

การใช้หุ่นยนต์หลายตัวทำงานผ่านระบบเครือข่ายเพื่อขนส่งแผงโซลาร์เซลล์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NETWORKED MULTIPLE MOBILE ROBOTS FOR SOLAR PANEL TRANSPORTATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Cyber-Physical System

Department of Mechanical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้หุ่นยนต์หลายตัวทำงานผ่านระบบเครือข่ายเพื่อขนส่ง แผงโซลาร์เซลล์
โดย	น.ส.จิราภา ธีรศรีณีย์
สาขาวิชา	ระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา พนมแข็ง)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล ดำรงค์พลาสติก)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พงศกร บำรุงไทย)	

จิราภา ธีรศรีณย์ : การใช้หุ่นยนต์หลายตัวทำงานผ่านระบบเครือข่ายเพื่อขนส่งแผงโซลาร์เซลล์. ( NETWORKED MULTIPLE MOBILE ROBOTS FOR SOLAR PANEL TRANSPORTATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง

ระบบหุ่นยนต์หลายตัวส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานหรือถูกนำมาใช้เมื่อไม่สามารถทำงานด้วยหุ่นยนต์ตัวเดียวได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึง ระบบหุ่นยนต์หลายตัวสำหรับขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถขนส่งด้วยหุ่นยนต์ตัวเดียวได้ ซึ่งจะเป็นการขนส่งโดยใช้หุ่นยนต์ 2 ตัวในการขนส่ง หุ่นยนต์แต่ละตัวนั้นจะเคลื่อนที่อยู่ภายในรางและเคลื่อนที่ในแนวตรง การควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์เป็นการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้อยู่ในระดับเดียวกันผ่านการวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 2 ตัวด้วยการติด Encoder วัดมุมด้านบนตัวหุ่นยนต์ที่อุปกรณ์จับแผงโซลาร์เซลล์ การควบคุมดังกล่าวจะช่วยลดระยะความต่างของระยะห่างที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามกัน นอกจากนี้ระบบหุ่นยนต์ได้รับการพัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายด้วยเครือข่ายไร้สาย Mesh network เพื่อช่วยพัฒนาการเคลื่อนที่ให้ดียิ่งขึ้นด้วยการส่งข้อมูลสถานะการเคลื่อนที่เพื่อให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวรับทราบการเคลื่อนที่ ณ เวลานั้น ๆ และจากการทดลองทั้งหมดพบว่า ระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามกันมีระยะไม่เกิน 3 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ระบบกายภาพที่เชื่อมประสาน ลายมือชื่อนิสิต .....

ด้วยเครือข่ายไซเบอร์

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270370021 : MAJOR CYBER-PHYSICAL SYSTEM

KEYWORD: Multirobot, Object transportation, Mesh network

Jirapa Tirasaran : NETWORKED MULTIPLE MOBILE ROBOTS FOR SOLAR  
PANEL TRANSPORTATION. Advisor: SURAT KWANMUANG

Multi-robot systems are used in operation where a single robot is not capable. In this thesis, a team of multi-robot system is used to transport an object which the carried object is much larger than a single robot can carry. To transport the oversized object smoothly, control and communication between robots is crucial. In this application, the robots move linearly along rails. The difference position between robots was measured by using incremental encoder attached at gripper on a robot to measure angle between robots and mesh wireless network was used to communicate between robots. A control feedback method was implement using P control to eliminate relative position between the master and slave robot. In addition, mesh network was used to improve movement by communicating about movement situation each other. Through experiments, it has shown that the slave robot can follow the master robot with relative position error less than 3 centimeters.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Cyber-Physical System

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาของดร.สุรัฐ ขวัญเมือง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมไปถึงนาย จุฬปรีชญ์ เพ็ชรช่าง นางสาวสุภาพ หมุดอุบล อาจารย์ทุกท่าน รุ่นพี่ เพื่อนและรุ่นน้องที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณนางสาวมาศฟ้า อัมพะวะผะลิน ที่อำนวยความสะดวกด้านงานเอกสารและการประสานงานต่าง ๆ ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ และบุคคลที่สำคัญที่สุดตลอดการดำเนินชีวิต ขอขอบคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่สนับสนุน ส่งเสริม ให้กำลังใจ สั่งสอน และเสียสละทุกอย่างเพื่อให้ข้าพเจ้าได้ประสบความสำเร็จไปอีกระดับ ขอขอบคุณทุกคนมาก ๆ ค่ะ

จิราภา ธีรศรัณย์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	17
3.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	17
3.2 การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ .....	19
1) รูปแบบการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติหลายตัว.....	19
2) ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh network.....	23
บทที่ 4 วิธีดำเนินการ .....	27
4.1 การจำลองหุ่นยนต์จำลอง.....	27
4.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละตัว .....	27
1) การควบคุมการเคลื่อนที่ .....	27

4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัว .....	30
1) การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ล้อ (Odometry).....	30
2) การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ .....	31
3) การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์.....	36
4) การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนขนาดน้ำหนักของวัตถุที่นำมาใช้ขนส่ง.....	37
4.4 การสื่อสารแบบไร้สาย.....	37
1) การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์.....	40
4.5 การกำหนดระยะความต่างที่ยอมรับได้ของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้.....	42
บทที่ 5 วิธีการทดลองและผลการทดลอง .....	45
5.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ล้อ (Odometry).....	46
1) วิธีการทดลอง .....	46
2) ผลการทดลอง.....	48
5.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วย Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ล้อ (Odometry) .....	48
1) วิธีการทดลอง .....	48
2) ผลการทดลอง.....	49
5.3 การทดสอบการสื่อสารผ่านระบบไร้สาย Mesh network.....	50
1) วิธีการทดลอง .....	50
2) ผลการทดลอง.....	52
5.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์... 53	
1) วิธีการทดลอง .....	54



2) ผลการทดลอง.....	55
5.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์.....	57
1) การทดลองที่ 1 ก่อนเปลี่ยนค่า Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่.....	57
1.1) วิธีการทดลอง.....	57
1.2) ผลการทดลอง.....	58
2) การทดลองที่ 2 หลังเปลี่ยนค่า Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่.....	59
2.1) วิธีการทดลอง.....	59
2.2) ผลการทดลอง.....	59
5.6 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนขนาดน้ำหนักของวัตถุที่นำมาใช้ขนส่ง.....	61
1) วิธีการทดลอง.....	61
2) ผลการทดลอง.....	62
5.7 การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์.....	62
1) การทดลองที่ 1 เปลี่ยนชนิดของข้อมูล.....	63
1.1) วิธีการทดลอง.....	63
1.2) ผลการทดลอง.....	64
2) การทดลองที่ 2 ประยุกต์การสื่อสารไร้สายในการควบคุมการเคลื่อนที่.....	64
2.1) วิธีการทดลอง.....	64
2.2) ผลการทดลอง.....	65
บทที่ 6 สรุปผล.....	69
บรรณานุกรม.....	71
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบของแต่ละการทดสอบ.....	75
ก.1 การทดสอบการสื่อสารผ่านระบบไร้สาย Mesh network.....	76
1) การทดสอบการส่งข้อมูลขนาด 10 bytes.....	76
2) การทดสอบการส่งข้อมูลขนาด 100 bytes.....	78

ก.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์... 79

ก.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์..... 83

ก.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนขนาดน้ำหนักของวัตถุที่นำมาใช้ขนส่ง 87

ก.5 การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์..... 88

ประวัติผู้เขียน..... 90



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ความคล้ายคลึงระหว่างหุ่นยนต์จำลองและหุ่นยนต์จริง.....	27
ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนข้อมูลที่ตัวรับข้อมูลสามารถรับได้ โดยข้อมูลมีขนาด 10 bytes .....	52
ตารางที่ 5.2 แสดงจำนวนข้อมูลที่ตัวรับข้อมูลสามารถรับได้ โดยข้อมูลมีขนาด 100 bytes .....	52
ตารางที่ 5.3 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.1 m/s.....	55
ตารางที่ 5.4 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.2 m/s.....	56
ตารางที่ 5.5 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.3 m/s.....	56
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบผลที่ได้จากค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วต่าง ๆ โดยควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ด้วย $K_p = 0.2$ .....	57
ตารางที่ 5.7 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยใช้ $K_p = 0.2$ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.1 m/s .....	58
ตารางที่ 5.8 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยใช้ $K_p = 0.2$ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.2 m/s .....	58
ตารางที่ 5.9 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยใช้ $K_p = 0.2$ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.3 m/s .....	58
ตารางที่ 5.10 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและเปลี่ยนค่า $K_p$ ตามระยะห่างดังกล่าว .....	59
ตารางที่ 5.11 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและเปลี่ยนค่า $K_p$ ตามระยะห่างดังกล่าว .....	59
ตารางที่ 5.12 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและเปลี่ยนค่า $K_p$ ตามระยะห่างดังกล่าว .....	60

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไป ก่อน และหลังเปลี่ยนค่า  $K_p$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว..... 60

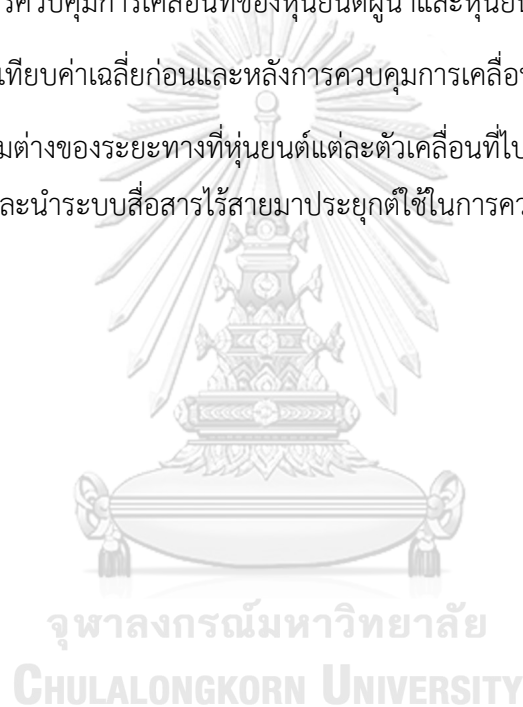
ตารางที่ 5.14 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเพิ่ม น้ำหนักที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับ ..... 62

ตารางที่ 5.15 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ เปลี่ยนชนิดข้อมูลในการสื่อสาร ..... 64

ตารางที่ 5.16 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ เปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำและหุ่นยนต์ผู้ตาม..... 65

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยก่อนและหลังการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์..... 67

ตารางที่ 5.18 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อมีการ ควบคุมการเคลื่อนที่และนำระบบสื่อสารไร้สายมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ ..... 68



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ข้อมูลสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของกฟผ.ปี 2564.....	2
รูปที่ 1.2 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา.....	3
รูปที่ 1.3 ตัวอย่างข้อมูลแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 330W .....	4
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของหลังคาที่เกี่ยวข้องต่อการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ .....	4
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยการผลัก.....	8
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยการยึด .....	8
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยวิธีการกักขัง.....	9
รูปที่ 2.4 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา.....	10
รูปที่ 2.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ตามข้อกำหนดของหุ่นยนต์ผู้นำและผู้ตาม .....	11
รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ผู้นำและผู้ตามที่ใช้ในงานวิจัย .....	11
รูปที่ 2.7 รูปแสดงการเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางของระบบหุ่นยนต์.....	12
รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตาม ผ่านการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุที่ หุ่นยนต์ผู้นำพาไป.....	12
รูปที่ 2.9 รูปด้านซ้ายแสดงภาพจำลองการยึดจับเบื้องต้นก่อนเริ่มการเคลื่อนที่ .....	13
รูปที่ 2.10 การขนส่งของหุ่นยนต์เลียนแบบมด.....	14
รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เลียนแบบมด.....	14
รูปที่ 2.12 การติดตั้ง support ที่หุ่นยนต์แต่ละตัว.....	15
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์.....	16
รูปที่ 3.1 Gantry mechanism .....	17
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบ Gantry.....	18
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัว .....	20

รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัวผ่านการควบคุมด้วยตัวกลาง .....	21
รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัวผ่านการควบคุมแบบกระจาย .....	22
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการทำงานในรูปแบบการทำงานร่วมกันแบบถ่อมตัว.....	23
รูปที่ 3.7 การสื่อสารในรูปแบบ Access Point .....	23
รูปที่ 3.8 การสื่อสารระบบเครือข่ายไร้สายรูปแบบ Mesh network.....	24
รูปที่ 3.9 ลำดับขั้นการเชื่อมต่อของแต่ละสถานี.....	25
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการเชื่อมต่อในรูปแบบการสื่อสารไร้สาย Mesh network .....	26
รูปที่ 4.1 หุ่นยนต์จำลอง.....	28
รูปที่ 4.2 Faulhaber motor.....	28
รูปที่ 4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อแต่ละล้อของหุ่นยนต์ .....	29
รูปที่ 4.4 การวัดมุมด้วย Encoder ที่ติดอยู่บนหุ่นยนต์ .....	32
รูปที่ 4.5 Encoder วัดมุมถูกต่อตรงเข้ากับที่จับของหุ่นยนต์ผู้ตาม .....	33
รูปที่ 4.6 ที่จับของหุ่นยนต์ผู้ตาม .....	33
รูปที่ 4.7 ที่จับของหุ่นยนต์ผู้นำ.....	34
รูปที่ 4.8 ระบบหุ่นยนต์หลายตัวที่ใช้ในการทดลอง .....	34
รูปที่ 4.9 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ด้วยมุม .....	35
รูปที่ 4.10 การขยายแฉงโซล่าเซลล์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ แม้การเคลื่อนที่ตามรูปซ้าย และรูปขวาจะวัดค่ามุมออกมาได้เท่ากัน แต่ค่าความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปมีค่าไม่เท่ากัน .....	36
รูปที่ 4.11 การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์กับจุดควบคุมกลางในระยะที่จุดควบคุมกลางครอบคลุมถึง ..	38
รูปที่ 4.12 การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์กับจุดควบคุมกลาง ในระยะที่จุดควบคุมกลางไม่สามารถ ครอบคลุมถึง .....	39
รูปที่ 4.13 painless Mesh network.....	40
รูปที่ 4.14 การรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ ผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย Mesh network.....	41

รูปที่ 4.15 การรับส่งข้อมูลเพิ่มเติมระหว่างหุ่นยนต์.....	42
รูปที่ 4.16 ระยะที่ยอมรับได้ในการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์.....	43
รูปที่ 4.17 การคำนวณหาระยะที่ยอมรับได้.....	44
รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	46
รูปที่ 5.2 หุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1.....	47
รูปที่ 5.3 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 1 ตัวผ่าน Simulink.....	47
รูปที่ 5.4 การส่งค่าและรับค่าระหว่างโปรแกรม MATLAB กับ Microcontroller board.....	47
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของล้อจากการแปลงค่า encoder (Odometry position).....	48
รูปที่ 5.6 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วย Encoder ที่ล้อ (Odometry).....	49
รูปที่ 5.7 ภาพจำลองการวางบอร์ดสำหรับทดสอบการสื่อสาร.....	51
รูปที่ 5.8 หุ่นยนต์จำลองแบบที่ 2.....	54
รูปที่ 5.9 เพิ่มน้ำหนักให้หุ่นยนต์แต่ละตัวตัวละ 5 กิโลกรัม.....	61
รูปที่ 5.10 เพิ่มน้ำหนักให้หุ่นยนต์แต่ละตัวตัวละ 8 กิโลกรัม.....	62
รูปที่ 5.11 ค่ามุมที่วัดได้จากการทดลองเมื่อค่า $K_t = K_f = 0.1$ .....	66

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในยุคปัจจุบันหุ่นยนต์เข้ามามีบทบาทในการทำงานร่วมกับมนุษย์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไม่ว่าจะเป็นเป็นการทำงานเพื่อช่วยผ่อนแรงของมนุษย์ ตั้งแต่การทำงานที่มีรูปแบบการทำงานซ้ำ ๆ ไม่ซับซ้อนมากไปจนถึงการทำงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้นก็ตาม เนื่องด้วยความสามารถในการรวบรวมข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในยุคดิจิทัล ทำให้หุ่นยนต์สามารถประมวลผลได้ดีมากขึ้นกว่าในอดีตและสามารถทำงานซับซ้อนได้มากขึ้นเรื่อย ๆ โดยอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ได้มีการพัฒนาหุ่นยนต์ให้มีความสามารถและมีความน่าเชื่อถือทั้งในด้านความแม่นยำ ความปลอดภัยและด้านอื่น ๆ เพิ่มขึ้นเพื่อทำให้มนุษย์มีความมั่นใจในการนำหุ่นยนต์เข้ามาใช้งานในชีวิตจริง

และอีกด้านหนึ่งที่เราควรให้ความสำคัญควบคู่ไปกับเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นไปในทุก ๆ วัน คือพลังงานต่าง ๆ ที่เรานำมาใช้โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า ทุกวันนี้พลังงานที่นำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมนั้น ส่วนใหญ่ล้วนเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดสิ้นไป หรือใช้เวลานานในการที่จะสร้างพลังงานดังกล่าวขึ้นมาใหม่ ไม่ว่าจะเป็นแก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน น้ำมัน หรือพลังงานอื่น ๆ อ้างอิงตามรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นข้อมูลสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของ กฟผ.ปี 2564 เพื่อเป็นการรักษาทรัพยากรต่าง ๆ ให้อยู่กับเราไปอย่างยาวนาน ในปัจจุบันพลังงานทดแทนจึงเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นพลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานไฟฟ้าจากขยะ รวมไปถึงพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมมากในประเทศไทย เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานดังกล่าวได้จากหลากหลายพื้นที่ทั่วประเทศไทย [1] ทำให้ได้รับความนิยมและได้รับการพัฒนาให้เหมาะสมต่อการใช้งานในสถานที่และโอกาสต่าง ๆ มากขึ้นเรื่อย ๆ



ประเภทเชื้อเพลิง	สะสมเดือนมกราคม - เมษายน 2564	
	จำนวน (ล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง)	ร้อยละ
ก๊าซธรรมชาติ	37,886.19	60.31
ถ่านหิน (รวมลิกไนต์)	14,481.89	23.05
พลังงานหมุนเวียน (พลังน้ำ, อื่นๆ)	10,198.65	16.23
น้ำมันเตา	29.66	0.05
น้ำมันดีเซล	72.95	0.12
อื่นๆ (สปป.ลาว, มาเลเซีย, ลำตะคองชลภาวัฒนา)	150.28	0.24
<b>รวม</b>	<b>62,819.62</b>	<b>100.00</b>

รูปที่ 1.1 ข้อมูลสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของกฟผ.ปี 2564

ข้อมูล : กองสื่อสารภายนอก ฝ่ายสื่อสารและประชาสัมพันธ์องค์กร กฟผ.

โดยทางกระทรวงพลังงานได้ให้ความสำคัญกับการสร้างพลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์เช่นเดียวกัน ทางกระทรวงมีการกำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทน เพื่อให้สามารถดำเนินการพัฒนาพลังงานทดแทนด้านต่าง ๆ ให้สามารถผลิตไฟฟ้ารวมสะสมถึงปี 2565 จำนวน 5,604 เมกะวัตต์ ประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ 500 เมกะวัตต์ พลังงานลม 800 เมกะวัตต์ พลังงานน้ำ 324 เมกะวัตต์ พลังงานชีวมวล 3,700 เมกะวัตต์ ก๊าซชีวภาพ 120 เมกะวัตต์ ชยะ 160 เมกะวัตต์และพลังงานอื่น ๆ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ภายในคู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานแสงอาทิตย์) [2]

สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้ หนึ่งในอุปกรณ์สำคัญสำหรับการเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวคือ โซลาร์เซลล์ ในปัจจุบันโซลาร์เซลล์ได้รับความนิยมในการติดตั้งตามสถานที่ต่าง ๆ มากขึ้น เพื่อช่วยในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าการใช้งานตามครัวเรือน ส่วนใหญ่นั้นจะมีการติดตั้งโซลาร์เซลล์ในบริเวณลานกว้างหรือบนหลังคาโรงงาน ซึ่งการติดตั้งบนหลังคานั้นค่อนข้างได้รับความนิยมเนื่องจากประหยัดพื้นที่ อย่างไรก็ตามต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีราคาค่อนข้างสูง ใช้เวลาในการคืนทุนประมาณ 5-6 ปี [3] ทำให้ผู้ประกอบการหลายรายเลือกที่จะยังไม่ลงทุนในการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แต่เนื่องด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ใช้แล้วไม่หมดไป เพื่อพัฒนาให้พลังงานทางเลือกดังกล่าว เป็นพลังงานทางเลือกที่คุ้มค่าต่อการลงทุนและเพิ่มความเหมาะสมในการนำมาใช้งานมากขึ้น การลดต้นทุนจึงเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญไม่น้อย

สำหรับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา ส่วนใหญ่จะกระทำโดยการนำแผงโซลาร์เซลล์ขึ้นไปติดตั้งบนโครงสร้างที่ได้จัดเตรียมไว้ล่วงหน้าทีละแผงดังรูปที่ 1.2 เนื่องด้วยการติดตั้งส่วนใหญ่ตัวแผงจะราบไปกับหลังคาเดิม มีช่องว่างใต้แผงที่ติดตั้งเล็กน้อย ทำให้การประกอบและติดตั้งแผง

โซลาร์เซลล์แต่ละแผงที่หน้างาน (บนหลังคา) นั้นเข้าถึงได้ยาก เมื่อเทียบกับการประกอบแผงต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกันล่วงหน้าจากโรงงานที่สามารถติดตั้งได้สะดวกและสามารถตรวจสอบจุดยึด จุดเชื่อมต่อต่าง ๆ ได้ล่วงหน้า จึงเกิดแนวคิดในการที่จะทำการประกอบแผงโซลาร์เซลล์หลายแผงเข้าด้วยกันล่วงหน้าในพื้นที่ทำงานภายในโรงงานก่อนที่จะนำขึ้นไปติดตั้งบนหลังคาทั้งชุด ซึ่งวิธีการดังกล่าว สามารถที่จะลดเวลาในการประกอบและติดตั้ง ซึ่งสามารถที่จะลดต้นทุนในการติดตั้งในส่วนของเวลาและแรงงานคน รวมไปถึงการลดจุดผิดพลาด ตลอดจนลดความเสียหายของอุปกรณ์ทั้งก่อนและระหว่างการติดตั้ง

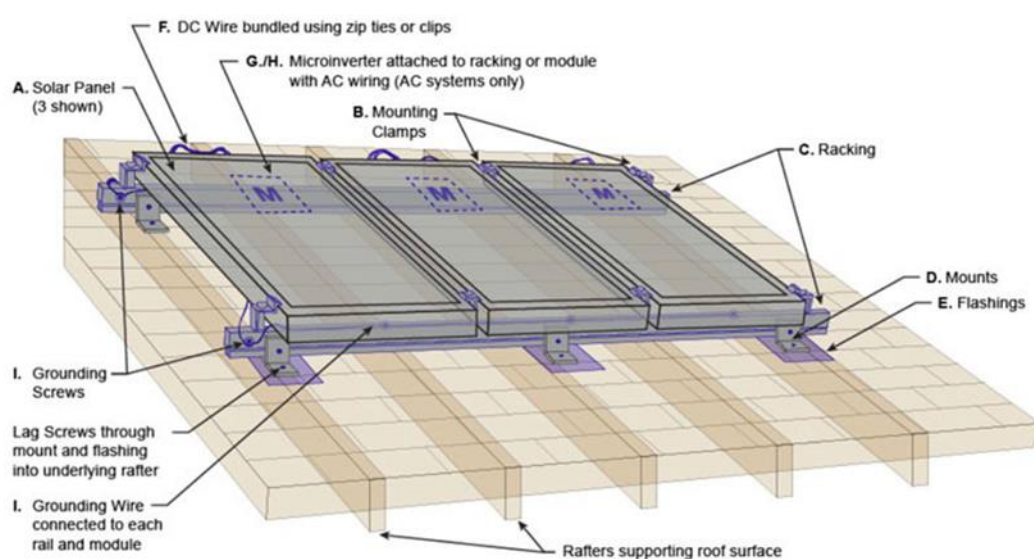


รูปที่ 1.2 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา [4]

อย่างไรก็ตามจากการสืบค้นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแผงโซลาร์เซลล์ในรูปที่ 1.3 จะพบว่า น้ำหนักของแผงโซลาร์เซลล์ขนาดประมาณ 330 W ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้งานทั่วไป แต่ละแผงจะมีน้ำหนักประมาณ 20-30 กิโลกรัม [5, 6] ดังนั้น การประกอบแผงโซลาร์เซลล์หลายแผงเข้าด้วยกันเป็นโมดูลจะทำให้ น้ำหนักรวมของโมดูลมากถึง 100 กิโลกรัมขึ้นไป การใช้แรงงานคนยกโมดูลดังกล่าวเพื่อนำไปติดตั้งที่รางติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคานั้น อาจทำให้เกิดอันตรายต่อทั้งคนงาน รวมไปถึงอาคาร อาจจะได้รับ ความเสียหายเนื่องจากคนงานทำการเดินขนส่งบนจุดที่ไม่ใช่โครงสร้างรับน้ำหนักของตัวอาคาร ซึ่งอาจทำให้เกิดการทรุดตัวของตัวของพื้นอาคารและเกิดการรั่วซึมของน้ำฝนได้ในอนาคต ซึ่งปัญหานี้แก้ไขได้ยาก เนื่องจากจุดที่รั่วซึมมักจะอยู่ใต้โครงสร้างแผงซึ่งเข้าถึงได้ยาก

Model	LUM 24330
Wattage (Wp)	330 Wp
Panel Type	PolyCrystalline
Warranty	144 months
Solar Panel Dimension (L*B*T) cm	197.6*99.1*3.5 CM
Net weight (kg.)	22.5 kg
Short Circuit Current, Isc (A)	9.22 A
Maximum Power Voltage Vmp (V)	38.03 V
Open Circuit Voltage, Voc (V)	45.53 V
Maximum Power Current , Imp (A)	8.68 A

รูปที่ 1.3 ตัวอย่างข้อมูลแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 330W [7]



รูปที่ 1.4 โครงสร้างของหลังคาที่เกี่ยวข้องต่อการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ [8]

ทั้งในส่วนของการขนแผงโซลาร์เซลล์ไปติดตั้งซึ่งเป็นการทำงานที่มีรูปแบบการทำงานซ้ำ ๆ ความต้องการในการลดต้นทุนในส่วนของคุณค่าและแรงงานคน รวมไปถึงความปลอดภัยต่าง ๆ หน่วยงานจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ดีในการช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น โดยหน่วยงานดังกล่าวจะเคลื่อนที่อยู่บนรางสำหรับติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ที่ถูกติดตั้งอยู่บนคานของอาคารซึ่งน้ำหนักของหน่วยงานจะลงไป

ยังรางและคานทำให้ปลอดภัยต่อตัวอาคารและยังช่วยลดอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้นต่อคนงานจากการยกของที่มีน้ำหนักมากด้วยเช่นกัน

หุ่นยนต์ดังกล่าวข้างต้นทำหน้าที่ในการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ที่ยังไม่ถูกติดตั้งจากด้านหนึ่งของรางแล้วเคลื่อนที่นำแผงโซลาร์เซลล์ไปติดตั้งที่อีกฝั่งหนึ่งของรางโดยจะมีพนักงานติดตั้งแผงประจำอยู่ ณ จุดที่ต้องทำการติดตั้ง ซึ่งในบางสถานที่รางมีความยาวหลายร้อยเมตร ดังนั้นการนำหุ่นยนต์เข้ามาช่วยในการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อนำไปติดตั้งนั้น ช่วยทั้งลดแรงงานคนและประหยัดเวลาได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามก็มีบางกรณีที่แผงโซลาร์เซลล์ถูกประกอบเข้าด้วยกันมากกว่า 10 แผงก่อนถูกยกขึ้นมาติดตั้งบนหลังคา การที่แผงโซลาร์เซลล์ที่ถูกประกอบนั้นมีความยาวที่มาก ทำให้ต้องติดตั้งแผงดังกล่าวบนรางติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ 2 รางหรือมากกว่านั้นขึ้นกับความยาวของชุดแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้ง การที่จะนำหุ่นยนต์มาช่วยในการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์นั้น ไม่สามารถขนส่งได้ด้วยหุ่นยนต์ตัวเดียวดั้งเดิมได้ เนื่องด้วยเงื่อนไขในการทำงานที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่อยู่ภายในราง ดังนั้นจึงต้องใช้จำนวนหุ่นยนต์ที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องการติดตั้ง เพื่อที่จะขนส่งชุดแผงโซลาร์เซลล์ชุดนั้นให้เคลื่อนที่ไปได้ โดยหุ่นยนต์แต่ละตัวนั้นจะต้องทำงานประสานกันเพื่อขนส่งชุดแผงโซลาร์เซลล์ จึงเกิดวิทย์ยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น

