป้อนให้กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้างของหุ่นยนต์ (Voltage) เทียบกับเวลาซึ่งขณะเริ่มเคลื่อนที่จะมีค่าอินพุตที่เพิ่มสูงขึ้นจากนั้นค่าจะคงที่ขณะเคลื่อนที่ตามเส้นทางหลักและค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมาย รวมถึงค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) เทียบกับเวลา ซึ่งจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการ

#### 4.4 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW กรณีมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 และ 2 ชั้น

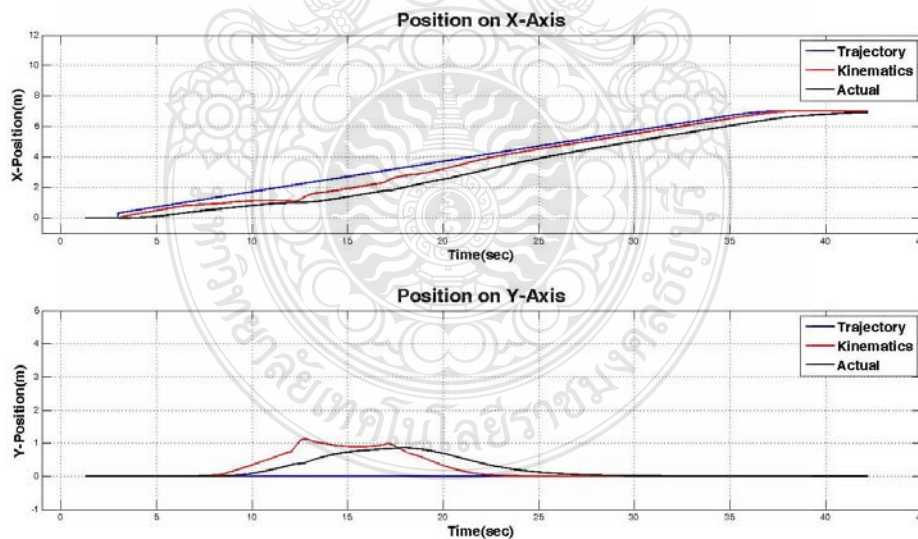


รูปที่ 4.26 สภาพแวดล้อมการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น

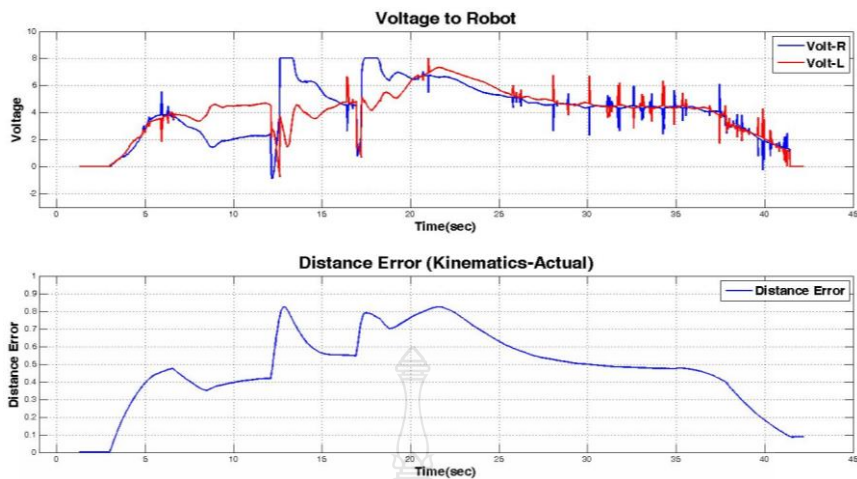
4.4.1 การทดสอบเคลื่อนที่จริงไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยมีสิ่งกีดขวางอยู่ด้วย 1 ชั้น มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm วางอยู่ที่ตำแหน่ง (2, 0) โดยตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านของหุ่นยนต์ในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) ไปยังเป้าหมายในแนวตรงด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 0)

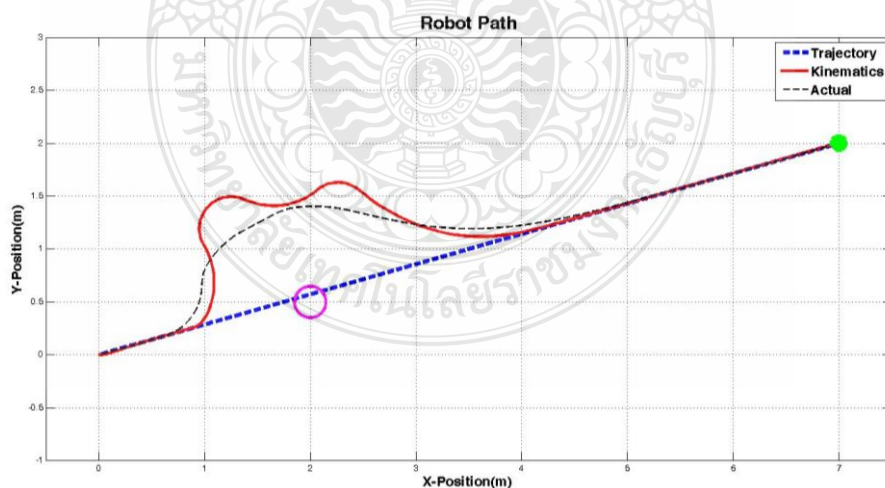


รูปที่ 4.28 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

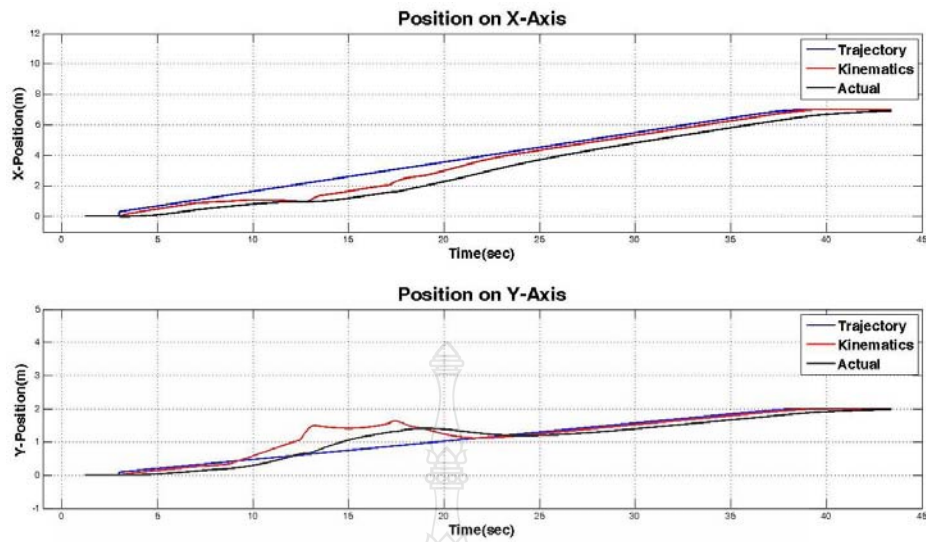


รูปที่ 4.29 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

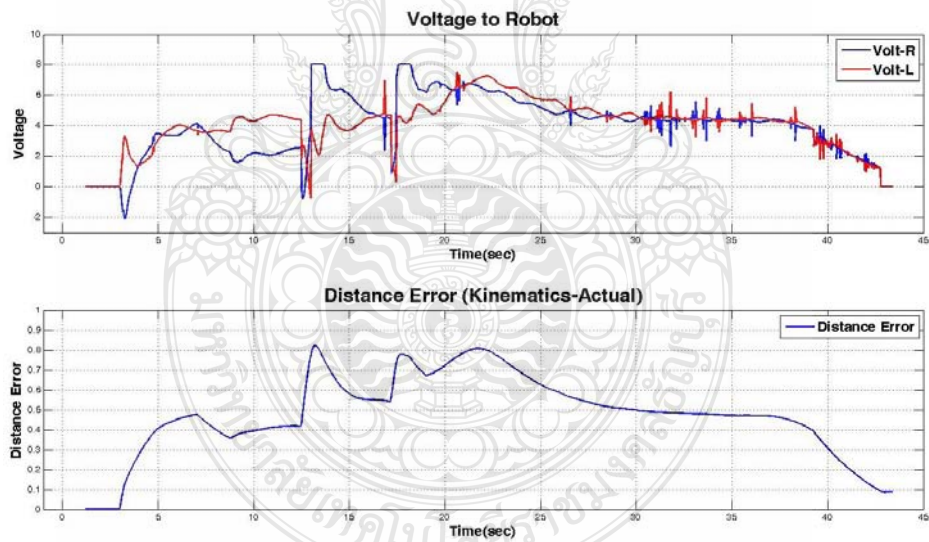
4.4.2 การทดสอบเคลื่อนที่จริงไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีสิ่งกีดขวางอยู่ด้วย 1 ชั้น มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm วางอยู่ที่ตำแหน่ง (2, 0.5) โดยตำแหน่งเป้าหมายอยู่เฉียงขึ้นเทียบกับด้านของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