วิทย์ยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์หลายตัวเพื่อใช้ในการขนส่งวัตถุ และเนื่องจากการทดลองในสถานที่จริงนั้น สามารถทำได้ยากและไม่บ่อยครั้งดังนั้นวิทย์ยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดสอบผ่านการจำลองด้วยหุ่นยนต์จำลองและรางจำลองที่สร้างขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น หากมีการพัฒนาทั้งทางด้านเทคโนโลยี การนำหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้รวมไปถึงการพัฒนากระบวนการผลิตแผงโซลาร์เซลล์ซึ่งทำให้ต้นทุนโดยรวมของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงได้ ย่อมทำให้ทั้งผู้ประกอบการและครัวเรือนจะให้ความสำคัญและให้ความสนใจในการใช้พลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทย์ยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาและพัฒนาการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จำลองให้สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่เกิดการติดขัดของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการขนย้าย
- 2) เพื่อศึกษาผลของการสื่อสารไร้สายแบบ Mesh network ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์ต่อการเสริมความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของชุดหุ่นยนต์

## 1.3 ขอบเขตของวิทย์ยานิพนธ์

วิทย์ยานิพนธ์นี้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขนส่งจำลองจำนวน 2 ตัว โดยหุ่นยนต์จำลองมีขนาดเท่ากับ 1/6 เท่าของหุ่นยนต์จริง เคลื่อนที่บนรางจำลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ต้นแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วยหุ่นยนต์จำนวนหลายตัว
- 2) ระบบสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์ที่จะสามารถเสริมความสามารถของระบบควบคุมระบบหุ่นยนต์ในข้างต้นได้



## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำระบบหุ่นยนต์หลายตัวมาใช้ร่วมกับงานในด้านต่าง ๆ มากมาย ทั้งการนำไปใช้ในงานที่มีความเสี่ยงสูงหรืออันตราย งานใต้น้ำ สสำรวจพื้นที่ และอื่น ๆ จากงานวิจัยของ Tamio Arai [9] ซึ่งทำการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบหุ่นยนต์หลายตัวไว้ในหลากหลายรูปแบบและได้แบ่งหัวข้องานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้ ระบบหุ่นยนต์หลายตัวที่ได้แรงบันดาลใจมาจากระบบทางชีวภาพ การสื่อสารของระบบหุ่นยนต์หลายตัว โครงสร้างของระบบหุ่นยนต์หลายตัว การทำ Localization/การทำแผนที่/การสำรวจ การขนส่งวัตถุและการจัดการ การประสานงานการเคลื่อนไหว และระบบหุ่นยนต์ที่สามารถกำหนดค่าใหม่เองได้ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ งานวิจัยที่สนใจคืองานวิจัยในหัวข้อของการขนส่งวัตถุและการจัดการ ซึ่งการรวบรวมของทีมของ Tamio Arai ทำให้สามารถพบเจอต่อย่างงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้สะดวกมากขึ้น และอีกหนึ่งงานวิจัยที่ได้รวบรวมเกี่ยวกับระบบหุ่นยนต์หลายตัวคืองานวิจัยของทีมของ Elio [10] เป็นการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบหุ่นยนต์สำหรับขนส่งวัตถุโดยเฉพาะ ทั้งการขนส่งในรูปแบบการผลักโดยหุ่นยนต์จะผลักวัตถุที่ต้องการขนส่งไปยังจุดหมาย หรือการขนส่งโดยการใช้ที่จับ และรูปแบบสุดท้ายคือการขนส่งโดยการที่หุ่นยนต์หลายตัวล้อมวัตถุเอาไว้แล้วขนส่งวัตถุไปยังปลายทาง ภายในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับข้อดี ข้อเสีย ของการขนส่งในรูปแบบต่าง ๆ รวมไปถึงการค้นหาตัวอย่างงานวิจัยในรูปแบบการขนส่งที่เราสนใจได้

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับข้อดี ข้อเสีย จากทางวิจัยของทีมของ Elio สามารถสรุปเกี่ยวกับข้อดีและข้อเสียของการขนส่งวัตถุด้วยระบบหุ่นยนต์หลายตัวในแต่ละแบบได้ดังต่อไปนี้ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะทำให้สามารถเลือกรูปแบบการขนส่งที่เหมาะสมกับงานได้

#### - การผลัก

เป็นวิธีการขนส่งที่นิยมใช้กับวัตถุที่ไม่สามารถจับได้ ซึ่งวิธีนี้จะต้องมีการควบคุมการเคลื่อนที่เป็นอย่างดีรวมถึงการรักษาตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์ แรงที่ใช้ผลักและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น มิเช่นนั้นวัตถุอาจจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการได้ สำหรับงานวิจัยที่ใช้การขนส่งด้วยวิธีนี้ ส่วนใหญ่จะทำให้เงื่อนไขในการขนส่งนั้นง่ายขึ้นด้วยการจัดตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์ให้อยู่ใกล้กับวัตถุที่ต้องการขนย้ายมากที่สุดและหันด้านเดียวกับทางที่จะผลัก เพื่อให้การขนส่งทำได้ง่ายขึ้น [11-13]

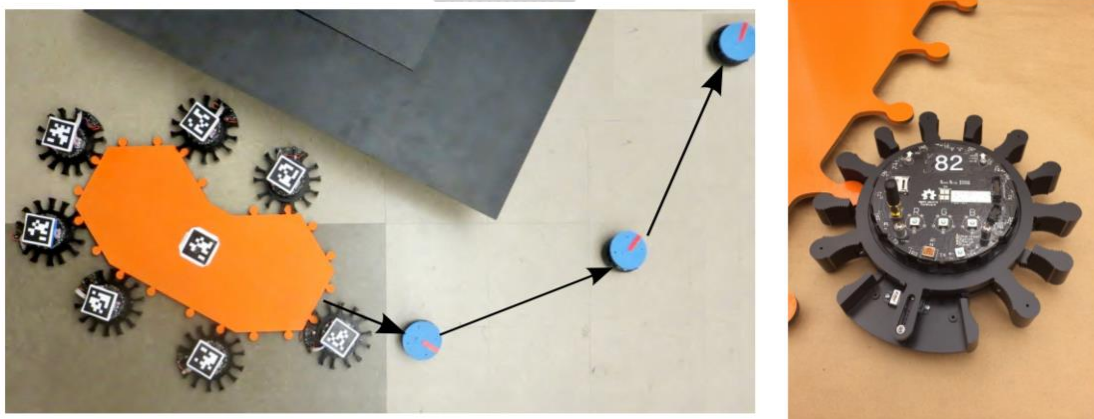




รูปที่ 2.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยการผลัก [14]

- การยึด (Grasping strategies)

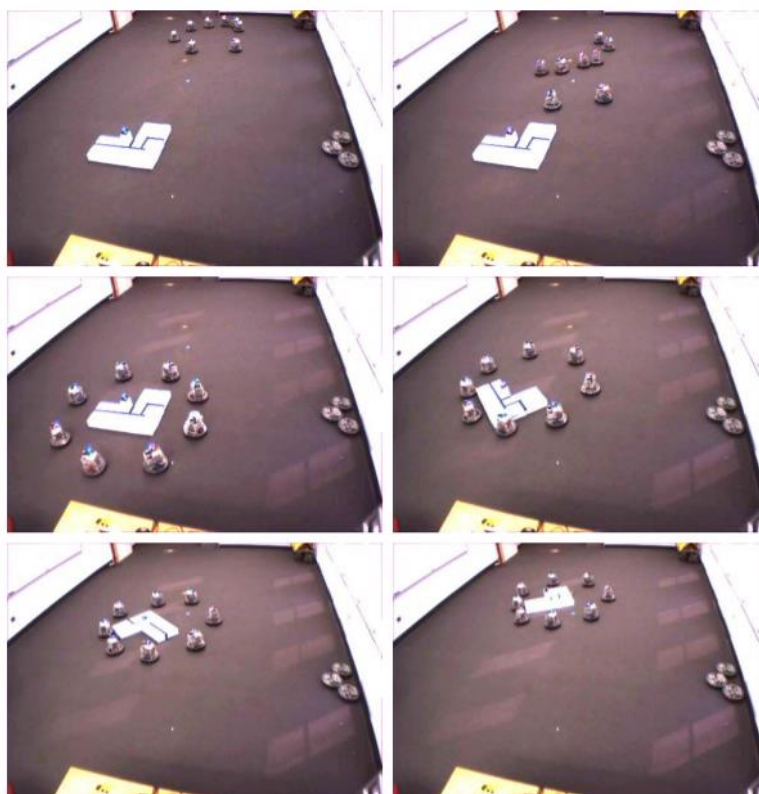
งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับการขนส่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์หลายตัวเลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากเมื่อเทียบวิธีนี้กับการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วยการผลักจะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ดีกว่า และสามารถใช้ในการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะอยู่ในรูปแบบของการผลักหรือการดึงก็ได้ และในบางกลไก อุปกรณ์สำหรับยึดจับวัตถุยังสามารถยกวัตถุได้อีกด้วย แต่วิธีนี้ก็ต้องการการการก่อสร้างที่จับที่มีความมั่นคงและมีประสิทธิภาพในการยึดจับวัตถุ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาต่างๆ เช่นการรักษาสมดุลของแรงในการจับวัตถุให้เคลื่อนที่ไปโดยไม่หล่นหรือเคลื่อนที่ไปชนสิ่งของโดยรอบระหว่างขนส่งนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่แก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการให้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวยึดจับวัตถุให้มั่นคงก่อนที่จะเริ่มเคลื่อนที่เพื่อขนส่งวัตถุไป [15, 16]



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยการยึด [17, 18]

- กรง/กักขัง (Caging Strategy)

จะมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายแบบผลัก แต่จะมีความพิเศษกว่าตรงที่กลุ่มของหุ่นยนต์จะล้อมวัตถุเอาไว้เหมือนเป็นกรงล้อม เพื่อมั่นใจได้ว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกลุ่มของหุ่นยนต์ การขนส่งในลักษณะนี้นั้น จะต้องควบคุมระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์และวัตถุให้คงที่เพื่อมั่นใจได้ว่าวัตถุจะไม่หลุดออกจากกลุ่มของหุ่นยนต์ [19]



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยวิธีการกักขัง [20]

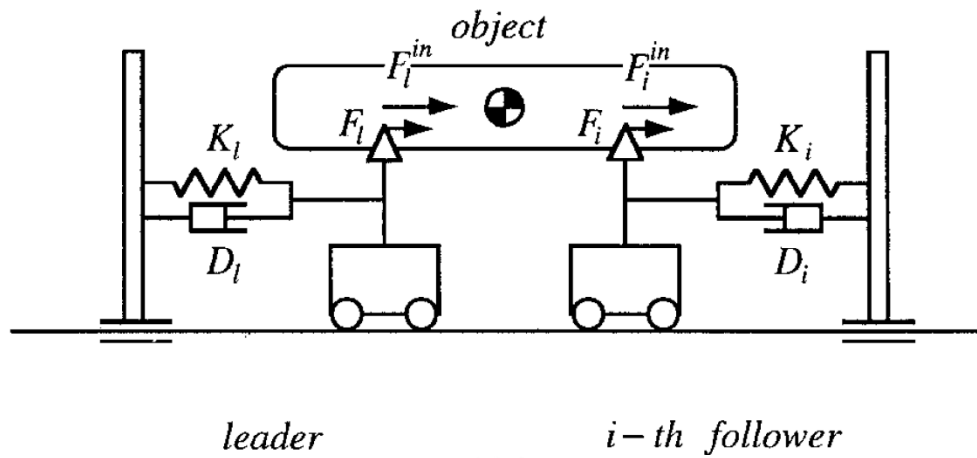
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกการขนส่งวัตถุโดยการที่หุ่นยนต์มีอุปกรณ์ในการที่จะยึดจับวัตถุเพื่อใช้ในการขนย้าย ถ้าดูจากตัวอย่างตามรูปที่ 2.4 ในการติดตั้งแผงโซล่าเซลล์บนหลังคานั้น แผงโซล่าเซลล์จะถูกยกขึ้นไปวางบนด้านหนึ่งของรางติดตั้งแผงโซล่าเซลล์และหุ่นยนต์จะขนย้ายแผงดังกล่าวด้วยการยกแผงโซล่าเซลล์จากด้านหนึ่งแล้วนำไปวางอีกด้านหนึ่งของราง วิธีการขนย้ายด้วยระบบหุ่นยนต์ที่มีที่จับยึดจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานในลักษณะดังกล่าว



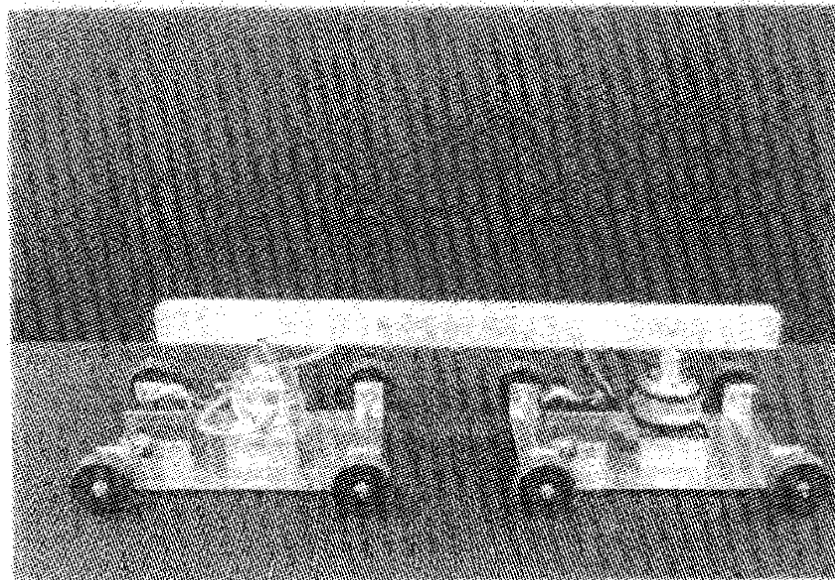


รูปที่ 2.4 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา [21]

ในส่วนของการสื่อสารของระบบหุ่นยนต์หลายตัวเพื่อให้หุ่นยนต์แต่ละตัวสามารถทำงานร่วมกันได้นั้น จะมีการสื่อสารหลัก ๆ อยู่ 2 รูปแบบ คือการสื่อสารผ่านตัวควบคุมกลาง (Centralized control method) และการสื่อสารที่แยกจากศูนย์ควบคุมกลางหรือการสื่อสารแบบกระจายตัว (Decentralized control method หรือ Distributed control method) [22] การสื่อสารที่แยกจากศูนย์ควบคุมกลางนั้น หุ่นยนต์แต่ละตัวจะมีความซับซ้อนมากกว่า ทำงานคล้ายคลึงกับมนุษย์มากกว่า โดย “Decentralized Control of Multiple Robots Handling an Object” ของ Kazuhiro Kosuge, Tomohiro Oosumi [23] หนึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์หลายตัว ได้นำเสนอการควบคุมระบบหุ่นยนต์หลายตัวโดยแยกจากศูนย์ควบคุมกลาง ระบบหุ่นยนต์ดังกล่าวเป็นการเคลื่อนที่ในแนวตรงตามรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 คำสั่งในการควบคุมการเคลื่อนที่จะถูกส่งไปยังหุ่นยนต์ที่เป็นผู้นำ (Leader) และหุ่นยนต์ตัวอื่น ๆ จะประเมินการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำด้วยตัวเองผ่านการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุและรักษาตำแหน่งของวัตถุอยู่ในตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนดไว้ โดยหุ่นยนต์ตัวที่เคลื่อนที่ตามนั้นจะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากการวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำว่าอยู่ห่างออกไปเท่าไรและควบคุมความเร็วตามข้อมูลที่วัดได้เพื่อให้สามารถขนส่งวัตถุดังกล่าวได้



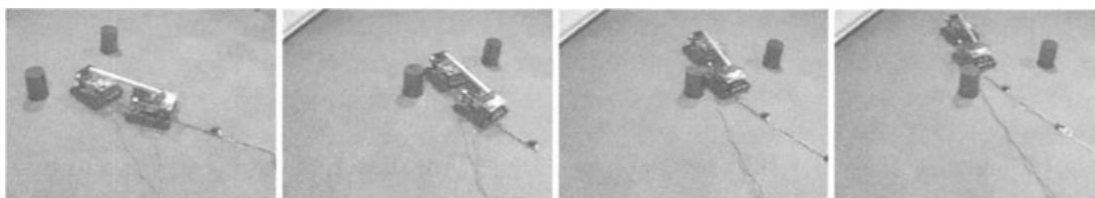
รูปที่ 2.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ตามข้อกำหนดของหุ่นยนต์ผู้นำและผู้ตาม [23]



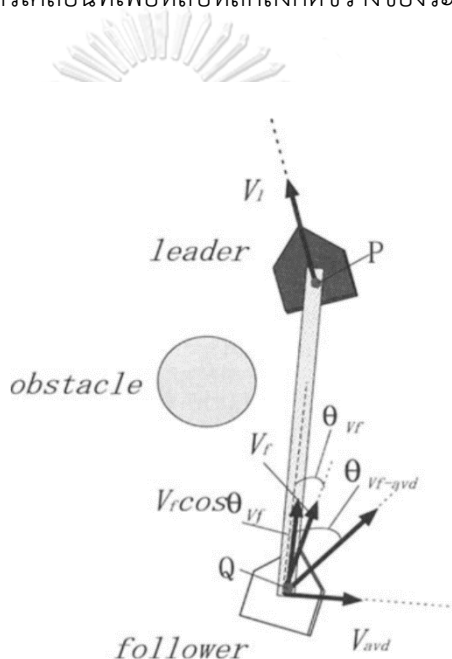
รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ผู้นำและผู้ตามที่ใช้ในงานวิจัย [23]

งานวิจัยข้างต้น [23] ได้มีการพัฒนาการทำงานของระบบหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [24, 25] โดย “Collision Avoidance Algorithm for Two Tracked Mobile Robots Transporting a Single Object in Coordination Based on Function Allocation Concept” ของคุณ Takeda, Hirata et al. 2002 [24] เป็นงานวิจัยที่มีการพัฒนาต่อจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ สำหรับงานวิจัยนี้ ระบบหุ่นยนต์พัฒนาจากการเคลื่อนที่ในแนวตรงเปลี่ยนเป็นสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวระนาบของพื้นที่ (ทั้งแนวแกน X และแนวแกน Y) และสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตามนั้นสามารถวิเคราะห์ผ่านข้อมูลเกี่ยวกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ

และความเร็วในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางตามรูปที่ 2.8 ด้วยการวิเคราะห์แรงที่วัดได้จากการติดเซ็นเซอร์วัดแรงไว้ที่ข้อต่อของหุ่นยนต์และทราบตำแหน่งของสิ่งกีดขวางจากการทำแผนที่ของตำแหน่งของสิ่งกีดขวางไว้



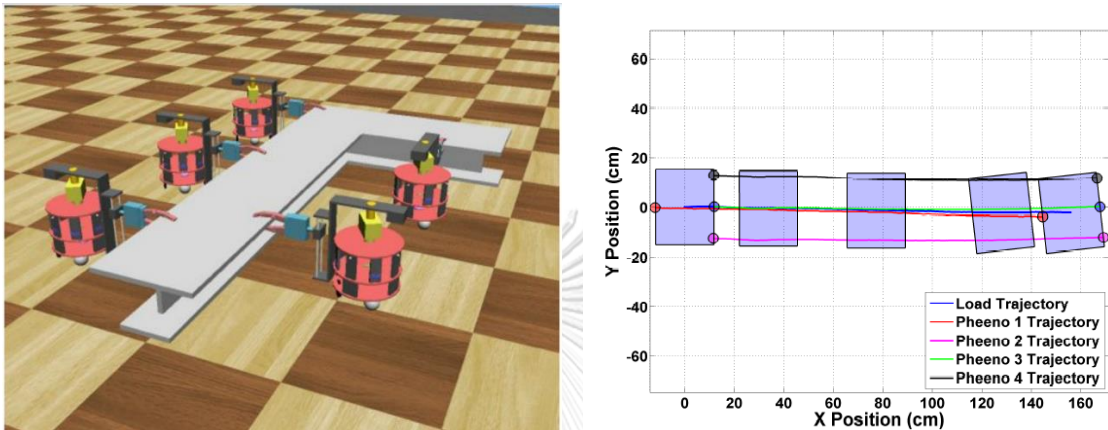
รูปที่ 2.7 รูปแสดงการเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางของระบบหุ่นยนต์ [24]



รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตามผ่านการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุที่หุ่นยนต์ผู้นำพาไป [24]

“Decentralized Sliding Mode Control for Autonomous Collective Transport by Multi-Robot Systems” ของ Farivarnejad et al., (2016) เป็นอีกหนึ่งงานวิจัยที่ต้องการนำเสนอการควบคุมระบบหุ่นยนต์หลายตัวโดยแยกจากศูนย์ควบคุมกลางเช่นกันโดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการขนส่งวัตถุทรงสี่เหลี่ยมด้วยความเร็วที่ต้องการไปยังจุดหมายที่ต้องการในแนวเส้นตรงสำหรับการควบคุมนั้น หุ่นยนต์แต่ละตัวจะไม่มีสื่อสารกับหุ่นยนต์ตัวอื่นและจะทราบเพียงความเร็วของตนเองและทิศทางของส่วนหัวหรือส่วนที่ยึดจับกับวัตถุเท่านั้น และข้อมูลที่ถูกติดตั้งไว้จะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับความเร็วที่ต้องการให้เคลื่อนที่และทิศทางที่ต้องการจะให้ไป โดยก่อนเริ่มเคลื่อนที่

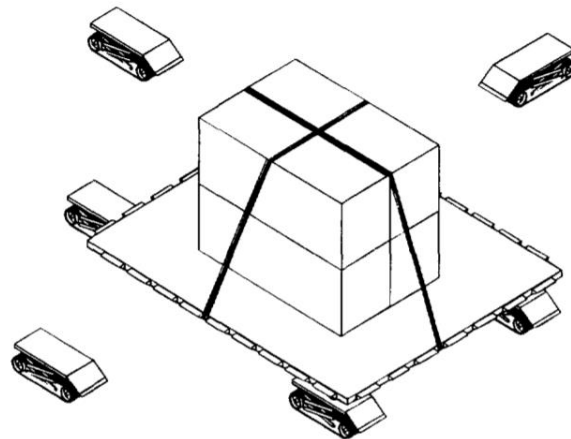
หุ่นยนต์จะถูกติดตั้งให้ยึดจับวัตถุด้วยความมั่นคงก่อนออกตัวเคลื่อนที่ ซึ่งการควบคุมการเคลื่อนย้ายวัตถุด้วยวิธีดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวที่ต้องการได้แต่อาจมีออกจากแนวบ้างเนื่องจากผลของการสั่นไหวของล้อและการคลาดเคลื่อนจากการถูกรบกวนในการวัดทิศทาง [26]



รูปที่ 2.9 รูปด้านซ้ายแสดงภาพจำลองการยึดจับเบื้องต้นก่อนเริ่มการเคลื่อนที่

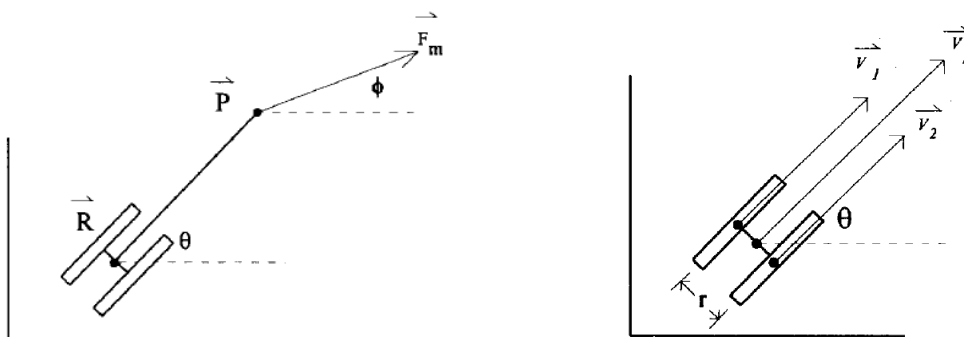
รูปด้านขวาแสดงผลการทดลองโดยวัตถุที่นำมาขนส่งมีการเอียงเล็กน้อยเนื่องจากผลของการสั่นไหว [26]

งานวิจัยต่อมา คืองานวิจัย “Toward the Development of a Material Transport System using Swarms of Ant-like Robots” ของ Stilwell and Bay (1993) [27] งานวิจัยนี้เป็นการเลียนแบบการทำงานของมดที่สามารถขนส่งวัตถุขนาดใหญ่กว่าตัวของมันได้โดยการที่มดหลาย ๆ ตัวช่วยกันขนของ สำหรับระบบหุ่นยนต์หลายตัวนี้ วัตถุสำหรับขนส่งนั้นจะถูกวางอยู่บนแผ่นพื้นแข็ง และหุ่นยนต์แต่ละตัวจะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ใต้แผ่นดังกล่าวเพื่อขนย้ายวัตถุ ระบบหุ่นยนต์นี้มีหุ่นยนต์ผู้นำเพียงตัวเดียวเช่นเดียวกับระบบหุ่นยนต์ที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ โดยหุ่นยนต์ผู้นำนั้นจะเลือกจากการที่หุ่นยนต์ตัวดังกล่าวไปถึงแผ่นพื้นแข็งเป็นตัวแรกหรืออาจจะเป็นตัวที่อยู่ใกล้ปลายทางมากที่สุด โดยหุ่นยนต์ผู้นำนั้นจะทราบตำแหน่งของปลายทางด้วยการสื่อสารผ่านสัญญาณ beacon จากตำแหน่งปลายทางเมื่อหุ่นยนต์ผู้นำได้รับสัญญาณดังกล่าว หุ่นยนต์ผู้นำจะพาหุ่นยนต์ตัวที่เหลือไปยังปลายทาง



รูปที่ 2.10 การขนส่งของหุ่นยนต์เลียนแบบมด [27]

หุ่นยนต์แต่ละตัวของระบบดังกล่าวถูกขับเคลื่อนด้วยล้อ 2 ข้างที่เป็นอิสระต่อกันและที่หุ่นยนต์แต่ละตัวมีเซ็นเซอร์วัดแรงถูกติดตั้งไว้ด้านบนของตัวหุ่นยนต์ซึ่งติดกับแผ่นรองสำหรับขนย้ายวัตถุสามารถหมุนได้อย่างอิสระในตำแหน่งที่ติดกับแผ่นรองวัตถุดังกล่าว [28, 29] ข้อมูลที่ได้จากการวัดแรงและความเร็วของล้อทั้ง 2 ล้อของหุ่นยนต์นั้น ถูกนำมาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ ด้วยการนำทอร์กที่เกิดขึ้นที่ล้อ 2 ข้างของหุ่นยนต์ มาคำนวณหามุมที่หมุนไป นำมุมที่ได้นั้นไปคำนวณหาความเร็วและความเร่งในการเคลื่อนที่รวมไปถึงแรงดึงซึ่งเป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับแผ่นวัตถุแข็งเกร็งที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุ แรงดังกล่าวจะถูกส่งไปยังเซ็นเซอร์ที่วัดแรงของหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ ทำให้หุ่นยนต์ตัวอื่นนั้นสามารถเคลื่อนที่ตามหุ่นยนต์ผู้นำได้โดยไม่ต้องมีการสื่อสารระหว่างกัน ซึ่งหุ่นยนต์ดังกล่าวใช้หลักการในการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ในช่วงที่หมุนหาจุดหมายที่จะไปส่งวัตถุเพื่อเป็นการลดค่า Overshoot ที่อาจจะเกิดขึ้นได้

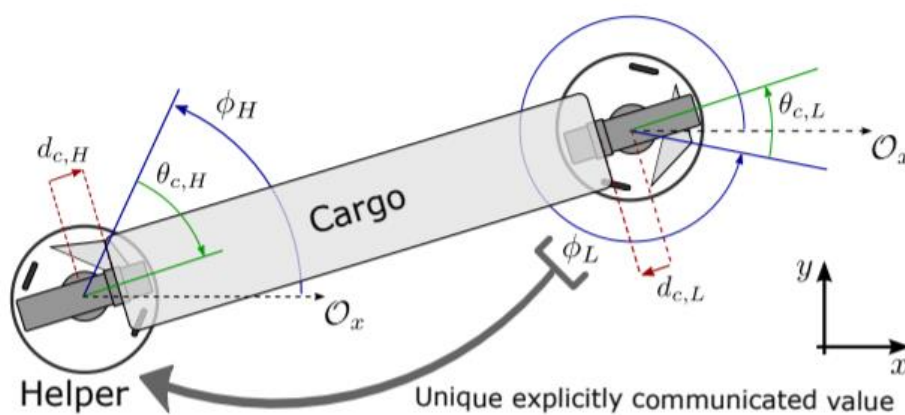


รูปที่ 2.11 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เลียนแบบมด [27]

อีกหนึ่งงานวิจัยที่น่าสนใจสำหรับระบบหุ่นยนต์ขนส่งวัตถุ นั้น คือ งานวิจัย “Multiconstrained joint transportation tasks by teams of autonomous mobile robots using a dynamical systems approach” [30] งานวิจัยนี้ใช้หุ่นยนต์ 2 ตัวในการขนย้ายวัตถุทรงปริซึมสี่เหลี่ยม คำสั่งในการเคลื่อนที่จะถูกส่งไปยังหุ่นยนต์ผู้นำแล้วหุ่นยนต์ผู้ตามจะเคลื่อนที่ตามด้วยการรักษาระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ผ่านการวัดระยะของวัตถุที่เคลื่อนที่ไป เมื่อทราบระยะดังกล่าว หุ่นยนต์ผู้ตามจะเคลื่อนที่ตามโดยฟังก์ชันในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตามจะเป็นฟังก์ชันของความยาวของวัตถุ

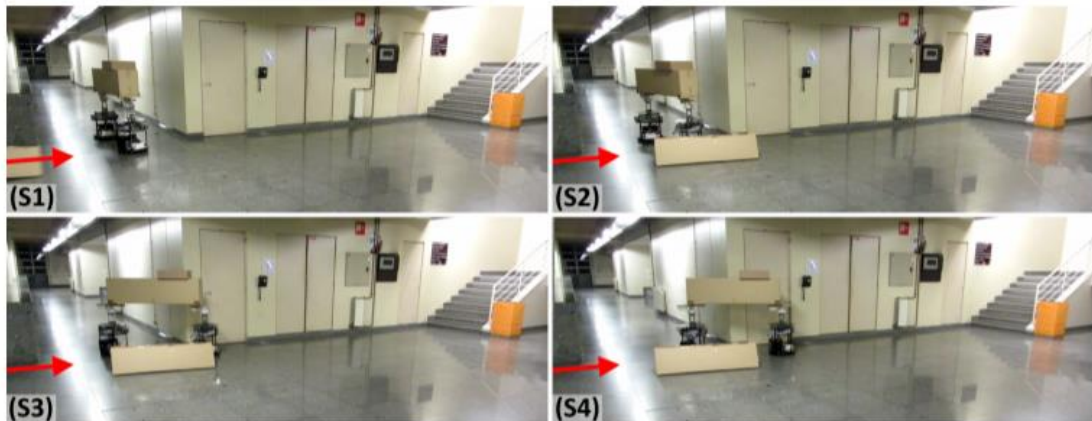
สำหรับการวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น ที่หุ่นยนต์แต่ละตัวจะติด support ที่มี DOF เท่ากับ 2 ที่ด้านบนตรงกลางหุ่น ซึ่ง support นี้สามารถหมุนได้อย่างอิสระ support นี้มีไว้เพื่อวัดระยะสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างระยะกึ่งกลางหุ่นยนต์ไปจนถึงระยะที่วัตถุเคลื่อนที่ออกไปโดยหุ่นยนต์ผู้ตามนั้นจะต้องรักษาระยะดังกล่าวไม่ให้เกินระยะที่ support รองรับได้ มิเช่นนั้นวัตถุที่นำมาขนส่งจะตกลงได้ support ดังกล่าวยังสามารถวัดมุมที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ได้เพื่อทราบการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์และสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยกันได้ตามรูปที่ 2.12

นอกจาก support ที่กล่าวข้างต้น ที่หุ่นยนต์แต่ละตัวมีเซ็นเซอร์เพื่อวัดระยะห่างถึงสิ่งกีดขวางและที่หุ่นยนต์ผู้นำนั้นมีการติดตั้งกล้องเพื่อหาตำแหน่งเป้าหมายหรือสิ่งกีดขวางแล้วจะประมวลหาทิศทางที่จะต้องเคลื่อนที่ไป



รูปที่ 2.12 การติดตั้ง support ที่หุ่นยนต์แต่ละตัว [30]





รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ [30]

นอกจากตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบหุ่นยนต์หลายตัวสำหรับขนย้ายที่กล่าวไปข้างต้น ยังมีงานวิจัยอีกหลายงานวิจัยที่ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวในการขนย้ายวัตถุ มีทั้งใช้ระบบ vision มาช่วยในการขนย้าย [31] การนำหุ่นยนต์หลาย ๆ ตัวมาประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักในการขนย้ายได้มากขึ้น [32] และอื่น ๆ อีกมากมาย

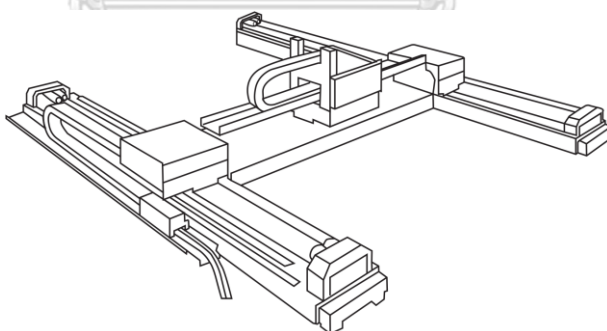
## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

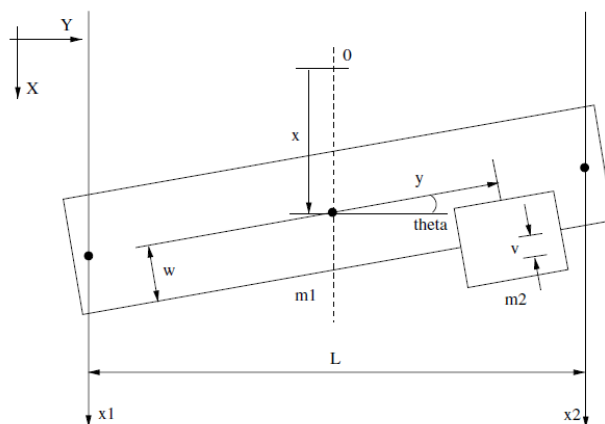
ระบบหุ่นยนต์หลายตัวสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่อยู่บนรางเพื่อขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ นั้นหมายความว่าหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง และการที่หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวนั้นจะสามารถขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ได้อย่างราบรื่นนั้น หมายถึงว่าหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวจะต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ในรูปแบบดังกล่าวนี้คล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่ของระบบ Gantry

ระบบ Gantry เป็นหนึ่งในระบบการเคลื่อนที่ตามแกนพิกัด (Cartesian system) ที่ได้รับความนิยม [33] มีลักษณะตามรูปที่ 3.1 ระบบดังกล่าวเหมาะสำหรับงานขนาดใหญ่ เช่น เครน หรืองานที่ต้องการความแม่นยำสูง ระบบนี้จะมีแนวแกนหนึ่งที่ต้องการความแม่นยำสูงจะมีมอเตอร์ 2 ตัวขับเคลื่อนอยู่ในแนวที่ขนานกัน ในขณะที่ระบบการเคลื่อนที่ตามแกนพิกัดทั่วไปจะควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยมอเตอร์ 1 ตัวต่อการเคลื่อนที่ใน 1 แกน สำหรับระบบ Gantry มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวที่เคลื่อนที่อยู่ในแนวแกนดังกล่าวจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่พร้อมกันเพื่อให้คานที่ติดตั้งพาดระหว่าง 2 มอเตอร์ดังกล่าวเคลื่อนที่ได้อย่างราบรื่นและแม่นยำ



รูปที่ 3.1 Gantry mechanism [33]





รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบ Gantry [33]

หลักการการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ Gantry จะมีหลักเป็น 2 ส่วน [34] คือ

#### 1.1) Center control

Center control จะเป็นการควบคุมตำแหน่งโดยเฉลี่ยของคานเพื่อต้องการทราบว่าตอนนี้คานเคลื่อนที่ไปอยู่ ณ ตำแหน่งไหนของระบบ หรือสามารถที่จะควบคุมให้คานเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการรวมไปถึงการหยุดอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยการกำหนดตำแหน่งเฉลี่ยของคานสามารถกำหนดได้ตามสมการที่ (1)

$$X = (X1+X2)/2 \quad (1)$$

เมื่อ X คือค่าตำแหน่งโดยเฉลี่ยของคาน

#### 1.2) Yaw control

Yaw control จะเป็นการควบคุมการหมุนของคาน ว่าต้องการให้คานสามารถหมุนหรือเอียงได้เท่าไร โดยในการควบคุมจะมีการเก็บค่าข้อมูลการเคลื่อนที่หรือตำแหน่งจากมอเตอร์แต่ละตัวเพื่อนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ หากดูตามรูปที่ 3.2 ถ้าต้องการให้คานเคลื่อนที่ตั้งฉากกับแนวแกนมอเตอร์ 2 ตัวที่เคลื่อนที่ขนานกัน สามารถที่จะควบคุมการหมุนของคานให้มีองศาเท่ากับหรือใกล้เคียง 0 เมื่อแปลงค่ามุมดังกล่าวให้อยู่ในรูปของค่าความต่างของระยะที่มอเตอร์เคลื่อนที่ไปตามสมการที่ (2) - (4) จะได้ว่าค่าความต่างนั้นควรมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียง 0 ซึ่งหลักการ Yaw control จะควบคุมการหมุนของคานผ่านค่าความต่างของระยะที่มอเตอร์เคลื่อนที่ไป

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_1 - X_2}{L}\right) \quad (2)$$

$$\theta \rightarrow 0 \quad (3)$$

$$(X_1 - X_2) \rightarrow 0 \quad (4)$$

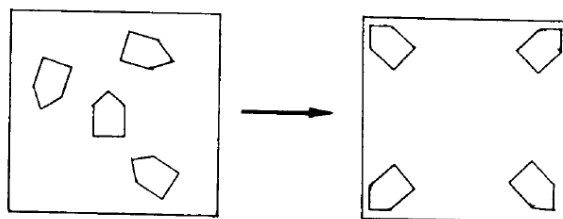
เมื่อกำหนดค่า  $X_1$  และ  $X_2$  เป็นระยะทางที่มอเตอร์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้

การควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนของ Center control จะเป็นการควบคุมตำแหน่งที่ต้องการให้คานที่พาดนั้นไปอยู่ในตำแหน่งใดของระบบ ส่วนการควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนของ Yaw control จะเป็นการควบคุมการหมุนของคาน ดังนั้นสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ต้องการให้หุ่นยนต์ 2 ตัวเคลื่อนที่ไปพร้อมกันเพื่อขนส่งวัตถุได้อย่างไม่ติดขัด ดังนั้นส่วนของการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้คือหลักการ Yaw control โดยแผงโซลาร์เซลล์ที่นำมาขนส่งนั้นก็เปรียบเสมือนคานของระบบ Gantry ว่าเรายอมให้เกิดการหมุนระหว่างขนส่งนั้นมากน้อยเพียงใด

### 3.2 การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์

1) รูปแบบการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติหลายตัว [22]

การทำงานสำหรับมนุษย์นั้นแต่ละคนสามารถทำงานของตนเองแยกอิสระจากการทำงานร่วมกับคนอื่นได้ ในขณะที่เดียวกันหากเกิดการกระทำร่วมกับกับบุคคลอื่นเช่นมีคนเดินถือของมาแล้วเขาไม่เห็นทาง กำลังจะเดินชนเมื่อเราเห็นก็สามารถตอบสนองได้เป็นอย่างดีในการที่จะหลบหลีกได้เนื่องจากในร่างกายมนุษย์นั้นมีประสาทสัมผัสมากมายเพื่อช่วยให้เรากระทำการต่าง ๆ ร่วมกับผู้อื่นได้เป็นอย่างดี ซึ่งถ้าเปรียบมนุษย์กับหุ่นยนต์ก็คือมนุษย์มีเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากมายอยู่ในตัวนั่นเอง ในส่วนของหุ่นยนต์ ปัจจุบันเรายังไม่มีเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากเทียบเท่ากับประสาทสัมผัสของมนุษย์ได้ และเราจะต้องสร้างตรรกะให้กับหุ่นยนต์เพื่อที่หุ่นยนต์แต่ละตัวจะสามารถทำงานของตนเองได้ ในขณะที่เดียวกันหากต้องทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ตัวอื่นก็จะต้องมีการสื่อสารระหว่างกัน ยกตัวอย่างเช่นมีเป้าหมายในการทำงานหนึ่งคือให้หุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกันบริเวณตรงกลางดังรูปที่ 3.3 จะต้องเคลื่อนที่ไปยังมุมห้องโดยแต่ละมุมห้องจะมีหุ่นยนต์ได้เพียง 1 ตัวเท่านั้น ถ้าเปรียบเทียบการทำงานร่วมกันนี้เป็นมนุษย์ ที่เริ่มต้นจากการยืนอยู่กลางห้อง โดยทั่วไปสิ่งที่เราจะทำกันนั้นคือการคูปฏิริยาคนรอบข้าง ทั้งสายตา ทิศทางการขยับร่างกายและอื่น ๆ ในการที่เราจะเลือกจะไปมุมห้องมุมไหนที่ไม่มีคนอื่นไป แต่สำหรับหุ่นยนต์นั้นการตัดสินใจในการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัวสามารถแบ่งได้เป็นวิธีหลัก 2 วิธี คือ การควบคุมผ่านตัวกลาง หรือ การควบคุมแบบกระจาย



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัว [22]

การควบคุมผ่านตัวกลาง คือ การที่ระบบหุ่นยนต์ต้องมีตัวกลางในการประมวลผลและส่งข้อมูลหรือคำสั่งไปยังหุ่นยนต์ทุกตัว โดยตัวกลางนั้นอาจจะเป็นตัวควบคุมแยกออกไปหรือเป็นการใส่ระบบประมวลผลลงในหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ โดยจะแบ่งส่วนประกอบย่อยทั้งระบบฮาร์ดแวร์และระบบซอฟต์แวร์ออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

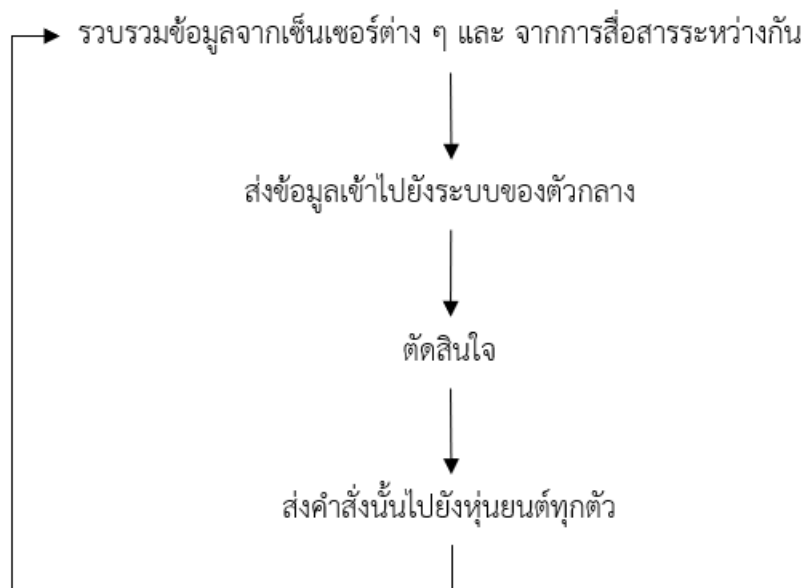
1.1) ส่วนประกอบที่หุ่นยนต์แต่ละตัว

- เซ็นเซอร์เพื่อตรวจจับสิ่งแวดล้อม
- ระบบสื่อสารไปยังตัวกลาง
- กลไกการทำงานของหุ่นยนต์

1.2) ส่วนประกอบที่ตัวกลาง

- ระบบประมวลเพื่อตัดสินใจกระทำการต่าง ๆ
- ระบบสื่อสารกับหุ่นยนต์ตัวอื่น ๆ
- การสร้างแผนที่ในการเคลื่อนที่ให้กับระบบหุ่นยนต์

โดยระบบหุ่นยนต์จะมีขั้นตอนตามแผนภาพในรูปที่ 3.4 เพื่อกระทำการสิ่งใดสิ่งหนึ่งร่วมกัน

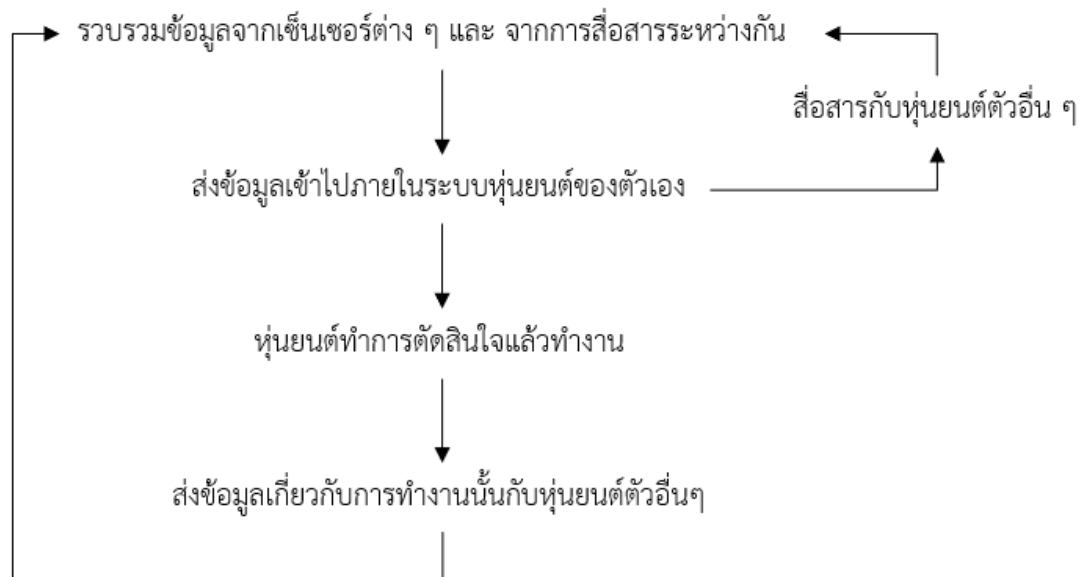


รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัวผ่านการควบคุมด้วยตัวกลาง

การควบคุมแบบกระจาย คือการที่หุ่นยนต์ทุกตัวมีระบบการควบคุมของตัวเองที่สามารถประมวลผลการทำงานของหุ่นยนต์รอบข้างเองได้โดยไม่ต้องส่งไปประมวลผลผ่านตัวกลาง โดยที่หุ่นยนต์แต่ละตัวจะมีระบบประมวลผลที่มีความซับซ้อนมากกว่าหุ่นยนต์ที่มีการควบคุมผ่านตัวกลาง ซึ่งหุ่นยนต์แต่ละตัวจะมีองค์ประกอบดังนี้

- ระบบประมวลผลเพื่อตัดสินใจ
- การวางแผนการเคลื่อนที่
- เซ็นเซอร์ตรวจวัดสิ่งแวดล้อม
- การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์
- กลไกการเคลื่อนที่

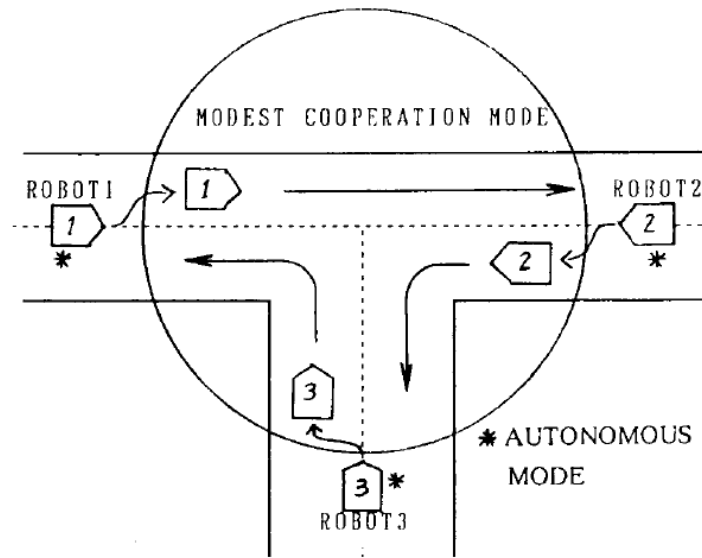
โดยระบบหุ่นยนต์จะมีขั้นตอนการประมวลผลตามแผนภาพในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทำงานร่วมกันของระบบหุ่นยนต์หลายตัวผ่านการควบคุมแบบกระจาย

หนึ่งในรูปแบบการทำงานของระบบหุ่นยนต์หลายตัวที่น่าสนใจและมีลักษณะการทำงานคล้ายกับมนุษย์ นั่นคือ การทำงานร่วมกันแบบถ่อมตัว ซึ่งระบบนี้จะเป็นการควบคุมผ่านตัวกลาง หรือ การควบคุมแบบกระจายก็ได้ หุ่นยนต์ที่ใช้ระบบนี้จะแบ่งเป็น 2 รูปแบบการทำงานในหุ่นยนต์ตัวเดียวกัน โดยจะแบ่งเป็น ระบบอิสระและระบบการทำงานร่วมกันแบบถ่อมตัว โดยจะมีการสลับการทำงานระหว่าง 2 รูปแบบนี้ด้วยการวัดระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์แต่ละตัว เมื่อหุ่นยนต์อยู่ใกล้กันก็จะเข้าสู่ระบบการทำงานร่วมกันแบบถ่อมตัว เมื่ออยู่ไกลกันก็กลับไปเป็นระบบอิสระตามเดิม

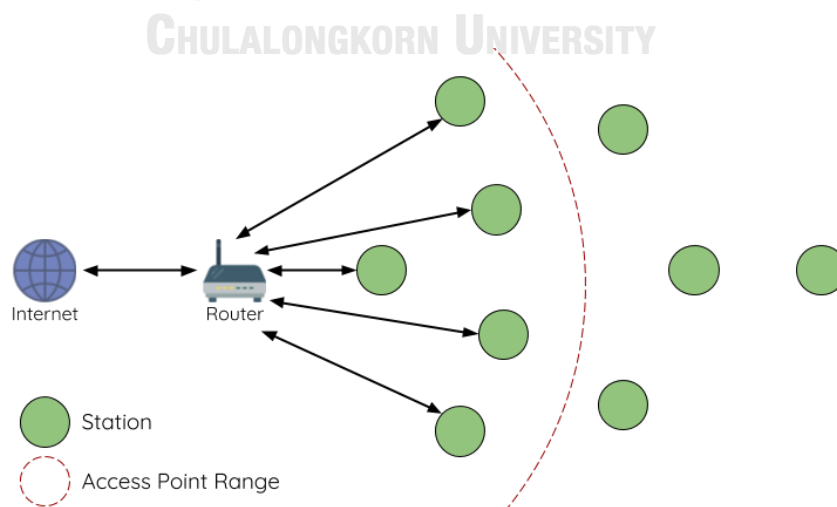
ตัวอย่างการทำงานในรูปแบบการทำงานร่วมกันแบบถ่อมตัว แสดงดังรูปที่ 3.6 มีหุ่นยนต์อยู่ 3 ตัวเคลื่อนที่มาจากแต่ละทิศ ขณะที่หุ่นยนต์ไม่ได้อยู่ใกล้กัน หุ่นยนต์จะใช้ระบบอิสระนั่นคือ หุ่นยนต์แต่ละตัวจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและวิ่งอยู่กลางถนน แต่เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่มาใกล้กันหุ่นยนต์จะเข้าสู่ระบบการทำงานร่วมกันแบบถ่อมตัว หุ่นยนต์แต่ละตัวจะลดความเร็วลง และ เบี่ยงไปทางซ้าย เพื่อให้หุ่นยนต์แต่ละตัวสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้อย่างปลอดภัย เป็นต้น



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการทำงานในรูปแบบการทำงานร่วมกันแบบล้อมตัว [22]

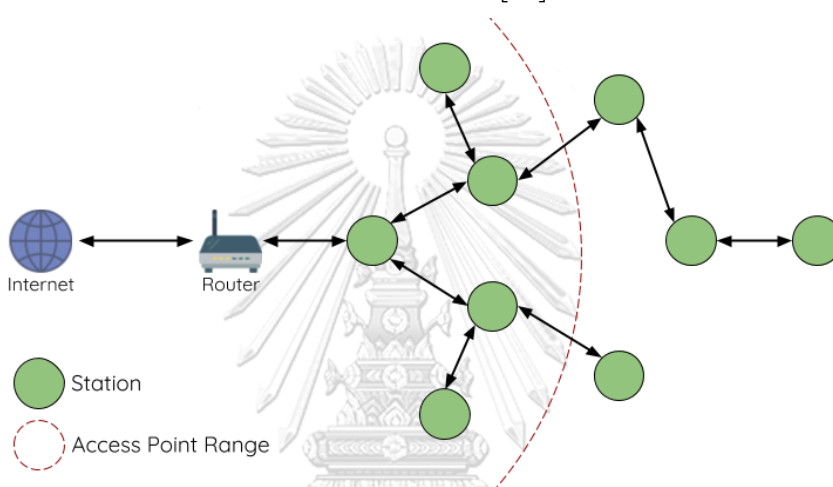
## 2) ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh network

การสื่อสารรูปแบบเดิมจะเป็นการสื่อสารจากจุดหนึ่งไปยังสถานีเชื่อมต่ออื่น ๆ ที่เหลือผ่านตัวกลางที่เรียกว่า access point (AP) ซึ่ง AP จะมีหน้าที่ในการควบคุมการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างสถานีต่าง ๆ โดยบาง AP ก็จะมีการรับและส่งข้อมูลจากเครือข่ายภายนอกมายังเราท์เตอร์ (Router) ข้อเสียของการสื่อสารในรูปแบบเดิมเช่นนี้คือข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ที่ AP สามารถครอบคลุมหรือกระจายสัญญาณเพื่อให้ AP สามารถส่งข้อมูลถึงแต่ละสถานีได้ และยังมีข้อจำกัดในด้านความสามารถในเรื่องของจำนวนสถานีที่ AP นั้นสามารถเชื่อมต่อได้สูงสุดในแต่ละครั้ง



รูปที่ 3.7 การสื่อสารในรูปแบบ Access Point [35]

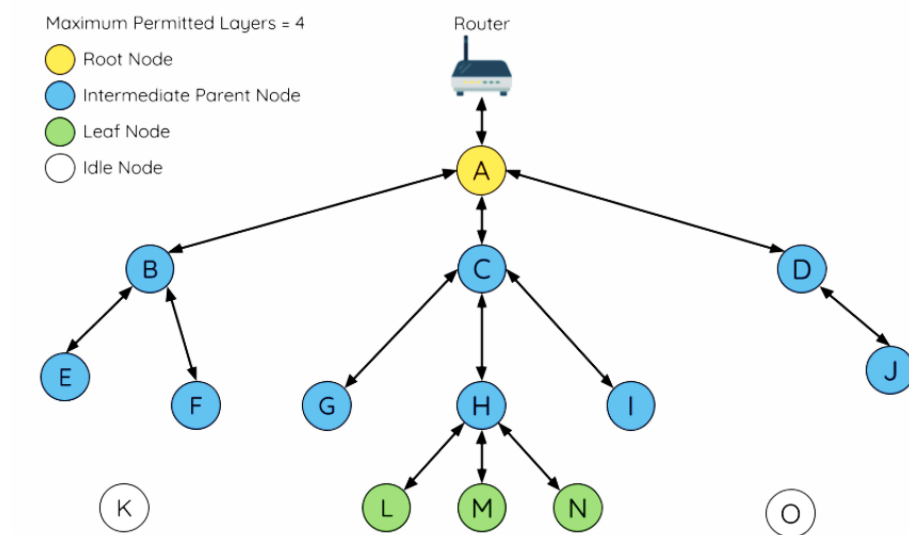
จากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบการสื่อสารได้มีการพัฒนาเรื่อย ๆ จนกระทั่งในปัจจุบันมีการสื่อสารในระบบเครือข่ายไร้สายในรูปแบบ Mesh network ซึ่งเป็นการที่แต่ละสถานีที่อยู่ใกล้กันสามารถสื่อสารกันได้โดยตรง ไม่ต้องผ่านสถานีกลาง และแต่ละสถานีสามารถส่งถ่ายข้อมูลผ่านสถานีที่อยู่ใกล้กันไปยังสถานีที่อยู่ถัดออกไปได้ การสื่อสารรูปแบบนี้มีข้อดีคือ แม้สถานีที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณที่สถานีกลางสามารถกระจายสัญญาณถึงได้ แต่แต่ละสถานีก็ยังสามารถสื่อสารถึงกันได้ ทำให้แม้จะเป็นสถานีที่อยู่ไกลแต่หากมีสถานีที่เชื่อมต่ออยู่ก็สามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้ทั้งหมด นอกจากนี้ยังลดเรื่องข้อจำกัดของความสามารถในการเชื่อมต่อสูงสุดในแต่ละครั้งของสถานีกลาง เนื่องจากแต่ละสถานีไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อไปยังสถานีกลางโดยตรง [35]