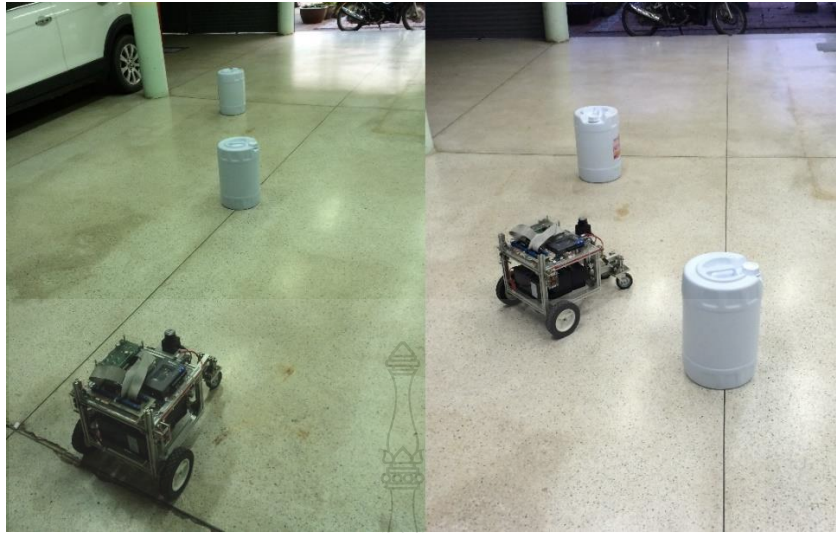
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0.5) ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.31 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบ การเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)

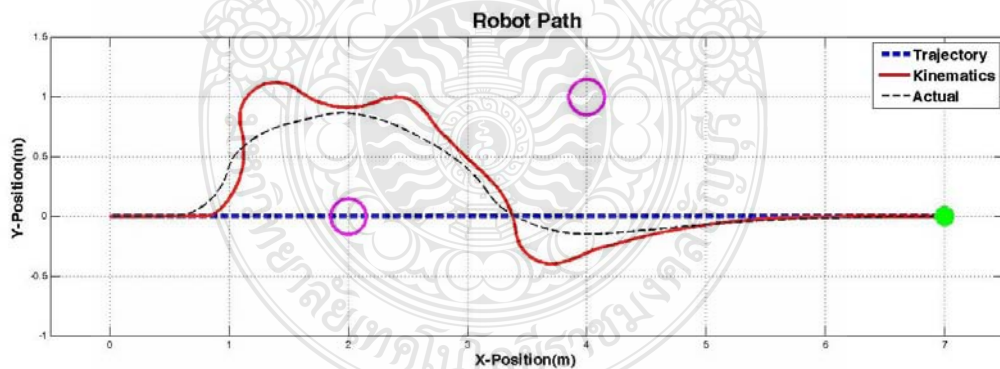


รูปที่ 4.32 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของ หุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีมี สิ่งกีดขวาง 1 ชั้นไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)



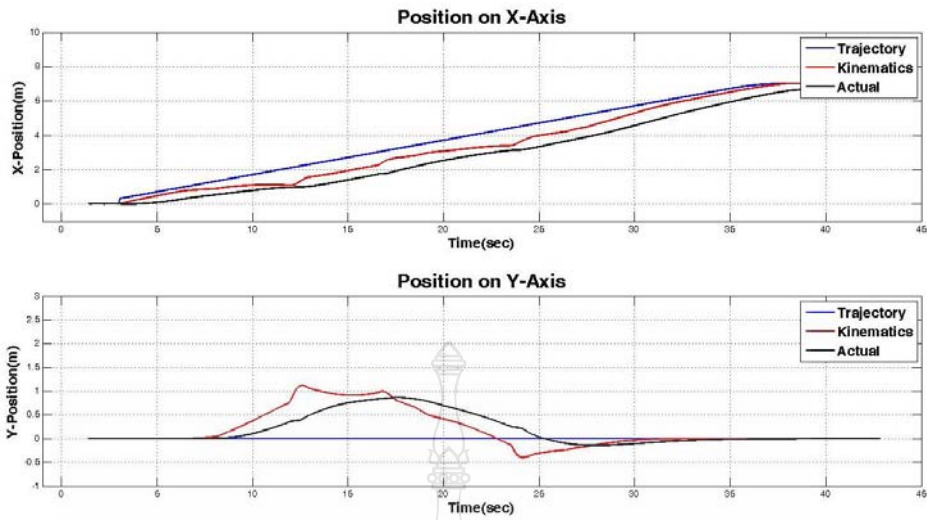
รูปที่ 4.33 สภาพแวดล้อมการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายในกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น

4.4.3 การทดสอบเคลื่อนที่จริงไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยมีสิ่งกีดขวางอยู่ด้วย 2 ชั้น มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm วางอยู่ที่ตำแหน่ง (2, 0) และ (4, 1) โดยตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านของหุ่นยนต์ในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

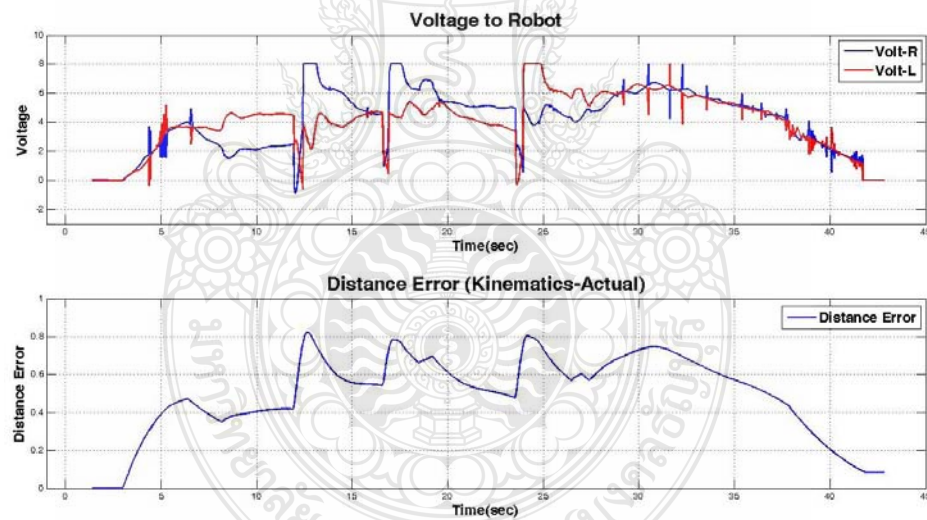


รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) และ (4, 1) ไปยังเป้าหมายในแนวตรงด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 0)



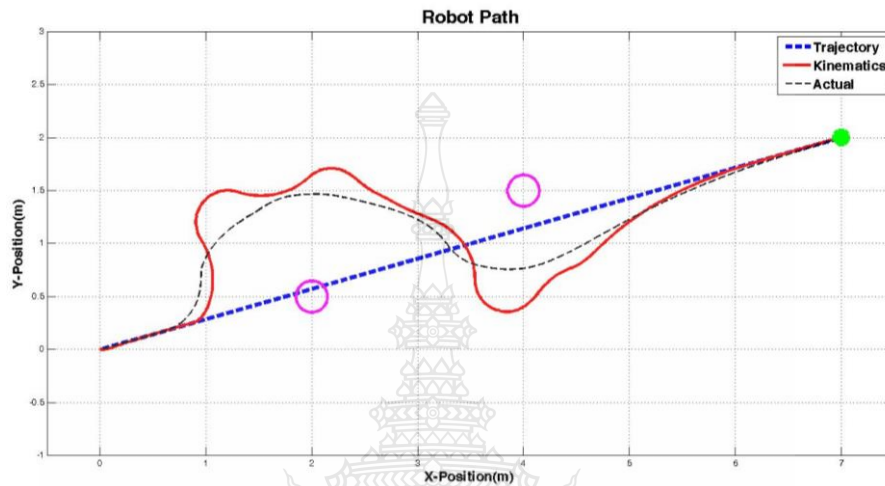


รูปที่ 4.35 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

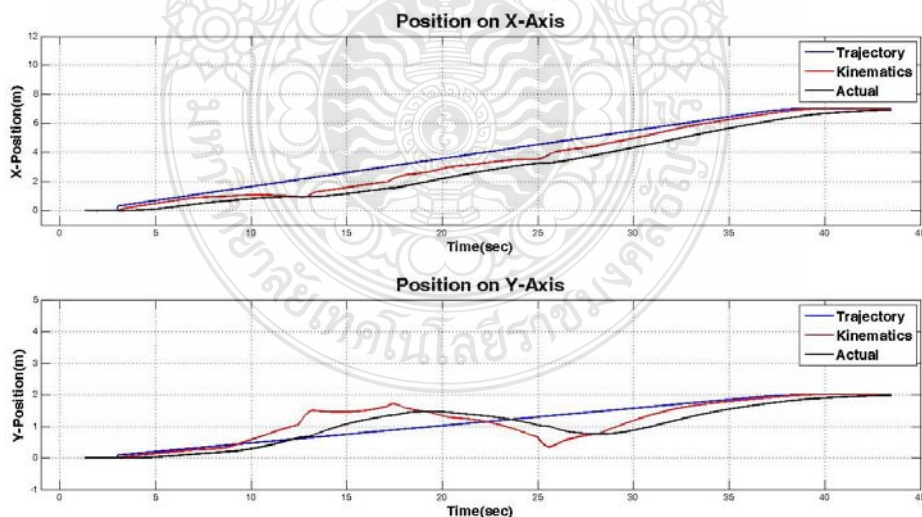


รูปที่ 4.36 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวตรงที่ตำแหน่ง (7, 0)