รูปที่ 3.8 การสื่อสารระบบเครือข่ายไร้สายรูปแบบ Mesh network [35]

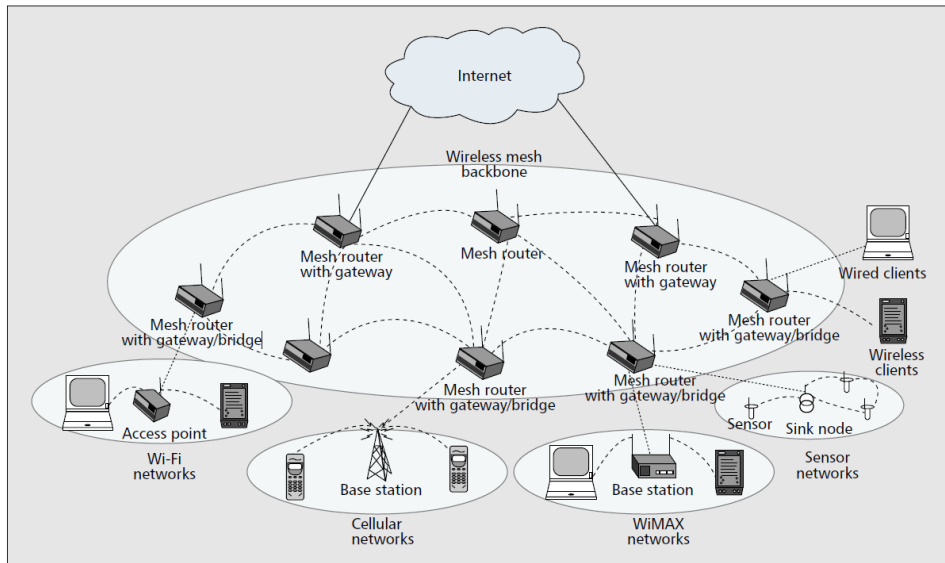
ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh network นั้น มีการจัดระบบภายในของเครือข่ายตัวเองอย่างอัตโนมัติทั้งการสร้างระบบเครือข่ายและรักษาการเชื่อมต่อระหว่างสถานีหรือโหนดตลอดเวลา โดยสถานีที่มองเห็นกันหรือสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้นั้นจะอยู่ในระดับเดียวกัน และสถานีอื่น ๆ ที่อยู่ไกลออกไปก็จะเป็นสถานีย่อยของสถานีระดับแรกและถูกจัดลำดับย่อยลงไปเรื่อย ๆ ตามระยะห่างดังรูปที่ 3.9 และเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างสถานีมีการอัปเดตตลอดเวลาและสามารถจัดการการสื่อสารภายในระบบของตัวเองได้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้โครงสร้างในการเชื่อมต่อจะไม่ตายตัวขึ้นอยู่กับว่า ณ เวลานั้น ๆ สถานีไหนอยู่ใกล้กัน หากสถานีใดสถานีหนึ่งล่ม การสื่อสารก็สามารถเปลี่ยนเส้นทางส่งข้อมูลได้ [36] นอกจากนี้การใช้พลังงานในพื้นที่ที่ครอบคลุมเท่ากัน ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh network นั้นจะใช้พลังงานในการส่งต่อข้อมูลน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการสื่อสารในรูปแบบเดิม สำหรับ Mesh router และ router ไร้สายทั่วไปนั้นถูกสร้างมาจากรูปแบบ hardware ที่คล้ายคลึงกัน จึงมีความยืดหยุ่นในการใช้งานร่วมระหว่างรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ โดยระบบทั่วไปที่ติดตั้ง wireless network interface cards (NICs) สามารถเชื่อมต่อโดยตรงกับ

ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh network ผ่านทาง wireless Mesh routers สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่มี NIC สามารถเข้าถึงระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh โดยเชื่อมต่อกับ wireless Mesh routers ผ่านทาง Ethernet หรือวิธีอื่นๆ ดังนั้น ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Mesh จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านระบบออนไลน์ได้ตลอดเวลา [37] แต่จากข้อดีที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ระบบเครือข่ายไร้สาย Mesh network ในปัจจุบันมีข้อเสียในเรื่องของราคาของอุปกรณ์ที่ทำ Mesh network แต่ละชิ้นมีราคาสูง ยิ่งหากต้องการติดตั้งหลาย ๆ โหนด ค่าใช้จ่ายโดยรวมก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย [38]



รูปที่ 3.9 ลำดับชั้นการเชื่อมต่อของแต่ละสถานี [35]





รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการเชื่อมต่อในรูปแบบการสื่อสารไร้สาย Mesh network [37]

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการ

#### 4.1 การจำลองหุ่นยนต์จำลอง

เนื่องจากการทดลองในสถานที่จริงโดยใช้หุ่นยนต์จริงนั้นไม่สามารถทำได้สะดวกและบ่อยครั้งมากนัก ดังนั้นสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการสร้างหุ่นยนต์จำลองขนาด 1/6 เท่าของหุ่นยนต์จริงขึ้นมาโดยความคล้ายคลึงระหว่างหุ่นยนต์จำลองและหุ่นยนต์จริงนั้นแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความคล้ายคลึงระหว่างหุ่นยนต์จำลองและหุ่นยนต์จริง

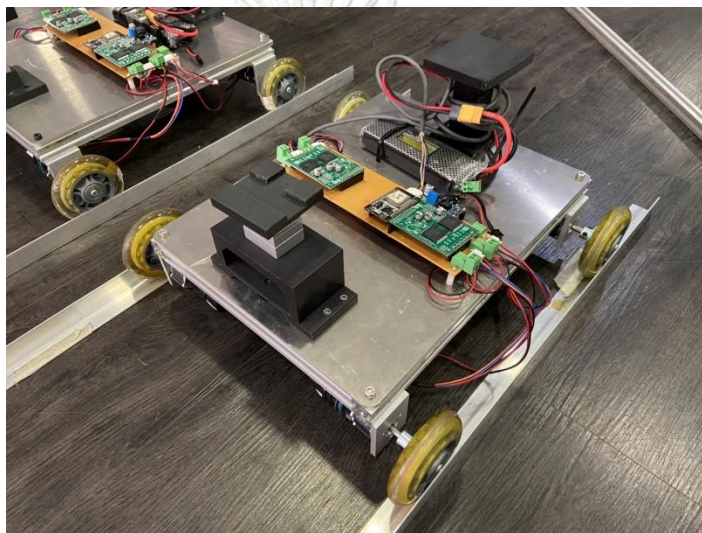
	หุ่นยนต์จริง	หุ่นยนต์จำลอง
ความกว้าง	167.5 ซม.	28 ซม.
ความยาว	214.8 ซม.	36 ซม.
จำนวนชุดล้อขับเคลื่อน	4	4
น้ำหนักสูงสุดที่หุ่นยนต์แต่ละตัวต้องแบกรับ	50 กิโลกรัม	10 กิโลกรัม
ความยาวแผงโซลาร์เซลล์โดยรวม	5 – 11 เมตร	1 – 2 เมตร
มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อโดยตรง	✓	✓
มอเตอร์ที่ล้อมี Encoder วัดการขับเคลื่อน	✓	✓
การสื่อสารไร้สาย	Mesh network	Mesh network

#### 4.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละตัว

##### 1) การควบคุมการเคลื่อนที่

หุ่นยนต์จำลองสำหรับการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยล้อ 4 ล้อต่อตรงเข้ามอเตอร์แต่ละตัว ตามรูปที่ 4.1 หุ่นยนต์แต่ละตัวถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยบอร์ด ESP32 Microcontroller มอเตอร์ที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อนคือ faulhaber motor และ motor driver คือ Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield ซึ่งสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้บอร์ดละ 2 ตัว ดังนั้นหุ่นยนต์ 1 ตัวจะต้องใช้ motor driver 2 บอร์ด สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อน (faulhaber motor) เป็นมอเตอร์ที่สามารถขับเคลื่อนได้ที่ความเร็วสูงสุด 0.48 m/s และแรง

ขับเคลื่อนของมอเตอร์รวมกันทั้ง 4 ล้อสามารถรับน้ำหนัก 10 กิโลกรัมรวมน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ (2 กิโลกรัม) ได้ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ประมาณมาจากการที่หุ่นยนต์จริงจะต้องสามารถรับน้ำหนักเพื่อขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ขนาดจริงที่มีขนาดน้ำหนักรวมไม่เกิน 100 กิโลกรัม สำหรับหุ่นยนต์ 2 ตัว เท่ากับว่าหุ่นยนต์จริงแต่ละตัวจะต้องสามารถรับน้ำหนักขนาด 50 กิโลกรัมได้ สำหรับหุ่นยนต์จำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สร้างเป็นขนาดอัตราส่วน 1/6 ของหุ่นยนต์จริง จึงถูกออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักรวมน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ได้ขนาด 10 กิโลกรัม และ faulhaber motor สามารถรองรับน้ำหนักตามขนาดที่ต้องการได้ นอกจากนี้มอเตอร์ดังกล่าวมี Encoder ที่ติดตั้งมาพร้อมกับตัวมอเตอร์ ทำให้สะดวกต่อการใช้งานสำหรับการวัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สำหรับการทดลองต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 หุ่นยนต์จำลอง

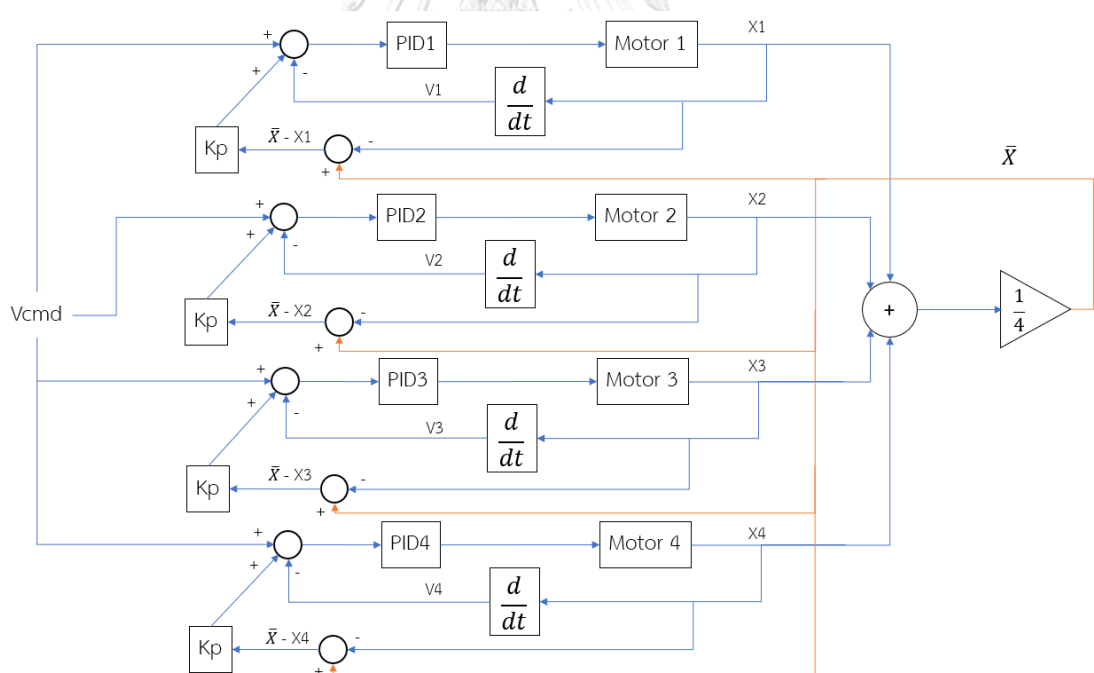
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULA UNIVERSITY



รูปที่ 4.2 faulhaber motor [40]

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เริ่มจากส่งค่าความเร็วที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังการควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อแต่ละล้อ โดยล้อแต่ละล้อนั้นจะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย PID control และส่งค่าไปยังมอเตอร์ของแต่ละล้อ หลังจากนั้นมอเตอร์จะส่งค่า Encoder ที่วัดได้ออกมา แล้วค่า Encoder ที่วัดได้นั้นจะถูกแปลงเป็นระยะที่ล้อนั้นเคลื่อนที่ไป ค่าดังกล่าวจะถูกนำมาหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเพื่อได้เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ ณ ขณะนั้นของล้อ และส่งค่าดังกล่าวไปควบคุมวงปิดเพื่อควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของล้อนั้น ๆ ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต้องการ

เมื่อล้อทุกล้อสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อตัวเองได้แล้ว ต่อมาจะเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อทั้ง 4 ล้อให้สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าล้อแต่ละล้อจะส่งค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของตัวเองมาซึ่งเป็นค่าที่คำนวณมาจากค่า Encoder ที่วัดได้จาก Encoder ที่ติดตั้งที่ล้อ (Odometry position) เพื่อมาหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ค่าเฉลี่ยดังกล่าวนั้นจะถูกส่งกลับไปยังล้อแต่ละล้อเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ โดยที่ถ้าล้อนั้นมีค่าของตำแหน่งสูงกว่าค่าเฉลี่ย ล้อดังกล่าวจะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการลดความเร็วเพื่อรักษาตำแหน่งให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับล้อที่เหลือเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถขับเคลื่อนไปพร้อมกันได้



รูปที่ 4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อแต่ละล้อของหุ่นยนต์

### 4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัว

จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เราต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวเคลื่อนที่อยู่ในแนวเดียวกันเพื่อที่จะขนส่งวัตถุได้ โดยการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นจะควบคุมให้ผลต่างระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์ 2 ตัวมีค่าใกล้เคียง 0 มากที่สุด ซึ่งทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ดังต่อไปนี้

- 1) ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ล้อ (Odometry)

เริ่มต้นด้วยการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วยการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละตัวผ่านการวัดตำแหน่งที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้ โดยทุกครั้งที่เริ่มต้นการทดลองค่าที่วัดได้จาก Encoder จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 และวัดระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้วยการแปลงค่าที่วัดได้จาก Encoder เป็นระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้โดยใช้สมการที่ (5) ซึ่งสมการนี้เป็นสมการที่คำนวณมาจากการเทียบระยะทางที่ล้อของหุ่นยนต์หมุน 1 รอบค่า Encoder ที่วัดได้จะมีค่าเท่าไร โดยระยะทางที่ล้อของหุ่นยนต์หมุน 1 รอบนั้นคำนวณมาจากเส้นรอบวงของล้อ

$$S = \frac{\pi D \cdot K_C \cdot c}{4 \cdot K_e \cdot K_g} \quad (5)$$

โดย	S	คือ	ระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้โดยคำนวณจากตำแหน่งของ Encoder (Odometry position) หน่วย เมตร (m.)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ หน่วย เมตร (m.)
	$K_C$	คือ	การปรับเทียบค่ากับระยะทางจริงที่เคลื่อนที่ได้
	c	คือ	จำนวน pulse ที่ Encoder วัดได้
	$K_e$	คือ	ความละเอียดของ encoder ที่มอเตอร์ (หน่วย count/รอบ)
	$K_g$	คือ	อัตราทดของมอเตอร์

ค่าระยะทางที่วัดได้จากสมการที่ (5) ของหุ่นยนต์แต่ละตัวจะถูกนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ให้มีค่าความต่างของระยะทางตามสมการที่ (6) โดยจะควบคุมค่าความต่างระยะทางของหุ่นยนต์ 2 ตัวที่เคลื่อนที่ไปให้มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงศูนย์

$$X_e = X_1 - X_2 \rightarrow 0 \quad (6)$$

เมื่อ  $X_e$  คือ ค่าความต่างของระยะที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้  
 $X_1, X_2$  คือระยะทางเชิงเส้นที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้

จากการทดลองในเบื้องต้นพบว่าการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัวผ่านการวัดตำแหน่งด้วย Encoder ที่ติดที่ล้อ (Odometry position) นั้น ไม่สามารถวัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำมากนัก เนื่องจากล้ออาจเกิดการลื่นไถลจากการเคลื่อนที่ได้ แม้จะเพิ่มน้ำหนักของหุ่นยนต์เพื่อลดผลจากการลื่นไถลแต่อย่างไรก็ตามการลื่นไถลยังสามารถเกิดขึ้นได้และมีผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ ดังแสดงในสมการที่ (7) และสมการที่ (8)

$$\bar{x}_1 = x_1 + \epsilon_1 \quad (7)$$

$$\bar{x}_2 = x_2 + \epsilon_2 \quad (8)$$

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 = x_1 - x_2 + \epsilon_1 - \epsilon_2 = 0 \quad (9)$$

$$x_1 - x_2 = \epsilon_2 - \epsilon_1 \neq 0 \quad (10)$$

เมื่อ  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  คือ ค่าระยะการเคลื่อนที่ที่วัดได้  
 $\epsilon_1, \epsilon_2$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

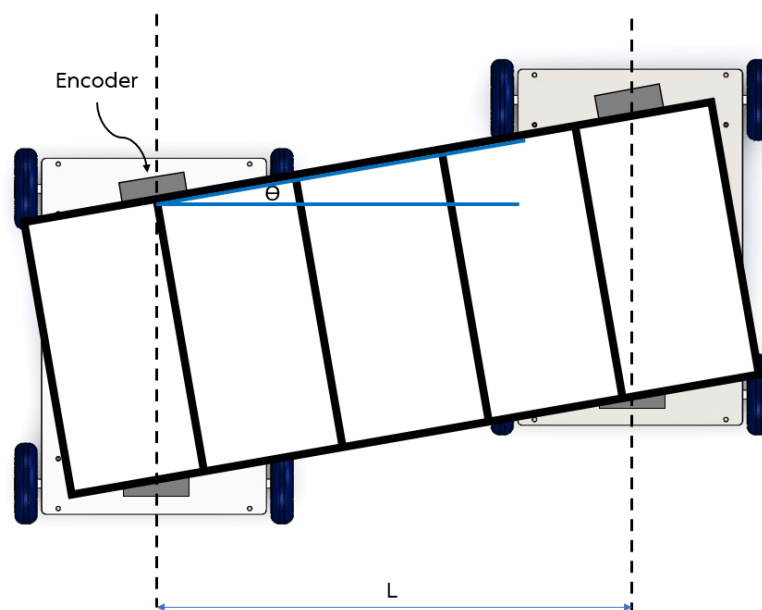
เมื่อแทนค่าในสมการที่ (7) และสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (5) จะได้ว่าหากล้อเกิดการลื่นไถลขึ้น จะมีค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งทำให้ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของตำแหน่งจริงได้จึงต้องติดตั้งอุปกรณ์อื่นเสริมเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2) การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

จากที่กล่าวตามข้อที่ 1) ระบบหุ่นยนต์หลายตัวไม่สามารถถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยค่าระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้ผ่านการวัดค่า Encoder ที่ติดมากับมอเตอร์ที่ล้อ (Odometry position) ดังนั้นจึงต้องมีการติดอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่

การติดตั้งอุปกรณ์อื่นเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการวัดความต่างระหว่างระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้ สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์หลากหลายชนิด อาทิ การใช้เลเซอร์ การติดตั้งเซ็นเซอร์ที่วางเพื่อวัดระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหรือการติดตั้ง Encoder วัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์ระหว่างการเคลื่อนที่

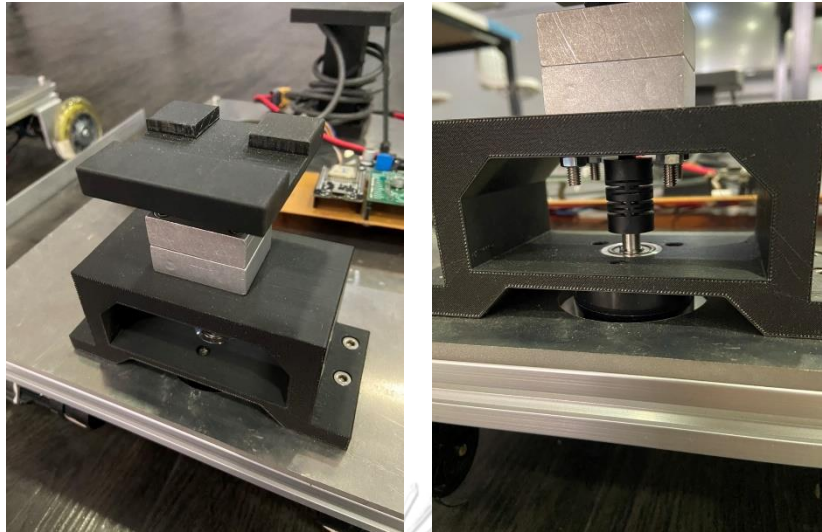
สำหรับการยิงเลเซอร์จากหุ่นยนต์ตัวหนึ่งเพื่อหาระยะของหุ่นยนต์อีกตัวหนึ่ง วิธีนี้อาจมีข้อจำกัดในเรื่องของแสง เนื่องจากหุ่นยนต์จริงต้องนำไปใช้ในที่โล่งแจ้ง หากแสงแดดมีมาก อาจรบกวนการวัดได้ หรือจะเป็นการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้บนรางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ วิธีนี้อาจทำให้มีค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจากหากต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้พร้อมกันมากเท่าไหน ความละเอียดหรือความถี่ในการติดตั้งเซ็นเซอร์ในการวัดยิ่งต้องมีมากเท่านั้น



รูปที่ 4.4 การวัดมุมด้วย Encoder ที่ติดอยู่บนหุ่นยนต์

ดังนั้นวิธีการที่ถูกเลือกมาใช้ในการวัดความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ คือการติด Encoder เพื่อวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 2 ตัวที่ด้านบนหุ่นยนต์ตัวหนึ่ง โดย Encoder ดังกล่าวสามารถวัดค่าได้ 2,000 P/R เชื่อมต่อผ่าน coupling เข้ากับที่จับที่สามารถหมุนได้เพื่อให้ Encoder หมุนไปพร้อมกับที่จับที่จับแผงโซลาร์เซลล์ไว้และวัดค่ามุมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งหุ่นยนต์ตัวที่ติด Encoder นี้จะทำหน้าที่เป็นหุ่นยนต์ผู้ตามในการรับข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและปรับการเคลื่อนที่ให้ระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน





รูปที่ 4.5 Encoder วัดมุมถูกต่อตรงเข้ากับที่จับของหุ่นยนต์ผู้ตาม

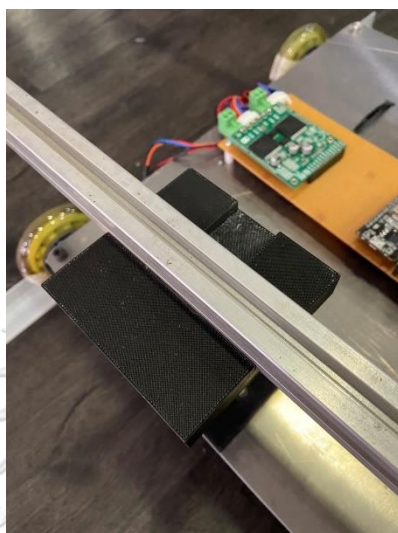
หลักการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว เริ่มจากหลักการการวัดมุมที่เกิดขึ้นด้วยการวางปลายแผงโซลาร์เซลล์ด้านหนึ่งบนที่จับที่ติดอยู่กับ encoder โดยปลายแผงโซลาร์เซลล์ด้านดังกล่าวจะถูกจับยึดอยู่กับที่เพื่อให้ encoder สามารถหมุนตามการเคลื่อนที่เพื่อวัดมุมที่เกิดขึ้นได้ สำหรับที่จับนั้น ถูกออกแบบให้เป็นช่องรูปตัวทีเพื่อวางส่วนของโครงของแผงโซลาร์เซลล์ได้ ดังรูปที่ 4.6 โดยช่องนั้นจะมีขนาดพอดีกับโครงของแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งสามารถวางตรงส่วนของโครงที่เป็นตัวหรือวางเยื้องออกมาก็ได้เนื่องจากขนาดของช่องมีความพอดี ยึดจับโครงได้โดยที่โครงไม่ขยับ และสามารถวัดมุมได้



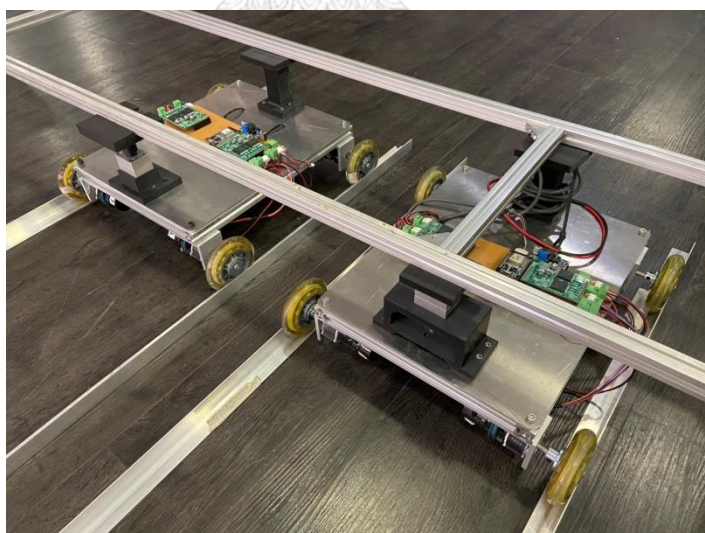
รูปที่ 4.6 ที่จับของหุ่นยนต์ผู้ตาม



สำหรับที่จับของหุ่นยนต์ผู้นำจะเป็นดังรูปที่ 4.7 ที่จับดังกล่าวจะมีลักษณะคล้ายกับที่จับของหุ่นยนต์ผู้ตามแต่ช่องจะมีความกว้างมากกว่าความกว้างของแผงโซลาร์เซลล์ประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อให้แผงด้านดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่และหมุนได้อย่างอิสระ เพื่อให้ระบบหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่เพื่อขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ได้อย่างไม่ติดขัด



รูปที่ 4.7 ที่จับของหุ่นยนต์ผู้นำ

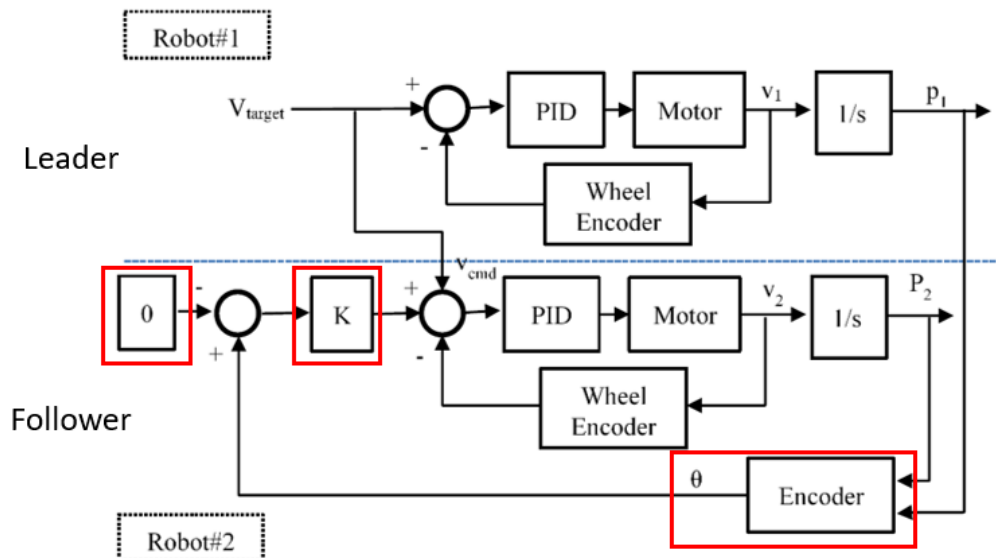


รูปที่ 4.8 ระบบหุ่นยนต์หลายตัวที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากต้องการให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวเคลื่อนที่ไปพร้อมเพริยงกันเพื่อที่จะขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นหุ่นยนต์จะต้องเคลื่อนที่อยู่ในระดับเดียวกัน การควบคุมการเคลื่อนที่ของ