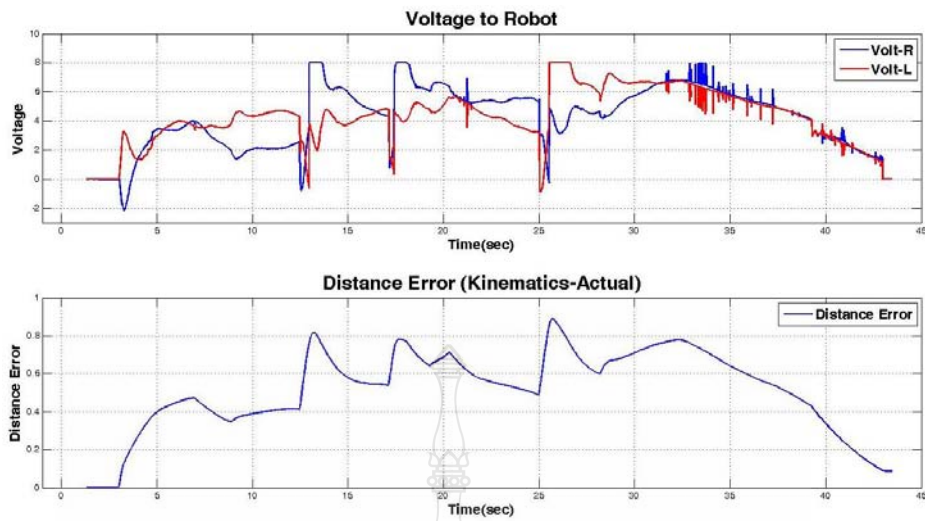
4.4.4 การทดสอบเคลื่อนที่จริงไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยมีสิ่งกีดขวางอยู่ด้วย 2 ชั้น มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm วางอยู่ที่ตำแหน่ง (2, 0.5) และ (4, 1.5) โดยตำแหน่งเป้าหมายอยู่เฉียงขึ้นเทียบกับด้านของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0.5) และ (4, 1.5) ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงเทียบกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.38 ค่าตำแหน่งของการสร้างเส้นทางและตัวหุ่นยนต์ในแนวแกน x และ y จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)



รูปที่ 4.39 ค่าอินพุตที่ป้อนให้กับหุ่นยนต์ (Voltage) และค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) จากผลการทดสอบเคลื่อนที่จริงกรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น ไปยังเป้าหมายในแนวเฉียงที่ตำแหน่ง (7, 2)

จากรูปที่ 4.26 และ 4.33 แสดงสภาพแวดล้อมจริงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งรูปที่ 4.27, 4.30, 4.34 และ 4.37 แสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์แบบมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 1 และ 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 0) และ (4, 1) ของการทดสอบที่ 1 ที่ตำแหน่งเป้าหมาย (7, 0) และ (2, 0.5) และ (4, 1.5) ของการทดสอบที่ 2 ที่ตำแหน่งเป้าหมาย (7, 2) โดยแสดงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory) ที่สร้างขึ้นจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย, เส้นทางที่ได้จากตัวควบคุมพีชชีลด์จิก ซึ่งเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวางจะมีการสร้างเส้นทางใหม่ขึ้นเพื่อหลบหลีกและเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางแล้วจะมีการเคลื่อนที่กลับเข้าสู่เส้นทางหลักเพื่อไปยังเป้าหมาย โดยเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ (Actual) ทำการเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์เอ็น โค้ดเดอร์ที่ติดตั้งไว้กับตัวหุ่นยนต์และทำการแปลงให้เป็นตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์ (Dead-Reckoning) เทียบกับตำแหน่งเริ่มต้น โดยรูปที่ 4.28, 4.31, 4.35 และ 4.38 แสดงตำแหน่งของการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมและตำแหน่งจริงของตัวหุ่นยนต์บนแกน x และ y เทียบกับเวลา ซึ่งขณะเริ่มต้นจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางหลักและเมื่อเมื่อการตรวจพบสิ่งกีดขวางจะมีการเคลื่อนที่หลบตามเส้นทางใหม่ที่สร้างขึ้นและกลับเข้าสู่เส้นทางหลักหลังจากผ่านสิ่งกีดขวางแล้วเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมาย และรูปที่ 4.29, 4.32, 4.36 และ 4.39 แสดงค่าอะนาล็อกอินพุตที่ป้อนให้กับ

บอร์ดควบคุมมอเตอร์ล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้างของหุ่นยนต์ (Voltage) เทียบกับเวลาซึ่งขณะเริ่มเคลื่อนที่จะมีค่าอินพุตที่เพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้หุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่ตามเส้นทางหลัก และเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางจะมีการปรับค่าสัญญาณควบคุมล้อขับเคลื่อนทั้ง 2 ข้างให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางและควบคุมให้กลับสู่เส้นทางหลักหลังจากผ่านสิ่งกีดขวางแล้ว จากนั้นค่าของสัญญาณควบคุมจะค่อยๆลดขนาดลงเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมาย รวมถึงค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางเคลื่อนที่ (Distance Error) เทียบกับเวลา ซึ่งจะค่อยๆลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการเช่นกัน



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี และการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ในระบบคาร์ทีเซียน สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไคเนมติกส์ โดยทำการจำลองการเคลื่อนที่จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวาง และทำการทดสอบกับตัวหุ่นยนต์จริงโดยใช้เซ็นเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์ในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง และใช้เอ็นโคโนเตอร์ในการบอกตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์ควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม LabVIEW สื่อสารกับคอมพิวเตอร์ผ่าน Wireless Router เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูล

การทดสอบจำลองการเคลื่อนที่จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบคือการเคลื่อนที่ไปหยุดยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางพบว่าตัวสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่ออกแบบไว้สามารถควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางหลักเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์และตำแหน่งเป้าหมายสูงสุดไม่เกิน 0.02 เมตร และการทดสอบเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการนั้นพบว่าตัวควบคุมพีชชีลอจิกที่ออกแบบไว้สำหรับควบคุมการหลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้นสามารถสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ใหม่ให้กับหุ่นยนต์ได้ในกรณีที่มีการตรวจจับสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ใกล้กับตัวหุ่นยนต์ในระยะที่น้อยกว่า 1 เมตร และจากนั้นจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่เส้นทางการเคลื่อนที่หลักเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์และตำแหน่งเป้าหมายสูงสุดไม่เกิน 0.025 เมตร

การทดสอบการทำงานกับตัวหุ่นยนต์จริงติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางและควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรม LabVIEW แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบคือการทดสอบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางจากผลการทดสอบพบว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางหลักที่สร้างขึ้นเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน

ระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์และตำแหน่งเป้าหมายสูงสุดไม่เกิน 0.1 เมตร และการทดสอบที่สองคือการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางจำนวน 1 และ 2 ชั้น เพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการพบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ออกแบบไว้สามารถสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ใหม่ให้กับหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และเคลื่อนที่กลับมายังเส้นทางหลักเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์และตำแหน่งเป้าหมายสูงสุดไม่เกิน 0.1 เมตร

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.2.1 การใช้งานเซ็นเซอร์เอ็น โค้ดเดอร์ในการบอกตำแหน่งและมุมหันเหของตัวหุ่นยนต์นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งหากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะทำให้การบอกตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นกว่าการเคลื่อนที่แบบช้าๆ และจะมีการสะสมไปเรื่อยๆ ดังนั้นควรหาวิธีการในการบอกตำแหน่งที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นเข้ามาช่วยเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่เกิดขึ้น เช่นการใช้งาน Wireless Router หลายๆ ตัวส่งสัญญาณภายในตัวอาคารเพื่อใช้ในการอ้างอิงและบอกตำแหน่งที่แท้จริงของตัวหุ่นยนต์

5.2.2 เซ็นเซอร์เลเซอร์ที่นำมาใช้ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางเป็นแบบใช้งานภายในร่ม โดยในจุดที่มีแสงสว่างจ้ามากจะทำให้การตรวจจับสิ่งกีดขวางจากการสแกนนั้นมีความผิดพลาดขึ้นได้ เพราะฉะนั้นควรมีการเลือกใช้เซ็นเซอร์ให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ใช้ปฏิบัติงาน เพื่อความแม่นยำที่สูงขึ้นในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง

5.2.3 ควรมีการนำเซ็นเซอร์เข็มทิศดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเอ็น โค้ดเดอร์ในการบอกมุมหันเหของหุ่นยนต์เพื่อบอกทิศทางอ้างอิงให้เหมือนกับทิศหลักของโลก และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการใช้เอ็น โค้ดเดอร์เพียงอย่างเดียว

5.2.4 ควรมีการทดสอบกับรูปแบบค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ของฟัซซีแบบอื่นๆ เช่นรูปประฆังคว่ำ (Bell-Shaped Membership Function) หรือรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function) เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจากผลที่ได้และความเหมาะสมในการนำมาใช้งานจริงกับหุ่นยนต์