ระบบหุ่นยนต์โดยการควบคุมมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้น ค่ามุมดังกล่าวจะต้องมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 0 องศามากที่สุด โดยค่ามุมมีความสัมพันธ์ดังแสดงตามสมการที่ (2)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X_1 - X_2}{L}\right) \quad (2)$$



รูปที่ 4.9 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ด้วยมุม

การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จะเป็นการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ โดยการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นแสดงตามรูปที่ 4.9 จากแผนภาพจะเห็นว่าจะมีส่วนที่เหมือนกันระหว่างหุ่นยนต์ผู้นำและผู้ตามคือส่วนในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละตัว และส่วนที่ต่างกันออกไปนั้นคือส่วนของหุ่นยนต์ผู้ตามที่มีการวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว ค่ามุมที่วัดได้นั้นจะถูกหักลบกับค่ามุมที่เราต้องการนั่นคือมุมเท่ากับ 0 องศา แล้วนำค่าที่ได้จากการหักลบนั้นมาคูณกับค่า Gain ที่ใช้สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวและบวกเพิ่มเข้าไปในการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตามดังสมการที่ (11) สมการดังกล่าวแสดงถึงการที่หากหุ่นยนต์ผู้ตามวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 2 ตัวมีค่าไม่เท่ากับ 0 องศา หุ่นยนต์ผู้ตามจะเพิ่มหรือลดความเร็วของตนเองเพื่อให้เคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับเดียวกันกับหุ่นยนต์ผู้นำนั่นเอง

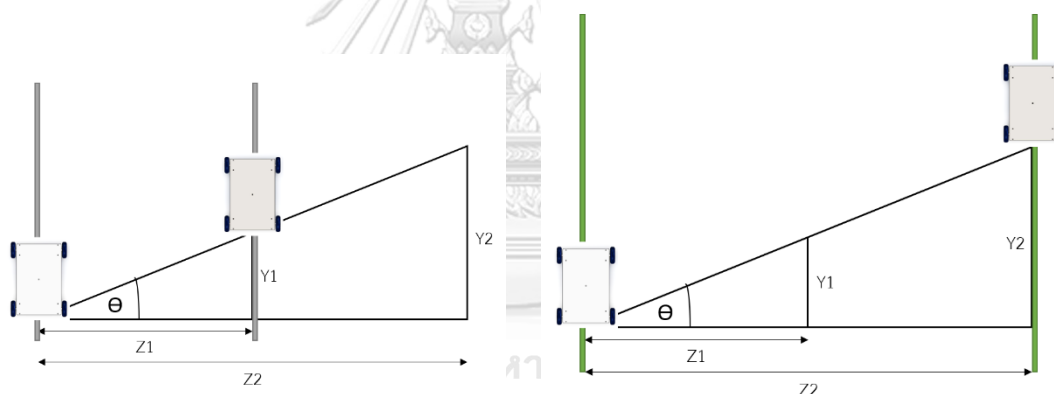
$$V_{cmd} = V_{target} + K_1 \cdot (\theta - 0) \quad (11)$$

เมื่อ  $V_{target}$  คือ ความเร็วที่ต้องการให้ระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่

$V_{cmd}$	คือ ความเร็วของหุ่นยนต์ผู้ตามที่ถูกปรับจากการควบคุมการเคลื่อนที่
$K_1$	คือ ค่า P gain สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์
$\theta$	คือ ค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว หน่วยองศา โดยการแปลงค่าที่วัดได้จาก encoder ที่ติดบนตัวของหุ่นยนต์ผู้ตาม

### 3) การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์

การประยุกต์ใช้ระบบหุ่นยนต์หลายตัวสำหรับขนส่งแผงโซลาร์เซลล์นั้น ขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ที่นำมาขนส่งอาจมีขนาดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับจุดที่ต้องการนำไปติดตั้งว่าสามารถติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาดเท่าใดได้ ดังนั้นระบบหุ่นยนต์หลายตัวควรที่จะมีความยืดหยุ่นในการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์หากต้องการขนย้ายแผงในขนาดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 การขนย้ายแผงโซลาร์เซลล์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ แม้การเคลื่อนที่ตามรูปซ้ายและรูปขวาจะวัดค่ามุมออกมาได้เท่ากัน แต่ค่าความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปมีค่าไม่เท่ากัน

เนื่องจากเราควบคุมการเคลื่อนที่ที่ระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วยการวัดมุมระหว่างหุ่นยนต์ ตามรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าแม้ค่ามุมที่วัดออกมาได้มีขนาดเท่ากัน แต่ถ้าหากเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์แล้วความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้จะเปลี่ยนไปด้วย

สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ เมื่อเปลี่ยนขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ขนส่งจนทำให้ต้องเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ ค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จึงต้องเปลี่ยนตามระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวด้วยตามสมการที่ (12) โดยค่า Gain ในการควบคุมระบบหุ่นยนต์ดังกล่าวนี้เป็นค่า Gain ที่ได้มาจากการคูณอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่าง

หุ้ยนยัรระยะใหม้ที่ใ้ในแต่ละกรณั้กับระยะห้างระหว่างหุ้ยนยัรที่ใ้ในการทดสอบห้าค้ Gain ในกรณั้ก่อนหน้า

$$V_{cmd} = V_{target} + \frac{Z_2}{Z_1} K_2 \cdot (\theta - 0) \quad (12)$$

เมื่อ  $Z_2$  ค้ือ ระยะห้างระหว่างหุ้ยนยัรที่ใ้ในแต่ละกรณั้

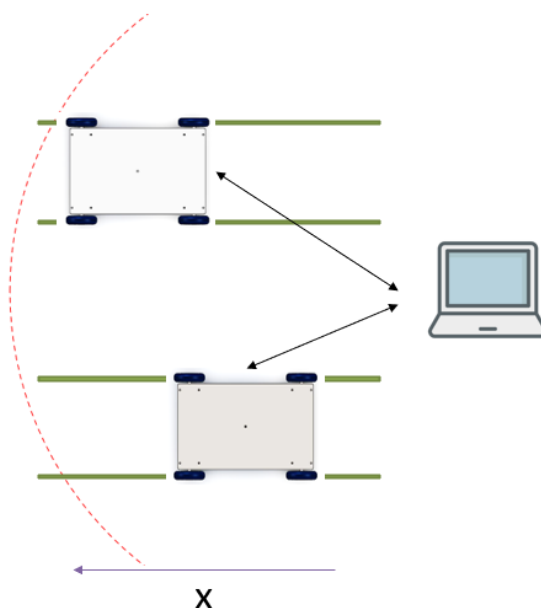
$Z_1$  ค้ือ ระยะห้างระหว่างหุ้ยนยัรเดิมจากกรณั้ก่อนหน้า

$K_2$  ค้ือ ค้่า P Gain ที่เลือกใ้จากกรณั้ก่อนหน้า

4) การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ้ยนยัรเมื่อเปลื่ยนขนาดน้ำหน้กของวัตฤที่นำม้ใ้ชน้ส่งขนาดของแวงโซล้่าเซลล้์มีผลต่อน้ำหน้กที่หุ้ยนยัรต้องแบกรับ หากขนาดของแวงมีกรเปลื่ยนเปลื่ง น้ำหน้กที่หุ้ยนยัรต้องแบกรับก็เปลื่ยนไปด้วย ซึ่งการกระทำด้ังกล้่าวมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ้ยนยัร ด้ังน้ันเราจ้ิงต้องกรทดสอบว่าน้ำหน้กของวัตฤที่ระบบหุ้ยนยัรต้องแบกรับมีผลต่อการเคลื่อนที่ของระบบหุ้ยนยัรมากน้อยเปลื่งใด การทดสอบเก้ียวกับผลของน้ำหน้กของวัตฤที่ต้องใ้ในการชน้ส่ง ใ้ค้่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบตามสมการที่ (12)

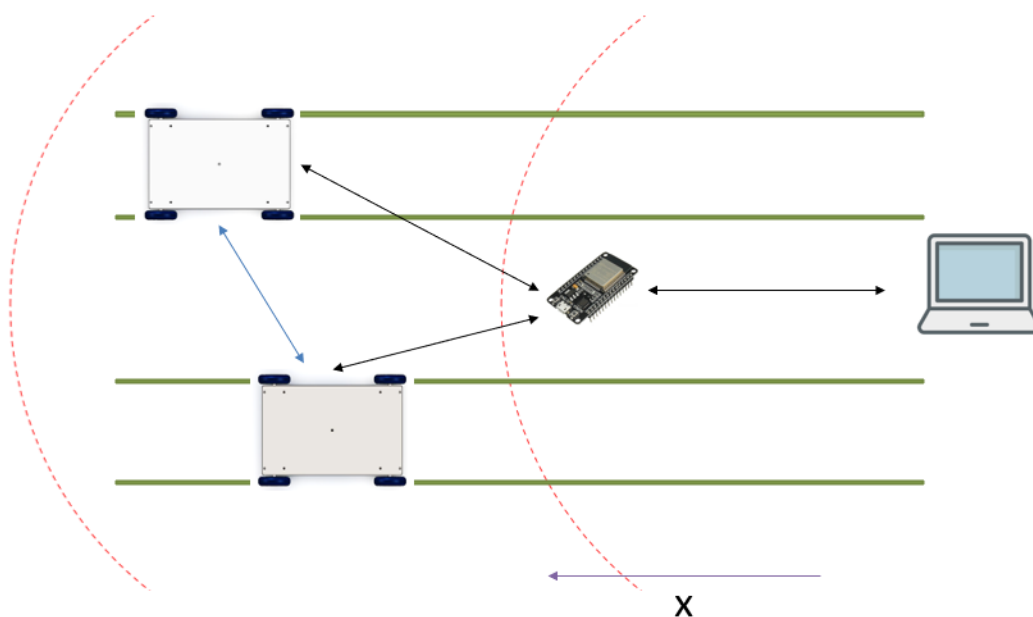
#### 4.4 การล้ือสารแบบไร้สาย

เหตุผลของการนำระบบล้ือสารไร้สายแบบ Mesh network ม้ใ้ชน้ัน หากดูตามรูปที่ 4.11 ถ้ารางสำหรับด้ติดตั้งแวงโซล้่าเซลล้์น้ันเป้็นรางระยะไกล้้อยู่ในระยะที่ล้ัญญานจากจุดควบคุมกลางน้ันสามารถกระจายไปถ้ถึงหุ้ยนยัรแต่ละด้ัวได้ การใ้การล้ือสารแบบ Access point ในรูปแบบเดิมน้ันสามารถนำม้ใ้ในการล้ือสารได้



รูปที่ 4.11 การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์กับจุดควบคุมกลางในระยะที่จุดควบคุมกลางครอบคลุมถึง

แต่สำหรับในบางกรณีที่เราติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์นั้นยาวถึง 200 เมตร สัญญาณจากจุดควบคุมกลางนั้นอาจจะไม่สามารถครอบคลุมได้ในระยะที่ไกลมากขนาดนั้น ดังนั้นระบบการสื่อสารไร้สายแบบ Mesh network จึงถูกเลือกเพื่อนำมาใช้ในการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์สำหรับขนส่งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อนำไปติดตั้งและระหว่างจุดควบคุมกลางกับหุ่นยนต์ จากรูปที่ 4.12 จะแสดงให้เห็นว่าแม้หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ออกห่างจากจุดควบคุมกลางเกินระยะที่จุดควบคุมกลางสามารถครอบคลุมถึง แต่ระบบหุ่นยนต์หลายตัวนั้นเคลื่อนที่ไปพร้อมกันตลอดเวลาเพื่อขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ ดังนั้นหุ่นยนต์จะอยู่ในระยะที่ใกล้กันตลอดเวลา การเลือกใช้ระบบการสื่อสารไร้สายแบบ Mesh network จะทำให้หุ่นยนต์ทุกตัวยังสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้อยู่และสามารถเคลื่อนที่ต่อไปด้วยกันได้แม้อยู่ในระยะที่ไกลเกินกว่าที่สัญญาณจากจุดควบคุมกลางจะเข้าถึง และถ้าหากต้องการให้หุ่นยนต์นั้นยังสามารถติดต่อกับจุดควบคุมกลางได้อยู่ นั่นก็เพียงแค่เพิ่มโหนดหรือสถานีระหว่างกลางเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์และจุดควบคุมกลางนั่นเอง

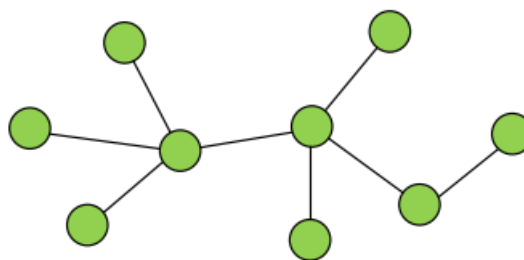


รูปที่ 4.12 การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์กับจุดควบคุมกลาง  
ในระยะที่จุดควบคุมกลางไม่สามารถครอบคลุมถึง

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ บอร์ดที่จะนำมาใช้ในการสื่อสารและควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์คือ ESP32 Microcontroller โดย library ที่นำมาใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย Mesh network นั้นคือ painlessMesh library ซึ่งเป็น library ที่ใช้สัญญาณ Wi-Fi ในการสื่อสาร library ดังกล่าวนั้นเป็น library ที่สามารถกำหนดค่าได้โดยอัตโนมัติและสามารถติดตั้งได้โดยง่าย เป็นเครือข่าย ad-hoc ที่ไม่ต้องการทั้งแผนในการเชื่อมต่อและจุดควบคุมกลาง โหนดทุกโหนดที่อยู่ในการเชื่อมต่อ painlessMesh นี้จะอยู่ในระดับความสำคัญที่เท่ากัน

สำหรับ painlessMesh network โมดูลหลายตัวสามารถตั้ง SSID (service set identifier) เดียวกันได้ และแต่ละโหนดนั้นจะแยกความแตกต่างของตัวเองกับโหนดอื่น ๆ ด้วยหมายเลข 32 บิตที่ไม่ซ้ำกันซึ่งนำมาจาก MAC address ของชิปของตัวเอง ไม่ได้ขึ้นกับ IP address ซึ่งทำให้การเชื่อมต่อที่เสถียรเพิ่มขึ้น โมดูลทุกโมดูลจะสามารถเชื่อมต่อกันได้อัตโนมัติผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย Mesh network โดยจะมีการอัปเดตเครือข่ายเป็นระยะเพื่อหาจุดเชื่อมต่อที่อยู่ใกล้กันและสัญญาณแรงที่สุด โดยการอัปเดตเครือข่ายทั้งหมดจะอัปเดตเป็นระยะทุก ๆ 3 วินาทีและโหนดทุกโหนดสามารถส่งข้อมูลทั้งโดยตรงและโดยอ้อมให้สามารถถึงกันได้หมด โหนดที่ยังไม่ได้เชื่อมต่อกับจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ จะหาจุดเชื่อมต่อที่สัญญาณแรงที่สุด และการเชื่อมต่อระหว่างโหนด 2 โหนดนั้นจะมีเพียงเส้นทางเดียวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเป็นการเชื่อมต่อวนลูปเป็นวงกลม โดยการเชื่อมต่อของ painlessMesh แสดงตามรูปที่ 4.13 การเชื่อมต่อนี้มีลักษณะคล้ายกับการเชื่อมต่อแบบ Star แต่

แตกต่างตรงที่ว่า การเชื่อมต่อแบบ star จะประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อกลางที่เชื่อมต่อสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง แต่สำหรับ painlessMesh network นั้น แต่ละโหนดสามารถทำหน้าที่เป็นทั้งจุดเชื่อมต่อสำหรับโหนดอื่น ๆ เพื่อให้ทุกสถานีสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้



รูปที่ 4.13 painlessMesh network [39]

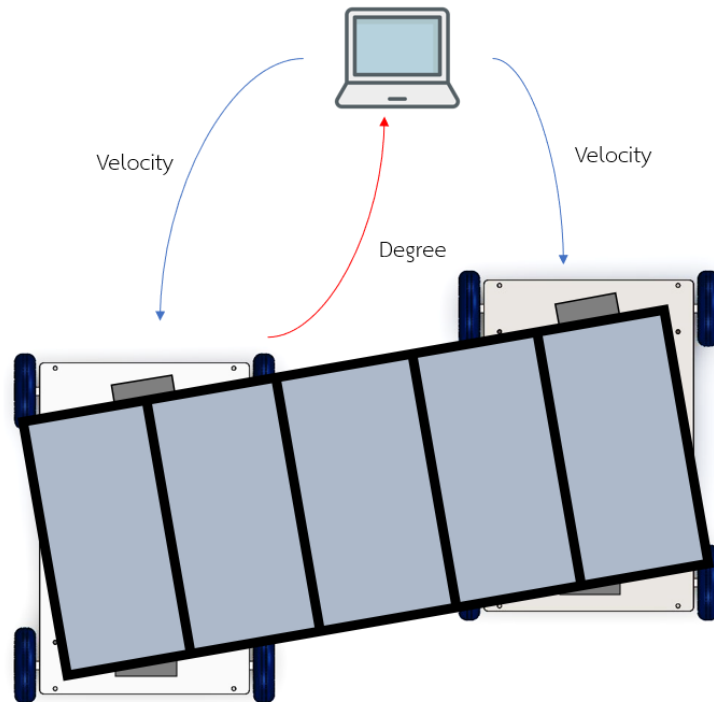
การสื่อสารในระบบไร้สาย Mesh network ทำได้ผ่านการส่งข้อความในรูปแบบ JSON โดยข้อมูลในรูปแบบ JSON จะเก็บข้อมูลในแบบ key, value แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการส่งข้อความแบบ binary แต่การส่งข้อความในรูปแบบดังกล่าวนี้จะง่ายต่อความเข้าใจของผู้ใช้งานและการทำงานร่วมกับ Javascript หรือ Web application

ข้อความที่ใช้ในการสื่อสารจะมี 2 ประเภท ข้อความแบบแรกเป็นการส่งข้อความที่เป็นข้อความเดียวส่งตรงไปยังโหนดที่ระบุไว้กับอีกรูปแบบหนึ่งคือการส่งข้อความแบบกระจายข้อความให้ทุกโหนดได้รับรู้ โหนดทั้งหมดมีเวลาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำน้อยกว่า 10 มิลลิวินาที ซึ่งจะมีประโยชน์สำหรับโหนดในการรันงานแบบ synchronous [39]

#### 1) การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

ในการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ จำเป็นที่จะต้องมีการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวและคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ทั้งนี้คำสั่งเกี่ยวกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จะถูกส่งผ่านคอมพิวเตอร์และส่งคำสั่งไปยังหุ่นยนต์แต่ละตัว โดยหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อมีการเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายทั้งหมดแล้ว ซึ่งสามารถดูสถานะการเชื่อมต่อของโครงข่ายผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ได้ การรอให้ทุกจุดทั้งคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์เชื่อมต่อกันเรียบร้อยแล้วก่อนเริ่มการเคลื่อนที่จะทำให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวได้รับคำสั่งและเริ่มเคลื่อนที่พร้อมกัน และค่ามุมที่วัดได้จาก Encoder ที่หุ่นยนต์ผู้ตามจะถูกส่งกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผลระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่



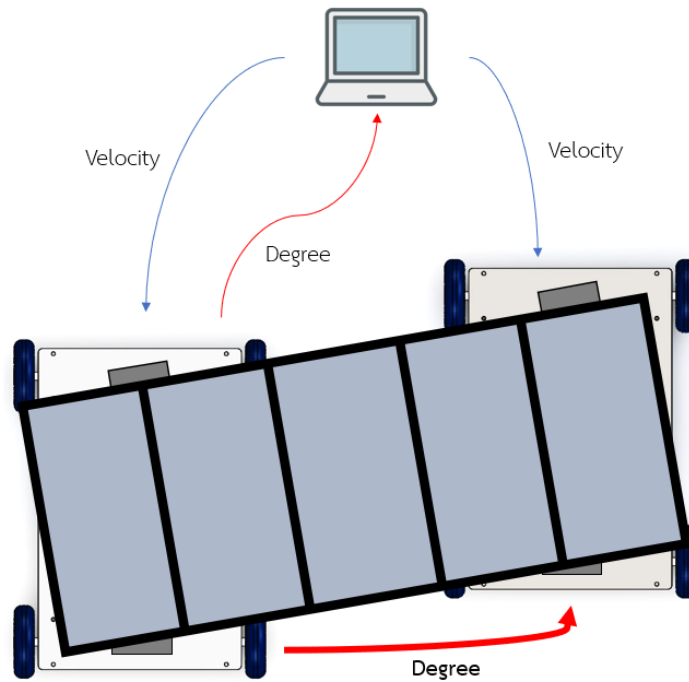


รูปที่ 4.14 การรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์  
ผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย Mesh network

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ตามที่กล่าวข้างต้นนี้ ในบางครั้งเมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเชื่อมต่อ เช่น สัญญาณขาดหายหรือบอร์ดควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งมีปัญหาขาดการเชื่อมต่อ เมื่อเราสั่งให้ระบบหุ่นยนต์หยุดการเคลื่อนที่ แต่บอร์ดดังกล่าวไม่สามารถเชื่อมต่อกลับเข้ามาในระบบโครงข่ายได้ทำให้ไม่ทราบข้อมูลเกี่ยวกับคำสั่งให้หยุดการเคลื่อนที่และยังเคลื่อนที่ต่อไปอยู่ จึงทำให้เกิดปัญหาในการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ได้ ดังนั้นเราจึงเพิ่มการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์โดยการที่หากหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งขาดการเชื่อมต่อให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวหยุดการเคลื่อนที่ชั่วคราวจนกว่าจะกลับมาเชื่อมต่อดังเดิมและเคลื่อนที่ต่อไป

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์และการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัวเพิ่มเติมโดยการที่ให้หุ่นยนต์ผู้ตามส่งข้อมูลเกี่ยวกับมุมที่วัดได้ให้กับหุ่นยนต์ผู้นำดังรูปที่ 4.15 และทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์โดยที่จากเดิมมีเพียงหุ่นยนต์ผู้ตามที่ปรับความเร็วเพื่อรักษาระดับการเคลื่อนที่ให้อยู่ระดับเดียวกับหุ่นยนต์ผู้นำแล้วนั้นเปลี่ยนเป็นให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวปรับความเร็วเพื่อให้มาอยู่ในระดับเดียวกัน โดยเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำดังแสดงในสมการที่ (13) และหุ่นยนต์ผู้ตามถูกควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ตามสมการที่ (14)





รูปที่ 4.15 การรับส่งข้อมูลเพิ่มเติมระหว่างหุ่นยนต์

$$V_{cmdL} = V_{target} - K_l \cdot (\theta - 0) \quad (13)$$

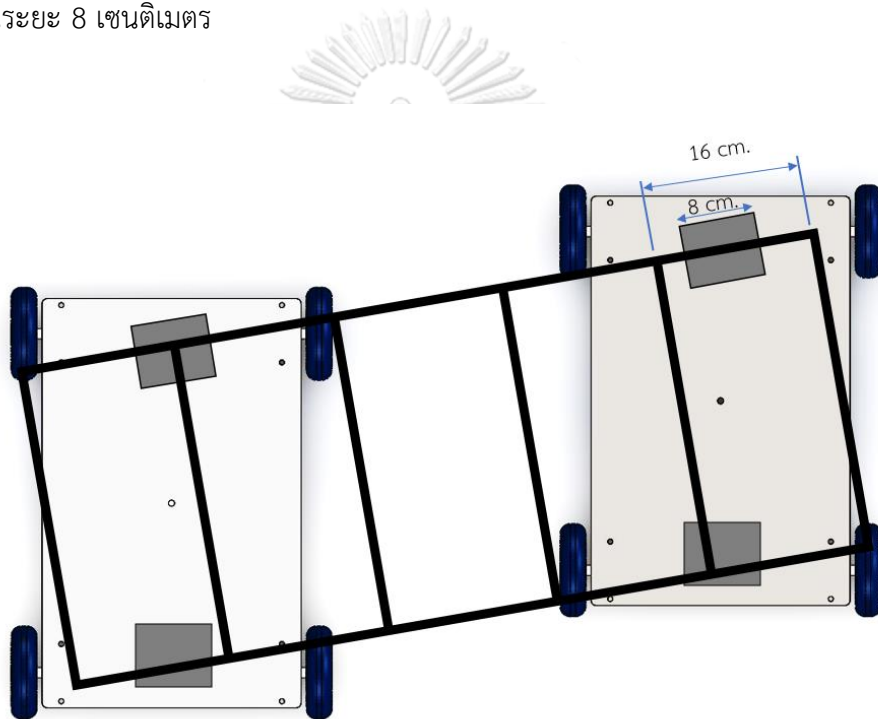
$$V_{cmdF} = V_{target} + K_f \cdot (\theta - 0) \quad (14)$$

- เมื่อ  $V_{cmdL}$  คือ ความเร็วของหุ่นยนต์ผู้นำ
- $V_{cmdF}$  คือ ความเร็วของหุ่นยนต์ผู้ตาม
- $K_l$  คือ ค่า P Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำ
- $K_f$  คือ ค่า P Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตาม

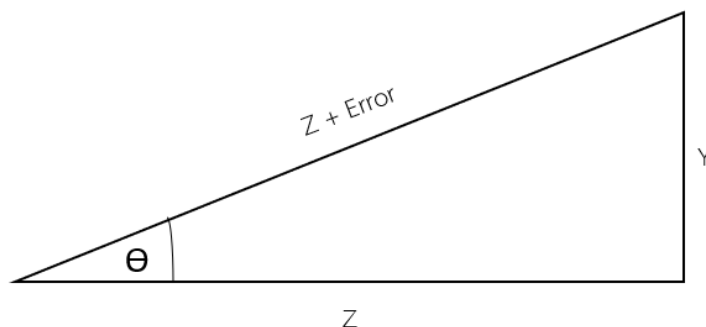
#### 4.5 การกำหนดระยะความต่างที่ยอมรับได้ของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปได้

เนื่องจากระบบหุ่นยนต์หลายตัวของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดมุมจาก Encoder ซึ่งปลายของแผงโซล่าเซลล์ด้านหนึ่งที่ใช้ขนส่งวางอยู่บนที่จับที่ติดกับ Encoder ดังกล่าวและปลายอีกด้านหนึ่งถูกวางไว้บนที่จับที่อยู่บนหุ่นยนต์อีก 1 ตัวและสามารถหมุนและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้น แผงโซล่าเซลล์ที่นำมาขนส่งจะไม่ถูกทำให้บิดงอจากการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว

ข้อจำกัดในการเคลื่อนที่จึงเกิดมาจากการที่หากหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวมีความต่างระหว่างระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปมากเกินไปอาจทำให้โครงของแผงโซลาร์เซลล์ชนกับที่จับของหุ่นยนต์ผู้นำได้ ตามรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าระยะทางที่หุ่นยนต์ผู้นำสามารถเคลื่อนที่ห่างออกจากหุ่นยนต์ผู้ตามได้ โดยที่ไม่ทำให้การเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ติดขัดคือการที่โครงของแผงโซลาร์เซลล์ส่วนที่วางอยู่บนที่จับของหุ่นยนต์ผู้นำนั้น เคลื่อนที่ภายในช่วงของแผงโซลาร์เซลล์ 1 แผง สำหรับหุ่นยนต์จำลองและแผงโซลาร์เซลล์จำลองสำหรับการทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ จากการคำนวณย่อยอัตราส่วนจากขนาดแผงโซลาร์เซลล์จริง แผงจำลองสามารถเคลื่อนที่ตามแนวของที่จับได้ไม่เกินระยะ 16 เซนติเมตร เมื่อหักลบกับความกว้างของที่จับที่มีความกว้าง 8 เซนติเมตรแล้วนั้น แผงโซลาร์เซลล์จะสามารถเคลื่อนที่ตามแนวที่จับได้เป็นระยะ 8 เซนติเมตร



รูปที่ 4.16 ระยะที่ยอมรับได้ในการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 4.17 การคำนวณหาระยะที่ยอมรับได้