## บรรณานุกรม

- [1] NASA Jet Propulsion Laboratory, Mars Exploration Rovers (Online), 2003, Available:  
<http://mars.nasa.gov/mer/gallery/artwork/rover3browse.html>, (10 November 2014).
- [2] Mohammed Faisal, Ramdane Hedjar, Mansour Al Sulaiman and Khalid 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, pp.1-7, January 2013.
- [3] Chi-Wen Lo, Kun-Lin Wu, Yue –Chen Lin and Jing –Sin Liu “An Intelligent Control System for Mobile Robot Navigation Tasks in Surveillance,” in 2<sup>nd</sup> International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications (RiTA), USA, 2013, pp.449-462.
- [4] กัณฑ์พรวิไลสง, “การประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิกกับการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏนครปฐม, ปีที่ 11, นน. 1-10, มกราคม 2556.
- [5] D. Martin, D.M. Guinea, M.C. García-Alegre, E. Villanueva and D. Guinea, “FUZZY STEERING CONTROL OF A HYDRAULIC TRACTOR AND LASER PERCEPTION IN OBSTACLE AVOIDANCE STRATEGIES,” in Spanish congress on Fuzzy Logic and Technology, Spain, 2010, pp. 349-356.
- [6] Umar Farooq, Syed Omar Saleh, Ghulam Abbas, Muhammad Usman Asad and Faiqa Rafiq, “A Two Loop Fuzzy Controller for Goal Directed Navigation of Mobile Robot,” in 2012 IEEE International Conference on Emerging Technologies, 2012, pp. 1-6.
- [7] Ramzy S. Ali, Ammar A. Aldair and Ali K. Almousawi, “Design an Optimal PID Controller using Artificial Bee Colony and Genetic Algorithm for Autonomous Mobile Robot,” International Journal of Computer Applications, Vol.100, pp.8-16, August 2014.
- [8] Rached Dhaouadi and Ahmad Abu Hatab, “Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework,” Journal of Advances in Robotics & Automation, Vol.2, pp.2-7, September 2013.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, Control Systems (Online), 2551, Available: <http://suchart.rmutl.ac.th/04-220-308/Control.pdf>, (11 January 2015).
- [10] ระบบควบคุมฟัซซี่ (Online), Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมฟัซซี่>, (18 December 2014).
- [11] Fuzzy Logic (Online), Available: <http://alaska.reru.ac.th/text/fuzzylogic.pdf>, (20 November 2014).
- [12] วีระพงษ์ เกิดสิน, “การเสริมกำลังเครื่องจักรกลโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548.
- [13] ฟัซซี่ลอจิก Fuzzy Logic (Online), Available: <http://www.academia.edu/7750667/บทที่18ฟัซซี่ลอจิกFuzzyLogic>, (15 January 2015).
- [14] Junran Jin, Hengshuo Huang, Junman Sun and Yongchao Pang, “Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Drum Water,” Journal of Sustainable Bioenergy Systems, Vol.3, pp.93-98, March 2013.
- [15] ไทยแลนด์อินดัสตรีคอกอม, การปรับค่าเกนตัวควบคุมแบบ PID ด้วย FUZZY LOGIC (Online), 2013, Available: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=19439&section=9>, (22 December 2014).
- [16] Alessandro De Luca, Trajectory planning in Cartesian space (Online), Available: [http://www.diag.uniroma1.it/~deluca/rob1\\_en/14\\_TrajectoryPlanningCartesian.pdf](http://www.diag.uniroma1.it/~deluca/rob1_en/14_TrajectoryPlanningCartesian.pdf), (29 January 2015).
- [17] Hedjar Ramdane, Mohammed Faisal, Mohammed Algabri and Khalid Al-Mutib, “Mobile Robot Navigation with Obstacle Avoidance in Unknown Indoor Environment using MATLAB,” International Journal of Computer Science and Network, Vol.2, pp.25-31, December 2013.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

[18] National Instruments, NI MyRIO (Online), Available:

<http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>, (25 November 2014).

[19] HOKUYO, Scanning range finder URG-04LX-UG01 (Online), Available:

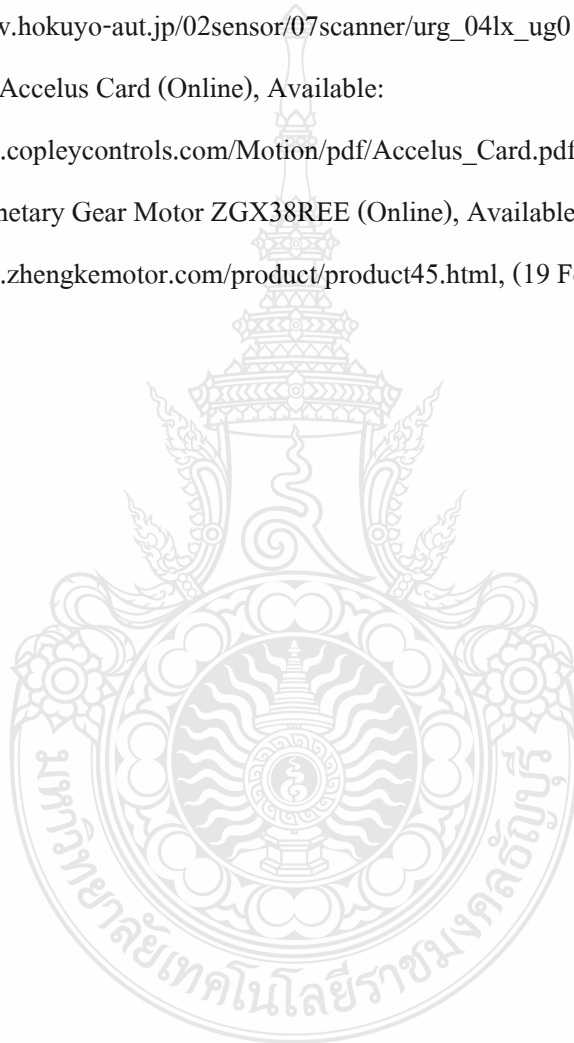
[https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg\\_04lx\\_ug01.html](https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx_ug01.html), (8 February 2015).

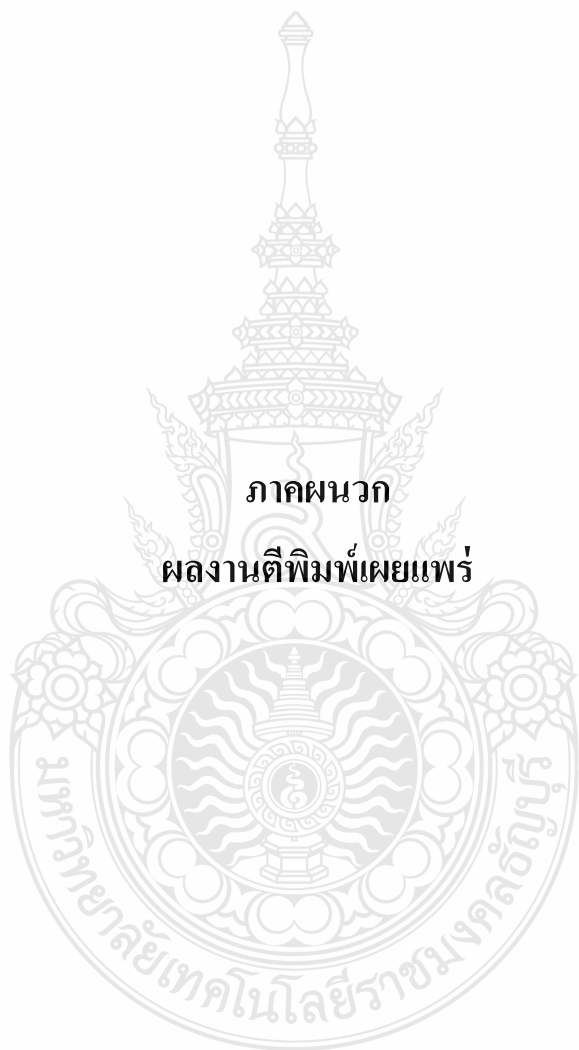
[20] copley controls, Accelus Card (Online), Available:

[http://www.copleycontrols.com/Motion/pdf/Accelus\\_Card.pdf](http://www.copleycontrols.com/Motion/pdf/Accelus_Card.pdf), (28 January 2015).

[21] ZHENGKE, Planetary Gear Motor ZGX38REE (Online), Available:

<http://www.zhengkemotor.com/product/product45.html>, (19 February 2015).





ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร  
Naresuan University Journal

# วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี Science and Technology

(ชื่อเดิม: วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร)

ปีที่ **24**

พฤษภาคม-สิงหาคม

ฉบับที่ 2

ISSN 0858-7418

ระบบวารสารออนไลน์ [www.journal.nu.ac.th](http://www.journal.nu.ac.th)

โทร. 0 5596 8835 โทรสาร. 0 5596 8826 *บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร*





วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - สิงหาคม 2559

**ที่ปรึกษา**

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์<br>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุพงษ์<br>ศาสตราจารย์ ดร.รัตนะ | จินายน<br>พงษ์เจริญ<br>บัวสนธิ์ |
|--|---------------------------------|

**บรรณาธิการ**

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ชัย | วิทยาอารีย์กุล |
|-----------------------------|----------------|

**กองบรรณาธิการ**

|   |   |  |
|---|---|--|
| Professor Dr. Hans<br>ศาสตราจารย์ ดร.จักรี<br>ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์<br>ศาสตราจารย์ ดร.นันทวัน<br>ศาสตราจารย์ ดร.ประกอบ<br>ศาสตราจารย์ ดร.สมนึก<br>ศาสตราจารย์ ดร.สนิท<br>ศาสตราจารย์ ดร.อนันต์<br>ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ดร.ศุภสิทธิ์<br>ศาสตราจารย์ ดร.สมยศ<br>รองศาสตราจารย์ ดร.ทัศนาศ<br>รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติมา<br>รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี<br>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุรพร<br>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ | E. Junginger<br>เส้นทอง<br>สมบัติสมภพ<br>บุญยะประภัศร<br>วิโรจน์กฤ<br>ตั้งเต็มสิริกุล<br>อักษรแก้ว<br>พลธานี<br>พรรณารุโณทัย<br>พลับเที่ยง<br>พิทักษ์สุธิพงษ์<br>จินาพงษา<br>ศรีจำเริญ<br>รักษังการ<br>แย้มเม่น | Marbuag, Germany<br>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี<br>มหาวิทยาลัยมหิดล<br>มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี<br>สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยขอนแก่น<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร<br>มหาวิทยาลัยนเรศวร |
|---|---|--|

**ผู้ช่วยบรรณาธิการ**

|                |           |
|----------------|-----------|
| นางสาวณัฐวรีณี | หม่อมนนท์ |
|----------------|-----------|

**ออกแบบปก**

|          |              |
|----------|--------------|
| นายสรณญา | แสงเย็นพันธ์ |
|----------|--------------|

**หน่วยงานที่รับผิดชอบ**

งานวิจัยและวิเทศสัมพันธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
99 หมู่ 9 อาคารมหาธรรมราชา โซน A ชั้น 1 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000  
โทรศัพท์ 0-5596-8835 โทรสาร 0-5596-8826

**ค่าสมาชิก**

100 บาทต่อปี หรือ 250 บาทต่อ 3 ปี

ต้นฉบับทุกเรื่องที่ส่งตีพิมพ์ได้รับการตรวจทางวิชาการ โดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) เฉพาะสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
อย่างน้อย 2 ท่าน ต่อ 1 บทความ การตีพิมพ์จะต้องได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการเป็นลายลักษณ์อักษร



บทความวิจัย

Effects of Sintering Behavior on Structure and Properties of  $B_2O_3$  doped  $(Bi_{0.5}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO_3$

Lead-Free Ceramics

ศุภลักษณ์ มะโนธรรม, ภารตรา ใจตา, ทวี ตันเมศิริ และกอบวูฒิ วุฒิจานกุล..... 142

อิทธิพลของอุณหภูมิที่อบต่อสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกของฟิล์มบางบิสเฟเทลอไซด์แบบบดงอได้เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอริง

กมลมาศ สิงคเสลิต, อาภาภรณ์ สกุลการเวก และรัชศักดิ์ ตักตานุกาฬ..... 148

ระบบ Human Machine Interface (HMI) สำหรับคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำโดยใช้ Visual C# และ OPC Server

จิตพร เหล่าอัมจันทร์ และวุฒิชัย อัครวินชัยโชติ..... 156

การประเมินผลกระทบของแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้หลักการระบุตำแหน่งความผิดปกติในระบบจำหน่ายด้วยเส้นโค้ง ITIC

ฤทธิพัฒน์ โพธิ์ศรี และสมพร สิริสำราญกุล..... 167

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้า Fe-Cr-Mo ที่ผ่านการขึ้นเตอริง

วนานรัตน์ ศรีจำพันธุ์, เรืองเดช ธงศรี, อัญพร ยอดแก้ว, นาดยา ต่อแสงธรรม, มนภาส มรกฏจินดา, รุ่งทิพย์ กระต่ายทอง และอัมพร เวียงมูล..... 175

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี-พีซีสำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร

ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ และมนุศักดิ์ จานทอง..... 183

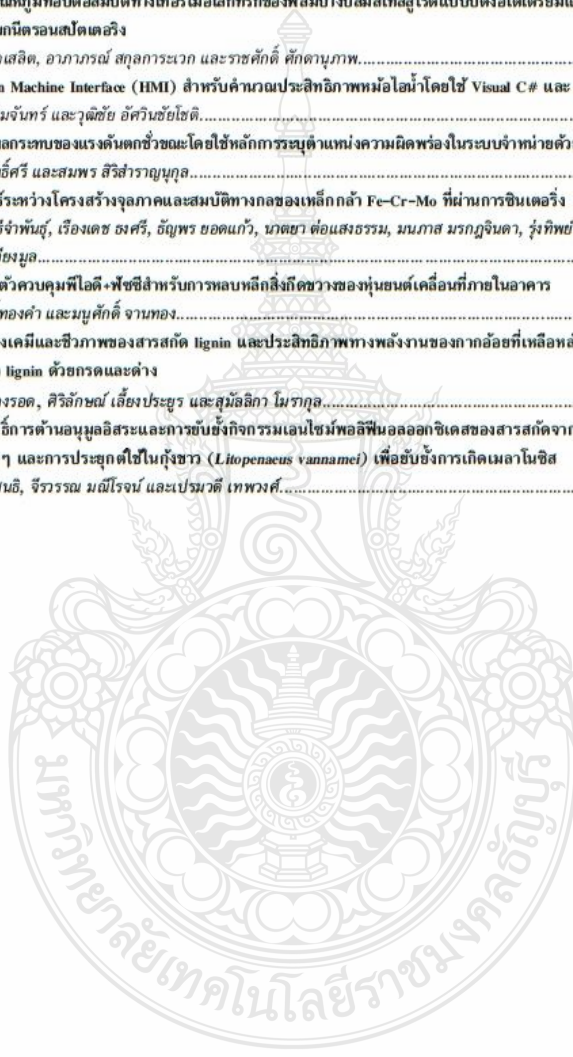
คุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพของสารสกัด lignin และประสิทธิภาพทางพลังงานของกากอ้อยที่เหลือหลังจากการสกัดแยก lignin ด้วยกรดและด่าง

ชุตินา บุญเรืองรอด, ศิริลักษณ์ เลียงประยูร และศุมนัลลิกา โมรากุล..... 195

การศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและการยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสของสารสกัดจากการตัดแต่ง

พืชชนิดต่างๆ และการประยุกต์ใช้ในกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) เพื่อยับยั้งการเกิดเมลานินซิส

ประภัสสร แสนธิ, จีวรรณ มณีโรจน์ และเปรมวดี เทพวงศ์..... 207





### การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี+ฟuzzyสำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ\* และมนูศักดิ์ จานทอง

#### PID+Fuzzy Controller Design for Obstacle Avoidance of Indoor Mobile Robot

Kraisak Phothongkum\* and Manusak Janthong

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ธัญบุรี ปทุมธานี 12110  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi,  
Pathumthani 12110

\* Corresponding author. E-mail address: kraisak\_px@mail.mutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขับเคลื่อน 2 ล้อ โดยเป็นการนำมาประยุกต์ใช้  
งานร่วมกับการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ในระบบคาร์ทีเซียนและตัวควบคุมพีไอดี เพื่อควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด  
ไว้ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการพร้อมทั้งสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งในงานนี้จะทำการทดสอบวิธีการควบคุมที่  
จะนำมาใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติที่จะสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้แรงงานมนุษย์ในการขนย้ายสิ่งของวัสดุภายในโรงงานหรือ  
คลังสินค้าได้ โดยทำการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่มีรูปแบบการขับเคลื่อนแบบดิฟ  
เฟอเรนเชียลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจากผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์พบว่าตัวควบคุมฟuzzy-พีไอ  
ดี สามารถควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ โดยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสามารถ  
สร้างเส้นทางเคลื่อนที่ใหม่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางให้กับหุ่นยนต์ได้ในกรณีที่หุ่นยนต์มีการตรวจพบสิ่งกีดขวางในเส้นทางเคลื่อนที่  
หลัก ซึ่งเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการแล้วมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์กับเป้าหมายสูงสุดไม่เกิน  
0.025 เมตร

คำสำคัญ: หุ่นยนต์เคลื่อนที่ หลบหลีกสิ่งกีดขวาง ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก

#### Abstract

This article presents the fuzzy logic controller used for motion control of 2-wheel mobile robot. The trajectory planning in  
cartesian space and PID controller is applied to track specified path toward a desired target point and to avoid the obstacle  
automatically. In this work, experimentations of the proposed algorithm for autonomous mobile robot can help to replace workers  
for material handling in factory or warehouse. Motion simulation using a mathematical model of differential drive mobile robot is  
performed by MATLAB/Simulink software. Simulation results show that the fuzzy-PID controller can control mobile robot to  
move along desired path toward the target, and then the fuzzy logic controller is able to generate a new path for mobile robot to  
avoid the obstacle when mobile robot detects the obstacle in original planned path and distance error when mobile robot reaches  
the target is less than 0.025 meters.

Keywords: Mobile Robot, Obstacle Avoidance, Fuzzy Logic Controller

#### บทนำ

ในปัจจุบันการขนย้ายสิ่งของวัสดุภายในโรงงาน  
อุตสาหกรรมหรือภายในคลังสินค้านั้น โดยส่วนมากแล้ว

จะใช้แรงงานมนุษย์ในการเข็นหรือลากเพื่อเคลื่อนย้าย  
ซึ่งหากวัสดุนั้นมีน้ำหนักมากก็จำเป็นต้องใช้แรงงานหลาย  
คน ทำให้มีการสิ้นเปลืองแรงงานและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น  
รวมทั้งอาจทำให้พื้นที่ปฏิบัติงานหรือการจราจรภายใน



โรงงานหรือคลังสินค้านั้นติดขัดหรือเกิดความวุ่นวายได้ ซึ่งแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาส่วนนี้ก็คือการนำเอาหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้ามาช่วยทำงานแทนมนุษย์ เช่น หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางได้มีการกำหนดเส้นทาง การเคลื่อนที่ไว้โดยการทาสีเส้นไว้กับพื้นที่ต้องการให้ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป ซึ่งหุ่นยนต์ในลักษณะนี้อาจมี ข้อจำกัดในเรื่องของการตรวจรูสิ่งกีดขวางว่าเส้นทางที่จะ เคลื่อนที่ไปนั้นมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่หรือไม่และอาจ ทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะ นำเอาหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติเข้ามาทำงานแทน รวมทั้งมีการควบคุมที่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ อัตโนมัติเพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากสภาวะ แวดล้อมที่ไม่แน่นอนภายในพื้นที่ปฏิบัติงานนั้นๆ ซึ่งใน พื้นที่ปฏิบัติงานนั้นต้องมีการกำหนดพิกัดหรือตำแหน่งที่แน่นอนไว้เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งจากตัวของหุ่นยนต์ เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการทำงาน

โดยมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวาง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะมีการ นำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์มาทำการ ทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ด้วยซอฟต์แวร์ก่อนเพื่อ ทดสอบวิธีการหรืออัลกอริทึมที่จะนำมาใช้ในการควบคุม การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในส่วนของแบบจำลองที่ นำมาใช้ในการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นั้น ประกอบด้วย แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematics Model) (Lee, Lin, Lim, & Lee, 2009) และแบบจำลองทางพลศาสตร์ (Dynamics Model) (Ali, Aldair, & Almousawi, 2014) ซึ่งจะมีความ แตกต่างกันโดยแบบจำลองทางพลศาสตร์นั้นจะมีการ นำเอาค่ามวล โมเมนต์และแรงต่างๆที่เกี่ยวข้องกับตัว หุ่นยนต์เข้ามาทำการคำนวณด้วย โดยจะทำให้ผลลัพธ์ที่ ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของหุ่นยนต์มาก ยิ่งขึ้น เช่นวิธีการของลากรางจ์ (Lagrange's approach) หรือวิธีการของนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler's approach) (Rached & Ahmad, 2013) ในส่วนของการ ควบคุมนั้นวิธีการหนึ่งที่มีนิยมนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ เคลื่อนที่คือตัวควบคุมพีชชิลอจิก ซึ่งจะมีหลักการคล้าย กับวิธีคิดของมนุษย์ ที่มีความซับซ้อนหรือคลุมเครือ และ มีเสถียรภาพสูงอีกด้วย (Xi & Byung-Jae, 2013) นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชชิลอจิกสำหรับ

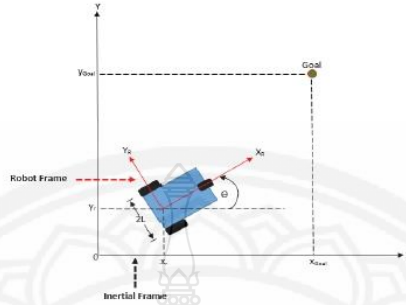
จำลองการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ โดย ใช้แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematics Model) โดย การสร้างเส้นทางเคลื่อนที่และควบคุมความเร็วล้อ ขับเคลื่อนทั้ง 2 ซ้างเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่ง กีดขวางไปยังตำแหน่งเป้าหมาย (Faisal, Hedjar, Sulaiman & Mutib, 2013) นำเสนอการใช้พีชชิลอจิก สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยทำการ ทดสอบกับหุ่นยนต์จริง และมีการติดตั้งเซ็นเซอร์ ตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยอัลตราโซนิก เพื่อตรวจรูระยะ ของสิ่งกีดขวางกับหุ่นยนต์และนำไปใช้เป็นอินพุตของตัว ควบคุมพีชชิลอจิกเพื่อควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบ หลีกสิ่งกีดขวางนั้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้

โดยบทความนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ตัว ควบคุมพีชชิลอจิกร่วมกับการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ ในระบบคาร์ทีเซียนเพื่อควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยัง ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการและสามารถหลบหลีกสิ่งกีด ขวางได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นทดสอบจำลองการ เคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดย ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

#### วิธีการศึกษาและวัสดุอุปกรณ์

1. โมเดลทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ คือ แบบจำลองของตัวหุ่นยนต์ที่เขียนออกมาเป็นสมการทาง คณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมหรือใช้เพื่อ การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ก่อนที่จะทำการทดสอบ กับหุ่นยนต์จริง

1.1 Kinematics Model หรือแบบจำลองทาง จลนศาสตร์แสดงดังสมการที่ 1 โดยจากรูปที่ 1 แสดง ลักษณะของตัวหุ่นยนต์ขับเคลื่อนแบบดิฟเฟอเรนเชียล ไตรฟ์ (Differential Drive Mobile Robot) โดยประกอบ ไปด้วยล้อขับเคลื่อนด้านหลัง 2 ล้อ ที่เป็นอิสระต่อกัน และล้อตามด้านหน้า (Caster Wheel) เพื่อใช้ในการ สมดุลตัวหุ่นยนต์ มีเฟรมที่สำคัญ 2 เฟรมคือ เฟรม อ้างอิงหลักที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Initial Frame) ใช้ในการ บอกตำแหน่งของหุ่นยนต์ และเฟรมของตัวหุ่นยนต์ (Robot Frame) ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่หรือหมุนหันเหไป กับตัวหุ่นยนต์ด้วย มีจุดกำเนิดอยู่ระหว่างล้อขับเคลื่อน ทั้ง 2 ซ้าง โดยแกน x ซ้ำไปทางด้านหน้าของตัวหุ่นยนต์



รูปที่ 1 ลักษณะแบบจำลองของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียล

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cdot \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \cdot \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ  $x$  คือตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับแกน  $x$  ของเฟรมอ้างอิง  
 $y$  คือตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับแกน  $y$  ของเฟรมอ้างอิง  
 $\theta$  คือมุมหันของหุ่นยนต์เมื่อวัดเทียบกับแกน  $x$  ของเฟรมอ้างอิง  
 $v$  คือ ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของหุ่นยนต์

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนแบบจำลองทาง ล้อขับเคลื่อนซ้ายและขวาอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้  
 จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วเชิงมุม เป็น (Mishra, 2014)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R \cdot \cos(\theta) & R \cdot \cos(\theta) \\ R \cdot \sin(\theta) & R \cdot \sin(\theta) \\ \frac{R}{L} & -\frac{R}{L} \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 Dynamics Model หรือแบบจำลองทาง พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) และพลังงานศักย์  
 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ สามารถหาได้จากสมการลากรางจ์ (Potential Energy) ของระบบ โดยสมการลากรางจ์  
 รานจ์ (Lagrange's Equation) ซึ่งจะทำการคำนวณจาก แสดงดังสมการที่ 3 (Edouard, Toni, & Ivan, 2010)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i \quad (3)$$





โดยที่  $L = T - V$

- เมื่อ  $L$  คือ สมการลากรางจ์ (Lagrangian)
- $T$  คือ พลังงานจลน์รวมของระบบ (Total Kinetic Energy)
- $V$  คือ พลังงานศักย์รวมของระบบ (Total Potential Energy)
- $q_i$  คือ ระบบพิกัดที่สนใจ (Generalized Coordinate System)
- $Q_i$  คือ แรงในระบบพิกัดที่สนใจ (Generalized Force)

โดยเมื่อทำการแทนค่าลงในสมการลากรางจ์แล้ว จัดรูปให้อยู่ในรูปแบบของสมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ว่า

$$\bar{M}(q) \cdot \ddot{q} + \bar{V}(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} = \bar{B}(q) \cdot \tau \tag{4}$$

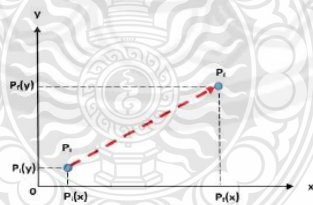
โดยที่

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) & \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) \\ \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 - I) & I_w + \frac{R^2}{4L^2}(mL^2 + I) \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R^2}{2L} m_c d \dot{\theta} \\ \frac{R^2}{2L} m_c d \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix}$$

2. การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory Planning in Cartesian Space) เป็นส่วนที่ใช้สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่หลักของหุ่นยนต์โดยจะเป็นเส้นทางระหว่างหุ่นยนต์กับเป้าหมายในแนวตรง และไม่ได้พิจารณาถึงสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่โดยสมการที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นของเส้นกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ ซึ่งในกรณีของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะพิจารณา 2 มิติคือบนระนาบ x, y เท่านั้น (Luca, 2008)



รูปที่ 2 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory Planning)



เริ่มจากการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของ ตำแหน่ง (L) และคำนวณหาระยะเวลาที่ใช้ในการสร้าง หุ่นยนต์ (P), ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ (P<sub>f</sub>), เส้นทางเคลื่อนที่สำหรับช่วงการเร่ง (T<sub>r</sub>) และเวลาที่ ใช้ทั้งหมด (T) ความเร็วสูงสุด (V<sub>max</sub>) และความเร่งสูงสุดที่ต้องการ (a<sub>max</sub>) จากนั้นทำการคำนวณหาระยะทางระหว่าง 2

$$L = \|P_f - P_i\| \tag{5}$$

$$T_r = \frac{V_{max}}{a_{max}} \tag{6}$$

$$T = \frac{L \cdot a_{max} + V_{max}^2}{a_{max} \cdot V_{max}} \tag{7}$$

จากนั้นคำนวณหาระยะทางที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็น ฟังก์ชันของเวลา (σ) โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาคือ ที่ t = 0 ถึง T<sub>r</sub>, t = T<sub>r</sub> ถึง T - T<sub>r</sub> และ t = T - T<sub>r</sub> ถึง T

$$\sigma(t) = \begin{cases} a_{max} \cdot \frac{t^2}{2} & ; t \in [0, T_r] \\ V_{max} \cdot t - \frac{V_{max}^2}{2a_{max}} & ; t \in [T_r, T - T_r] \\ -a_{max} \cdot \frac{(t - T)^2}{2} + V_{max} \cdot T - \frac{V_{max}^2}{2a_{max}} & ; t \in [T - T_r, T] \end{cases} \tag{8}$$

สุดท้ายหาค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราการสร้าง เส้นทางเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย เส้นทางเคลื่อนที่ (S) และจะได้อสมการการสร้าง เพื่อนำไปใช้งานกับหุ่นยนต์แสดงดังสมการที่ 10

$$S = \frac{\sigma}{L} \tag{9}$$

$$P(s) = P_i + S \cdot (P_f - P_i) \tag{10}$$

3. ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก (Fuzzy Logic Controller) เป็นศาสตร์ด้านการคำนวณที่เข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นในวงการวิจัย และได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ มากมาย ซึ่งฟuzzyลอจิกนั้นเป็นเครื่องมือที่เข้ามาช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งจะใช้หลักการเหตุผลที่คล้ายการ เลียนแบบวิถีคิดของมนุษย์ (ประหยัด สุพะเก่า, 2553)

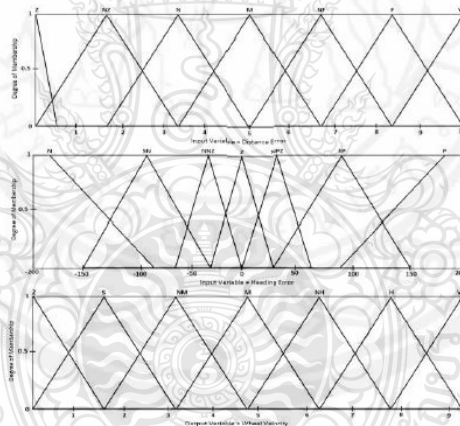
3.1 Fuzzy Tracking (FT) ใช้ในการควบคุมให้ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางหลักที่กำหนดไว้จาก ตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย รัศมีค่าอินพุต 2 ค่า คือ ความผิดพลาดของระยะทาง (Distance Error) ประกอบด้วยตัวแปรทางภาษาคือ {Z, NZ, N, M, NF, F, VF} และความผิดพลาดของมุมหันเห (Heading Error) ประกอบด้วยตัวแปรทางภาษาคือ {N, SN,



NNZ, Z, NPZ, SP, P) โดยเมื่อประมวลผลแล้วจะได้ ขวา (VL, VR) ประกอบด้วยตัวแปรทางภาษาคือ {Z, S, NM, M, NH, H, VH} แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 กฎในการควบคุมของ Fuzzy Tracking

| Angle Er. | N    | SN   | NNZ  | Z    | NPZ  | SP   | P    |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| Dis. Er.  | L=Z  | L=Z  | L=Z  | L=Z  | L=NM | L=NM | L=M  |
|           | R=M  | R=NM | R=NM | R=Z  | R=Z  | R=Z  | R=Z  |
| NZ        | L=S  | L=S  | L=Z  | L=S  | L=M  | L=NH | L=H  |
|           | R=H  | R=NH | R=M  | R=S  | R=Z  | R=S  | R=S  |
| N         | L=S  | L=S  | L=S  | L=NM | L=NH | L=H  | L=VH |
|           | R=VH | R=H  | R=NH | R=NM | R=S  | R=S  | R=S  |
| M         | L=S  | L=S  | L=S  | L=M  | L=H  | L=H  | L=VH |
|           | R=VH | R=H  | R=H  | R=M  | R=S  | R=S  | R=S  |
| NF        | L=S  | L=S  | L=NM | L=NH | L=NH | L=H  | L=VH |
|           | R=VH | R=H  | R=NH | R=NH | R=NM | R=S  | R=S  |
| F         | L=S  | L=S  | L=M  | L=H  | L=NH | L=H  | L=VH |
|           | R=VH | R=H  | R=NH | R=H  | R=M  | R=S  | R=S  |
| VF        | L=S  | L=S  | L=NM | L=VH | L=NH | L=H  | L=VH |
|           | R=VH | R=H  | R=NH | R=VH | R=NM | R=S  | R=S  |



รูปที่ 3 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Fuzzy Tracking (FT)

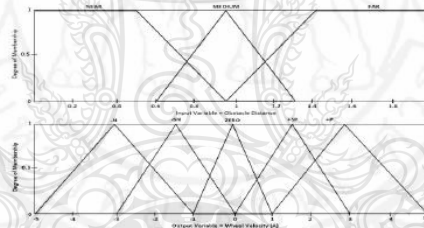
3.2 Fuzzy Avoidance (FA) ใช้ในการควบคุม เคลื่อนที่อยู่ที่รับค่าอินพุตระยะของสิ่งกีดขวางที่ตรวจพบ เพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ใหม่ให้กับหุ่นยนต์ในการ ได้ (Obstacle Distance) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ หลบหลีกสิ่งกีดขวางเมื่อมีการตรวจพบสิ่งกีดขวางการ ด้านหน้า, ด้านซ้าย และด้านขวาของหุ่นยนต์



ประกอบด้วยตัวแปรทางภาษาคือ {NEAR, MEDIUM, FAR} ของล้อขับเคลื่อนซ้ายและขวา (VL, VR) แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งเมื่อประมวลผลแล้วได้เอาท์พุทเป็นความเร็ว

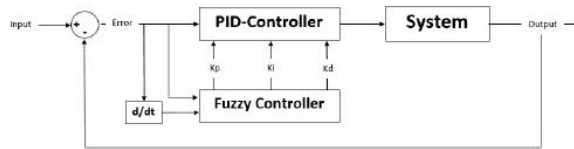
ตารางที่ 2 กฎในการควบคุมของ Fuzzy Avoidance

| Obstacle Distance |        |        | Wheel Vel. |            |
|-------------------|--------|--------|------------|------------|
| Front             | Right  | Left   | Left Vel.  | Right Vel. |
| FAR               | FAR    | FAR    | P+         | P+         |
| FAR               | FAR    | NEAR   | P+         | SP+        |
| FAR               | NEAR   | FAR    | SP+        | P+         |
| FAR               | NEAR   | NEAR   | N-         | SP+        |
| NEAR              | FAR    | FAR    | SP+        | P+         |
| NEAR              | FAR    | NEAR   | P+         | SP+        |
| NEAR              | NEAR   | FAR    | SP+        | P+         |
| NEAR              | NEAR   | NEAR   | N-         | P+         |
| FAR               | FAR    | MEDIUM | SP+        | SP+        |
| FAR               | MEDIUM | FAR    | SP+        | SP+        |
| FAR               | MEDIUM | MEDIUM | SP+        | SP+        |
| MEDIUM            | FAR    | FAR    | ZERO       | SP+        |
| MEDIUM            | FAR    | MEDIUM | P+         | SP+        |
| MEDIUM            | MEDIUM | FAR    | SP+        | P+         |
| MEDIUM            | MEDIUM | MEDIUM | ZERO       | SP+        |



รูปที่ 4 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Fuzzy Avoidance (FA)

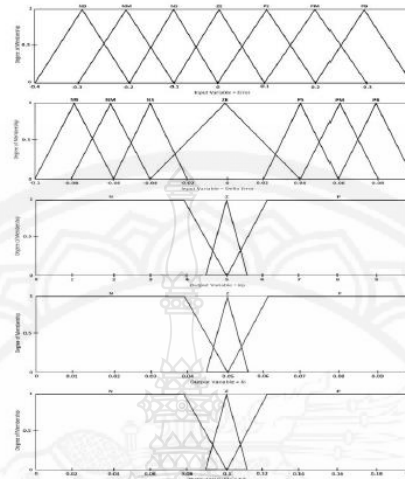
3.3 Fuzzy-PID (FPID) ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้อย่างถูกต้องมากขึ้น โดยจะมีการนำเอาค่าความผิดพลาด (Error) ของระบบมาคำนวณ ซึ่งหากระบบมีค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนไปจะมีการปรับค่าเกนให้โดยอัตโนมัติเพื่อความเหมาะสมในการควบคุมระบบในขณะนั้น ๆ โดยบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแสดงดังรูปที่ 5 รับค่าอินพุต 2 ค่า คือ ความผิดพลาด (Error) ประกอบด้วยตัวแปรทางภาษา {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB} และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด (Delta Error) ประกอบด้วยตัวแปรทางภาษา {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB} แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุม Fuzzy-PID

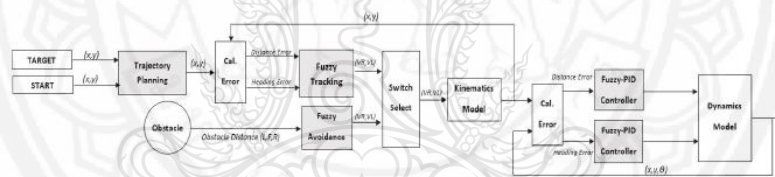
ตารางที่ 3 กฎในการควบคุมของ Fuzzy-PID

| Delta-Error | Error |    | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|-------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|
|             | Kp    | Ki |    |    |    |    |    |    |    |
| NB          | Kp    | Ki | P  | Z  | N  | N  | N  | Z  | P  |
|             | Kd    |    | N  | P  | P  | N  | P  | P  | N  |
| NM          | Kp    | Ki | P  | Z  | N  | N  | N  | Z  | P  |
|             | Kd    |    | P  | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |
| NS          | Kp    | Ki | N  | Z  | P  | P  | P  | Z  | N  |
|             | Kd    |    | P  | Z  | Z  | N  | Z  | Z  | P  |
| ZE          | Kp    | Ki | P  | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |
|             | Kd    |    | N  | N  | N  | Z  | N  | N  | N  |
| PS          | Kp    | Ki | P  | P  | P  | Z  | P  | P  | P  |
|             | Kd    |    | N  | N  | Z  | P  | Z  | N  | N  |
| PM          | Kp    | Ki | P  | P  | Z  | N  | Z  | P  | P  |
|             | Kd    |    | N  | Z  | P  | P  | P  | Z  | N  |
| PB          | Kp    | Ki | P  | Z  | Z  | N  | Z  | Z  | P  |
|             | Kd    |    | P  | Z  | N  | N  | P  | Z  | P  |
|             | Kp    | Ki | N  | P  | P  | P  | N  | P  | N  |
|             | Kd    |    | P  | Z  | N  | N  | P  | Z  | P  |

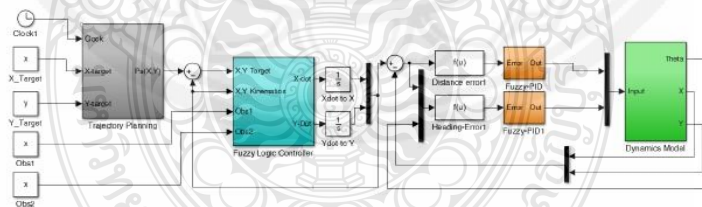


รูปที่ 6 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Fuzzy-PID (FPID)

#### 4. การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์



รูปที่ 7 โดอะแกรมการควบคุมจำลองการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวาง

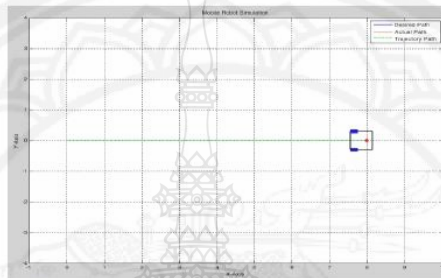


รูปที่ 8 ซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink ที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน

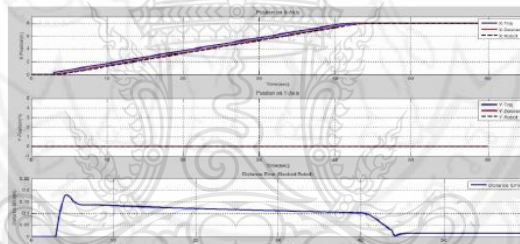
### ผลการศึกษา

ในส่วนของการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink โดยได้ทำการออกแบบโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 การทดสอบคือ การ

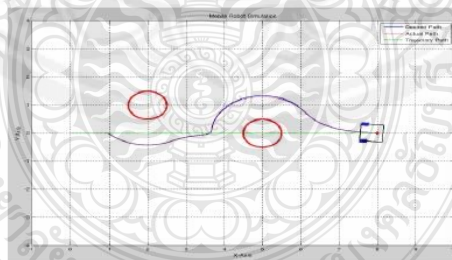
จำลองเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายโดยไม่มีสิ่งกีดขวาง การเคลื่อนที่ เริ่มต้นที่ตำแหน่ง (0, 0) เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (8, 0) และกรณีที่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่รวมอยู่ด้วย เริ่มต้นที่ตำแหน่ง (0, 0) เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ตำแหน่ง (8, 0) มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ 2 ชั้นที่ตำแหน่ง (2, 1) และ (5, 0)



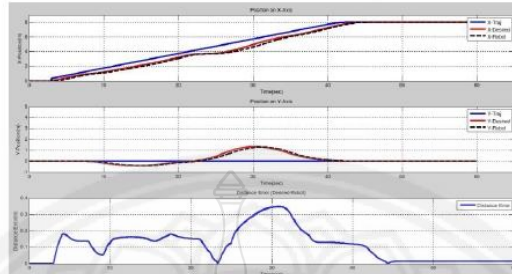
รูปที่ 9 ผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 10 ตำแหน่งของหุ่นยนต์และค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์กับเป้าหมายเทียบกับเวลากรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 11 ผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้น



รูปที่ 12 ตำแหน่งของหุ่นยนต์และค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์กับเป้าหมายเทียบกับเวลาที่มีสิ่งกีดขวาง

#### อภิปรายผลการศึกษ

จากรูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยแสดงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory), เส้นทางที่ได้จาก Kinematics Model (Desired) และเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ (Actual) โดยรูปที่ 10 แสดงตำแหน่งของการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมและตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์บนแกน x และ y เทียบกับเวลาที่เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมายที่ต้องการ และค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่ (Distance Error) เทียบกับเวลา ซึ่งจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.025 เมตร

จากรูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่รวมอยู่ด้วยเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยแสดงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่หลัก (Trajectory), เส้นทางที่ได้จาก Kinematics Model (Desired) และเส้นทางการเคลื่อนที่จริงของหุ่นยนต์ (Actual) ซึ่งเมื่อมีการตรวจพบสิ่งกีดขวางจะมีการสร้างเส้นทางใหม่เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเพื่อหลบหลีก โดยรูปที่ 12 แสดงตำแหน่งของการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากตัวควบคุมและตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์บนแกน x และ y เทียบกับเวลาที่เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมายที่ต้องการ และค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหุ่นยนต์กับเส้นทางการเคลื่อนที่

(Distance Error) เทียบกับเวลา ซึ่งจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.025 เมตร

#### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีชซีลอจิกและการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ในระบบคาร์ทีเซียน กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 2 ล้อ โดยเป็นการจำลองการทำงานเสมือนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ชนย้ายวัสดุภายในโรงงานหรือคลังสินค้าต่าง ๆ แทนการใช้งานแรงงานคนหรือหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบติดตามเส้นที่พื้น ซึ่งไม่สามารถตรวจรู้หรือหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ โดยจะเป็นการควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการพร้อมทั้งสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้แบบอัตโนมัติ และทำการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ในสภาวะที่มีและไม่มีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ ซึ่งจากผลการทดสอบจำลองการเคลื่อนที่พบว่า ตัวสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และตัวควบคุมพีชซีลอจิกที่ได้ทำการออกแบบไว้สามารถควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่สร้างขึ้นเพื่อไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ และกรณีที่มีการตรวจพบสิ่งกีดขวางหุ่นยนต์ก็สามารถหลบหลีกและเคลื่อนที่ผ่านไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้เช่นกัน โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์กับเป้าหมายไม่เกิน 0.025 เมตร

สำหรับการพัฒนาต่อไปควรมีการทดสอบจำลองกับกลุ่มของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลาย ๆ ตัว ทำงานพร้อมกันใน





สภาวะแวดล้อมเดียวกันเพื่อให้เหมือนกับสภาพการทำงานจริง และควรมีการทดสอบหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่กำลังมีการเคลื่อนที่ด้วย

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

ประยัต สุปะกำ. (2553). Fuzzy Logic. สืบค้นจาก <http://alaska.renu.ac.th/text/fuzzylogic.pdf> [1]

Luca, A. D. (2008). *Trajectory Planning in Cartesian space*. Retrieved from [http://www.diag.uniroma1.it/~deluca/rob1\\_en/14\\_TrajectoryPlanningCartesian.pdf](http://www.diag.uniroma1.it/~deluca/rob1_en/14_TrajectoryPlanningCartesian.pdf)

Ali, R. S., Aldair, A. A., & Almousawi, A. K. (2014). Design an Optimal PID Controller using Artificial Bee Colony and Genetic Algorithm for Autonomous Mobile Robot. *Computer Applications*, 100(16), 8-16.

Edouard, L., Toni, P., & Ivan, P. (2010). MODELLING OF MOBILE ROBOT DYNAMICS. In *Proceeding of the 7<sup>th</sup> EUROSIM Congress on Modelling and Simulation in Czech (6-10 September 2010)*. N.P.: n.p.

Faisal, M., Hedjar, R., Al Sulaiman, M., & Al-Mutib, K. (2013). Fuzzy Logic Navigation and Obstacle voidance by a Mobile Robot in an Unknown Dynamic Environment. *Advanced Robotics Systems*, 10, 1-7.

Lee, J. H., Lin, C., Lim, H., & Lee, J. M. (2009). Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Mobile Robot in the RFID Sensor Space. *Control, Automation and Systems*, 7, 429-435. DOI 10.1007/s12555-009-0312-7.

Mishra, E. A. (2014). Trajectory Tracking of Differential Drive Wheeled Mobile Robot. *Mechanical Engineering and Robotics (IJMER)*, 2, 28-31.

Rached, D., & Ahmad A. H. (2013). Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework. *Advances in Robotics & Automation*, 2, 2-7. DOI.org/10.4172/2168-9695.1000107

Xi, L., & Byung-Jae, C. (2013). Design of Obstacle Avoidance System for Mobile Robot using Fuzzy Logic Systems. *Smart Home*, 7(3), 321-328.

#### Translated Thai Reference

Supakum, P. (2010). Fuzzy Logic. Retrieved from <http://alaska.renu.ac.th/text/fuzzylogic.pdf> [in Thai] [1]

## ประวัติผู้เขียน

|                     |   |
|---------------------|---|
| ชื่อ – นามสกุล      | นายไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ   |
| วัน เดือน ปีเกิด    | 14 มกราคม 2534  |
| ที่อยู่             | 66 หมู่ 1 ต.หนองโพธิ์ อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี 72240   |
| ประวัติการศึกษา     | สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ)<br>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2557 |
| ประวัติการทำงาน     |   |
| พ.ศ.2557 – ปัจจุบัน | ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล<br>คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี                                       |
| เบอร์โทรศัพท์       | 094-4983353   |
| อีเมลล์             | aunnkraisak@gmail.com   |