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{Z}{Z+Error}\right) \quad (15)$$

$$Y = Z \cdot \tan \theta \quad (16)$$

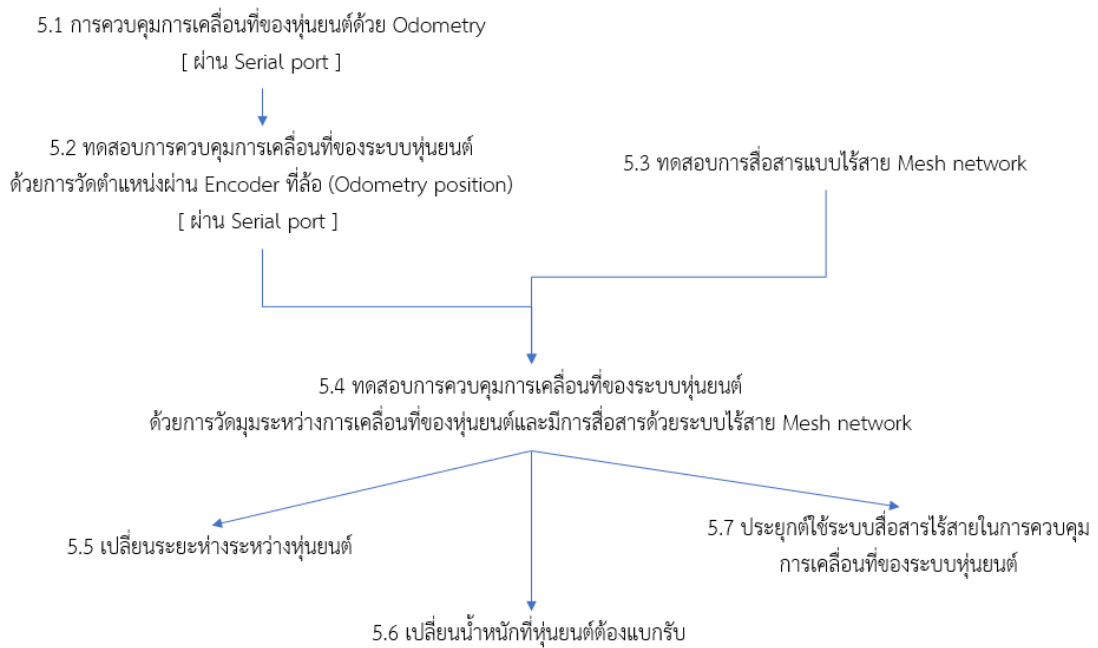
จากรูปที่ 4.17 เมื่อ  $Z$  คือระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว จะพบว่าระยะที่แผงโซล่าเซลล์สามารถเคลื่อนที่ได้จะอยู่ที่ระยะ  $Z$  ถึง  $Z$  บวกกับระยะที่ยอมให้เคลื่อนที่ได้ สมมติว่าที่จับอยู่กึ่งกลางของช่วงแผงโซล่าเซลล์ 1 แผงพอดี ระยะที่แผงจะสามารถเคลื่อนที่ได้จะอยู่ที่ประมาณ 4 เซนติเมตร เมื่อแทนค่าในสมการที่ (15) ด้วย  $Z = 50$  เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างหลักที่เราใช้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะได้ว่ามุม  $\theta$  ที่ยอมรับได้อยู่ที่ประมาณ 22.2 องศา เมื่อนำมุดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (16) จะได้ว่าค่าที่ยอมรับได้ของความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์ตามกันอยู่ที่ระยะประมาณ 20.4 เซนติเมตร ถึงแม้ระยะดังกล่าวเป็นระยะสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ตามกันได้โดยวัตถุที่ขนส่งไม่ขัดการเคลื่อนที่นั้น แต่ระยะดังกล่าวเป็นระยะที่ยอมรับได้มากที่สุดเมื่อวางช่องของโครงแผงโซล่าเซลล์ที่กึ่งกลางบนที่จับ หากไม่สามารถวางในระยะดังกล่าวได้ ระยะในการเคลื่อนที่ได้ก็จะน้อยลงและการที่ยอมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ถึงระยะดังกล่าว อาจเกิดข้อผิดพลาดขึ้นหากหุ่นยนต์ยังเคลื่อนที่ต่อไปและเคลื่อนที่ห่างกันมากกว่าระยะดังกล่าว อาจทำให้เกิดอันตรายต่อหุ่นยนต์ ที่จับรวมไปถึงแผงที่ขนส่งได้ ดังนั้นเราจึงกำหนดเพิ่มเติมให้ระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามกันได้ไม่เกินระยะ 5 เซนติเมตร เป็นระยะที่เรายอมรับได้ในการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## บทที่ 5

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตัวเดียวด้วยการสั่งการผ่าน Serial port ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ต้องการได้หรือไม่ ต่อมาจะเป็นการทดสอบเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ไปพร้อมกันของหุ่นยนต์ 2 ตัว เพื่อทดสอบว่าทฤษฎีที่เลือกมาใช้เกี่ยวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวด้วยหลักการของระบบ Gantry สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้โดยไม่เกิดการติดขัดได้หรือไม่ โดยในการทดสอบในตอนแรก ระบบหุ่นยนต์ถูกควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านการวัดค่า Encoder ที่ล้อเพื่อแปลงเป็นตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป (Odometry position) พบว่า หุ่นยนต์ 2 ตัวสามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้แต่มีผลของการสั่นไหวทำให้ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ดีนัก จึงทำการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ นั่นคือ การติด Encoder เพื่อวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวที่จับแผงโซล่าเซลล์ และมีการศึกษาเกี่ยวกับการสื่อสารแบบไร้สาย Mesh network ก่อนจะทำการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่โดยวัดค่ามุม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไป

เมื่อสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวสามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้รวมไปถึงการสื่อสารผ่านระบบไร้สาย Mesh network ได้อย่างไม่ติดขัด ต่อมาได้มีการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ในสถานการณ์ที่ต่าง ๆ เช่น การควบคุมการเคลื่อนที่เมื่อเปลี่ยนขนาดวัตถุที่ขนส่งทำให้วัตถุมีขนาดกว้างขึ้น หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ที่อยู่ภายในรางที่ห่างกันมากขึ้น การควบคุมการเคลื่อนที่เมื่อน้ำหนักที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับมีค่ามากขึ้น หุ่นยนต์จะยังสามารถควบคุมการเคลื่อนที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ และมีการประยุกต์ใช้การสื่อสารแบบไร้สายเพื่อนำมาช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ว่าสามารถทำให้การเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ดีขึ้นได้หรือไม่ แผนภาพโดยรวมของการทดลองทั้งหมดแสดงตามรูปที่ 5.1

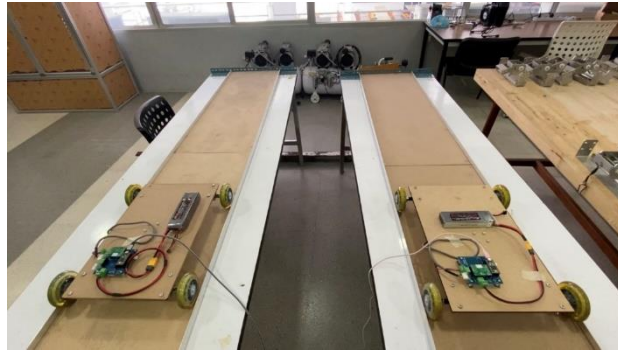


รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทดลอง

### 5.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ล้อ (Odometry)

#### 1) วิธีการทดลอง

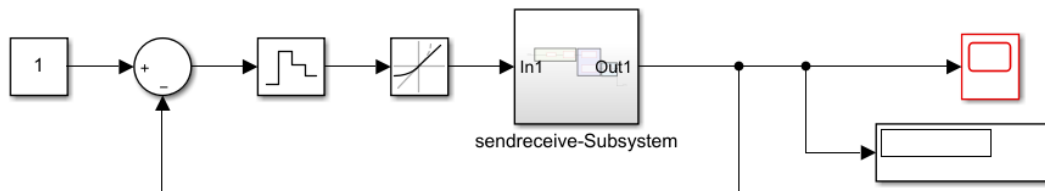
หุ่นยนต์จำลองสำหรับการทดลองนี้มีลักษณะตามรูปที่ 5.2 หุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1 ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เพียง 1 ตัว ขับเคลื่อนล้อทั้ง 4 ล้อ และระบบหุ่นยนต์ดังกล่าวถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการนำค่าที่วัดได้จาก encoder มาแปลงเป็นระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป (Odometry position) แล้วนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว ตามสมการที่ (6)



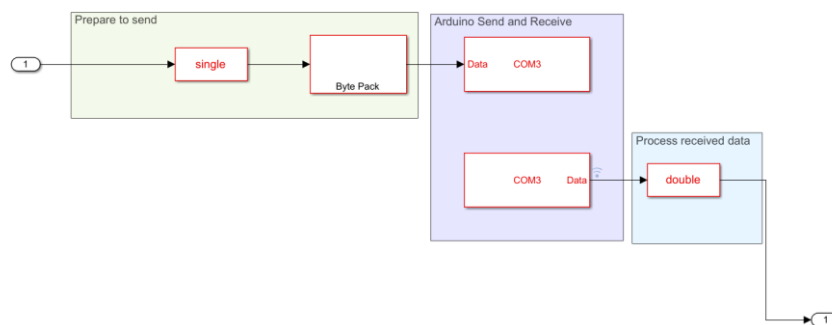
รูปที่ 5.2 หุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1

การเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่เป็นการเก็บข้อมูลผ่านสาย Serial port เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1 และถูกส่งการผ่านทาง Simulink ในโปรแกรม MATLAB

เริ่มจากการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 1 ตัว การทดสอบดังกล่าวจะเป็นการสั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในระยะทางที่ต้องการซึ่งในที่นี้คือระยะทาง 1 เมตร การรับและส่งข้อมูลระหว่าง Simulink ไปยัง Microcontroller board เป็นการส่งค่าระยะทางที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากโปรแกรม Simulink และแปลงค่าดังกล่าวเป็นค่าความเร็วให้อยู่ในรูป Pulse-width modulation (PWM) ส่งไปยังบอร์ดควบคุม บอร์ดควบคุมจะส่งค่ากลับมายังโปรแกรมในรูปของระยะทางที่มอเตอร์เคลื่อนที่ได้โดยคำนวณมาจากการแปลงค่าของ encoder ที่วัดได้ (Odometry position) ตามสมการที่ (5)



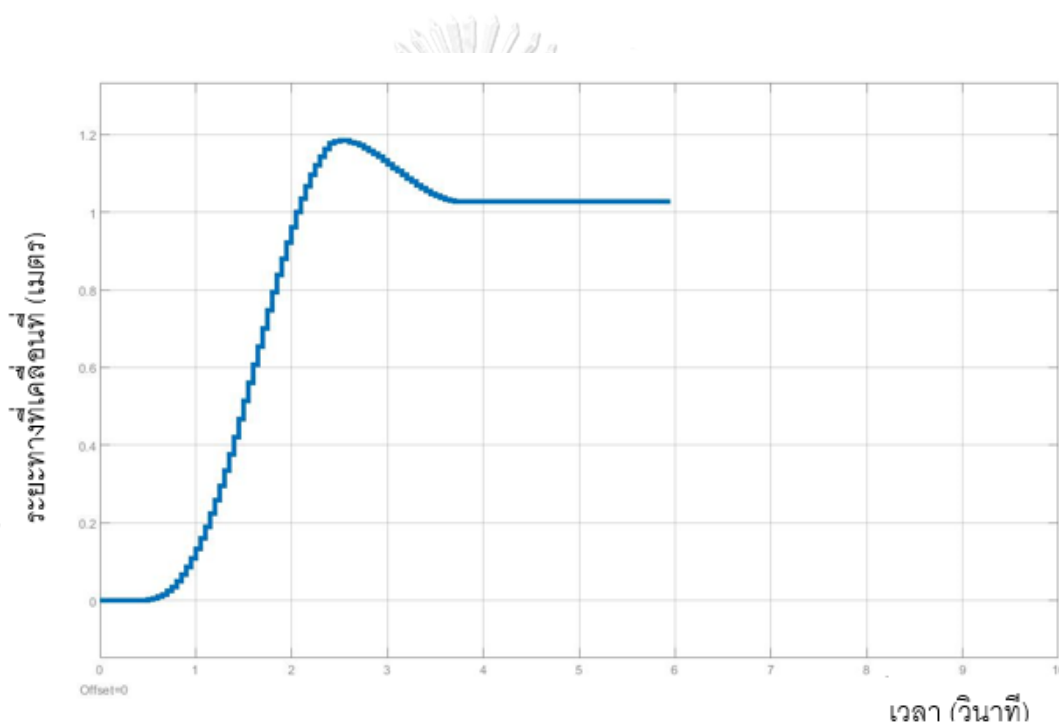
รูปที่ 5.3 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 1 ตัวผ่าน Simulink



รูปที่ 5.4 การส่งค่าและรับค่าระหว่างโปรแกรม MATLAB กับ Microcontroller board

## 2) ผลการทดลอง

จากการทดสอบพบว่า การควบคุมระบบหุ่นยนต์ผ่านการควบคุมค่า encoder ที่ติดอยู่กับมอเตอร์ (Odometry) เพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากนัก เนื่องจากผลจากการสั่นไถลของล้อในขณะเริ่มต้นและตอนหยุด ทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ไม่สามารถควบคุมได้ดีมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ผลการทดสอบนี้เป็นหนึ่งในผลการทดสอบมอเตอร์ของหุ่นยนต์ 1 ตัว ที่ถูกสั่งให้เคลื่อนที่ไปในระยะ 1 เมตร จากรูปจะพบว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่เกินระยะ 1 เมตรแต่ในความเป็นจริงพบว่า ระยะที่วัดได้จริงอยู่ที่ 0.93 เมตร



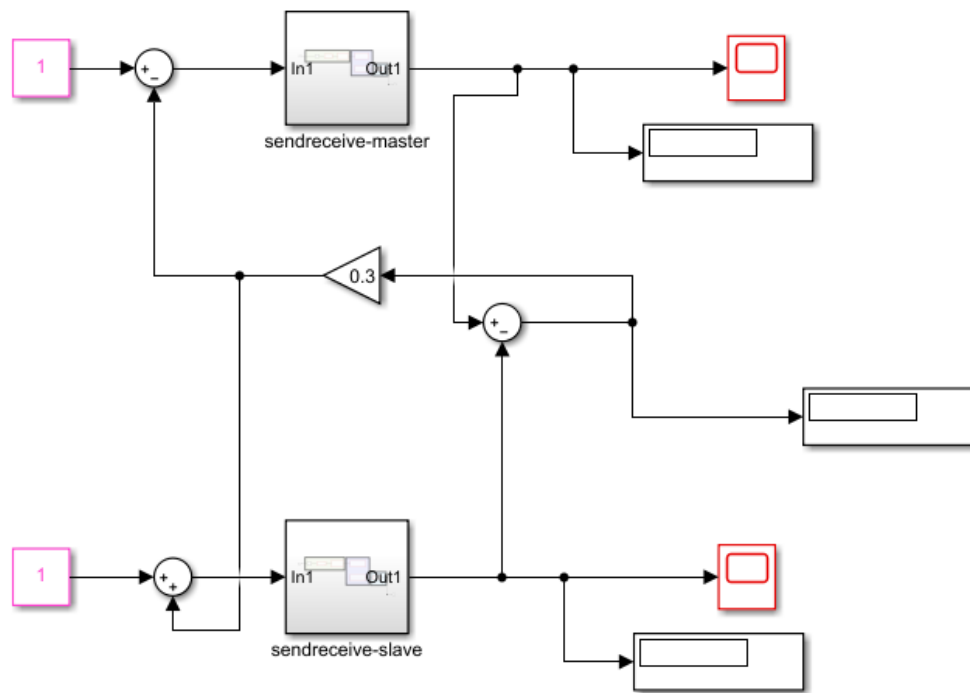
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของล้อจากการแปลงค่า encoder (Odometry position)

## 5.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วย Encoder ที่ติดตั้งกับมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่ล้อ (Odometry)

### 1) วิธีการทดลอง

สำหรับการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1 ทั้ง 2 ตัวให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน รูปที่ 5.6 แสดงถึงแผนภาพการทำงานในการควบคุมการเคลื่อนที่ดังกล่าว โดยค่าระยะทางที่คำนวณได้จาก encoder (Odometry position) ของหุ่นยนต์แต่ละตัวจะนำมาหักลบกัน หากระยะทางที่คำนวณได้ผลออกมาเป็นค่าบวกหมายถึงหุ่นยนต์ผู้นำอยู่นำหน้าหุ่นยนต์ผู้ตาม

ระบบจะทำการปรับค่าโดยไปเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตาม และลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำ และเป็นเช่นเดียวกันกับกรณีตรงกันข้าม เพื่อให้หุ่นยนต์ทั้งคู่เคลื่อนที่ไปได้พร้อมกัน โดยในการทดสอบในหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1 นั้น เป็นการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยระบบ Yaw control และดูลักษณะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจากการวัดค่า encoder ที่ติดอยู่กับมอเตอร์ (Odometry)



รูปที่ 5.6 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัวด้วย Encoder ที่ล้อ (Odometry)

## 2) ผลการทดลอง

สำหรับการทดสอบการควบคุมเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ตามแผนภาพในรูปที่ 5.6 นั้น หุ่นยนต์สามารถรักษาระดับในการเคลื่อนที่ให้อยู่ในแนวเดียวกันได้ แต่เนื่องจากผลจากการสั่นไหวตามที่กล่าวในหัวข้อ 5.1 ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หลายตัวผ่านการวัด encoder ที่มอเตอร์ล้อขับเคลื่อน (Odometry) เพียงอย่างเดียว นั้น ประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่อาจไม่ดีมากนัก



### 5.3 การทดสอบการสื่อสารผ่านระบบไร้สาย Mesh network

หลังจากการทดสอบตามข้อ 5.1 และ 5.2 เพื่อทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ในเบื้องต้นแล้วนั้น การสื่อสารของหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 1 เป็นการสื่อสารผ่านสาย Serial port เนื่องจากหุ่นยนต์ที่จะนำไปใช้งานจริงเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้สำหรับขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่อยู่บนรางสำหรับติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า หากหุ่นยนต์แต่ละตัวนั้นสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ไปด้วยกันผ่านระบบไร้สาย ดังนั้นจึงเริ่มจากการศึกษาระบบการสื่อสารแบบไร้สายระหว่างแผงควบคุมก่อนจะนำไปรวมกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ในส่วนถัดไป

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นในบทที่ 4 ระบบเชื่อมต่อแบบไร้สาย Mesh network เป็นระบบที่น่าสนใจ ทั้งในเรื่องความครอบคลุมในพื้นที่การใช้งาน ลดข้อจำกัดในความสามารถในเชื่อมต่อกับโหนดหลาย ๆ โหนดรวมไปถึงความสะดวกสบายในการเชื่อมต่อ ดังนั้นเราจึงเลือกระบบ Mesh network มาใช้ในการสื่อสารภายในระบบหุ่นยนต์ และการทดสอบเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย Mesh network นี้จะเป็นการทดสอบเพื่อนำระบบสื่อสารไร้สายไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ในการทดสอบหัวข้อถัดไป

#### 1) วิธีการทดลอง

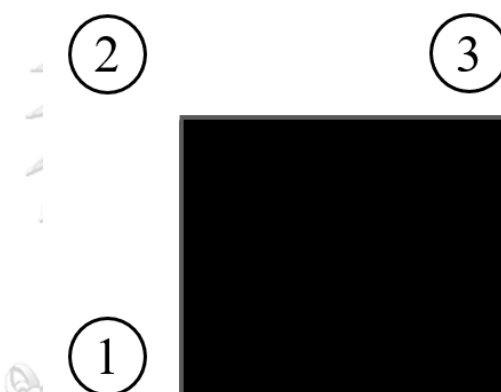
ในการทดสอบจะใช้บอร์ดในการทดสอบทั้งหมด 3 บอร์ด ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยการวางบอร์ด ณ บริเวณต่าง ๆ โดยที่ยังไม่ได้ประกอบเข้ากับหุ่นยนต์ แต่ละบอร์ดที่นำมาทดสอบนั้นจะแบ่งตามหน้าที่หลัก ๆ ได้แก่ 1. Server เป็นบอร์ดที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย Serial port เพื่อใช้รับข้อมูลจากบอร์ด Client และส่งข้อมูลเข้าไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและนำไปวิเคราะห์การทำงานต่อ 2) Client ส่งข้อมูล ในที่นี้เปรียบเสมือนเป็นบอร์ดที่ติดอยู่กับตัวหุ่นยนต์คอยส่งข้อมูลสถานะของตัวเองให้กับหุ่นยนต์ตัวอื่น ๆ และ Server ได้ทราบข้อมูล 3) สถานีกลาง บอร์ดนี้จะเปรียบเสมือนสถานีกลางที่ติดไว้ระหว่างทางเพื่อใช้ในการสื่อสารหากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกห่างจาก Server ในระยะที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับ Server โดยตรงได้ สามารถติดตั้งสถานีกลางในทุก ๆ ช่วงระยะที่แต่ละสถานีกลางยังเชื่อมต่อกับ Server ได้อยู่และอยู่ในระยะที่เชื่อมต่อกับหุ่นยนต์ได้เช่นกัน ทำให้หุ่นยนต์ยังสามารถเชื่อมต่อกับ Server ได้ตลอดเวลา

การทดสอบการสื่อสารระหว่างบอร์ดควบคุมด้วยระบบเชื่อมต่อไร้สาย Mesh ทดสอบด้วยการส่งข้อมูลขนาด 10 bytes และขนาด 100 bytes ที่ความเร็วในการส่งข้อมูล 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 และ 1000 ข้อความต่อวินาที ด้วยวิธีการส่งที่แตกต่างกัน ดังนี้

1.1) ตัวส่งข้อมูล (Client) และตัวรับข้อมูล (Server) อยู่ห่างกันประมาณ 2 เมตร โดยไม่มีสิ่งกีดขวาง การทดสอบในกรณีนี้เปรียบเสมือนหุ่นยนต์ (ตัวส่งข้อมูล) เคลื่อนที่อยู่ในระยะที่ยังสามารถเชื่อมต่อกับ Server ได้ ตามรูปที่ 5.7 ตำแหน่งบอร์ดหมายเลข 1 แทนตำแหน่งการวางบอร์ดรับข้อมูล และ ตำแหน่งบอร์ดหมายเลข 2 แทนตำแหน่งบอร์ดส่งข้อมูล

1.2) ตัวส่งและตัวรับข้อมูลอยู่ห่างกันประมาณ 3 เมตรและมีสิ่งกีดขวาง การทดสอบในกรณีนี้เปรียบเสมือน หุ่นยนต์ยังเคลื่อนที่อยู่ในระยะที่ยังเชื่อมต่อกับ Server ได้แต่มีสิ่งกีดขวาง ตามรูปที่ 5.7 ตำแหน่งบอร์ดหมายเลข 1 แทนตำแหน่งการวางบอร์ดรับข้อมูล และ ตำแหน่งบอร์ดหมายเลข 3 แทนตำแหน่งบอร์ดส่งข้อมูล

1.3) ตามรูปที่ 5.7 บอร์ดตัวส่งข้อมูลจะอยู่ตำแหน่งหมายเลข 3 ส่งข้อมูลไปยังตัวส่งข้อมูลหมายเลข 2 แล้วตัวส่งข้อมูลหมายเลข 2 ส่งข้อมูลให้ตัวรับข้อมูลหมายเลข 1 การทดสอบในกรณีนี้เปรียบเสมือนหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งบอร์ดหมายเลข 3 ไม่สามารถเชื่อมต่อกับ Server หรือเชื่อมต่อได้ไม่เสถียรมากนัก จึงเชื่อมต่อผ่านสถานีกลางหรือบอร์ดตำแหน่งที่ 2 เพื่อส่งข้อมูลให้แก่ Server โดยการทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบในกรณีที่ 1.2) ว่าระหว่างการส่งโดยตรงกับการส่งหลาย ๆ ต่อมีผลต่อการส่งข้อมูลหรือไม่



รูปที่ 5.7 ภาพจำลองการวางบอร์ดสำหรับทดสอบการสื่อสาร

สำหรับการทดสอบทั้งหมดนี้จะส่งข้อมูลจำนวน 1000 ข้อมูลต่อครั้ง ทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง ต่อ 1 การทดลองและเก็บข้อมูลว่าตัวรับข้อมูลนั้น สามารถรับข้อมูลได้จำนวนเท่าไร และในการรับข้อมูลจะมีการเช็คข้อมูลก่อนว่าข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่ต้องการหรือไม่ การทดสอบทดสอบด้วยบอร์ดควบคุม ESP32 Microcontroller ซึ่งบอร์ดดังกล่าวจะเป็นบอร์ดที่เรานำไปควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต่อไป โดยตัวส่งข้อมูลจะถูกวางอยู่ในจุดต่าง ๆ ตามระยะทางและเงื่อนไขที่กำหนด และตัวรับข้อมูลจะถูกต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย Serial port

การสื่อสารระบบไร้สาย Mesh network ผ่าน ESP32 Microcontroller สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ painlessMesh library ในการสื่อสาร โดย painlessMesh library ที่ใช้เป็น painlessMesh library version 1.4.2

## 2) ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนข้อมูลที่ตัวรับข้อมูลสามารถรับได้ โดยข้อมูลมีขนาด 10 bytes

อัตราการส่งข้อมูล (msg/s)	ส่งตรง ไม่มีสิ่งกีดขวาง		ส่งตรง มีสิ่งกีดขวาง		ส่งผ่านตัวกลาง	
	ค่าเฉลี่ย	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%	ค่าเฉลี่ย	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%	ค่าเฉลี่ย	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%
1000	884.2	99.66	836.4	102.00	937.3	57.05
200	934.9	54.33	865	89.06	907.6	82.90
100	869	89.22	872.6	92.16	868.6	74.64
50	961.5	31.77	899.4	82.37	910.5	14.28
20	1000	0.00	991	11.14	964.8	20.04
10	1000	0.00	985.2	33.48	995.3	2.02
5	1000	0.00	999.9	0.23	996.7	1.85
2	1000	0.00	1000	0.00	999.4	1.36

ตารางที่ 5.2 แสดงจำนวนข้อมูลที่ตัวรับข้อมูลสามารถรับได้ โดยข้อมูลมีขนาด 100 bytes

อัตราการส่งข้อมูล (msg/s)	ส่งตรง ไม่มีสิ่งกีดขวาง		ส่งตรง มีสิ่งกีดขวาง		ส่งผ่านตัวกลาง	
	ค่าเฉลี่ย	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%	ค่าเฉลี่ย	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%	ค่าเฉลี่ย	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%
1000	950.4	72.73	908	83.38	855.5	110.89
200	926.8	67.84	909.1	69.73	901.1	93.19
100	939.5	69.85	913	56.95	865.5	110.83
50	978.3	26.48	877.5	30.07	869.7	56.48
20	983.5	10.44	955.2	28.66	921.3	25.28
10	999.9	0.23	1000	0.00	988.7	5.61
5	1000	0.00	985.7	32.35	993.8	2.40
2	995.4	9.22	980	45.24	976.1	31.87

จากตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2 พบว่ายิ่งอัตราการส่งข้อมูลเร็วมากเท่าใด โอกาสที่ข้อมูลจะสูญหายยิ่งมีมากเท่านั้น แต่ในบางช่วงกลับพบว่าจำนวนข้อมูลที่รับได้มีค่าที่ไม่ตรงตามแนวโน้ม เนื่องจากช่วงเวลาในการทดสอบทั้งหมดใช้เวลานาน ไม่สามารถทำการทดสอบทั้งหมดในเวลาพร้อมกันได้ เมื่อเวลาเปลี่ยน จำนวนคนใช้งาน Wi-Fi ในย่าน 2.4 HZ ในแต่ละช่วงที่ไม่เท่ากัน และยากที่จะหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีการใช้งาน Wi-Fi ได้ เนื่องจากในปัจจุบันการใช้งานอินเทอร์เน็ตเป็นสิ่งที่ไม่ควรมองข้ามในชีวิตประจำวันของทุกคนไปแล้ว ซึ่งสัญญาณจากหลาย ๆ แหล่งนั้นอาจรบกวนการรับส่งข้อมูลในการทดสอบได้ จึงทำให้ผลการทดสอบไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่คาดหวังไว้ แต่อย่างไรก็ดีทำให้ได้ทราบถึงผลจากการส่งข้อมูลที่ถี่ต่างกัน ในบางครั้ง แม้จะส่งข้อมูลด้วยอัตราที่เร็ว แต่หากการเชื่อมต่อ

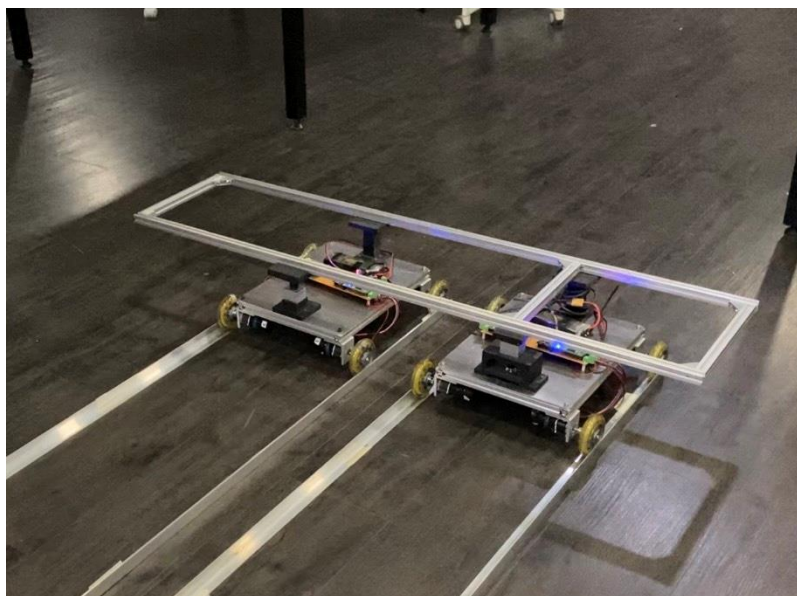
ดี ไม่มีสัญญาณอื่น ๆ ครอบคลุม การส่งข้อมูลก็จะมีปัญหา สามารถรับข้อมูลได้ครบถ้วน แต่เพื่อความมั่นใจในการส่งข้อมูลในทุก ๆ ช่วงเวลา เราจึงต้องเลือกช่วงอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สุดไม่ช้าเกินไป แต่ก็สามารถส่งข้อมูลได้ครบถ้วนมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

จากการทดสอบข้างต้น พบว่า การส่งข้อมูลที่อัตราเร็ว 10 ข้อความต่อวินาที เป็นความเร็วที่ทุกกรณี ตัวรับข้อมูลสามารถรับข้อมูลได้ใกล้เคียง 1000 ข้อความหรือสามารถรับข้อมูลได้เกือบครบนั้นเอง สามารถดูผลการรับข้อมูลที่ภาคผนวก ก ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลที่ 10 ข้อความต่อวินาทีในส่วนการทดลองถัดไป

สำหรับผลการทดสอบระหว่างการส่งข้อมูลโดยตรงและการส่งข้อมูลหลายต่อหรือการส่งผ่านตัวกลาง พบว่าแนวโน้มการส่งข้อมูลโดยตรงให้กับตัวรับข้อมูล ตัวรับข้อมูลได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนมากกว่า แต่อย่างไรก็ดีการทดสอบนี้เป็นการทดสอบในระยะที่ตัวส่งข้อมูลยังสามารถสื่อสารโดยตรงกับตัวรับข้อมูลได้เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันระหว่างการส่งโดยตรงกับการส่งหลายต่อได้ แต่หากตัวส่งข้อมูลอยู่ไกลในระยะที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับตัวรับข้อมูลได้ การมีสถานีกลางจะทำให้หุ่นยนต์หรือตัวส่งข้อมูลยังเชื่อมต่อกับตัวรับข้อมูลหรือ Server อยู่ได้

#### 5.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

จากการทดสอบตามหัวข้อ 5.1 ซึ่งทำให้ได้ข้อสรุปว่าระบบหุ่นยนต์ไม่สามารถถูกควบคุมการเคลื่อนที่ได้ด้วยการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ผ่าน Encoder ที่ติดอยู่ที่ล้อ (Odometry position) เพียงอย่างเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากนัก ทำให้มีแนวคิดในการสร้างหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 2 ขึ้น ประกอบกับการทดสอบระบบการสื่อสารแบบไร้สายตามหัวข้อ 5.3 ทำให้สามารถนำระบบการเชื่อมต่อแบบไร้สาย Mesh network มาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารได้ ดังนั้น สำหรับหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 2 ระบบหุ่นยนต์จะถูกควบคุมการเคลื่อนที่ให้ผ่านการวัดมุมด้วย Encoder ที่ติดอยู่บนหุ่นยนต์ผู้ตาม และหุ่นยนต์จะสื่อสารผ่านระบบไร้สาย Mesh network



รูปที่ 5.8 หุ่นยนต์จำลองแบบที่ 2

#### 1) วิธีการทดลอง

การทดสอบของหุ่นยนต์จำลองแบบที่ 2 ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านการวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว โดยหุ่นยนต์ผู้ตามสามารถเคลื่อนที่ตามหุ่นยนต์ผู้นำได้โดยไม่ต้องมีการสื่อสาร และสำหรับในส่วนของสื่อสารนั้น เป็นการสื่อสารเพื่อส่งข้อมูลความเร็วที่ต้องการให้ระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่และส่งข้อมูลสถานะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กลับไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่า การสื่อสารของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวและการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ เป็นการสื่อสารผ่านระบบ Mesh network ด้วย ESP32 Microcontroller โดย ESP32 Microcontroller ที่ใช้สำหรับการทดลองนี้มีทั้งหมด 3 ตัว ESP32 2 ตัวแรกถูกติดตั้งที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์พร้อมส่งข้อมูลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปยังบอร์ดอื่น ๆ ที่ต้องการและ ESP32 Microcontroller อีก 1 บอร์ดถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย Serial port เพื่อใช้ในการรับและส่งข้อมูลผ่านทางคอมพิวเตอร์

เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์จำลองสามารถทำความเร็วได้สูงสุดที่ 0.48 m/s ดังนั้นสำหรับการทดสอบจะทดสอบที่ความเร็ว 0.1, 0.2 และ 0.3 m/s และหุ่นยนต์ 2 ตัวอยู่ห่างกัน 50 เซนติเมตร โดยการทดสอบในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Gain ที่เหมาะสมในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ แต่ละการทดสอบจะทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตลอดการเคลื่อนที่พร้อมแสดงช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่คิดจากค่ามุมที่วัดได้จาก Encoder ที่ติดอยู่บนตัวหุ่นยนต์กับระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวคิดตามสมการที่ (17)

$$\Delta X = \text{abs}(X1 - X2) = L \cdot \tan(\theta) \quad (17)$$

เมื่อ  $\Delta X$  คือ ระยะที่หุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งตามหุ่นยนต์อีกตัว

$X1, X2$  คือ ระยะที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไป

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว

$\theta$  คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว

## 2) ผลการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นด้วยการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ที่ความเร็ว 0.1 m/s ผลการควบคุมการเคลื่อนที่แสดงดังตารางที่ 5.3 จากตารางจะพบว่าเมื่อเพิ่มค่า P gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ ค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะมีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ได้ผลดีขึ้นนั่นเอง แต่เมื่อใส่ค่า P gain เพิ่มไปที่  $K_p = 0.5$  การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตามเริ่มมีการเคลื่อนที่นำหน้าและถอยหลังหุ่นยนต์ผู้นำสลับไปมา เนื่องจากค่า Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่เริ่มมากเกินไป การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เริ่มไม่เสถียรและเมื่อเพิ่มค่าไปที่  $K_p = 0.6$  ระบบหุ่นยนต์มีการส่ายเคลื่อนที่นำหน้าและถอยหลังอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นค่า P gain ที่ถูกเลือกเพื่อใช้ในการทดสอบควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ที่ความเร็วถัดไปคือค่า  $K_p = 0.4$

ตารางที่ 5.3 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.1 m/s

ค่า Gain ในการควบคุม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
$K_p = 0$ (ไม่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์)	$34.91 \pm 7.47$	$9.29 \pm 5.53$
$K_p = 0.05$	$2.24 \pm 0.39$	$0.31 \pm 0.08$
$K_p = 0.08$	$1.18 \pm 0.26$	$0.17 \pm 0.06$
$K_p = 0.1$	$2.75 \pm 0.54$	$0.09 \pm 0.02$
$K_p = 0.2$	$1.18 \pm 0.25$	$0.04 \pm 0.03$
$K_p = 0.4$	$0.71 \pm 0.15$	$0.03 \pm 0.02$

ค่า Gain ในการควบคุม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
Kp = 0.5	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร
Kp = 0.6	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร

หลังจากได้ค่า P gain จากการทดลองที่ความเร็ว 0.1 m/s เรียบร้อยแล้ว โดยค่า P gain ที่ได้คือ Kp = 0.4 จึงนำค่าดังกล่าวมาทดสอบการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.2 m/s พบว่าค่า Kp = 0.4 เมื่อนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.2 และ 0.3 m/s ทำให้ระบบหุ่นยนต์ไม่เสถียร เมื่อลดค่า Gain เหลือค่า Kp = 0.3 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ยังคงสั่น เคลื่อนที่เดินหน้าและถอยหลังอยู่ ดังนั้น สำหรับการทดสอบการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ที่ความเร็ว 0.2 และ 0.3 m/s จะควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย Kp = 0.2 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.4 และ ตารางที่ 5.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.2 m/s

ค่า Gain ในการควบคุม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
Kp = 0 (ไม่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์)	76.91 ± 17.55	18.79 ± 11.87
Kp = 0.08	2.55 ± 0.58	0.36 ± 0.15
Kp = 0.2	0.90 ± 0.22	0.05 ± 0.01
Kp = 0.3	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร
Kp = 0.4	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร

ตารางที่ 5.5 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.3 m/s

ค่า Gain ในการควบคุม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
Kp = 0 (ไม่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์)	80.31 ± 18.09	16.56 ± 13.34
Kp = 0.08	3.78 ± 0.49	0.75 ± 0.43
Kp = 0.2	2.08 ± 0.52	0.16 ± 0.10
Kp = 0.3	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร
Kp = 0.4	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร

ดังนั้น ค่า P Gain ที่เราเลือกใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์คือค่า  $K_p = 0.2$  เนื่องจากเป็นค่า Gain ที่สามารถนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ได้เสถียรมากที่สุดในทุกความเร็ว แม้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วเท่ากับ 0.3 m/s จะมามีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยที่ความเร็วอื่น ๆ ดังแสดงตามตารางที่ 5.6 แต่ระยะดังกล่าวยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบผลที่ได้จากค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วต่าง ๆ โดยควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ด้วย  $K_p = 0.2$

ความเร็วในการเคลื่อนที่	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
0.1 m/s	$1.18 \pm 0.25$	$0.04 \pm 0.03$
0.2 m/s	$0.90 \pm 0.22$	$0.05 \pm 0.01$
0.3 m/s	$2.08 \pm 0.52$	$0.16 \pm 0.10$

### 5.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์

จากที่กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า เนื่องจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ถูกควบคุมด้วยการวัดมุมที่เกิดขึ้นจากความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ดังนั้นการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์มีผลต่อการวัดมุมและควบคุมการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นได้

วิธีการทดลองจะถูกแบ่งย่อยออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

1) การทดลองที่ 1 ก่อนเปลี่ยนค่า Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่

#### 1.1) วิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1 นี้จะเป็นการทดลองโดยใช้ค่า P Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบเท่ากับการทดลองก่อนหน้าคือ  $K_p = 0.2$  เพื่อดูผลการทดลองว่าประสิทธิภาพดีขึ้นหรือแย่ลงหรือไม่ และมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์จากเดิมที่หุ่นยนต์ 2 ตัวอยู่ห่างกันที่ระยะ 50 เซนติเมตร ในการทดลองนี้จะทดสอบเพิ่มที่ระยะ 100 และ 150 เซนติเมตร ที่ความเร็ว 0.1, 0.2 และ 0.3 m/s ตามลำดับ โดยทุกการทดลองจะทดสอบเป็นจำนวนทั้งหมด 10 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตลอดการเคลื่อนที่พร้อมแสดงช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และสามารถดูข้อมูลดิบของผลการทดลองได้ที่ภาคผนวก ก



### 1.2) ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.7, ตารางที่ 5.8 และ ตารางที่ 5.9 เป็นตารางแสดงผลการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่โดยไม่เปลี่ยนค่า P Gain แต่เปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ที่ความเร็ว 0.1, 0.2 และ 0.3 m/s ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการทดลองจะพบว่า เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ การกระทำดังกล่าวส่งผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการควบคุมด้วยค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างหุ่นยนต์ สังเกตได้จากค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่มีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์มีค่ามากขึ้น ดังนั้นเราจึงทำการทดลองเปลี่ยนค่า P Gain ในการทดลองถัดไป

ตารางที่ 5.7 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยใช้  $K_p = 0.2$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.1 m/s

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
50 cm.	$1.18 \pm 0.25$	$0.04 \pm 0.03$
100 cm.	$0.94 \pm 0.23$	$0.06 \pm 0.03$
150 cm.	$1.41 \pm 0.28$	$0.20 \pm 0.07$

ตารางที่ 5.8 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยใช้  $K_p = 0.2$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.2 m/s

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
50 cm.	$0.90 \pm 0.22$	$0.05 \pm 0.01$
100 cm.	$1.89 \pm 0.37$	$0.13 \pm 0.08$
150 cm.	$2.47 \pm 0.34$	$0.31 \pm 0.17$

ตารางที่ 5.9 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวโดยใช้  $K_p = 0.2$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว 0.3 m/s

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
50 cm.	$2.08 \pm 0.52$	$0.16 \pm 0.10$
100 cm.	$2.75 \pm 0.52$	$0.27 \pm 0.18$
150 cm.	$3.42 \pm 0.77$	$0.42 \pm 0.28$

2) การทดลองที่ 2 หลังเปลี่ยนค่า Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่

### 2.1) วิธีการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างหุ่นยนต์ การกระทำดังกล่าวส่งผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ โดยการเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นใช้ค่า Gain ตามสมการที่ (12) ซึ่งเป็นการคูณอัตราส่วนระหว่างระยะห่างหุ่นยนต์ใหม่กับระยะห่างหุ่นยนต์เดิมที่เคยใช้ในการทดลองเริ่มต้น

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เดิมที่เคยใช้คือระยะห่างเท่ากับ 50 เซนติเมตร สำหรับการทดลองนี้จะทดสอบที่ระยะห่างเท่ากับ 100 และ 150 เซนติเมตร ระยะห่างดังกล่าวมีค่าเป็น 2 และ 3 เท่าตามลำดับของระยะห่างเดิม ดังนั้น ในการทดลองนี้ ที่ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 เซนติเมตร จากเดิมใช้ค่า  $K_p = 0.2$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่ จะถูกเปลี่ยนเป็น  $K_p = 2 * 0.2 = 0.4$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในระยะดังกล่าว และเช่นเดียวกับที่ระยะห่างเท่ากับ 150 เซนติเมตร ค่า Gain ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่จะถูกเปลี่ยนเป็น  $K_p = 3 * 0.2 = 0.6$

การทดลองทดลองที่ความเร็ว 0.1, 0.2 และ 0.3 m/s ตามลำดับ โดยทุกการทดลองจะทดสอบเป็นจำนวนทั้งหมด 10 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตลอดการเคลื่อนที่พร้อมแสดงช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

$$V_{cmd} = V_{target} + \frac{Z_2}{Z_1} K_2 \cdot (\theta - 0) \quad (12)$$

### 2.2) ผลการทดลอง

ตารางที่ 5.10 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและเปลี่ยนค่า  $K_p$  ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
50 cm.	$1.18 \pm 0.25$	$0.04 \pm 0.03$
100 cm.	$1.26 \pm 0.24$	$0.05 \pm 0.02$
150 cm.	$0.47 \pm 0.07$	$0.05 \pm 0.01$

ตารางที่ 5.11 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและเปลี่ยนค่า  $K_p$  ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
-------------------------	-----------------------	-----------------------

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
50 cm.	$0.90 \pm 0.22$	$0.05 \pm 0.01$
100 cm.	$1.18 \pm 0.20$	$0.08 \pm 0.03$
150 cm.	$1.06 \pm 0.19$	$0.08 \pm 0.05$

ตารางที่ 5.12 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวและเปลี่ยนค่า Kp ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
50 cm.	$2.08 \pm 0.52$	$0.16 \pm 0.10$
100 cm.	$1.26 \pm 0.25$	$0.16 \pm 0.06$
150 cm.	$2.00 \pm 0.36$	$0.13 \pm 0.12$

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไป ก่อนและหลังเปลี่ยนค่า Kp ในการควบคุมการเคลื่อนที่ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าเฉลี่ยก่อนเปลี่ยนค่า Gain (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ยหลังเปลี่ยนค่า Gain (เซนติเมตร)
ความเร็ว 0.1 m/s		
50 cm.	$0.04 \pm 0.03$	$0.04 \pm 0.03$
100 cm.	$0.06 \pm 0.03$	$0.05 \pm 0.02$
150 cm.	$0.20 \pm 0.07$	$0.05 \pm 0.01$
ความเร็ว 0.2 m/s		
50 cm.	$0.05 \pm 0.01$	$0.05 \pm 0.01$
100 cm.	$0.13 \pm 0.08$	$0.08 \pm 0.03$
150 cm.	$0.31 \pm 0.17$	$0.08 \pm 0.05$
ความเร็ว 0.3 m/s		
50 cm.	$0.16 \pm 0.10$	$0.16 \pm 0.10$
100 cm.	$0.27 \pm 0.18$	$0.16 \pm 0.06$
150 cm.	$0.42 \pm 0.28$	$0.13 \pm 0.12$

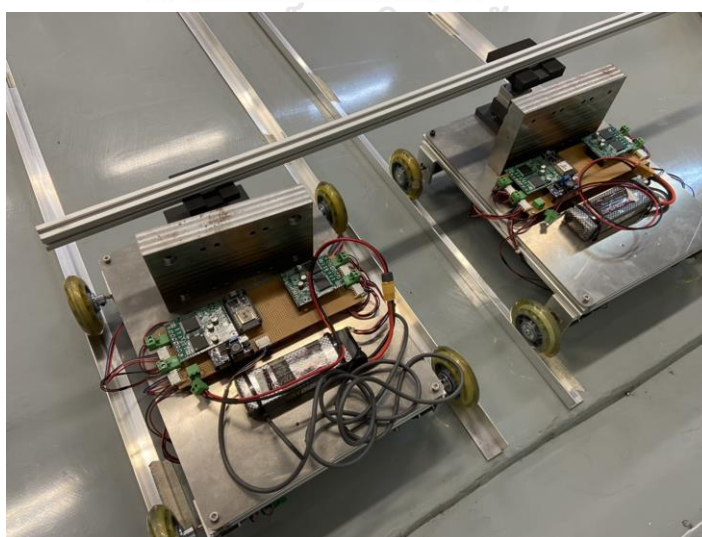
จากตารางที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ตามสมการที่ (12) ทำให้ค่าเฉลี่ยของค่าความต่างในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีค่าใกล้เคียงเดิมในทุก ๆ

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปและในทุก ๆ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ดังนั้นเมื่อมีการนำระบบหุ่นยนต์นี้ไปใช้ในการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์แล้วนั้น จะต้องมีการคำนึงถึงระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ว่ามีระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้นหรือไม่ หากมีการเปลี่ยนแปลงสามารถคูณค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยอัตราส่วนระหว่างระยะห่างใหม่กับระยะห่างเดิมได้ เพื่อให้สามารถควบคุมประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ได้ดังเดิม

## 5.6 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนขนาดน้ำหนักของวัตถุที่นำมาใช้ขนส่ง

### 1) วิธีการทดลอง

การทดลองทดสอบการขนส่งวัตถุเมื่อหุ่นยนต์ต้องแบกรับน้ำหนักเพิ่มโดยเพิ่มน้ำหนักให้หุ่นยนต์แต่ละตัวเข้าไปอีกตัวละ 5 และ 8 กิโลกรัม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการขนส่งกับการขนส่งเมื่อยังไม่เพิ่มน้ำหนักในการแบกรับของหุ่นยนต์ โดยการทดลองจะทดสอบที่ความเร็ว 0.1 m/s ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 50 เซนติเมตร และใช้  $K_p = 0.1$  การทดลองนี้เป็นการทดลองก่อนหน้าการทดลองกรณีอื่น ๆ ที่กล่าวไว้ในข้างต้น การทดลองโดยใช้ค่า Gain ที่  $K_p = 0.1$  เป็นการทดสอบในกรณีนี้เท่านั้น ค่าผลการทดสอบที่ได้จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงเทียบภายในกรณีไม่เกี่ยวข้องกับกรณีอื่น ๆ ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยทุกการทดลองจะทดสอบเป็นจำนวนทั้งหมด 10 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตลอดการเคลื่อนที่พร้อมแสดงช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%



รูปที่ 5.9 เพิ่มน้ำหนักให้หุ่นยนต์แต่ละตัวตัวละ 5 กิโลกรัม



รูปที่ 5.10 เพิ่มน้ำหนักให้หุ่นยนต์แต่ละตัวแต่ละ 8 กิโลกรัม

## 2) ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามตารางที่ 5.14 จะพบว่า การเพิ่มน้ำหนักในการขนส่งเข้าไปภายในระบบหุ่นยนต์ส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ แต่อย่างไรก็ดี ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้ำหนักของวัตถุที่ขนส่ง ควรตรวจสอบการควบคุมของระบบหุ่นยนต์ว่ายังสามารถทำงานอยู่ในระบบที่ยอมรับได้หรือไม่

ตารางที่ 5.14 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับ

น้ำหนักที่เพิ่ม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
0 กก.	$1.26 \pm 0.19$	$0.13 \pm 0.04$
5 กก.	$1.61 \pm 0.29$	$0.20 \pm 0.05$
8 กก.	$2.32 \pm 0.54$	$0.17 \pm 0.05$

## 5.7 การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

การทดลองในกรณีก่อนหน้า ระบบสื่อสารไร้สายใช้สำหรับการรับและส่งข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์และคอมพิวเตอร์ และหากขาดการเชื่อมต่อระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว หุ่นยนต์ทั้ง 2 จะหยุดการเคลื่อนที่และรอจนกว่าการเชื่อมต่อจะกลับมาปกติจึงเริ่มเคลื่อนที่ต่อไป แต่การสื่อสารไร้สายไม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ โดยจะมีเพียงหุ่นยนต์ผู้ตามที่ติดตั้ง Encoder ในการวัดมุมเป็นตัวที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ให้สามารถขนส่งวัตถุไปได้โดย

ที่ไม่ต้องมีการสื่อสารข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ สำหรับการทดลองนี้จึงทำการทดสอบว่า หากนำระบบการสื่อสารไร้สายมาช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่จะดีขึ้นหรือไม่

### 1) การทดลองที่ 1 เปลี่ยนชนิดของข้อมูล

#### 1.1) วิธีการทดลอง

เนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้ ข้อมูลคำสั่งเกี่ยวกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จะถูกส่งออกจากคอมพิวเตอร์และส่งไปยังหุ่นยนต์แต่ละตัว และข้อมูลจาก Encoder วัดมุมในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จะถูกส่งกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่าการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ จะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลเป็นการส่งข้อมูลเป็นการรับและส่งข้อมูลเพียงข้อมูลเดียวไปยังแต่ละบอร์ด

สำหรับการทดลองนี้การรับและส่งข้อมูลจะเปลี่ยนไปจากกรณีที่ทดลองก่อนหน้านี้ นั่นคือคำสั่งเกี่ยวกับการความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จะยังส่งไปที่หุ่นยนต์แต่ละตัวดังเดิม แต่ในส่วนของข้อมูลเกี่ยวกับค่ามุมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ จากเดิมที่ส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพียงทางเดียวเพื่อบันทึกค่า ในการทดลองนี้จะส่งค่าดังกล่าวไปยังหุ่นยนต์อีก 1 ตัวเพื่อให้หุ่นยนต์อีก 1 ตัวทราบเกี่ยวกับข้อมูลการเคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder จากเดิมจะรับข้อมูลเพียงแค่ข้อมูลเกี่ยวกับความเร็วในการเคลื่อนที่ แต่สำหรับการทดลองนี้หุ่นยนต์จะต้องรับข้อมูลเกี่ยวกับค่ามุมเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสาร จากเดิมชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารคือ String เพื่อความสะดวกในการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ และหุ่นยนต์ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder จะไม่สืบสนว่าข้อมูลที่ได้รับเป็นข้อมูลคำสั่งเกี่ยวกับความเร็วในการเคลื่อนที่หรือเป็นข้อมูลค่ามุมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ ชนิดข้อมูลจึงถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบ JSON โดยข้อมูลในรูปแบบ JSON จะเก็บข้อมูลในแบบ key, value ซึ่งในการทดลองจะเป็นการส่งบอกว่าข้อมูลมาจากบอร์ดตัวไหน และต้องการส่งข้อมูลอะไร เช่น ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูล {"Board": "Server", "Velocity": "0.1"} และถ้าเป็นข้อมูลจากบอร์ดควบคุมของหุ่นยนต์ผู้ตามจะส่งข้อมูล {"Board": "Client1", "Degree": "0.045"} เป็นต้น ดังนั้นเมื่อแต่ละบอร์ดได้รับข้อมูลจะสามารถแยกได้ว่าข้อมูลดังกล่าวมาจากบอร์ดไหนและข้อมูลที่รับเป็นข้อมูลอะไร

ข้อมูลชนิด JSON จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าข้อมูลในรูปแบบ String การทดลองที่ 1 นี้จึงทดสอบว่า หากเปลี่ยนชนิดข้อมูลในการเคลื่อนที่จะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์หรือไม่

การทดสอบทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.1 m/s ค่า  $K_p = 0.1$  ทดสอบเป็นจำนวนทั้งหมด 10 ครั้ง รายงานผลในรูปของค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตลอดการเคลื่อนที่พร้อมแสดงช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

### 1.2) ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสาร ไม่มีผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ดังแสดงตามตารางที่ 5.15 ค่าเฉลี่ยของความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่มีค่าใกล้เคียงเดิมแม้จะเปลี่ยนชนิดของข้อมูลในการสื่อสาร

ตารางที่ 5.15 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเปลี่ยนชนิดข้อมูลในการสื่อสาร

ชนิดของข้อมูล	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
String	$1.49 \pm 0.29$	$0.11 \pm 0.04$
JSON	$1.26 \pm 0.19$	$0.13 \pm 0.04$

## 2) การทดลองที่ 2 ประยุกต์การสื่อสารไร้สายในการควบคุมการเคลื่อนที่

### 2.1) วิธีการทดลอง

การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์นั้น จะเป็นการส่งข้อมูลเกี่ยวกับค่ามุมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ไปให้กับหุ่นยนต์ผู้นำที่ไม่ได้ติด Encoder จากเดิมที่มีแต่หุ่นยนต์ผู้ตามที่ติด Encoder ที่ทราบข้อมูลดังกล่าว โดยในกรณีตามการทดลองในหัวข้อ 5.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ที่ใช้เป็นกรณีหลักในการควบคุมการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์ผู้ตามที่ติด Encoder จะควบคุมด้วยค่า  $K_p = 0.2$  สำหรับในการทดลองนี้การควบคุมการเคลื่อนที่จะถูกแบ่งการทดลองออกเป็นทดลองย่อยอีก 3 กรณี

- หุ่นยนต์ตัวที่ติด Encoder ใช้ค่า  $K_p = 0.2$  และเพิ่มค่า P Gain ให้หุ่นยนต์ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder
- หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวใช้ค่า  $K_p = 0.1$  ซึ่งเป็นค่ากึ่งหนึ่งของค่าเดิม
- หุ่นยนต์ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder ใช้ค่า  $K_p = 0.2$  และหุ่นยนต์ตัวที่ติด Encoder ปรับค่า P Gain

สำหรับการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำ (ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder) จะถูกควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ตามสมการที่ (13) และการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้ตาม (หุ่นยนต์ตัวที่ติด Encoder) ถูกควบคุมตามสมการที่ (14) ทดลองที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ที่ความเร็ว 0.1 m/s ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 50 เซนติเมตร

$$V_{cmdL} = V_{target} - K_l \cdot (\theta - 0) \quad (13)$$

$$V_{cmdF} = V_{target} + K_f \cdot (\theta - 0) \quad (14)$$

## 2.2) ผลการทดลอง

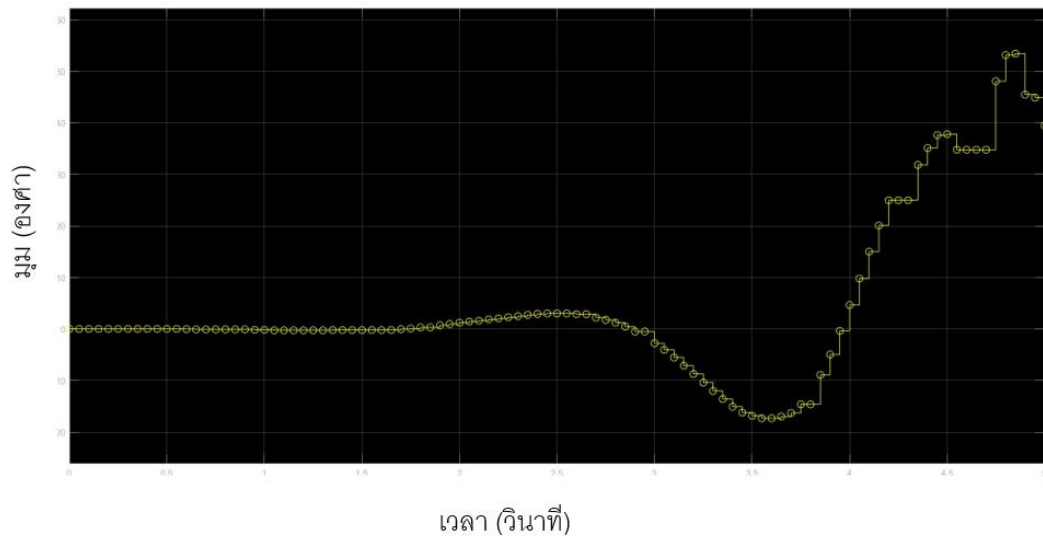
ตารางที่ 5.16 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้นำและหุ่นยนต์ผู้ตาม

ค่า P Gain	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
$K_f = 0.2$	$1.18 \pm 0.25$	$0.04 \pm 0.03$
$K_f = 0.2, K_l = 0.05$	$0.55 \pm 0.15$	$0.03 \pm 0.01$
$K_f = 0.2, K_l = 0.08$	$0.75 \pm 0.14$	$0.05 \pm 0.02$
$K_f = 0.1, K_l = 0.1$	ไม่เสถียร	ไม่เสถียร
$K_f = 0.05, K_l = 0.2$	5.96	1.42

จากผลทดลองตามตารางที่ 5.16 พบว่าเมื่อประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่โดยเพิ่มค่า P Gain ให้หุ่นยนต์ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder ด้วยค่า  $K_l = 0.05$  จะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ดีขึ้น และเมื่อทดลองเปลี่ยนค่า P Gain เป็น  $K_l = 0.08$  การควบคุมการเคลื่อนที่ซึ่งให้ผลที่ดีกว่าการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านหุ่นยนต์ผู้ตามเพียงอย่างเดียวเมื่อเทียบค่าสูงสุดของค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ แต่ค่าดังกล่าวเริ่มทำให้การควบคุมของระบบหุ่นยนต์ไม่เสถียรและส่งผลให้การควบคุมการเคลื่อนที่ไม่ดีเท่าที่  $K_l = 0.05$

เมื่อทดลองปรับการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการลด Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวเหลือกึ่งหนึ่ง พบว่าระบบหุ่นยนต์ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่เพื่อขนส่งวัตถุได้เนื่องจากระบบไม่เสถียร ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ค่ามุมที่วัดได้จากการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการเปลี่ยนค่า Gain ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวลดลงเหลือกึ่งหนึ่งหรือเท่ากับ 0.1 พบว่าค่ามุมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ไม่เสถียร





รูปที่ 5.11 ค่ามุมที่วัดได้จากการทดลองเมื่อค่า  $K_l = K_f = 0.1$

สำหรับการทดลองเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่โดยที่หุ่นยนต์ตัวที่ไม่ได้ติด Encoder ใช้ค่า  $K_l = 0.2$  และหุ่นยนต์ตัวที่ติด Encoder ปรับค่า P Gain เหลือ  $K_f = 0.05$  การทดลองในกรณีนี้ แสดงผลจากการทดลองตามตารางที่ 5.16 เพียงการทดลอง 1 ครั้ง เนื่องจากจากการทดลองพบว่า การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์สามารถควบคุมได้ด้วยค่าดังกล่าวในบางครั้ง และบางครั้งการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นไม่เสถียรจึงไม่สามารถเก็บข้อมูลผลการทดลองได้ทั้ง 10 ครั้ง

จากการทดลองทั้งหมดในหัวข้อ 5.7 พบว่า สามารถนำระบบการสื่อสารไร้สายมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการขนส่งแผงโซลาร์เซลล์ได้ แต่ในการควบคุมจะต้องทำการเลือก Gain ให้เหมาะสมเพื่อให้ระบบหุ่นยนต์สามารถขนส่งได้อย่างเสถียร

ตารางที่แสดงด้านล่างต่อไปนี้ เป็นการสรุปและรวบรวมผลการทดลองในการทดลองทั้งหมด สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ ทั้ง การหาค่า Gain ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำมาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ (ตารางที่ 5.17) การปรับเปลี่ยนค่า Gain ในการควบคุมการเคลื่อนที่เมื่อมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว (ตารางที่ 5.13) ผลที่เกิดจากการควบคุมการเคลื่อนที่เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับ (ตารางที่ 5.14) รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารไร้สายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ (ตารางที่ 5.18)

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยก่อนและหลังการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

ความเร็วในการเคลื่อนที่	ค่าเฉลี่ยก่อนการควบคุมการเคลื่อนที่ (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ยหลังการควบคุมการเคลื่อนที่ (เซนติเมตร)
0.1 m/s	9.29 ± 5.53	0.04 ± 0.03
0.2 m/s	18.79 ± 11.87	0.05 ± 0.01
0.3 m/s	16.56 ± 13.34	0.16 ± 0.10

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปก่อนและหลังเปลี่ยนค่า Kp ในการควบคุมการเคลื่อนที่ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัว

ระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์	ค่าเฉลี่ยก่อนเปลี่ยนค่า Gain (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ยหลังเปลี่ยนค่า Gain (เซนติเมตร)
ความเร็ว 0.1 m/s		
50 cm.	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.03
100 cm.	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02
150 cm.	0.20 ± 0.07	0.05 ± 0.01
ความเร็ว 0.2 m/s		
50 cm.	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01
100 cm.	0.13 ± 0.08	0.08 ± 0.03
150 cm.	0.31 ± 0.17	0.08 ± 0.05
ความเร็ว 0.3 m/s		
50 cm.	0.16 ± 0.10	0.16 ± 0.10
100 cm.	0.27 ± 0.18	0.16 ± 0.06
150 cm.	0.42 ± 0.28	0.13 ± 0.12

ตารางที่ 5.14 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับ

น้ำหนักที่เพิ่ม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
0 กก.	$1.26 \pm 0.19$	$0.13 \pm 0.04$
5 กก.	$1.61 \pm 0.29$	$0.20 \pm 0.05$
8 กก.	$2.32 \pm 0.54$	$0.17 \pm 0.05$

ตารางที่ 5.18 ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อมีการควบคุมการเคลื่อนที่และนำระบบสื่อสารไร้สายมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่

ค่า Gain ในการควบคุม	ค่าสูงสุด (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
ความเร็ว 0.1 m/s		
$K_f = 0$	$34.91 \pm 7.47$	$9.29 \pm 5.53$
$K_f = 0.2$	$1.18 \pm 0.25$	$0.04 \pm 0.03$
$K_f = 0.2, K_l = 0.05$	$0.55 \pm 0.15$	$0.03 \pm 0.01$

## บทที่ 6

### สรุปผล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและพัฒนาการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์จำลอง ให้สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกันได้อย่างแม่นยำ โดยไม่เกิดการติดขัดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการขนย้ายแผงโซลาร์เซลล์ รวมไปถึงการศึกษาผลของการสื่อสารไร้สายแบบ Mesh network ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์ต่อการเสริมความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

การทดลองเริ่มต้นจากการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่าจาก Encoder ที่ติดอยู่ที่ล้อ (Odometry) แล้วนำค่าดังกล่าวมาควบคุมการเคลื่อนที่ให้หุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวเคลื่อนที่อยู่ในแนวเดียวกัน จากการทดลองพบว่าการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยวิธีดังกล่าวมีผลของการสั่นไหว ทำให้ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้แม่นยำมากนัก จึงต้องมีการติดอุปกรณ์เพิ่มเติม โดยอุปกรณ์ที่เลือกใช้คือการติด Encoder ด้านบนตัวหุ่นยนต์ตัวหนึ่งเพื่อวัดมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว

ก่อนการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัวนั้น มีการทดสอบเกี่ยวกับการส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สาย Mesh network เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารภายในระบบหุ่นยนต์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยค่ามุมในการทดลองต่อไป โดยในการทดสอบเป็นการหาค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่เหมาะสมซึ่งทดลองส่งข้อมูลขนาด 10 bytes และขนาด 100 bytes จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการสื่อสารคือ 10 ข้อความต่อวินาที

การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ตัว เริ่มต้นด้วยการหาค่า Gain ที่เหมาะสมในการนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ ค่า Gain ที่ได้สำหรับหุ่นยนต์จำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีค่าเท่ากับ 0.2 นอกจากนี้ยังมีการทดสอบค่า Gain สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเคลื่อนที่ เช่น การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ การเพิ่มน้ำหนักที่หุ่นยนต์ต้องแบกรับ ซึ่งการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยค่ามุมที่วัดได้จากเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์ 2 ตัวสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดี โดยในการทดลองทั้งหมดพบว่าค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่มีค่าไม่เกิน 3 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ภายในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.2 ข้อย่อยที่ 6) ที่กำหนดให้ค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่มีค่าไม่เกิน 5 เซนติเมตร

และการทดลองสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้ระบบการสื่อสารไร้สาย Mesh network มาพัฒนาการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ จากการทดสอบที่ความเร็ว 0.1 m/s พบว่า การประยุกต์ใช้ระบบการสื่อสารไร้สาย Mesh network สามารถช่วยพัฒนาการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์ได้ โดยจากเดิมค่าเฉลี่ยของค่าความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่มีค่าอยู่ที่ 0.04 เซนติเมตร เมื่อนำระบบการสื่อสารไร้สาย Mesh network มาประยุกต์ใช้ค่าเฉลี่ยลดลงไปอยู่ที่ 0.03 เซนติเมตร และจากเดิมค่าสูงสุดตลอดการเคลื่อนที่อยู่ที่ 1.18 เซนติเมตร เมื่อประยุกต์ใช้ระบบการสื่อสารไร้สาย Mesh network ค่าสูงสุดลดลงไปอยู่ที่ 0.55 เซนติเมตร

สำหรับคำแนะนำจากการทดลองพบว่า การสื่อสารแบบไร้สายย่อมมีความไม่เสถียร ในการสื่อสาร บางครั้งมีการหลุดบ้างหรือค้างบ้าง ความสามารถในการส่งข้อมูลอาจจะขึ้นกับสัญญาณในแต่ละช่วง ถ้ามีการถูกรบกวน ความสามารถก็จะลดลง ในการนำไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์จริง แนะนำให้แบ่งบอร์ดควบคุมออกเป็น 2 CPU ส่วนหนึ่งสำหรับการบังคับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และอีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนของการสื่อสาร หากเกิดการขัดข้องขึ้นระบบจะได้ reboot ตัวเองได้ จะช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

## บรรณานุกรม

1. iEnergyGuru. พลังงานแสงอาทิตย์กับประเทศไทย. Available from: <https://ienergyguru.com/2015/07/solar-resource-map-of-thailand/>.
2. กระทรวงพลังงาน, ก. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานแสงอาทิตย์). 2554; Available from: <https://energy.go.th/2015/wp-content/uploads/2016/02/2-solar.pdf>.
3. สุรกิจ ทองสุก, อ.ล., การศึกษาประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (*PERFORMANCE AND ECONOMIC ANALYSIS ON ROOFTOP PV SYSTEM*). 2018. **10**(19): p. 157-169.
4. *Solar rooftop*. Available from: <http://www.ksgroup-metalsheet.com/products/rooftop/solar-rooftop/>.
5. ต้องใช้พื้นที่หลังคาเท่าไร? อย่างไรและต้องหันไปทางทิศใด? ; Available from: <https://www.solarhub.co.th/solar-solutions/residential-solar/327-how-much-space>.
6. ไทยรัฐ. รู้จัก "แผงโซลาร์เซลล์" ก่อนติดหลังคาบ้าน ควรเลือกแบบไหนดี? ; Available from: <https://www.thairath.co.th/lifestyle/life/2026053>.
7. *Solar Panel 330W / 24V Poly*. Available from: <https://www.luminousindia.com/solar-panel-330w-24v-poly.html>.
8. Bushong, S. *Anatomy Of A Rooftop Solar Mounting System*. 2014; Available from: <https://www.solarpowerworldonline.com/2014/03/anatomy-rooftop-solar-mounting-system/>.
9. Arai, T., et al., *Advances in multi-robot systems*. 2002. **18**(5): p. 655-661.
10. Tuci, E., et al., *Cooperative object transport in multi-robot systems: A review of the state-of-the-art*. 2018. **5**: p. 59.
11. Kube, C.R.J.A.r., *Task modelling in collective robotics*. 1997. **4**(1): p. 53-72.
12. Kube, C.R. and H.J.A.b. Zhang, *Collective robotics: From social insects to robots*. 1993. **2**(2): p. 189-218.
13. Rus, D., B. Donald, and J. Jennings. *Moving furniture with teams of autonomous robots*. in *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent*

- Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. 1995. IEEE.
14. Kube, C.R., E.J.R. Bonabeau, and a. systems, *Cooperative transport by ants and robots*. 2000. **30**(1-2): p. 85-101.
  15. Sasaki, J., et al. *Cooperating grasping of a large object by multiple mobile robots*. in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1995. IEEE.
  16. Wang, Z. and M. Schwager. *Kinematic multi-robot manipulation with no communication using force feedback*. in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016. IEEE.
  17. Habibi, G., et al. *Distributed centroid estimation and motion controllers for collective transport by multi-robot systems*. in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015. IEEE.
  18. Habibi, G., et al., *Distributed path planning for collective transport using homogeneous multi-robot systems*, in *Distributed Autonomous Robotic Systems*. 2016, Springer. p. 151-164.
  19. Gerkey, B.P. and M.J. Mataric. *Pusher-watcher: An approach to fault-tolerant tightly-coupled robot coordination*. in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*. 2002. IEEE.
  20. Fink, J., M.A. Hsieh, and V. Kumar. *Multi-robot manipulation via caging in environments with obstacles*. in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008. IEEE.
  21. Lapatrada, ไทยพร้อมหรือยัง ? เปลี่ยนหลังคาบ้านให้ทำเงินด้วย Solar Rooftop. 2019.
  22. Premvuti, S. and S. Yuta. *Consideration on the cooperation of multiple autonomous mobile robots*. in *EEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications*. 1990. IEEE.
  23. Kosuge, K. and T. Oosumi. *Decentralized control of multiple robots handling an object*. in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'96*. 1996. IEEE.
  24. Takeda, H., et al., *Collision avoidance algorithm for two tracked mobile robots transporting a single object in coordination based on function allocation*

- concept, in *Distributed Autonomous Robotic Systems 5*. 2002, Springer. p. 155-164.
25. Kosuge, K., et al. *Transportation of a single object by two decentralized-controlled nonholonomic mobile robots*. in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*. 1998. IEEE.
  26. Farivarnejad, H., S. Wilson, and S. Berman. *Decentralized sliding mode control for autonomous collective transport by multi-robot systems*. in *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*. 2016. IEEE.
  27. Stilwell, D.J. and J.S. Bay. *Toward the development of a material transport system using swarms of ant-like robots*. in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1993. IEEE.
  28. Bay, J.S.J.I.R. and A. Magazine, *Design of the "army-ant" cooperative lifting robot*. 1995. **2**(1): p. 36-43.
  29. Johnson, P.J. and J.S.J.A.r. Bay, *Distributed control of simulated autonomous mobile robot collectives in payload transportation*. 1995. **2**(1): p. 43-63.
  30. Machado, T., et al. *Multi-constrained joint transportation tasks by teams of autonomous mobile robots using a dynamical systems approach*. in *2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*. 2016. IEEE.
  31. Alonso-Mora, J., S. Baker, and D.J.T.I.J.o.R.R. Rus, *Multi-robot formation control and object transport in dynamic environments via constrained optimization*. 2017. **36**(9): p. 1000-1021.
  32. Mammoet. *All you need to know about the Mammoet Self-Propelled Modular Transporter (SPMT)*. 2014 [cited 2021 29/4]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=wL3YvOe0ZgE>.
  33. Teo, C., et al., *Dynamic modeling and adaptive control of a H-type gantry stage*. 2007. **17**(7): p. 361-367.
  34. *Gantry Motion Controller - The Elmo Way*. [cited 2020 15/1]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=Kjl0iyUCeJ8>.
  35. *ESP-MESH*. [cited 2020 10/7]; Available from: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/mesh.html>.



36. D.S., J. *ESP8266/ESP32 & Mesh Network*. 2018 [cited 2021; Available from: <https://meetjoeblog.com/2018/03/25/esp8266-esp32-mesh-network-ep1/>.
37. Akyildiz, I.F. and X.J.I.C.m. Wang, *A survey on wireless mesh networks*. 2005. **43(9)**: p. S23-S30.
38. Gimme. *Mesh WiFi คืออะไร / ขยายสัญญาณไวไฟให้ครอบคลุมทั้งบ้าน แก้ปัญหาแพ็กเกจแรง แต่เน็ตไม่วิ่ง*. 2019; Available from: <https://droidsans.com/whatis-mesh-wifi/>.
39. Arjadi, R.H., et al. *Performance Evaluation of ESP8266 Mesh Networks*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. IOP Publishing.
40. *Belt Faulhaber Encoder Hollow Cup Gear Motor With Encoder 2342l012 2342L012CR(6.3)*. Available from: <https://th.aliexpress.com/i/32812680138.html>.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบของแต่ละการทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY







ตารางที่ ก.6 แสดงจำนวนข้อมูลดิบที่ตัวรับข้อมูลสามารถรับได้ ด้วยการส่งข้อมูลผ่านตัวกลาง โดยข้อมูลมีขนาด 100 bytes

อัตรา การส่ง ข้อมูล (msg/s)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1000	1000	963	714	764	997	574	1000	759	1000	784
200	995	996	809	1000	994	788	649	1000	786	994
100	1000	939	704	596	734	1000	965	735	990	992
50	762	917	859	855	956	924	763	999	846	816
20	943	962	929	960	859	888	958	920	893	901
10	993	992	988	977	990	994	992	995	994	972
5	994	998	997	992	988	994	998	995	992	990
2	1000	999	939	860	990	995	995	992	996	995

ก.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการวัดค่ามุมที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

ตารางที่ ก.7 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ  $K_p = 0$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	32.06	7.56	34.91	6.44	7.16	16.72	14.27	20.44	11.96	6.80
ค่าเฉลี่ย	20.84	2.78	23.05	2.44	1.94	9.17	10.56	12.19	8.37	1.54

ตารางที่ ก.8 แสดงข้อมูลดิประยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ  $K_p = 0.05$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	1.26	0.39	2.24	0.82	0.94	0.82	1.77	1.26	0.86	0.79
ค่าเฉลี่ย	0.55	0.17	0.36	0.30	0.19	0.32	0.41	0.31	0.23	0.30

ตารางที่ ก.9 แสดงข้อมูลดิประยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ  $K_p = 0.08$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	1.18	0.39	0.63	0.39	1.18	0.51	0.63	1.18	1.18	1.14
ค่าเฉลี่ย	0.37	0.08	0.16	0.10	0.22	0.12	0.15	0.26	0.18	0.11

ตารางที่ ก.10 แสดงข้อมูลดิประยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ  $K_p = 0.1$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.55	0.31	0.90	0.51	0.98	0.16	0.51	2.75	0.24	1.06
ค่าเฉลี่ย	0.11	0.06	0.08	0.13	0.11	0.05	0.10	0.14	0.06	0.09

ตารางที่ ก.11 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ  $K_p = 0.2$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.12	0.51	0.08	0.08	0.47	1.18	0.12	0.35	0.04	0.16
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.13	0.02	0.02	0.05	0.04	0.02	0.07	0.02	0.02

ตารางที่ ก.12 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อ  $K_p = 0.4$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.27	0.08	0.08	0.16	0.47	0.04	0.24	0.12	0.27	0.71
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.01	0.01	0.01	0.09	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06

ตารางที่ ก.13 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อ  $K_p = 0$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	9.33	52.50	35.08	6.00	3.58	13.76	4.61	25.53	76.91	42.23
ค่าเฉลี่ย	6.49	39.01	25.34	3.68	1.69	10.93	2.49	20.35	49.19	28.78



ตารางที่ ก.14 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อ  $K_p = 0.08$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	2.36	0.79	2.55	1.49	1.41	0.94	2.52	2.52	0.31	1.45
ค่าเฉลี่ย	0.38	0.18	0.57	0.33	0.26	0.18	0.45	0.83	0.22	0.21

ตารางที่ ก.15 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อ  $K_p = 0.2$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.08	0.55	0.67	0.86	0.08	0.86	0.90	0.43	0.75	0.75
ค่าเฉลี่ย	0.04	0.03	0.04	0.06	0.04	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04

ตารางที่ ก.16 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อ  $K_p = 0$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	3.26	6.88	80.31	6.56	27.39	16.03	50.71	5.76	2.91	27.18
ค่าเฉลี่ย	1.56	4.71	57.54	4.31	20.74	13.62	38.13	2.94	1.13	20.92

ตารางที่ ก.17 แสดงข้อมูลดิเบรยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อ  $K_p = 0.08$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	3.74	2.52	2.44	3.26	2.52	3.78	3.62	3.38	3.78	1.93
ค่าเฉลี่ย	1.06	0.39	0.26	0.38	0.43	1.10	2.14	0.39	1.13	0.24

ตารางที่ ก.18 แสดงข้อมูลดิเบรยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อ  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	1.96	2.08	1.69	1.96	1.30	0.08	1.61	0.16	0.98	1.02
ค่าเฉลี่ย	0.12	0.49	0.10	0.31	0.17	0.04	0.15	0.03	0.07	0.07

### ก.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์

ตารางที่ ก. 19 แสดงข้อมูลดิเบรยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 ซม. โดยใช้  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.16	0.79	0.79	0.16	0.24	0.94	0.24	0.16	0.24	0.16
ค่าเฉลี่ย	0.04	0.08	0.16	0.04	0.03	0.07	0.03	0.05	0.03	0.05

ตารางที่ ก.20 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 150 ซม. โดยใช้  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.71	1.41	1.41	0.24	0.59	0.59	0.94	0.94	1.18	1.18
ค่าเฉลี่ย	0.29	0.18	0.37	0.08	0.12	0.10	0.11	0.32	0.24	0.21

ตารางที่ ก.21 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 ซม. โดยใช้  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	1.89	1.26	1.26	1.41	0.47	1.02	0.16	0.47	1.02	1.10
ค่าเฉลี่ย	0.21	0.10	0.10	0.44	0.07	0.09	0.06	0.07	0.09	0.07

ตารางที่ ก.22 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 150 ซม. โดยใช้  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	2.47	1.89	1.06	1.06	1.06	1.77	2.00	1.53	1.89	1.89
ค่าเฉลี่ย	0.60	0.55	0.13	0.12	0.10	0.16	0.69	0.15	0.47	0.18

ตารางที่ ก.23 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 ซม. โดยใช้  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	2.20	2.75	0.94	1.89	0.24	2.04	2.12	1.26	2.20	1.73
ค่าเฉลี่ย	0.81	0.22	0.08	0.14	0.09	0.20	0.26	0.11	0.69	0.13

ตารางที่ ก.24 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 150 ซม. โดยใช้  $K_p = 0.2$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	2.20	2.75	0.94	1.89	0.24	2.04	2.12	1.26	2.20	1.73
ค่าเฉลี่ย	0.81	0.22	0.08	0.14	0.09	0.20	0.26	0.11	0.69	0.13

ตารางที่ ก.25 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 ซม. โดยเปลี่ยนค่า Gain ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.24	1.26	0.16	0.55	0.08	0.47	0.24	0.24	0.24	0.47
ค่าเฉลี่ย	0.04	0.08	0.04	0.07	0.02	0.06	0.03	0.03	0.05	0.12

ตารางที่ ก.26 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 150 ซม. โดยเปลี่ยนค่า Gain ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.47	0.35	0.47	0.24	0.24	0.35	0.24	0.24	0.24	0.35
ค่าเฉลี่ย	0.06	0.03	0.06	0.02	0.03	0.09	0.06	0.06	0.04	0.07

ตารางที่ ก.27 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 ซม. โดยเปลี่ยนค่า Gain ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.47	1.18	0.63	0.55	0.55	1.18	0.47	0.47	0.47	0.55
ค่าเฉลี่ย	0.06	0.07	0.19	0.06	0.08	0.07	0.08	0.06	0.06	0.10

ตารางที่ ก.28 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.2 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 150 ซม. โดยเปลี่ยนค่า Gain ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.94	0.59	0.94	1.06	0.71	0.24	0.94	1.06	0.94	1.06
ค่าเฉลี่ย	0.06	0.06	0.27	0.06	0.06	0.04	0.06	0.05	0.07	0.05

ตารางที่ ก.29 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 100 ซม. โดยเปลี่ยนค่า Gain ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	1.26	0.71	0.39	1.18	1.18	1.18	0.39	1.18	1.18	1.18
ค่าเฉลี่ย	0.35	0.09	0.08	0.10	0.12	0.19	0.08	0.20	0.19	0.20

ตารางที่ ก.30 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.3 m/s เมื่อระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เท่ากับ 150 ซม. โดยเปลี่ยนค่า Gain ตามระยะห่างดังกล่าว

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	2.00	1.53	1.06	0.35	1.18	1.06	1.53	1.30	1.18	0.35
ค่าเฉลี่ย	0.11	0.61	0.07	0.05	0.09	0.07	0.09	0.13	0.09	0.05

#### ก.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนขนาดน้ำหนักของวัตถุที่นำมาใช้ขนส่ง

ตารางที่ ก.31 แสดงข้อมูลดิบของผลการทดสอบระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามกันโดยเพิ่มขนาด load ที่หุ่นยนต์แบกรับในการเคลื่อนที่อีก 5 กิโลกรัมและทดสอบที่ความเร็ว 0.1 m/s

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.98	0.67	0.43	1.61	1.02	0.27	1.06	0.71	0.39	0.43
ค่าเฉลี่ย	0.22	0.20	0.13	0.31	0.28	0.08	0.14	0.27	0.13	0.19

ตารางที่ ก.32 แสดงข้อมูลดิบของผลการทดสอบระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามกันโดยเพิ่มขนาด load ที่หุ่นยนต์แบกรับในการเคลื่อนที่อีก 8 กิโลกรัมและทดสอบที่ความเร็ว 0.1 m/s

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	1.53	0.55	0.71	0.51	0.39	0.79	0.31	2.12	2.32	0.27
ค่าเฉลี่ย	0.17	0.19	0.12	0.10	0.13	0.28	0.13	0.26	0.26	0.07

#### ก.5 การประยุกต์การสื่อสารไร้สายเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบหุ่นยนต์

ตารางที่ ก.33 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อเปลี่ยนชนิดของข้อมูลในการสื่อสารให้อยู่ในรูปแบบ JSON

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.51	0.35	1.26	0.43	0.55	0.51	0.47	0.39	0.31	0.55
ค่าเฉลี่ย	0.14	0.10	0.12	0.05	0.17	0.14	0.09	0.16	0.07	0.27

ตารางที่ ก.34 แสดงข้อมูลดิบระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ผู้ตามด้วย  $K_p = 0.2$  และหุ่นยนต์นำ  $K_p = 0.05$

ระยะ ความต่าง ของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.24	0.55	0.47	0.04	0.47	0.08	0.08	0.12	0.12	0.47
ค่าเฉลี่ย	0.02	0.07	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05

ตารางที่ ก. 35 แสดงข้อมูลดิระยะความต่างของระยะทางที่หุ่นยนต์แต่ละตัวเคลื่อนที่ไปที่ความเร็ว 0.1 m/s เมื่อควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ผู้ตามด้วย  $K_p = 0.2$  และหุ่นยนต์นำ  $K_p = 0.08$

ระยะความต่างของหุ่นยนต์ (ซม.)	ทดสอบครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าสูงสุด	0.43	0.47	0.43	0.43	0.12	0.12	0.47	0.67	0.75	0.35
ค่าเฉลี่ย	0.05	0.04	0.08	0.05	0.03	0.02	0.03	0.06	0.11	0.05





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิราภา ธีรศรัณย์
วัน เดือน ปี เกิด	17 ตุลาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY