

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยล้อแม่เหล็ก

นายตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WALL CLIMBING ROBOT  
WITH MAGNETIC WHEELS

MR. Trinnachoke Eiammanussakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2013  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

สาขาวิชา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ใต้น้ำด้วยล้อแม่เหล็ก

นายตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล

วิศวกรรมเครื่องกล

ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.กฤษณันท์ มะลิทอง)

ตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล : การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยล้อแม่เหล็ก. (DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WALL CLIMBING ROBOT WITH MAGNETIC WHEELS)  
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 78 หน้า.

หุ่นยนต์ไต่ผนังถูกใช้ในการตรวจสอบสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ผนังของถังเหล็กขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมแทนการทำงานด้วยมนุษย์เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลา อีกทั้งมีความปลอดภัยและความแม่นยำของตำแหน่งที่ตรวจสอบ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา ออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถไต่ผนังโลหะโดยใช้ล้อแม่เหล็ก พร้อมระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางและเวลาที่กำหนด ในขั้นตอนการออกแบบ ได้วิเคราะห์แรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อที่จำเป็นสำหรับหุ่นยนต์ในการยึดเกาะและการเคลื่อนที่บนผนังเหล็ก จากนั้นจึงออกแบบล้อแม่เหล็กด้วยแนวคิดต่างๆ และเลือกอุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนล้อให้สอดคล้องกับการใช้งาน จึงสามารถกำหนดรูปแบบและขนาดของล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างและใช้กับหุ่นยนต์ไต่ผนัง งานวิจัยนี้ยังศึกษาสมการจลศาสตร์ของหุ่นยนต์เพื่อออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุและการติดตามเส้นทาง และพัฒนาโปรแกรมการสั่งการเคลื่อนที่ให้กับหุ่นยนต์โดยใช้โปรแกรม LabVIEW 2011 จากการทดสอบพบว่า หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังเหล็กแบนที่มีความหนา 4 มิลลิเมตรในระนาบเอียงต่างๆ ได้ โดยสามารถปรับเปลี่ยนอัตราเร็วของการเคลื่อนที่และการหมุนได้จากการสั่งการด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังถูกทดสอบการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางบนผนังเหล็กที่มีเส้นทางตรงในแนวตั้งและแนวเอียง 25 องศา พบว่า หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางดังกล่าวได้โดยมีค่าผิดพลาดของการกระจัดตามเส้นทางอ้างอิงน้อยมาก อีกทั้งยังมีการกระจัดออกจากเส้นทางอ้างอิงประมาณ 1 มิลลิเมตร และมีค่าผิดพลาดของทิศทางไม่เกิน 0.02 เรเดียน ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตของการใช้งานจริง

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2556.....

# # 5470206221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : WALL CLIMBING ROBOT / MAGNETIC WHEEL / TRAJECTORY TRACKING CONTROL

TRINNACHOKE EIAMMANUSSAKUL : DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WALL CLIMBING ROBOT WITH MAGNETIC WHEELS. ADVISOR : PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 78 pp.

A wall climbing robot using magnetic wheels is used for wall inspections of large steel tanks in industrial plants in order to reduce operating cost and time whereas safety and accuracy of inspected areas are guaranteed. The research objectives were to develop a steel wall climbing robot using magnetic wheels and to control the motion of the robot along specified trajectory. In design stage, pulling forces of magnetic wheels were analyzed so that they were strong enough to hold the robot on steel walls while it was moving. Then, magnetic wheels were designed and manufactured based on the analysis data and were used in our wall climbing robot. Kinematics of motion of the robot was also obtained and used in the motion control of the robot. The motion control was done via radio frequency transmitter cooperated with the servo trajectory tracking control. The control software was developed based on LabVIEW 2011. According to the experiments, the robot could climb and move with specified motions on a 4-millimeter-thick flat steel wall with varied inclination. Furthermore, the tracking performance along vertical and 25-degree inclined straight paths on a steel surface was investigated. And the result showed that the maximum tracking errors were 1 millimeter in position and 0.02 radian in orientation which were within the limit of the applications.

Department : .....Mechanical Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study : Mechanical Engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year : 2013.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ที่ชี้แนะการวางแผนการเรียน การดำเนินวิทยานิพนธ์ การพัฒนาทักษะทางวิศวกรรม และการเตรียมความพร้อมสู่การทำงาน หลังจากจบการศึกษา รวมทั้งการสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่การทำงานด้วย

การผลิตหุ่นยนต์ใต้น้ำยังได้รับความช่วยเหลือจากห้องปฏิบัติการออกแบบทางชีวกลศาสตร์ และการผลิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้านการผลิตฐานของหุ่นยนต์ด้วยเครื่องตัดวอเตอร์เจ็ต (Waterjet cutting machine) สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอื่นของหุ่นยนต์ นายสุภัท ชานนท์เมืองได้เป็นผู้ฝึกสอนและควบคุมการผลิตด้วยเครื่องกลึงและเครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC machine) ภายในศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการศึกษาในหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต ผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาต่อปริญญาโทที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาฯ เป็นระยะเวลา 2 ปี และได้รับการสนับสนุนการตีพิมพ์บทความจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขา ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวและนิสิตในศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 การยึดเกาะผนังของหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยแม่เหล็ก.....	3
2.1 สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ.....	3
2.2 รูปแบบของหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยแม่เหล็ก.....	4
2.2.1 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนลำตัว.....	4
2.2.2 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ล้อ.....	5
2.3 ล้อแม่เหล็ก.....	7
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์ไต่ผนัง.....	9
3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์ไต่ผนัง.....	9
3.2 การกำหนดลักษณะและขนาดเบื้องต้นของล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์.....	9
3.3 การวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระ.....	11
3.4 การพิจารณาแนวคิดการออกแบบล้อแม่เหล็ก.....	14
3.4.1 คุณลักษณะแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็ก.....	15
3.4.2 แนวคิดการออกแบบล้อแม่เหล็กด้านหน้าของหุ่นยนต์.....	16
3.4.3 แนวคิดการออกแบบล้อแม่เหล็กด้านหลังของหุ่นยนต์.....	18
3.5 การออกแบบและเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อ.....	19
3.5.1 การออกแบบและเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า.....	20
3.5.2 การออกแบบและเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง.....	23
3.6 การกำหนดขนาดล้อแม่เหล็ก.....	25
3.7 การสร้างหุ่นยนต์.....	26
บทที่ 4 สมการจลศาสตร์และการควบคุมการเคลื่อนที่.....	28
4.1 การระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์.....	28

	หน้า
4.2 เจ็อนไซบั้งคับน็อนโฮโลโนมิกและสมการจลศาสตร์.....	29
4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ.....	32
4.4 การควบคุมการติดตามเส้นทางของหุ่นยนต์.....	33
4.4.1 การออกแบบตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	34
4.4.2 การควบคุมมอเตอร์.....	37
4.4.3 การระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ในการควบคุม การติดตามเส้นทาง.....	37
4.4.4 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	38
บทที่ 5 โปรแกรมการสั่งการทำงานของหุ่นยนต์.....	40
5.1 การพัฒนาโปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์ด้วย LabVIEW.....	40
5.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับโปรแกรม.....	41
5.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	42
5.3.1 โปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ.....	42
5.3.2 โปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง.....	43
5.3.3 โปรแกรมการรับและประมวลผลภาพ.....	43
5.3.4 โปรแกรมการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของล้อแม่เหล็กด้านหลัง.....	46
บทที่ 6 การทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์.....	50
6.1 การทดสอบการยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กกระนาบเอียง... ..	50
6.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิงบนผนังเหล็กแนวตั้ง.....	53
6.2.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	55
6.2.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เมื่อใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	60
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต.....	65
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต.....	66
7.2.1 การใช้กล้องเพื่อระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง.....	66
7.2.2 การพัฒนาเป็นการติดต่อแบบไร้สายกับหุ่นยนต์.....	67
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	
น้ำหนักและแรงดึงดูของล้อยแม่เหล็กที่สร้างจากจำนวนและขนาดต่างๆ ของแผ่นเหล็ก เมื่อใช้แม่เหล็กรูปวงแหวนจำนวน 1 ชั้น.....	15
ตารางที่ 3.2	
น้ำหนักและแรงดึงดูของล้อยแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ.....	18

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การโคจรและหมุนของอิเล็กตรอนภายในอะตอมของวัสดุ.....	3
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ไต่ผนัง Scorpion B-scan ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ด้านใต้ลำตัว.....	5
รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์ MINOAS ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กจำนวนมากที่ขบล้อ.....	5
รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์ MARC ที่ติดตั้งแม่เหล็กที่ขั้วล้อตีนตะขาบ.....	6
รูปที่ 2.5 ความเสียหายของล้อตีนตะขาบเมื่อหุ่นยนต์เลี้ยว.....	6
รูปที่ 2.6 ล้อแม่เหล็กของ Magnet Sales & Service Ltd.....	7
รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ TriPod ที่ใช้ล้อแม่เหล็ก.....	7
รูปที่ 2.8 วงจรแม่เหล็กของล้อแม่เหล็ก.....	8
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์.....	10
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของหุ่นยนต์.....	10
รูปที่ 3.3 แผนภาพวัตถุอิสระของหุ่นยนต์ขณะยึดเกาะกับผนังเหล็กกระนาบเอียง.....	12
รูปที่ 3.4 การทดสอบแรงดึงดูระหว่างล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็ก.....	14
รูปที่ 3.5 การประกอบล้อแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนและแผ่นเหล็ก.....	15
รูปที่ 3.6 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กตัน	17
รูปที่ 3.7 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้น.....	17
รูปที่ 3.8 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปทรงกระบอกจำนวนหลายชิ้น และแผ่นเหล็กตัน.....	17
รูปที่ 3.9 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนสองชิ้น.....	18
รูปที่ 3.10 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนหนึ่งชิ้นและตลับลูกปืน..	19
รูปที่ 3.11 แผนภาพจำลองอิสระของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ทิศทางขึ้นบนผนังในแนวตั้ง.....	21
รูปที่ 3.12 ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า.....	23
รูปที่ 3.13 ล้อด้านหลังของหุ่นยนต์.....	24
รูปที่ 3.14 ช่วงการทำงานของมอเตอร์ Maxon รุ่น RE35-118783.....	25
รูปที่ 3.15 ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง.....	25
รูปที่ 3.16 ล้อแม่เหล็กที่ถูกพิมพ์ลายที่ขบล้อ.....	26
รูปที่ 3.17 หุ่นยนต์ไต่ผนังที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง.....	27
รูปที่ 3.18 หุ่นยนต์ไต่ผนังที่สร้างขึ้นตามการออกแบบ.....	27
รูปที่ 4.1 แกนอ้างอิงสำหรับระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่บนระนาบ.....	28
รูปที่ 4.2 ความแตกต่างของตำแหน่งของหุ่นยนต์.....	30
รูปที่ 4.3 การเลี้ยวโค้งของหุ่นยนต์รอบจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะ.....	31
รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ.....	33
รูปที่ 4.5 เส้นทางอ้างอิงสำหรับการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง.....	34
รูปที่ 4.6 ระบบการควบคุมการติดตามเส้นทางอ้างอิง.....	39

	หน้า
รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับโปรแกรม.....	42
รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	44
รูปที่ 5.3 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง.....	45
รูปที่ 5.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรมรับและประมวลผลภาพ.....	47
รูปที่ 5.5 การเลือกขอบเขตที่สนใจ.....	48
รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์โดยเปรียบเทียบกับทิศทางอ้างอิง... 48	48
รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของล้อแม่เหล็กด้านหลัง	49
รูปที่ 6.1 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 0 องศา.....	51
รูปที่ 6.2 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 45 องศา.....	51
รูปที่ 6.3 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 90 องศา.....	51
รูปที่ 6.4 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 135 องศา.....	52
รูปที่ 6.5 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 180 องศา.....	52
รูปที่ 6.6 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 225 องศา.....	52
รูปที่ 6.7 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 270 องศา.....	53
รูปที่ 6.8 การยัดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 315 องศา.....	53
รูปที่ 6.9 การจัดชุดการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังแนวตั้ง.....	54
รูปที่ 6.10 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวตั้งโดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	56
รูปที่ 6.11 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวตั้ง โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	57
รูปที่ 6.12 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	58
รูปที่ 6.13 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	59
รูปที่ 6.14 ช่วงท้ายของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามเส้นทางเอียง 25 องศา.....	60
รูปที่ 6.15 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวตั้ง โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	61
รูปที่ 6.16 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวตั้งโดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	62
รูปที่ 6.17 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	63
รูปที่ 6.18 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง.....	64
รูปที่ ๗.1 อุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กด้านหน้า.....	74
รูปที่ ๗.2 อุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กด้านหลัง.....	74

	หน้า
รูปที่ ผ.3 อุปกรณ์ NI-cRIO9074.....	75
รูปที่ ผ.4 มอดูลที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ NI-cRIO9074.....	75
รูปที่ ผ.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Coppley รุ่น 4122P.....	75
รูปที่ ผ.6 อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณวิทยุ VEX ความถี่ 75.970 เมกะเฮิร์ตซ์.....	76
รูปที่ ผ.7 กล้องเว็บแคม Logitech รุ่น HD Pro Webcam C920.....	77
รูปที่ ผ.8 อุปกรณ์ตรวจจับแสงขนาดเล็ก OMRON.....	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถึงเหล็กขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของผนังเหล็กและรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กที่ใช้ประกอบกันอย่างสม่ำเสมอ เพื่อที่จะสามารถดำเนินการบำรุงรักษาบริเวณที่เสียหายก่อนเกิดรอยร้าวซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์และทรัพย์สิน [1]

วิธีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของถังมักเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing) เช่น การใช้อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบโดยมนุษย์ด้วยการสร้างนั่งร้านเพื่อนำอุปกรณ์ตรวจวัดไปยังบริเวณต่างๆ ของถังมักใช้ระยะเวลานาน, มีค่าใช้จ่ายสูงและอาจเป็นอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ [1], [3], [4] หุ่นยนต์ไต่ผนังจึงถูกนำมาใช้เพื่อติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิกและเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ต้องการตรวจสอบเพื่อสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวและยังระบุตำแหน่งที่ตรวจสอบได้แม่นยำกว่ามนุษย์ [5]

หุ่นยนต์ไต่ผนังโดยทั่วไปมีรูปแบบการยึดเกาะกับผนังและโครงสร้างที่ใช้ในการเคลื่อนที่อย่างหลากหลาย สำหรับการตรวจสอบถังเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรม หุ่นยนต์ไต่ผนังที่ยึดเกาะด้วยแม่เหล็กถาวรมีข้อดีว่าการยึดเกาะประเภทอื่นเช่น การใช้ถ้วยสุญญากาศ เพราะสามารถสร้างแรงยึดเกาะกับผนังได้ค่อนข้างคงที่และไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเพิ่มเติม [3], [6] นอกจากนี้การขับเคลื่อนหุ่นยนต์ด้วยล้อมีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อนและสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่ด้วยขา [7] นอกจากนี้ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ยังสามารถประมาณได้จากการหมุนของล้ออีกด้วย ดังนั้นหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยแม่เหล็กและขับเคลื่อนด้วยล้อจึงเป็นรูปแบบที่ถูกพัฒนาอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของหุ่นยนต์ไต่ผนังคือ การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนผนังเหล็กด้วยอัตราเร็วและทิศทางที่ต้องการเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถสำรวจบริเวณต่างๆ ของถังเหล็กรวมทั้งการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้โดยมีค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถนำอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิกไปตรวจสอบผนังเหล็กบนเส้นทางที่ต้องการ โดยเฉพาะการตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กของถัง ซึ่งมักมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นระบบควบคุมการเคลื่อนที่เป็นเส้นทางตรงจึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับการทำงานของหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการสร้างต้นแบบหุ่นยนต์ไต่ผนังเพื่อใช้ในการตรวจสอบถังเหล็กขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยการออกแบบล้อแม่เหล็กซึ่งใช้ในการสร้างแรงยึดเกาะกับผนังให้มีสอดคล้องกับส่วนขับเคลื่อนล้อและโครงสร้างของหุ่นยนต์ จากนั้นจึงศึกษาสมการจลศาสตร์เพื่อออกแบบระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ รวมทั้งการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการสั่งการทำงานให้กับหุ่นยนต์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังโดยใช้ล้อแม่เหล็กสร้างแรงยึดเกาะกับผนัง และสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางและเวลาที่กำหนดได้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ออกแบบรูปแบบและขนาดล้อแม่เหล็กที่เหมาะสมกับการใช้งานของหุ่นยนต์ไต่ผนัง
- 2) สร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังซึ่งติดตั้งล้อแม่เหล็กตามรูปแบบที่ออกแบบไว้
- 3) ออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนัง
- 4) ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ไต่ผนังให้ทำงานได้ตามวัตถุประสงค์

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์ไต่ผนัง
- 2) ออกแบบ สร้างและทดลองล้อแม่เหล็ก เพื่อหารูปแบบและขนาดที่เหมาะสม
- 3) ออกแบบและสร้างโครงสร้างการขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ไต่ผนัง
- 4) ศึกษาาระบบจลศาสตร์ของหุ่นยนต์และออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่
- 5) พัฒนาโปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์ไต่ผนังด้วยตัวควบคุมการเคลื่อนที่
- 6) ทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนังและปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น
- 7) สรุปผลและเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) หุ่นยนต์ที่ติดตั้งล้อแม่เหล็กสามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กในแนวตั้งได้
- 2) ตัวควบคุมสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางและเวลาที่กำหนดได้

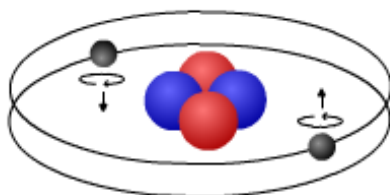
## บทที่ 2

### การยึดเกาะผนังของหุ่นยนต์ใต้น้ำด้วยแม่เหล็ก

#### 2.1 สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ (Magnetic properties of materials)

เมื่อวัสดุอยู่ในสนามแม่เหล็กจะมีสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแตกต่างกันตามลักษณะการโคจรและหมุนของอิเล็กตรอนภายในอะตอมดังรูปที่ 2.1 ซึ่งส่งผลต่อการตอบสนองกับสนามแม่เหล็ก โดยแบ่งได้เป็น 3 ประเภท [8] ได้แก่

- วัสดุไดอะแมกเนติก (Diamagnetic material) เช่น ทอง เงิน ทองแดง เป็นต้น ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็กและมีแรงผลักออกจากสนามแม่เหล็กอย่างอ่อน วัสดุประเภทนี้มีอิเล็กตรอนหมุนและโคจรเป็นคู่ในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหักล้างกัน วัสดุนี้มีความสามารถในการให้สนามแม่เหล็กซึมผ่านสัมพัทธ์เมื่อเปรียบเทียบกับสุญญากาศ (Relative permeability) มีค่าน้อยกว่า 1
- วัสดุพาราแมกเนติก (Paramagnetic material) เช่น แพลตินัม อะลูมิเนียม ออกซิเจน เป็นต้น จะดึงดูดด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอกเพียงเล็กน้อย เนื่องจากภายในอะตอมมีอิเล็กตรอนบางตัวที่ไม่ถูกจับคู่จึงทำให้เกิดโมเมนต์และสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก อิเล็กตรอนจะจัดเรียงใหม่เอง ทำให้วัสดุประเภทนี้ไม่สามารถรักษาสภาพการเป็นแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก วัสดุนี้มีความสามารถในการให้สนามแม่เหล็กซึมผ่านสัมพัทธ์มีค่ามากกว่า 1 เล็กน้อย
- วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic material) ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล และโคบอลต์ จะดึงดูดกับสนามแม่เหล็กจากภายนอกอย่างรุนแรง เนื่องจากโมเมนต์จากอิเล็กตรอนที่ไม่ถูกจับคู่มีค่าสูง และไม่จัดเรียงตัวใหม่เมื่อนำสนามแม่เหล็กจากภายนอกออกไป ทำให้วัสดุยังคงรักษาสภาพการเป็นแม่เหล็กได้ ความสามารถในการให้สนามแม่เหล็กซึมผ่านสัมพัทธ์ของวัสดุประเภทนี้มากกว่า 1 วัสดุประเภทนี้จึงถูกนำมาเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กเพื่อผลิตแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.1 การโคจรและหมุนของอิเล็กตรอนภายในอะตอมของวัสดุ [9]

แม่เหล็กถาวรที่มีสนามแม่เหล็กสูงสมัยใหม่ผลิตด้วยสารประกอบของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชนิดแรร์เอิร์ท (Rare-earth material) ได้แก่  $Nd_{12}Fe_{14}B$  (Neodymium magnet) และ  $Sm_1Co_5$  (Samarium Cobalt magnet) แม่เหล็กชนิดนี้มีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง (Residual flux density) สูงกว่าแม่เหล็กถาวรที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกหรือวัสดุเฟอร์ไรท์ เช่น  $BaFe_2O_3$  (Ferrite magnet) และยังถูกลบสภาพแม่เหล็ก (Demagnetize) ยากเนื่องจากมีค่าแรงบังคับจากภายใน (Intrinsic coercive force) สูง [10] โดยอาจมีแรงดึงดูดแม่เหล็กลดลงเพียงหนึ่งเปอร์เซ็นต์เมื่อใช้งานนาน 10 ปีเมื่อใช้งานภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมและไม่ได้รับความเสียหายทางกายภาพ [11] อย่างไรก็ตามแม่เหล็กถาวรวัสดุแรร์เอิร์ทมักมีราคาสูงและเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงมาก

## 2.2 รูปแบบของหุ่นยนต์ใต้น้ำด้วยแม่เหล็ก

เนื่องจากการตรวจสอบผนังเหล็กต้องการความต่อเนื่องของการเลื่อนอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นหุ่นยนต์ใต้น้ำจึงมักมีการเคลื่อนที่ด้วยล้อ และใช้แม่เหล็กถาวรวัสดุแรร์เอิร์ทสร้างแรงดึงดูดกับผนังเหล็ก เนื่องจากวิธีการยึดเกาะนี้ไม่ใช้พลังงานจากภายนอกเพิ่มเติม มีแรงดึงดูดสูงและค่อนข้างคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการยึดเกาะรูปแบบอื่น โดยที่ผนังจะต้องสร้างจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเพื่อให้แม่เหล็กสามารถสร้างแรงดึงดูดกับผนังได้ หุ่นยนต์จึงต้องใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างวัสดุเหล็ก เช่น ถังเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรม

หุ่นยนต์ใต้น้ำมีการติดตั้งแม่เหล็กถาวรสองรูปแบบได้แก่ การติดตั้งบนลำตัวและการติดตั้งที่ล้อ ซึ่งมีโครงสร้างและลักษณะการขับเคลื่อนหุ่นยนต์แตกต่างกัน

### 2.2.1 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนลำตัว

แม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งไว้ที่ด้านใต้ของลำตัวหุ่นยนต์โดยให้แม่เหล็กมีระยะห่างจากผนังเหล็กเล็กน้อย เพื่อไม่ให้ช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังเหล็กมากจนทำให้แรงดึงดูดเหล็กน้อยเกินไป ดังนั้นบางงานวิจัย [12] จึงพัฒนาหลักการปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและผนังเหล็กเพื่อปรับขนาดแรงดึงดูดแม่เหล็กให้เหมาะสมกับการตรวจสอบพื้นผิวไม่ราบเรียบ การติดตั้งแม่เหล็กลักษณะนี้มีข้อดีคือ หุ่นยนต์ยังคงสามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับความสะอาดของผนังเหล็ก แต่ก็มีข้อเสียคือ แรงดึงดูดแม่เหล็กแรงสูงอาจทำให้โครงสร้างของหุ่นยนต์เสียรูปได้ ดังนั้นโครงสร้างของหุ่นยนต์จะต้องถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ

หุ่นยนต์ใต้น้ำที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์เช่น Scorpion B-scan ดังรูปที่ 2.2 ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ด้านใต้ลำตัว หุ่นยนต์มีความกว้าง 22.2 เซนติเมตร ยาว 38.5 เซนติเมตร และสูง 10.2 เซนติเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างผนังเหล็กและแม่เหล็ก 2.5 มิลลิเมตรจะสามารถสร้างแรงยึดเกาะกับผนังเหล็กได้ 13.6 กิโลกรัม น้ำหนักของหุ่นยนต์คือ 4.75 กิโลกรัม หุ่นยนต์นี้ขับเคลื่อนล้อทั้งสี่ข้างอย่างอิสระต่อกันด้วยอัตราเร็วสูงสุด 0.25 เมตรต่อวินาที เมื่อหุ่นยนต์กำลังตรวจสอบผนังเหล็ก จะมีอัตราเร็วสูงสุด 0.2 เมตรต่อวินาทีและทำงานได้ภายในบริเวณ 30 เมตร (ความยาวของสายสัญญาณ)



## 2.2.2 หุ่นยนต์ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ล้อ

การติดตั้งแม่เหล็กที่ล้อของหุ่นยนต์ใต้ผนังมีข้อดีคือ แม่เหล็กสัมผัสกับผนังเหล็กโดยตรง จึงทำให้ไม่มีช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังเหล็กและเกิดแรงดึงดูดสูง แต่หุ่นยนต์จะสามารถยึดเกาะบนผนังที่มีความสะอาดพอสมควรเท่านั้นเช่น ไม่มีเศษผงเหล็กเกาะบนผนัง มิเช่นนั้นแม่เหล็กอาจดูดผงเหล็กไว้ เมื่อล้อกลิ้งทับผงเหล็กเหล่านั้น ล้อจะไม่สัมผัสกับผนัง ช่องว่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงดึงดูดแม่เหล็กน้อยลงและอาจทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กได้

การติดตั้งแม่เหล็กที่ล้อมีหลายรูปแบบและขึ้นอยู่กับลักษณะการขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ เช่น หุ่นยนต์ MINOAS ในรูปที่ 2.3 ติดตั้งแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กจำนวนมากที่ขอบล้อ มีวัตถุประสงค์การใช้งานเพื่อสำรวจพื้นที่ต่างๆ ของโครงสร้างเรือ หุ่นยนต์นี้ถูกออกแบบให้มีน้ำหนักเบาจึงไม่จำเป็นต้องใช้เชือกนिरภัยห้อยหุ่นยนต์ในขณะที่ทำงาน นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังถูกควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยคลื่นวิทยุ ทำให้มีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่สูง หุ่นยนต์นี้มีความกว้าง 28 เซนติเมตร ยาว 38 เซนติเมตรและสูง 15 เซนติเมตร น้ำหนัก 0.67 กิโลกรัม ขับเคลื่อนล้อทั้งสองข้างแยกกันอย่างอิสระด้วยอัตราเร็ว 50 เซนติเมตรต่อวินาทีบนผนังเหล็กในแนวตั้ง

การติดตั้งแม่เหล็กที่ล้ออีกลักษณะหนึ่งคือ การใช้ล้อตีนตะขาบที่ติดตั้งแม่เหล็กบนซี่ล้อเช่น หุ่นยนต์ MARC ในรูปที่ 2.4 การติดตั้งแม่เหล็กแบบนี้ทำให้มีแม่เหล็กจำนวนมากที่สัมผัสกับผนังเหล็กแรงยึดเกาะของหุ่นยนต์บนผนังจึงค่อนข้างสูง หุ่นยนต์นี้มีกว้าง 43 เซนติเมตร ยาว 49 เซนติเมตรและสูงประมาณ 37 เซนติเมตร มีการขับเคลื่อนล้อแต่ละข้างอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วสูงสุด 0.12 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ใต้ผนัง Scorpion B-scan ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ด้านใต้ลำตัว [13]

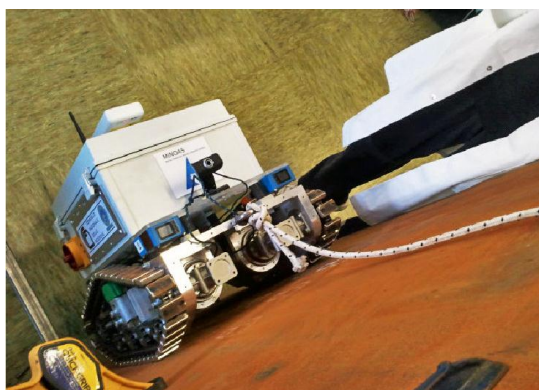


รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์ MINOAS ที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กจำนวนมากที่ขอบล้อ [4]

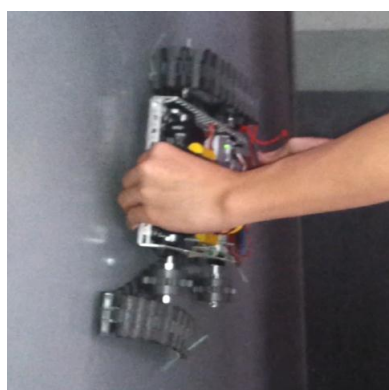
อย่างไรก็ตามการติดตั้งแม่เหล็กบนล้อตีนตะขาบยังมีผลเสียต่อการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ เนื่องจากล้อตีนตะขาบจะต้องไถลเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเลี้ยวโค้งได้ [14] แต่การใช้แม่เหล็กทำให้ล้อไถลได้ยากขึ้น แรงบิดจากส่วนขับเคลื่อนของหุ่นยนต์และแรงเสียดทานที่ล้ออาจทำให้แรงดึงภายในล้อมีค่ามากและเสียหายดังรูปที่ 2.5 ได้

นอกจากการติดตั้งแม่เหล็กถาวรที่ล้อเพื่อให้สัมผัสกับผนังเหล็กโดยตรงแล้ว ยังสามารถติดตั้งแม่เหล็กให้อยู่ภายในล้อหุ่นยนต์ซึ่งเรียกว่า ล้อแม่เหล็ก (Magnetic wheel) โดยมีลักษณะภายนอกดังรูปที่ 2.6 การติดตั้งแม่เหล็กลักษณะนี้ทำให้แรงดึงดูดเพิ่มมากขึ้นกว่าการดึงดูดด้วยแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว โดยใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย (เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งของล้อ)

หุ่นยนต์ที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่ใช้ล้อแม่เหล็กเพื่อสร้างแรงยึดเกาะกับผนังเหล็กได้แก่ หุ่นยนต์ Tripod ของ Jireh Industries Ltd ดังรูปที่ 2.7 หุ่นยนต์มีความกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร และสูง 19 เซนติเมตร หนัก 13.6 กิโลกรัม โดยสามารถบรรทุกอุปกรณ์เพิ่มเติมที่มีน้ำหนักไม่เกิน 10 กิโลกรัม หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.3 เมตรต่อวินาที ภายในพื้นที่การทำงานเป็นระยะทาง 45 เมตร (ความยาวของสายสัญญาณ)



รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์ MARC ที่ติดตั้งแม่เหล็กที่ล้อตีนตะขาบ [15]



รูปที่ 2.5 ความเสียหายของล้อตีนตะขาบเมื่อหุ่นยนต์เลี้ยว [16]

จากการศึกษารูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนหุ่นยนต์ไต่ผนัง จะเห็นได้ว่า การติดตั้งแต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อเสีย และมีประโยชน์ในการใช้งานแตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการให้หุ่นยนต์ไต่ผนังสามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังเหล็กที่มีระนาบแบน รวมทั้งควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทาง ภายในเวลาที่ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะพัฒนาหุ่นยนต์ไต่ผนังที่ใช้ล้อแม่เหล็ก เนื่องจากแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กมีขนาดมากกว่ารูปแบบที่ติดตั้งแม่เหล็กบนลำตัวหุ่นยนต์และรูปแบบที่ติดตั้งแม่เหล็กขนาดเล็กบนล้อ อีกทั้งเป็นรูปแบบการติดตั้งแม่เหล็กที่ไม่สร้างความเสียหายกับโครงสร้างหุ่นยนต์ นอกจากนี้หุ่นยนต์ควรเคลื่อนที่โดยไม่มีการไถที่ล้อเพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นหุ่นยนต์ล้อตีสันตะขาบจึงไม่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ในขณะที่การใช้ล้อแม่เหล็กสามารถลดโอกาสการเกิดการไถที่ล้อให้ลดลงได้ อีกทั้งยังเป็นการติดตั้งแม่เหล็กที่มีจำนวนชิ้นส่วนน้อย ทำให้ดูแลรักษาหุ่นยนต์ได้ง่ายกว่ารูปแบบที่ติดตั้งแม่เหล็กจำนวนมาก

### 2.3 ล้อแม่เหล็ก

ล้อแม่เหล็กโดยทั่วไปมีโครงสร้างคือ แม่เหล็กถาวรและแผ่นเหล็กที่ประกอบเข้ากับทั้งสองด้านของแม่เหล็ก (ขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็ก) โดยที่แผ่นเหล็กจะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าแม่เหล็กวงแหวนเล็กน้อยเพื่อให้วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) ของล้อแม่เหล็กมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 ล้อแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบนี้จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กส่วนใหญ่อยู่ภายในแผ่นเหล็กและผนังเหล็ก เพราะวัสดุเหล็กมีค่าความสามารถในการให้สนามแม่เหล็กซึมผ่านสัมพัทธ์เท่ากับ 100 [18]



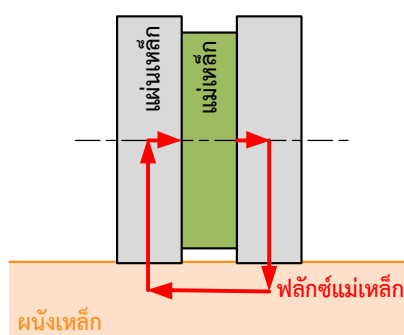
รูปที่ 2.6 ล้อแม่เหล็กของ Magnet Sales & Service Ltd.



รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ TriPod ที่ใช้ล้อแม่เหล็ก [17]

ในขณะที่อากาศมีค่านี้นเท่ากับ 1 [19] ฟลักซ์แม่เหล็กจึงไม่ฟุ้งกระจายในอากาศแต่จะถูกส่งผ่านแผ่นเหล็กด้านซ้ายเหนือของแม่เหล็กไปยังผนังเหล็กและกลับเข้าสู่แผ่นเหล็กด้านขวาใต้ของแม่เหล็ก รูปแบบของวงจรแม่เหล็กนี้จึงส่งผลให้แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็กมากกว่าการใช้แม่เหล็กเพียงอย่างเดียว

แรงดึงดูดแม่เหล็กกับผนังทำให้แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังที่กระทำกับล้อแม่เหล็กมีค่ามากขึ้น แรงเสียดทานสูงสุดระหว่างล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็กจึงมีค่ามาก ถ้าแรงเสียดทานสูงสุดนี้มีค่ามากกว่าแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ (มีค่าเท่ากับแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อหารด้วยรัศมีของล้อ) จะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่โดยที่ล้อกลิ้งและไม่ไถลบนพื้น (Pure rotation) ซึ่งมีข้อดีคือ อัตราเร็วการหมุนล้อจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ทำให้สามารถประมาณตำแหน่งและทิศทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยการคำนวณจากการหมุนของล้อได้อย่างแม่นยำ และทำให้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามเส้นทางที่กำหนดได้ง่ายกว่าการไม่ใช้แม่เหล็ก [20] ดังนั้นการใช้ล้อแม่เหล็กที่สามารถสร้างแรงดึงดูดได้มากกว่าแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวจะได้รับประโยชน์จากการป้องกันการไถลมากกว่าการติดตั้งแม่เหล็กรูปแบบอื่น



รูปที่ 2.8 วงจรแม่เหล็กของล้อแม่เหล็ก

## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์ไต่ผนัง

#### 3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์ไต่ผนัง

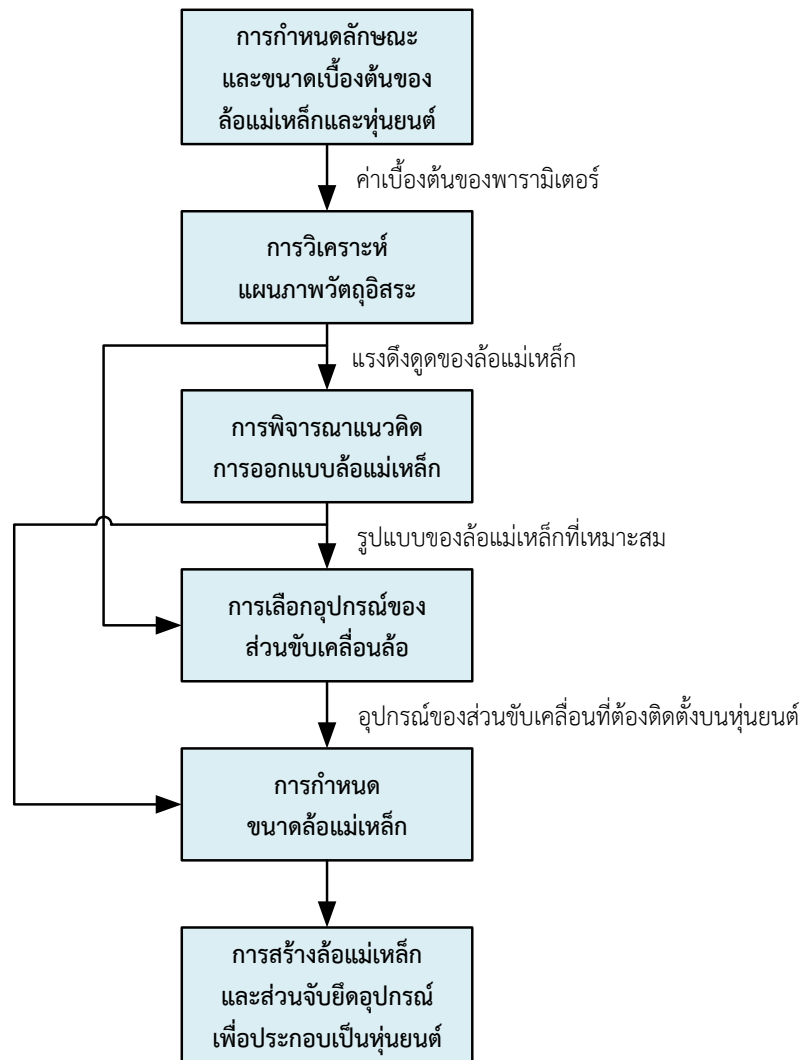
การออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์มีขั้นตอนดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 เริ่มต้นจากการกำหนดลักษณะล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์เช่น รูปร่างของหุ่นยนต์และการวางตำแหน่งของล้อแม่เหล็ก รวมทั้งกำหนดค่าเบื้องต้นให้กับพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระ (Free body diagram) เช่น น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์, ระยะห่างระหว่างล้อและขนาดของล้อ โดยประมาณ เป็นต้น แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กที่คำนวณได้จากแผนภาพวัตถุอิสระจะถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาแนวคิดการออกแบบ (Conceptual design) ของล้อแม่เหล็กเพื่อหารูปแบบล้อที่เหมาะสม จากนั้นจึงเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อให้สอดคล้องกับแรงดึงดูดและรูปแบบของล้อแม่เหล็ก เมื่อกำหนดขนาดของล้อที่ให้แรงดึงดูดตามที่ต้องการและเหมาะสมกับขนาดของอุปกรณ์แล้ว จึงสร้างล้อแม่เหล็กและส่วนจับยึดอุปกรณ์ต่างนำมาประกอบเป็นหุ่นยนต์ไต่ผนัง

#### 3.2 การกำหนดลักษณะและขนาดเบื้องต้นของล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์

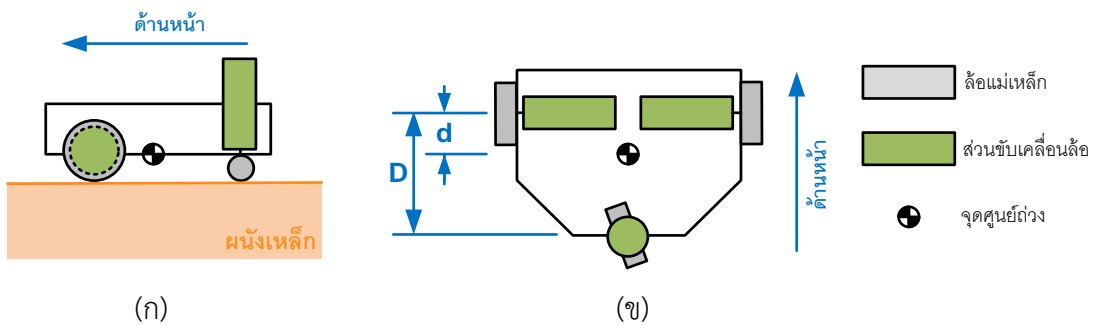
ลักษณะของหุ่นยนต์ไต่ผนังที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยล้อแม่เหล็กจำนวนสามล้อ ล้อแม่เหล็กด้านหน้าทั้งสองทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยถูกขับเคลื่อนอย่างแยกกันอิสระ (มีส่วนส่งกำลังเช่น มอเตอร์ เฟืองทด และเพลลา แยกออกจากกัน) แต่มีแกนหมุนอยู่ในแนวเดียวกัน ในขณะที่ล้อแม่เหล็กด้านหลังจะต้องมีแรงดึงดูดกับผนังเพียงพอที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะบนผนังเหล็กที่วางตัวในระนาบเอียงมุมต่างๆ ได้ ถึงแม้ว่าล้อด้านหลังจะไม่ใช้ในการขับเคลื่อน หุ่นยนต์แต่จะต้องสามารถเปลี่ยนทิศทางของแกนหมุนให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ รูปแบบการขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ด้วยล้อและส่วนขับเคลื่อนที่แยกกันอย่างอิสระนี้มีข้อดีคือ หุ่นยนต์สามารถเลี้ยวรอบจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะ (Instantaneous center of rotation) ด้วยวงเลี้ยวแคบหรือแม้แต่การหมุนรอบตัวเองโดยไม่เกิดการไถลระหว่างล้อกับผนัง หุ่นยนต์จึงสามารถเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ตรวจสอบบริเวณแคบได้

เนื่องจากล้อด้านหน้าของหุ่นยนต์ถูกกำหนดให้เป็นล้อสำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ ดังนั้น หุ่นยนต์จึงควรถูกออกแบบให้เอื้อต่อการเกิดแรงเสียดทานสูงระหว่างล้อด้านหน้ากับผนัง เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ไถล วิธีการหนึ่งในการเพิ่มแรงเสียดทานคือการเพิ่มแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังด้วยการออกแบบให้ล้อแม่เหล็กด้านหน้ามีแรงดึงดูดกับผนังสูง [21]

การกำหนดค่าเบื้องต้นให้กับพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์, ล้อแม่เหล็ก และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างวัสดุเหล็กและเหล็ก ถูกกำหนดโดยประมาณจากหุ่นยนต์ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ [17], [22] ขนาดของล้อแม่เหล็กที่ประมาณได้จากงานวิจัยอื่น [3], [23], [24] และจากตารางอ้างอิงในหนังสือคู่มือทางวิศวกรรม [25] ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่า



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างล้อแม่เหล็กและหุ่นยนต์



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของหุ่นยนต์

(ก) มุมมองด้านข้าง

(ข) มุมมองด้านบน

- มวลรวมของหุ่นยนต์ (ล้อแม่เหล็กและอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์) มีค่า 10 กิโลกรัม
- ระยะห่างระหว่างล้อแม่เหล็กด้านหน้าและด้านหลังคือ 30 เซนติเมตร
- ล้อแม่เหล็กด้านหน้าทั้งสองมีรัศมีเท่ากับ 50 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับผนังเหล็กเท่ากันคือ 0.78 (ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับเหล็ก)

ถ้ากำหนดให้ส่วนประกอบของหุ่นยนต์แต่ละส่วนมีมวลเท่ากัน (ล้อแม่เหล็กและส่วนขับเคลื่อนล้อมีมวลเท่ากันคือ 1.667 กิโลกรัม) จะสังเกตจากโครงสร้างของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 3.2 (ก) ได้ว่า มวลส่วนใหญ่ของหุ่นยนต์มาจากล้อด้านหน้าและส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า จุดศูนย์กลางถ่วง (Center of gravity, CG) ของชิ้นส่วนเหล่านี้อยู่ที่ระดับความสูงจากพื้นเท่ากับรัศมีของล้อ จึงกำหนดให้

- จุดศูนย์กลางถ่วงของหุ่นยนต์อยู่ที่ระดับความสูงจากพื้นเท่ากับรัศมีของล้อ
- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงกับแนวแกนของล้อด้านหน้าในรูปที่ 3.2 (ข) หาได้จาก

$$d = \frac{\sum_{i=1}^6 m_i l_i}{\sum_{i=1}^6 m_i} = \frac{2mD}{6m} = \frac{D}{3}$$

โดยที่  $m_i$  คือ มวลของแต่ละชิ้นส่วนและ  $l_i$  คือ ระยะห่างระหว่างแต่ละชิ้นส่วนกับแนวแกนล้อด้านหน้า ดังนั้น ระยะห่างระหว่างล้อด้านหน้าและจุดศูนย์กลางถ่วงของหุ่นยนต์ ( $d$ ) จะมีค่าเพียงหนึ่งในสามเท่าของระยะห่างระหว่างล้อด้านหน้าและด้านหลัง ( $D$ ) คือ 10 เซนติเมตร

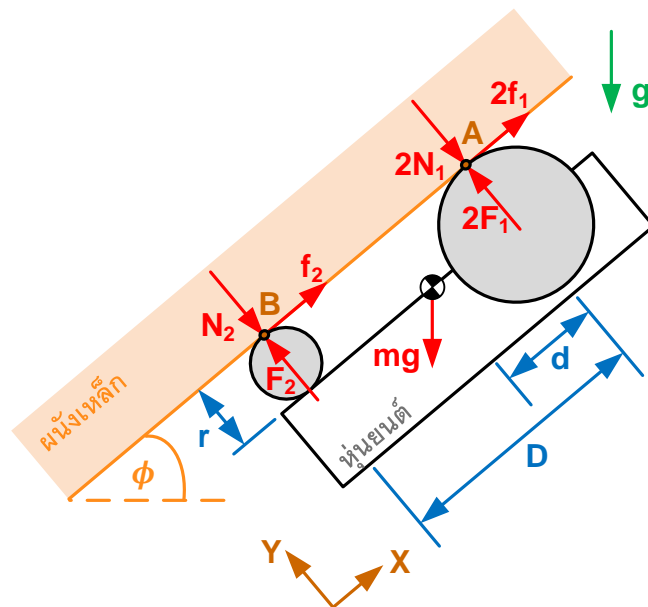
### 3.3 การวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระ

ขณะที่หุ่นยนต์ยึดเกาะบนผนังเหล็กระนาบเอียงดังรูปที่ 3.3 จะสามารถวิเคราะห์สมดุลของแรงและโมเมนต์รอบจุดต่างๆ ได้ดังนี้

$$[\sum F_x = 0, \nearrow +] \quad 2f_1 + f_2 - mg \sin \phi = 0 \quad (3.1)$$

$$[\sum M_A = 0, CCW +] \quad (N_2 - F_2)D + (mg \cos \phi)d - (mg \sin \phi)r = 0 \quad (3.2)$$

$$[\sum M_B = 0, CCW +] \quad (2F_1 - 2N_1)D - (mg \cos \phi)(D - d) - (mg \sin \phi)r = 0 \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.3 แผนภาพวัตถุอิสระของหุ่นยนต์ขณะยึดเกาะกับผืนเหล็กระนาบเอียง

โดยที่  $f_i$  คือ แรงเสียดทานระหว่างล้อที่  $i$  กับผืนเหล็ก

$F_i$  คือ แรงดึงจุดแม่เหล็กระหว่างล้อที่  $i$  กับผืนเหล็ก

$N_i$  คือ แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผืนเหล็กที่กระทำบนล้อที่  $i$

$mg$  คือ น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์ (โดยที่  $m$  คือ มวลรวมของหุ่นยนต์ และ  $g$  คือ อัตราเร่งโน้มถ่วงของโลก)

$D$  คือ ระยะห่างระหว่างล้อแม่เหล็กด้านหน้ากับด้านหลัง

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างล้อแม่เหล็กด้านหน้ากับจุดศูนย์กลางถ่วงของหุ่นยนต์

$r$  คือ รัศมีของล้อแม่เหล็กด้านหน้า

$\phi$  คือ มุมเอียงของระนาบผืนเหล็ก

$A$  คือ ตำแหน่งที่ล้อแม่เหล็กด้านหน้าสัมผัสกับผืนเหล็ก

$B$  คือ ตำแหน่งที่ล้อแม่เหล็กด้านหลังสัมผัสกับผืนเหล็ก



เพื่อให้หุ้ยนต์สามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กในระนาบเอียงมุมต่างๆ ได้ ล้อแม่เหล็กด้านหลังจะต้องมีแรงดึงดูดกับผนังเหล็กอย่างเพียงพอ ดังนั้นในการคำนวณเพื่อหาแรงดึงดูดแม่เหล็กขั้นต่ำของล้อด้านหลัง จึงสมมติให้หุ้ยนต์อยู่ในสภาวะที่ยังสามารถยึดเกาะกับผนังเหล็กได้แต่ล้อด้านหลังกำลังหลุดออกจากผนังเหล็ก ( $N_2 = 0$ ) ดังนั้นสมการ (3.2) จะเปลี่ยนไปคือ

$$-F_2 D + (mg \cos \phi) d - (mg \sin \phi) r = 0$$

$$F_2 = \frac{mg}{D} (d \cos \phi - r \sin \phi) \quad (3.4)$$

นอกจากนี้ล้อแม่เหล็กด้านหน้าจะต้องสร้างแรงเสียดทานกับผนังเหล็กอย่างเพียงพอเพื่อไม่ให้หุ้ยนต์ไถลบนพื้นเอียงอีกด้วย ดังนั้นการหาแรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อด้านหน้าจึงวิเคราะห์ในกรณีที่แรงเสียดทานระหว่างล้อด้านหน้ากับผนังเหล็กมีค่าสูงสุด โดยที่ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างล้อด้านหลังกับผนังเหล็กเนื่องจากล้อด้านหลังของหุ้ยนต์ถูกสมมติให้อยู่ในสภาวะกำลังหลุดออกจากผนังเหล็กสมการ (3.1) จึงเปลี่ยนไปคือ

$$2f_{1,\max} - mg \sin \phi = 0$$

$$2\mu_1 N_1 - mg \sin \phi = 0$$

$$N_1 = \frac{mg \sin \phi}{2\mu_1} \quad (3.5)$$

โดยที่  $\mu_1$  คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างล้อแม่เหล็กด้านหน้ากับผนังเหล็ก แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังเหล็กที่กระทำบนล้อด้านหน้าที่คำนวณได้ตั้งสมการ (3.5) สามารถนำไปแทนค่าในสมการ (3.3) เพื่อหาขนาดแรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อด้านหน้าได้ดังนี้

$$\left[ 2F_1 - 2 \left( \frac{mg \sin \phi}{2\mu_1} \right) \right] D - (mg \cos \phi)(D - d) - (mg \sin \phi) r = 0$$

$$F_1 = \frac{mg}{2} \left( \frac{\sin \phi}{\mu_1} + \cos \phi + \frac{r \sin \phi - d \cos \phi}{D} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อแทนค่าเบื้องต้นของพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.2 ลงในสมการ (3.6) และ (3.4) ตามลำดับจะได้ว่า

$$F_1 = 32.7 \cos \phi + 71.060 \sin \phi \quad (3.7)$$

$$F_2 = 32.7 \cos \phi - 16.35 \sin \phi \quad (3.8)$$

จากสมการ (3.7) จะได้ว่า เมื่อระนาบเอียงของผนังเหล็กมีค่าประมาณ 65 องศา หุ่นยนต์จะต้องใช้แรงดึงดุดแม่เหล็กของล้อด้านหน้ามากที่สุดคือ 78.222 นิวตัน และจากสมการ (3.8) พบว่าเมื่อหุ่นยนต์ยึดเกาะบนผนังเหล็กที่มีระนาบเอียงประมาณ 33 องศา จะต้องการแรงดึงดุดแม่เหล็กของล้อด้านหลังมากที่สุดคือ 36.559 นิวตัน อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้นี้ได้มาจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์และสมมติฐานต่างๆ ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับหุ่นยนต์ที่จะสร้างและสภาพแวดล้อมการทำงานจริง ดังนั้นขนาดแรงดึงดุดแม่เหล็กที่จะนำไปใช้ในการออกแบบจึงควรใช้ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3

ดังนั้นในการออกแบบล้อแม่เหล็กจะกำหนดให้

- แรงดึงดุดแม่เหล็กระหว่างล้อด้านหน้ากับผนังเหล็ก ( $F_1$ ) มีค่าเท่ากับ 234.666 นิวตัน (23.921 กิโลกรัม)
- แรงดึงดุดแม่เหล็กระหว่างล้อด้านหลังกับผนังเหล็ก ( $F_2$ ) มีค่าเท่ากับ 109.667 นิวตัน (11.180 กิโลกรัม)

### 3.4 การพิจารณาแนวคิดการออกแบบล้อแม่เหล็ก

เงื่อนไขหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณารูปแบบของล้อแม่เหล็กคือ แรงดึงดุดของล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็กจะต้องมีขนาดใกล้เคียงกับค่าจากการวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระ การหาขนาดแรงดึงดุดนี้จะหาได้จากการทดสอบดังรูปที่ 3.4 โดยออกแรงดึงที่ล้อแม่เหล็กให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในทิศทางตั้งฉากกับผนังเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร ด้วยตาชั่งสปริง จนกระทั่งล้อแม่เหล็กหลุดออกจากผนังเหล็ก จะได้ว่าแรงดึงสูงสุดที่อ่านได้จากตาชั่งสปริง (ขณะที่ล้อแม่เหล็กกำลังหลุดจากผนังเหล็ก) คือ แรงดึงดุดสูงสุดที่ล้อแม่เหล็กสามารถดึงดุดกับผนังเหล็กได้



รูปที่ 3.4 การทดสอบแรงดึงดุดระหว่างล้อแม่เหล็กกับผนังเหล็ก

### 3.4.1 คุณลักษณะแรงดึงดุดของล้อแม่เหล็ก

เมื่อนำแผ่นเหล็กมาประกอบที่ด้านข้างของแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนดังรูปที่ 3.5 จะพบว่า ขนาดแรงดึงดุดของล้อแม่เหล็กจะมากกว่าแรงดึงดุดของแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว โดยมีขนาดแตกต่างกันตามจำนวนและขนาดของแผ่นเหล็กที่ใช้ จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าการประกอบแผ่นเหล็กทั้งสองข้างของแม่เหล็กจะทำให้แรงดึงดุดมีค่ามากที่สุด นอกจากนี้ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแผ่นเหล็กขนาดเล็กจะมีแรงดึงดุดสูงกว่าการใช้แผ่นเหล็กขนาดใหญ่ จากข้อมูลดังกล่าวจะสังเกตได้ว่า คุณลักษณะการดึงดุดของล้อแม่เหล็กเป็นเช่นเดียวกับแม่เหล็กที่ยังไม่ประกอบเป็นล้อแม่เหล็กคือ แม่เหล็กมีแรงดึงดุดกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับวัสดุมากขึ้น ในกรณีของล้อแม่เหล็กจึงเปรียบเทียบได้ว่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและผนังเหล็กคือ ความแตกต่างระหว่างขนาดของแม่เหล็กและแผ่นเหล็ก ดังนั้นในการออกแบบล้อแม่เหล็กควรกำหนดให้แผ่นเหล็กใหญ่กว่าแม่เหล็กเพียงเล็กน้อยหรือต้องออกแบบให้แม่เหล็กมีระยะห่างกับผนังเหล็กให้น้อยจึงจะได้ล้อแม่เหล็กที่มีแรงดึงดุดสูง



รูปที่ 3.5 การประกอบล้อแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนและแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 3.1 น้ำหนักและแรงดึงดุดของล้อแม่เหล็กที่สร้างจากจำนวนและขนาดต่างๆ ของแผ่นเหล็ก เมื่อใช้แม่เหล็กรูปวงแหวนจำนวน 1 ชิ้น

จำนวนแผ่นเหล็ก (ชิ้น)	เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็ก (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงดึงดุดแม่เหล็ก (กิโลกรัม)
0	-	89	4.5
1	45	204	18
1	62	309	12
1	71	356	7
2	71	655	มากกว่า 30

### 3.4.2 แนวคิดการออกแบบล้อแม่เหล็กด้านหน้าของหุ่นยนต์

เนื่องจากล้อแม่เหล็กด้านหน้าของหุ่นยนต์ทำหน้าที่ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ ดังนั้นล้อแม่เหล็กประเภทนี้จะต้องสามารถสร้างแรงเสียดทานสถิตระหว่างล้อกับพื้นได้มาก เพื่อให้ล้อสามารถขับเคลื่อนหุ่นยนต์โดยไม่เกิดการไถล ดังนั้นล้อแม่เหล็กนี้จึงควรออกแบบให้มีแรงดึงดูดกับผนังเหล็กมาก (เพื่อให้แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังมีค่ามาก) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและทดสอบแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กด้านหน้าที่มีรูปแบบดังนี้

- ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กตัน

เมื่อนำแผ่นเหล็กตัน (มีเฉพาะรูที่ตรงกลางแผ่นเหล็กสำหรับการประกอบเข้ากับเพลาล้อ) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 62 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร และความหนา 10 มิลลิเมตร มาประกอบกับแม่เหล็กรูปวงแหวนที่ทั้งสองด้านของขั้วแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.6 ล้อแม่เหล็กจะมีน้ำหนักเท่ากับ 523 กรัม และแรงดึงดูดแม่เหล็กมีค่ามากกว่า 30 กิโลกรัม

- ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กที่เจาะรูในแนวรัศมีของล้อ

เนื่องจากล้อแม่เหล็กที่ใช้แผ่นเหล็กตันมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ล้อแม่เหล็กดังรูปที่ 3.7 จึงนำแผ่นเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตรมาเจาะรูเพิ่มเติมโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร จำนวน 4 รูในแนวรัศมีของล้อ ปรากฏว่าล้อแม่เหล็กมีน้ำหนักลดลงเหลือเพียง 324 กรัม แต่แรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อส่วนที่ถูกเจาะรูจะลดลงเหลือเพียง 23 กิโลกรัม ในขณะที่ล้อส่วนที่ไม่ถูกเจาะรูจะมีแรงดึงดูดแม่เหล็กเท่ากับ 27 กิโลกรัม

- ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปทรงระบอบจำนวนหลายชิ้นและแผ่นเหล็กตัน

รูปแบบล้อแม่เหล็กดังรูปที่ 3.8 เป็นแนวคิดที่จะใช้แม่เหล็กขนาดเล็กกระจายตัวที่ขอบล้อ [3] เพื่อให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับผนังเหล็กน้อยลงและอาจลดโอกาสการสูญเสียแรงดึงดูด แม่เหล็กขนาดเล็กมีรูปทรงระบอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15.1 มิลลิเมตร และหนา 3.6 มิลลิเมตร จำนวน 8 ชิ้นถูกวางเรียงในบ่าวัสตุเรซัน แล้วประกอบด้วยแผ่นเหล็กตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตรและหนา 10 มิลลิเมตรที่แต่ละด้านของบ่าวัสตุเรซัน พบว่า ล้อแม่เหล็กหนัก 666 กรัมและมีแรงดึงดูด 7 กิโลกรัม



รูปที่ 3.6 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กตัน



รูปที่ 3.7 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กที่เจาะรูในแนวรัศมีของล้อ



รูปที่ 3.8 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปทรงกระบอกจำนวนหลายชิ้นและแผ่นเหล็กตัน

จากการเปรียบเทียบน้ำหนักและแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กแต่ละรูปแบบดังตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า การใช้แม่เหล็กรูปวงแหวนจำนวนหนึ่งชิ้นสามารถสร้างแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กได้มากกว่า การใช้แม่เหล็กรูปทรงกระบอกหลายชิ้น ถึงแม้ว่าการเจาะรูแผ่นเหล็กจะสามารถลดน้ำหนักของล้อได้ก็ตาม แต่แรงดึงดูดแม่เหล็กจะมีขนาดน้อยลงและไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งล้อ ดังนั้นล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กตันจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับหุ่นยนต์ใต้น้ำมากที่สุด เนื่องจากล้อแม่เหล็กแบบนี้สามารถสร้างแรงดึงดูดแม่เหล็กแรงสูงและสม่ำเสมอ แม้ว่าจะมีน้ำหนักค่อนข้างมากก็ตาม

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักและแรงดึงดูของล้อยแม่เหล็กรูปแบบต่างๆ

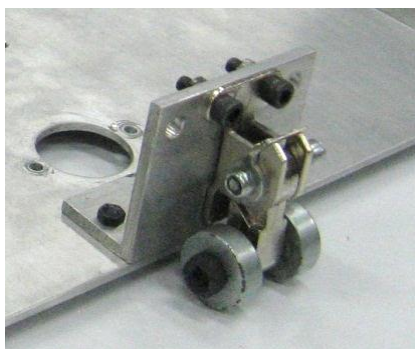
รูปแบบล้อยแม่เหล็ก		เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	แรงดึงดู แม่เหล็ก (กิโลกรัม)
แม่เหล็ก	แผ่นเหล็ก			
รูปวงแหวนหนึ่งชั้น	ตัน	62	523	มากกว่า 30
รูปวงแหวนหนึ่งชั้น	เจาะรูตามแนวรัศมี	62	324	23 (เจาะรู) 27 (ไม่เจาะรู)
รูปทรงกระบอกหลายชั้น	ตัน	71	666	7

### 3.4.3 แนวคิดการออกแบบล้อยแม่เหล็กด้านหลังของหุ่นยนต์

เนื่องจากล้อยแม่เหล็กด้านหลังไม่มีหน้าที่ในการขับเคลื่อนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ดังนั้นการออกแบบล้อยแม่เหล็กด้านหลังจึงไม่ต้องการแรงดึงดูสูงมาก แต่ควรเน้นให้ล้อยสามารถเปลี่ยนทิศทางแกนหมุนของล้อได้โดยสะดวก งานวิจัยนี้ได้ศึกษามีแนวความคิดในการออกแบบล้อยแม่เหล็กด้านหลังดังนี้

- ล้อยแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนสองชั้นโดยไม่ใช้แผ่นเหล็ก

ล้อยแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนสองชั้นดังรูปที่ 3.9 สามารถเปลี่ยนทิศทางแกนหมุนของล้อได้โดยเชื่อมต่อส่วนกลางของล้อเข้ากับส่วนขับเคลื่อน การเปลี่ยนทิศทางแกนหมุนของล้อด้วยวิธีนี้ทำให้เกิดแรงต้านในการบิดน้อย เนื่องจากแม่เหล็กทั้งสองจะกึ่งตามการบิดและไม่ไถลบนผนังเหล็ก การเสียดสีกับผนังจึงน้อยและทำให้การสึกหรอของล้อยน้อยลงด้วยเช่นกัน ล้อยแม่เหล็กรูปแบบนี้มีน้ำหนัก 113 กรัม และมีแรงดึงดู 4 กิโลกรัม



รูปที่ 3.9 ล้อยแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนสองชั้น

- ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูวงแหวนหนึ่งชิ้นและตลับลูกปืน

เนื่องจากล้อแม่เหล็กที่ไม่ใช้แผ่นเหล็กประกอบเข้ากับแต่ละด้านของแม่เหล็กมีแรงดึงดูดน้อย และการให้แม่เหล็กสัมผัสกับพื้นเหล็กโดยตรงอาจทำให้แม่เหล็กเสียหายได้ง่าย เพราะแม่เหล็กมีความเปราะ อีกทั้งยังไม่ทราบว่าแม่เหล็กรูวงแหวนมีตำแหน่งรูตรงกับจุดศูนย์กลางของล้อหรือไม่ ดังนั้นล้อแม่เหล็กด้านหลังรูปแบบนี้จึงปรับปรุงให้มีโครงสร้างคล้ายกับล้อด้านหน้าดังรูปที่ 3.10 โดยเปลี่ยนจากแผ่นเหล็กเป็นตลับลูกปืนซึ่งสร้างจากวัสดุเหล็กเช่นกัน เนื่องจากรางนอกของตลับลูกปืน (Outer race) สามารถหมุนได้โดยอิสระจากรางใน ทำให้ตลับลูกปืนสามารถลื่นบนพื้นระหว่างการบิดแกนหมุนของล้อได้ ล้อแม่เหล็กรูปแบบนี้มีน้ำหนัก 271 กรัม และมีแรงดึงดูด 12 กิโลกรัมซึ่งมากกว่ารูปแบบที่ใช้แม่เหล็กอย่างเดียว

จากแนวความคิดการออกแบบของล้อแม่เหล็กด้านหลังดังกล่าว จึงตัดสินใจว่าล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูวงแหวนหนึ่งชิ้นโดยใช้ตลับลูกปืนแทนการใช้แผ่นเหล็กมีความเหมาะสมกับหุ่นยนต์ใต้น้ำมากที่สุด เพราะล้อแม่เหล็กรูปแบบนี้สามารถสร้างแรงดึงดูดกับผนังเหล็กได้มาก ในขณะที่ล้อน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่มากนัก อีกทั้งยังเป็นรูปแบบของล้อที่ทำให้แม่เหล็กถาวรเสียหายน้อย

### 3.5 การออกแบบและเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อ

หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้โดยใช้ส่วนที่ขับเคลื่อนล้อแต่ละข้างของหุ่นยนต์ให้หมุนด้วยมุมที่ต้องการ ดังนั้นส่วนขับเคลื่อนของหุ่นยนต์จึงถูกแบ่งเป็นสองส่วนตามลักษณะการทำงานของล้อคือ ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า และส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง

ส่วนขับเคลื่อนล้อประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านและแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet brush DC motor) ที่ขับเคลื่อนล้อผ่านเฟืองฮาร์โมนิก (Harmonic gear) เพื่อให้ได้แรงบิดของล้อเพิ่มขึ้น และยังติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์แบบเพิ่มค่า (Incremental encoder) ไว้ที่เพลาด้านหลังของมอเตอร์ การประกอบอุปกรณ์ในแนวเดียวกันเช่นนี้จะทำให้ล้อหมุนโดยไม่มีระยะ



รูปที่ 3.10 ล้อแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรแรงสูงรูวงแหวนหนึ่งชิ้นและตลับลูกปืน

คลอนที่เกิดจากการเปลี่ยนทิศทางของการขับเคลื่อน (เช่น การใช้เฟืองดอกจอก) อีกทั้งเอ็นโค้ดเดอร์ยังสามารถตรวจรู้ความละเอียดของมุมหมุนของล้อได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากการใช้งานเอ็นโค้ดเดอร์แบบเพิ่มค่าทำให้ตรวจวัดสัญญาณได้มากขึ้นสี่เท่าจากที่ระบุไว้ในข้อกำหนดของอุปกรณ์ นอกจากนี้การใช้เฟืองส่งกำลังทำให้มุมหมุนของมอเตอร์ (และเอ็นโค้ดเดอร์) มากกว่ามุมหมุนของล้อ จึงเป็นการเพิ่มความละเอียดของการอ่านค่ามุมหมุนของล้อได้เช่นกัน การติดตั้งอุปกรณ์ลักษณะนี้จึงเหมาะต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ต้องการความแม่นยำสูง

การออกแบบส่วนขับเคลื่อนล้อจะต้องกลับมาวิเคราะห์แบบจำลองวัตถุอิสระของหุ่นยนต์อีกครั้ง เพื่อคำนวณหาค่าของแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อแต่ละข้าง เนื่องจากแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการใช้ค่าความปลอดภัย ทำให้ล้อด้านหลังของหุ่นยนต์ไม่อยู่ในสภาวะที่กำลังหลุดออกจากผนังตามที่เคยสมมติไว้

### 3.5.1 การออกแบบและเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า

จากแผนภาพจำลองอิสระดังรูปที่ 3.11 หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่บนผนังในทิศทาง  $+X$  โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$\left[ \sum F_x = ma_x, \nearrow + \right] \quad 2f_1 + f_2 - mg \sin \phi = ma_x \quad (3.9)$$

โดยที่  $a_x$  คือ อัตราเร่งของหุ่นยนต์ในทิศทาง  $+X$

เนื่องจากหุ่นยนต์ถูกขับเคลื่อนด้วยล้อแม่เหล็กด้านหน้าเท่านั้น จึงสมมติว่า แรงเสียดทานระหว่างล้อด้านหลังกับผนังเหล็กมีค่าน้อยมาก ( $f_2 \approx 0$ ) และจากการสมมติให้ล้อกลิ้งโดยไม่ไถลจะได้ว่า อัตราเร่งเชิงเส้นของหุ่นยนต์จะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร่งเชิงมุมของล้อ [26] จึงเขียนสมการ (3.9) ได้ว่า

$$2f_1 - mg \sin \phi = m\alpha r$$

$$\alpha = \frac{2f_1 - mg \sin \phi}{mr} \quad (3.10)$$

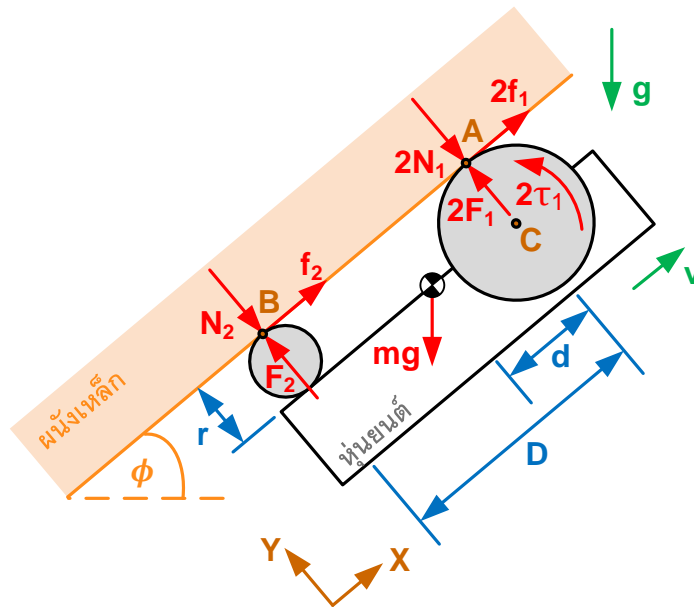
โดยที่  $\alpha$  คือ อัตราเร่งเชิงมุมของการหมุนของล้อด้านหน้า

เมื่อพิจารณาการหมุนของล้อด้านหน้า (โมเมนต์รอบจุด C) จะสามารถคำนวณหาแรงบิดของล้อหน้าได้ดังนี้

$$\left[ \sum M_C = I\alpha, CCW + \right] \quad \tau_1 - f_1 r = I\alpha$$

แทนค่าด้วยสมการ (3.10) จะได้ว่า  $\tau_1 - f_1 r = I \left( \frac{2f_1 - mg \sin \phi}{mr} \right)$





รูปที่ 3.11 แผนภาพจำลองอิสระของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ทิศทางขึ้นบนผนังในแนวตั้ง

จากการสมมติให้ล้อยิ่งโดยไม่ไถลจะได้ว่า แรงขับเคลื่อนหุ่นยนต์ที่มากที่สุดและเป็นไปได้คือ กรณีที่แรงเสียดทานระหว่างล้อด้านหน้ากับผนังมีค่าสูงสุด คือ  $f_1 = \mu_1 N_1$  จึงได้ว่า

$$\tau_1 = \mu_1 N_1 r + I \left( \frac{2\mu_1 N_1 - mg \sin \phi}{mr} \right) \quad (3.11)$$

เนื่องจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยที่ล้อทั้งสามอยู่บนระนาบของผนังเหล็ก จึงกล่าวได้ว่า โมเมนต์รอบจุดสัมผัสระหว่างล้อด้านหลังกับผนัง (รอบจุด B) มีความสมดุลและมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับสมการ (3.3) ดังนั้นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังเหล็กที่จุด A จึงมีค่าเท่ากับ

$$N_1 = F_1 - \frac{mg}{2D} [(D-d) \cos \phi + r \sin \phi]$$

เมื่อแทนค่าในสมการด้วยค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์และแรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อด้านหน้าที่ใช้ในการออกแบบ จะได้ว่า

$$N_1 = 234.666 - 32.7 \cos \phi - 8.175 \sin \phi \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) จะเห็นได้ว่า แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังเหล็กที่ล้อด้านหน้า (จุด A) จะมีค่ามากที่สุดเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนผนังเหล็กที่มีระนาบเอียงประมาณ 194 องศา โดยมีค่าเท่ากับ 268.372 นิวตัน ( $N_{1,max}$ ) และเมื่อสมมติให้ล้อยิ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและมีมวลของล้อยิ่งมีค่าเท่ากับส่วนประกอบอื่นของหุ่นยนต์ (ล้อยิ่งน้ำหนักเป็นหนึ่งในหกส่วนของหุ่นยนต์) จะได้ว่า ล้อยิ่ง

โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนของล้อคือ  $I = \frac{1}{2} \left( \frac{m}{6} \right) r^2$  แรงบิดของล้อหน้าที่มากที่สุดจะสามารถหาได้จากการแทนค่าแรงปฏิกิริยาที่มากที่สุดและโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อลงในสมการ (3.11)

$$\tau_{1,\max} = \mu_1 N_{1,\max} r + \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{m}{6} \right) r^2 \right] \left( \frac{2\mu_1 N_{1,\max} - mg \sin \phi}{mr} \right)$$

$$\tau_{1,\max} = 12.310 \text{ นิวตัน} \cdot \text{เมตร}$$

เมื่อพิจารณากำลังที่ล้อด้านหน้าแต่ละข้างต้องขับเคลื่อนหุ่นยนต์ จะได้ว่า

$$P_1 = f_{1,\max} v_1 = \tau_{1,\max} \dot{\phi}_1$$

โดยที่  $v_1$  คือ อัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้า (และหุ่นยนต์)

$\dot{\phi}_1$  คือ อัตราเร็วการหมุนล้อด้านหน้า

$$\mu_1 N_{1,\max} v_1 = \tau_{1,\max} \dot{\phi}_1$$

$$\dot{\phi}_1 = \frac{\mu_1 N_{1,\max} v_1}{\tau_{1,\max}}$$

เมื่อกำหนดให้หุ่นยนต์มีอัตราเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเท่ากับ 0.2 เมตรต่อวินาที จะได้ว่าล้อหุ่นยนต์จะต้องหมุนด้วยอัตราเร็ว  $\dot{\phi}_1 = 3.401$  เรเดียนต่อวินาที

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มอเตอร์ Tamagawa รุ่น TRE 30W ขนาด 30 วัตต์ ซึ่งมีแรงบิด 0.206 นิวตัน·เมตร (เมื่อทำงานต่อเนื่องโดยใช้กระแสไฟฟ้า 2.1 แอมแปร์) และหมุนด้วยอัตราเร็ว 3000 รอบต่อนาที หรือ 314.159 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นอัตราทดของเฟืองที่ต้องการคือ

$$\text{gear ratio}_1 = \frac{\dot{\phi}_{\text{motor1}}}{\dot{\phi}_1} = \frac{314.159}{3.401} = 92.373$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้เฟืองส่งกำลังแบบฮาร์มอนิก Hi-T Drive H14b3402E5S ซึ่งมีอัตราทดเท่ากับ 88:1 เพื่อให้ใกล้เคียงกับอัตราทดที่ต้องการ นอกจากนี้แรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อจะเพิ่มขึ้นจากแรงบิดของมอเตอร์เป็น  $0.206 \times 88 = 18.128$  นิวตัน·เมตร ซึ่งมีค่ามากกว่า  $\tau_{1,\max}$  เล็กน้อย ดังนั้นมอเตอร์และเฟืองฮาร์มอนิกชุดนี้จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนล้อหน้า

นอกจากนี้ยังใช้เอ็นโค้ดเดอร์ US Digital รุ่น E5-500-394-IE-D-D-D-B ซึ่งมีความละเอียด 500 ครั้งต่อรอบการหมุน ทำให้สามารถควบคุมมุมหมุนของล้อด้านหน้าให้มีความละเอียดได้ถึง  $\frac{360 \text{ deg}}{88 \times 500 \times 4 \text{ pulses}}$  ดังนั้น สัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์หนึ่งครั้ง คือ มุมหมุนของล้อ 0.002 องศา

สรุปได้ว่า อุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้าดังรูปที่ 3.12 ประกอบด้วย

- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปร่งถ่าน: Tamagawa, TRE 30W
- เฟืองฮาร์โมนิก: Hi-T Drive, H14b3402E5S
- เอ็นโค้ดเดอร์: US Digital, E5-500-394-IE-D-D-D-B

### 3.5.2 การออกแบบและเลือกอุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่า แรงบิดของส่วนขับเคลื่อนล้อที่กระทำต่อล้อด้านหลังมีค่าเท่ากับ

$$\tau_2 = f_2 L$$

โดยที่  $\tau_2$  คือ แรงบิดของส่วนขับเคลื่อนที่ใช้ในการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของล้อด้านหลัง

$L$  คือ ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของตลับลูกปืนทั้งสองข้าง (จากล้อแม่เหล็กในรูปที่ 3.10 ระยะห่างนี้มีค่าเท่ากับ 17 มิลลิเมตร)

เนื่องจากล้อแม่เหล็กด้านหลังมีตลับลูกปืนประกอบเข้ากับแม่เหล็กทั้งสองด้าน ดังนั้นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังเหล็กที่กระทำต่อตลับลูกปืนแต่ละข้างมีค่าครึ่งหนึ่งของแรงปฏิกิริยานี้ จึงสามารถหาแรงบิดสูงสุดที่กระทำต่อล้อด้านหลังได้คือ

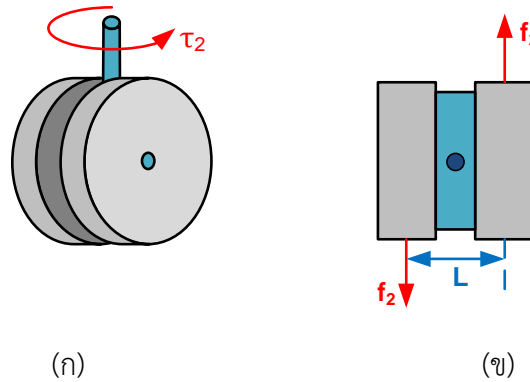
$$\tau_{2,\max} = \left( \mu_2 \frac{N_{2,\max}}{2} \right) L \quad (3.13)$$

เนื่องจากแรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อด้านหลังที่จะใช้ในการออกแบบมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณในสภาวะที่ล้อด้านหลังของหุ่นยนต์กำลังหลุดออกจากผนังเหล็ก ดังนั้นแรงปฏิกิริยาระหว่างล้อด้านหลังกับผนังเหล็กในการออกแบบนี้จึงต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.2) ได้ดังนี้

$$N_2 = F_2 + \frac{mg}{D} (r \sin \phi - d \cos \phi)$$



รูปที่ 3.12 ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า



รูปที่ 3.13 ล้อด้านหลังของหุ่นยนต์

- (ก) การขับเคลื่อนด้วยแรงบิดของส่วนขับเคลื่อนผ่านเพลายูที่อยู่ผ่านกึ่งกลางของล้อ  
 (ข) ทิศทางของแรงเสียดทานระหว่างล้อกับผนังขณะบิดมุมของล้อ

เมื่อแทนค่าในสมการด้วยพารามิเตอร์ค่าเริ่มต้นและแรงดึงดูดแม่เหล็กของล้อด้านหลังที่ใช้ในการออกแบบ จะได้ว่า

$$N_2 = 109.667 + 16.35 \sin \phi - 32.7 \cos \phi \quad (3.14)$$

จากสมการ (3.14) แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับผนังเหล็กที่จุด B มีค่าสูงสุดเท่ากับ 146.226 นิวตัน เมื่อระนาบของผนังเหล็กทำมุมเอียง 153 องศา ดังนั้นแรงบิดสูงสุดที่ใช้ในการหมุนแกนหมุนของล้อด้านหลังจะหาได้จากสมการ (3.13) คือ 0.969 นิวตัน·เมตร

งานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ Maxon รุ่น RE35-118783 และเฟืองฮาร์โมนิก Hi-T Drive รุ่น RP14i100 ที่มีอัตราทดเท่ากับ 100:1 ดังนั้นมอเตอร์จึงใช้แรงบิดสูงสุดเท่ากับ

$$\tau_{motor2} = \frac{\tau_{2,max}}{gear\ ratio_2} = 0.00969 \text{ นิวตัน·เมตร}$$

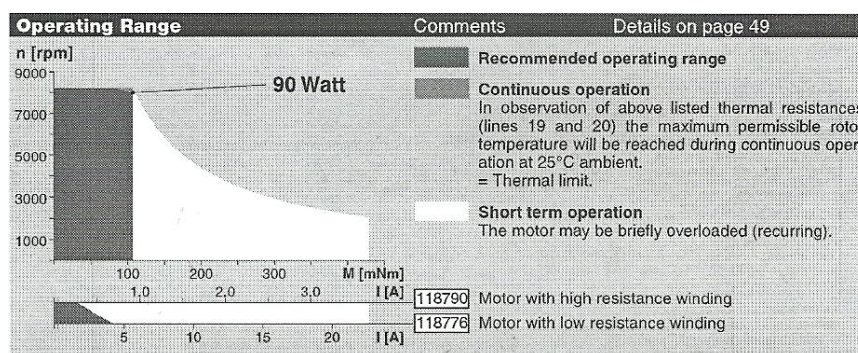
จากช่วงการทำงานของมอเตอร์ในรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อมอเตอร์มีแรงบิดเท่ากับ 9.69 มิลลินิวตัน·เมตร จะมีอัตราการหมุนประมาณ 8200 รอบต่อวินาที ดังนั้นอัตราการหมุนของล้อเมื่อใช้เฟืองฮาร์โมนิกจะมีค่าประมาณ 82 รอบต่อวินาที หรือ 1.367 รอบต่อวินาที แสดงว่า ล้อด้านหลังซึ่งกำหนดให้มีมุมบิดในช่วง -90 ถึง 90 องศา (ครึ่งรอบ) จะใช้ระยะเวลาในการเปลี่ยนทิศทางของแกนล้อไม่เกิน 0.366 วินาทีซึ่งเป็นระยะเวลาที่มีค่าไม่มากเกินไปเนื่องจากหุ่นยนต์มักเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและเลี้ยวด้วยอัตราเร็วต่ำ สำหรับการตรวจรู้มุมบิดของล้อจะใช้เอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดตั้งไว้ที่เพลาด้านหลังของมอเตอร์คือ US Digital, E5-1024-157-I-D-H-D-B ซึ่งมีความละเอียด 1024 ครั้งต่อรอบการหมุน ทำให้สามารถควบคุมความละเอียดของมุมหมุนล้อด้านหลังได้  $\frac{360 \text{ deg}}{100 \times 1024 \times 4 \text{ pulses}}$  หรือประมาณ 0.001 องศาต่อหนึ่งสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์

สรุปว่า อุปกรณ์ของส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลังดังรูปที่ 3.15 ประกอบด้วย

- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปรงถ่าน: Maxon RE35-118783
- เฟืองฮาร์โมนิก: Hi-T Drive, RP14i100
- เอ็นโค้ดเดอร์: US Digital, E5-1024-157-I-D-H-D-B

### 3.6 การกำหนดขนาดล้อแม่เหล็ก

จากคุณลักษณะของแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กดังกล่าวในหัวข้อที่ 3.4.1 ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและผนังเหล็กควรมีค่าน้อย เพื่อให้ได้ล้อแม่เหล็กที่มีแรงดึงดูดสูง จึงควรกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็กมีขนาดเล็กและใกล้เคียงกับขนาดของอุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนให้มากที่สุด เนื่องจากส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้าของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 3.12 มีเฟืองฮาร์โมนิกเป็นองค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร ดังนั้นถ้าเลือกให้ฐานของหุ่นยนต์สร้างจากแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร รวมทั้งเผื่อความสูงของหัวน็อตสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ และระยะความสูงของฐานหุ่นยนต์จากผนังแล้วจะได้ว่า ล้อแม่เหล็กด้านหน้าควรมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 พบว่า แรงดึงดูดแม่เหล็กระหว่างล้อกับผนังเหล็กที่มีความหนา 4



รูปที่ 3.14 ช่วงการทำงานของมอเตอร์ Maxon รุ่น RE35-118783



รูปที่ 3.15 ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง

มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า 30 กิโลกรัมซึ่งมากกว่าค่าที่ออกแบบไว้คือ 23.921 กิโลกรัม แต่การที่ผิวของขอบล้อมีลักษณะเรียบ ล้อแม่เหล็กจึงไถลบนผนังเหล็กได้ง่ายมาก ดังนั้นล้อแม่เหล็กด้านหน้าจึงถูกพิมพ์ลายที่ขอบล้อให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 พบว่าล้อแม่เหล็กไถลบนผนังเหล็กได้ยากขึ้นมาก ในขณะที่ยังคงมีแรงดึงดูดกับผนังมากกว่า 30 กิโลกรัมเช่นเดิม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ล้อแม่เหล็กด้านหน้าควรมีรูปแบบที่ประกอบด้วยแม่เหล็กรูปวงแหวนขนาดใหญ่หนึ่งชิ้นและแผ่นเหล็กตันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตร ซึ่งถูกพิมพ์ลายที่ขอบล้อ ล้อแม่เหล็กจะมีแรงดึงดูดกับผนังเหล็กหนา 4 มิลลิเมตรมากกว่า 30 กิโลกรัมซึ่งมากกว่ากับค่าที่ออกแบบไว้ และน้ำหนักของล้อเท่ากับ 725 กรัม

งานวิจัยนี้เลือกใช้ล้อแม่เหล็กด้านหลังที่มีรูปแบบคือ แม่เหล็กถาวรแรงสูงรูปวงแหวนหนึ่งชิ้นที่ประกอบด้วยตลับลูกปืนทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 3.10 โดยเลือกตลับลูกปืนที่ใช้ในการประกอบที่แต่ละด้านของแม่เหล็กให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตรเพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงกับแม่เหล็กซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตร จะได้แรงดึงดูดระหว่างล้อกับผนังเหล็กเท่ากับ 12 กิโลกรัมซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้คือ 11.180 กิโลกรัม และน้ำหนักของล้อเท่ากับ 148 กรัม

### 3.7 การสร้างหุ่นยนต์

โครงสร้างหุ่นยนต์และการจับยึดอุปกรณ์ถูกออกแบบเบื้องต้นด้วยโปรแกรม CATIA เนื่องจากเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ, การผลิต และทางวิศวกรรม (Computer aided design, manufacturing, and engineering) เพื่อลดโอกาสการเกิดความผิดพลาดจากการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์และเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ก่อนการผลิตจริง สำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูงเช่น ตัวล้อของตลับลูกปืน จะสามารถใช้โปรแกรมนี้สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดให้เป็นคำสั่งจีโค้ด (G code) สำหรับสั่งการทำงานให้กับเครื่องจักรควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer numerical control machine: CNC machine) นอกจากนี้จุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์จะสามารถหาจากโปรแกรมนี้ได้ดังรูปที่ 3.17 พบว่า จุดศูนย์กลางอยู่ในแนวกึ่งกลางของหุ่นยนต์ โดยอยู่หลังจากแนวแกนของล้อด้านหน้าเป็นระยะ (d) 75.403 มิลลิเมตร และสูงกว่าแนวแกนล้อ (h) 43.614 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า



รูปที่ 3.16 ล้อแม่เหล็กที่ถูกพิมพ์ลายที่ขอบล้อ

จุดศูนย์ถ่วงของหุ่นยนต์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม CATIA มีความแตกต่างไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่กำหนดไว้เบื้องต้นในการวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระ

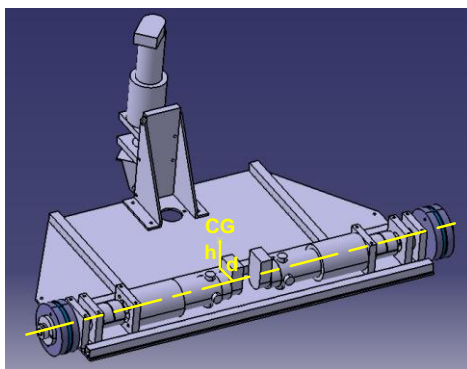
หลังจากการออกแบบหุ่นยนต์ไต่ผนังในโปรแกรม CATIA แล้ว จึงสร้างชิ้นส่วนทั้งหมดและนำมาประกอบร่วมกับล้อแม่เหล็กและอุปกรณ์ขับเคลื่อนล้อได้ดังรูปที่ 3.18 พบว่า หุ่นยนต์มีความกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร และสูง 27 เซนติเมตร โดยมีน้ำหนัก 7.1 กิโลกรัม

เมื่อนำส่วนขับเคลื่อนล้อหน้าทั้งสองด้านมาทดสอบด้วยการจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์พบว่ามอเตอร์สามารถหมุนได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดประมาณ 600 เรเดียนต่อวินาที อัตราเร็วเชิงเส้นสูงสุดของล้อด้านหน้า (และหุ่นยนต์) ( $v_{wheel,max}$ ) จะหาได้จากอัตราเร็วเชิงมุมสูงสุดของมอเตอร์ ( $\phi_{motor,max}$ ) ได้ดังนี้

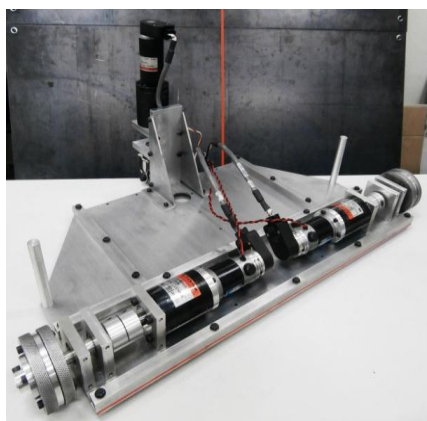
$$v_{wheel,max} = \frac{1}{N} (r \phi_{motor,max})$$

$$v_{wheel,max} = 0.242 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

อย่างไรก็ตามจากทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยการสั่งการด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุด้วยวิธีที่จะอธิบายในบทที่ 4 พบว่า หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยที่ควบคุมอัตราเร็วของล้อด้านหน้าได้ด้วยอัตราเร็วเชิงเส้นสูงสุดประมาณ 0.2 เมตรต่อวินาทีเท่านั้น



รูปที่ 3.17 หุ่นยนต์ไต่ผนังที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง



รูปที่ 3.18 หุ่นยนต์ไต่ผนังที่สร้างขึ้นตามการออกแบบ

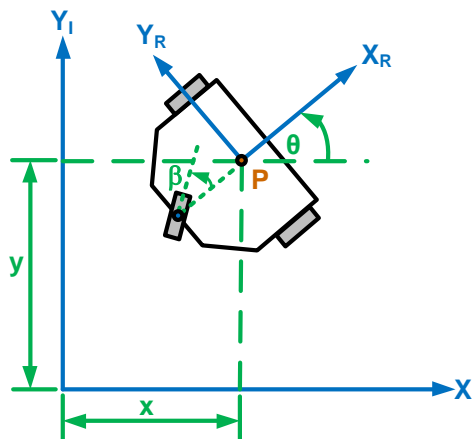
## บทที่ 4

### สมการจลศาสตร์และการควบคุมการเคลื่อนที่

การศึกษาที่มาของสมการจลศาสตร์จะทำให้รู้ข้อจำกัดและลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากต่อออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นอกจากนี้งานวิจัยยังแบ่งตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ออกเป็นสองรูปแบบคือ ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการสั่งการจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ และตัวควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง (Trajectory tracking controller) เพื่อรองรับการใช้งานของหุ่นยนต์รูปแบบต่างๆ เช่น การสำรวจและการตรวจความสมบูรณ์ของผนังเหล็กของถังขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

#### 4.1 การระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์

สำหรับการเคลื่อนที่บนระนาบ จะสามารถระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ได้ด้วยแกนอ้างอิงสองส่วนดังรูปที่ 4.1 ได้แก่ แกนอ้างอิงเฉื่อย (Inertial frame,  $\{I\}$ ) และแกนอ้างอิงหุ่นยนต์ (Robot frame,  $\{R\}$ ) การกำหนดแกนอ้างอิงเฉื่อยจะให้จุดกำเนิดอยู่ที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่คือจุดกึ่งกลางระหว่างล้อด้านหน้าของหุ่นยนต์ โดยมีแกน  $+X_I$  ซึ่งไปทางทิศทางด้านหน้าของหุ่นยนต์ และแกน  $+Z_I$  ซึ่งไปทางด้านบนของหุ่นยนต์ (ไม่แสดงในรูป) แกนอ้างอิงเฉื่อยจะถูกกำหนดให้อยู่กับที่ แต่แกนอ้างอิงหุ่นยนต์จะต้องมีตำแหน่ง (จุด P) และทิศทางของแกน  $+X_R$  จะต้องเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การกระจัดระหว่างจุดกำเนิดของแกนอ้างอิงเฉื่อยไปยังแกนอ้างอิงหุ่นยนต์ในทิศทาง  $+X_I$  และ  $+Y_I$  มีค่าเท่ากับ  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ มุมของ  $X_R$  เมื่อเปรียบเทียบกับแกน  $X_I$  คือ มุม  $\theta$  หมายถึง ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังคือ มุม  $\beta$  จะหาได้จากมุมระหว่างระนาบของล้อด้านหลังเปรียบเทียบกับทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์ ดังนั้นตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่จึงระบุได้ด้วยตัวแปร 3 ตัวคือ การกระจัด  $x$  และ  $y$  และมุม  $\theta$  (มุม  $\beta$  แสดงถึง ทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลัง ซึ่งไม่สามารถระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์)



รูปที่ 4.1 แกนอ้างอิงสำหรับระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่บนระนาบ



ความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงทั้งสองสามารถอธิบายได้ด้วยเมทริกซ์การหมุน (Rotation matrix) รอบแกน  $Z_R$  หรือในแนวตั้งฉากกับระนาบตั้งสมการ (4.1) และทิศทางของหุ่นยนต์ในแกนอ้างอิงทั้งสองมีค่าเท่ากันดังสมการ (4.2)

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{Z}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_I \\ \dot{Y}_I \\ \dot{Z}_I \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

และ 
$$\dot{\theta}_R = \dot{\theta}_I \quad (4.2)$$

เมื่อนำสมการย่อยที่ 1 และ 2 ในสมการ (4.1) มาเขียนรวมกับสมการ (4.2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่บนระนาบตั้งสมการ (4.3)

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{Y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_I \\ \dot{Y}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

## 4.2 เงื่อนไขบังคับนอกระบบ (Nonholonomic Constraint) และสมการจลศาสตร์ (Kinematic Equation)

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่กำหนดให้ล้อหมุนโดยไม่ไถลจะทำให้ล้อของหุ่นยนต์ต้องกลิ้งด้วยความเร็วเชิงมุมโดยสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์ และเป็นการบังคับไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวแกนของล้อได้ การจำกัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ลักษณะนี้เป็นเงื่อนไขแบบนอกระบบซึ่งเขียนเป็นสมการ [27] ได้ดังนี้

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0$$

โดยสามารถจัดรูปได้ดังสมการ (4.4)

$$\begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.4)$$

ในทางกลับกัน ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขแบบนอกระบบสามารถหาได้จากปริภูมิศูนย์ (Null space) ของเมทริกซ์แรกในสมการ (4.4)

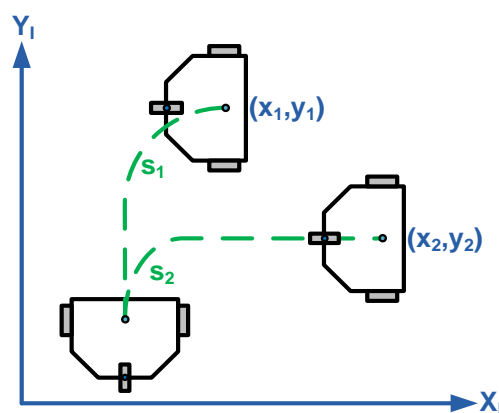
$$N([\sin \theta \quad -\cos \theta \quad 0]) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น สมการจลศาสตร์ของหุ่นยนต์ คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่  $v$  คือความเร็วในการเคลื่อนที่ไปทิศทางข้างหน้าของหุ่นยนต์ (ทิศทาง  $+X_R$ ) และ  $\omega$  คือความเร็วในการหมุนของหุ่นยนต์

เนื่องจากเงื่อนไขแบบนอนโฮโลโนมิกจำกัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามจำนวนเงื่อนไขที่ใช้สำหรับกรณีนี้ การเคลื่อนที่มีจำนวนหนึ่งเงื่อนไข ทำให้จำนวนองศาอิสระ (Degree of freedom) ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ลดลงเหลือเท่ากับ 2 โดยสังเกตได้จากสมการจลศาสตร์ในสมการ (4.5) ในขณะที่จำนวนตัวแปรที่จำเป็นต่อการระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์คือ  $x$ ,  $y$  และ  $\theta$  (จำนวน 3 ตัว) ดังนั้นการใช้เงื่อนไขแบบนอนโฮโลโนมิกจึงอาจทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่มีความซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้เงื่อนไขแบบนอนโฮโลโนมิกยังไม่สามารถหาปริพันธ์ได้ (Non-integrable) ทำให้สมการจลศาสตร์ของหุ่นยนต์ต้องอยู่ในรูปเชิงอนุพันธ์ (ความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่) โดยไม่สามารถแปลงสมการให้อยู่ในรูปปริพันธ์ (ความสัมพันธ์ของตำแหน่งในการเคลื่อนที่) ยกตัวอย่างดังรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า ระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่สามารถบ่งบอกเส้นทาง การเคลื่อนที่และอาจหมายถึงตำแหน่งหุ่นยนต์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 ความแตกต่างของตำแหน่งของหุ่นยนต์  
เมื่อระยะทางการเคลื่อนที่แต่ละเส้นทางเท่ากัน ( $s_1 = s_2$ )

เนื่องจากหุ่นยนต์ถูกขับเคลื่อนด้วยล้อด้านหน้าทั้งสอง (การขับเคลื่อนล้อด้านหลังไม่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่) ดังนั้นลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จึงเปรียบเสมือนหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อแยกกันอย่างอิสระ (Differential drive robot) ซึ่งมีสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า ดังนี้

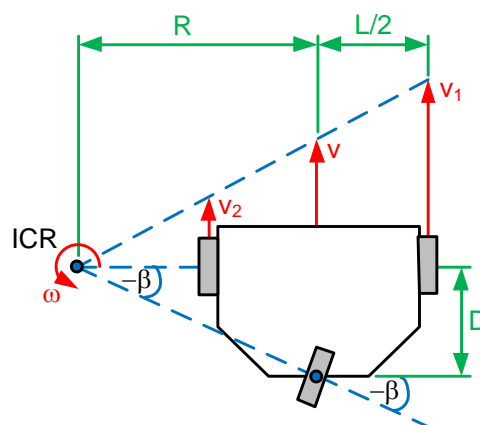
$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{N} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

โดย  $r$  คือ รัศมีของล้อด้านหน้า (กำหนดล้อสองข้างให้มีขนาดเท่ากัน),  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างล้อหน้าทั้งสอง,  $N$  คือ อัตราทดของเกียร์ที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังล้อ (ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้าทั้งสองข้างเป็นอุปกรณ์รุ่นเท่ากัน),  $\dot{\phi}_1$  และ  $\dot{\phi}_2$  คือ อัตราเร็วการหมุนของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อด้านหน้าข้างขวาและซ้ายตามลำดับ

สมการจลศาสตร์ผกผันจะหาได้จากส่วนกลับของสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้าคือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \frac{N}{r} \begin{bmatrix} 1 & L/2 \\ 1 & -L/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

นอกจากการเคลื่อนที่ของล้อด้านหน้าทั้งสองจะสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามสมการจลศาสตร์แล้ว ล้อด้านหลังของหุ่นยนต์จะต้องมีทิศทางแกนหมุนสอดคล้องกับลักษณะของหุ่นยนต์ ในขณะที่หุ่นยนต์เลี้ยวโค้ง ล้อด้านหลังจะต้องเปลี่ยนทิศทางแกนหมุนให้สอดคล้องกับความเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าทั้งสอง ( $v_1$  และ  $v_2$ ) เพื่อให้มีจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะ (Instantaneous center of rotation, ICR) เกิดขึ้นเพียงจุดเดียว ดังรูปที่ 4.3 โดยจะสังเกตเห็นว่า จุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะจะอยู่ในแนวแกนหมุนของล้อด้านหน้าเสมอ ยกเว้นการเคลื่อนที่ทิศทางไปข้างหน้าที่จะต้องกำหนดให้ระนาบของล้อด้านหลังชี้ไปทางด้านหน้าของหุ่นยนต์และไม่มีจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะ



รูปที่ 4.3 การเลี้ยวโค้งของหุ่นยนต์รอบจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะ

### 4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ

การใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุเพื่อสั่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามทิศทางและอัตราเร็วที่กำหนดทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนผนังเหล็กได้อย่างรวดเร็ว จึงมีประโยชน์ต่อการใช้หุ่นยนต์เพื่อสำรวจพื้นที่บนผนังเหล็ก และยังเป็นกำหนัดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางอีกด้วย

จากลักษณะการเลี้ยวโค้งของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่า ทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังมีความสัมพันธ์กับรูปร่างของหุ่นยนต์คือ

$$\tan(-\beta) = \frac{D}{R}$$

โดยที่  $R$  คือ รัศมีความโค้งของการหมุน (ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของหุ่นยนต์ถึงจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะ) ซึ่งหาได้โดย

$$R = \frac{D}{\tan(-\beta)} \quad (4.8)$$

นอกจากนี้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าจะต้องสัมพันธ์กับอัตราเร็วในการหมุนรอบจุดศูนย์กลางการหมุนชั่วขณะคือ

$$\omega = \frac{v}{R} \quad (4.9)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับอัตราการหมุนของล้อหน้าทั้งสอง ดังสมการย่อยที่ 1 ของสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้าดังสมการ (4.6) จะเขียนสมการ (4.9) ได้ว่า

$$\omega = \frac{1}{R} \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (4.10)$$

โดย  $v_i = \frac{r\dot{\phi}_i}{N}$  คือ อัตราเร็วการหมุนของล้อด้านหน้าข้างขวา ( $i=1$ ) หรือข้างซ้าย ( $i=2$ )

ในขณะเดียวกัน อัตราเร็วของการหมุนของหุ่นยนต์ก็สามารถหาได้จากสมการย่อยที่ 2 ของสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้าดังสมการ (4.6)

$$\omega = \frac{2}{L}(v_1 - v_2)$$

เนื่องจากอัตราการหมุนของหุ่นยนต์มีลักษณะที่สัมพันธ์กับสมการจลศาสตร์ ดังนั้นจึงสรุปจากสมการ (4.10) และสมการย่อยที่ 2 ของสมการ (4.6) ได้ว่า

$$\frac{1}{2R}(v_1 + v_2) = \frac{2}{L}(v_1 - v_2)$$

สามารถจัดรูปใหม่ได้ว่า

$$\left( \frac{2}{L} - \frac{1}{2R} \right) v_1 = \left( \frac{2}{L} + \frac{1}{2R} \right) v_2 \quad (4.11)$$

จากสมการ (4.11) จะสังเกตได้ว่า ถ้ากำหนดอัตราเร็วการหมุนของล้อด้านหน้าข้างหนึ่งก็จะสามารถคำนวณหาอัตราการหมุนของล้อด้านหน้าอีกข้างหนึ่งได้

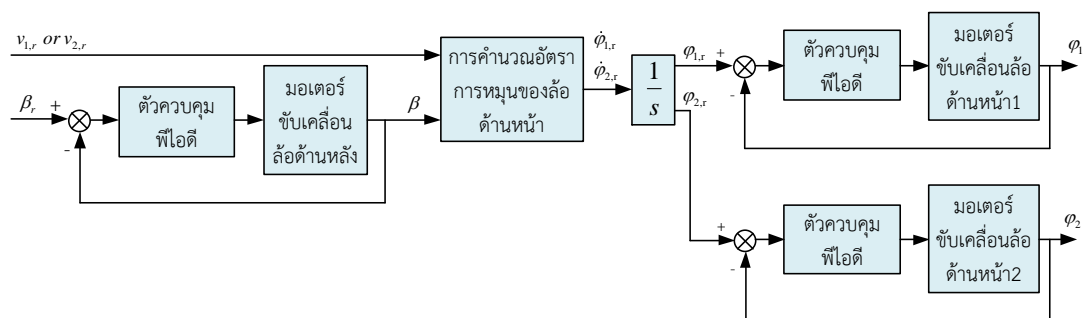
ในการควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและหมุนด้วยอัตราเร็วที่กำหนด จะต้องใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุเพื่อออกคำสั่งได้แก่

- ค่าอ้างอิงอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้า ( $v_{1,r}$  หรือ  $v_{2,r}$ )
- ค่าอ้างอิงทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลัง ( $\beta_r$ )

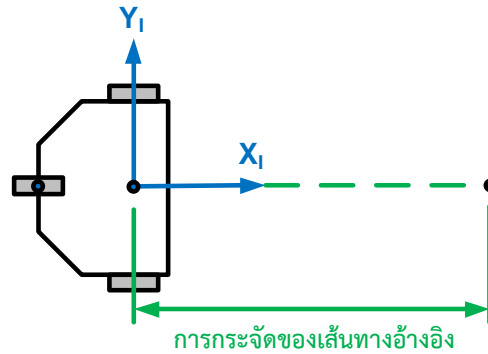
คำสั่งเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 4.4 มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อด้านหลังจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) เพื่อให้มีทิศทางของแกนหมุนของล้อด้านหลังเป็นไปตามค่าอ้างอิงตามที่สั่งการด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ ในขณะเดียวกันทิศทางแกนหมุนที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ที่เชื่อมต่อกับล้อด้านหลังจะถูกนำมาคำนวณร่วมกับค่าอ้างอิงอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าเพื่อหาค่าอ้างอิงอัตราการหมุนของล้อด้านหน้า ( $\dot{\varphi}_{1,r}$  และ  $\dot{\varphi}_{2,r}$ ) ด้วยสมการ (4.8) และ (4.11) ทิศทางของแกนหมุนนี้ยังเป็นเงื่อนไขในการกำหนดว่า คำสั่งอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าที่ได้รับจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุเป็นของล้อด้านขวาหรือด้านซ้าย โดยพิจารณาจากทิศทางการเลี้ยวโค้งของหุ่นยนต์ จากนั้นมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อด้านหน้าทั้งสองจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้ค่าอ้างอิงมุมหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อด้านหน้าทั้งสอง ( $\varphi_{1,r}$  และ  $\varphi_{2,r}$ )

#### 4.4 การควบคุมการติดตามเส้นทางของหุ่นยนต์

เนื่องจากการใช้งานของหุ่นยนต์ใต้น้ำมักใช้ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมระหว่างแผ่นเหล็กที่ใช้ในการประกอบเป็นถังเหล็กขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้เส้นทางอ้างอิงที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางตามแกน  $+X_I$  (ทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์เมื่อเริ่มต้นการเคลื่อนที่) ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ



รูปที่ 4.5 เส้นทางอ้างอิงสำหรับการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง

การควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางอ้างอิงจะแบ่งการควบคุมออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การควบคุมการติดตามเส้นทางและการควบคุมมอเตอร์

#### 4.4.1 การออกแบบตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

ระบบการควบคุมนี้จะเปรียบเทียบตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่กับเส้นทางอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลา เพื่อคำนวณว่า หุ่นยนต์ควรจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือหมุนอย่างไรเพื่อลดค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น

ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแกนอ้างอิงเฉื่อยคือ ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งและทิศทางของเส้นทางอ้างอิง  $(x_r, y_r, \theta_r)$  และหุ่นยนต์  $(x, y, \theta)$  จะถูกนำมาแปลงให้เป็นค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแกนอ้างอิงหุ่นยนต์ด้วยเมทริกซ์ในสมการ (4.3) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

โดยที่  $x_e$  คือ ค่าผิดพลาดของการกระจัดในทิศทางของเส้นทางอ้างอิง

$y_e$  คือ ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง

$\theta_e$  คือ ค่าผิดพลาดของทิศทางการหมุนหุ่นยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางอ้างอิง

อนุพันธ์ของสมการย่อยที่ 1 ของสมการ (4.11) สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= (\dot{x}_r - \dot{x}) \cos \theta - (x_r - x) \dot{\theta} \sin \theta + (\dot{y}_r - \dot{y}) \sin \theta + (y_r - y) \dot{\theta} \cos \theta \\ &= (\dot{x}_r - v \cos \theta) \cos \theta - (x_r - x) \omega \sin \theta + (\dot{y}_r - v \sin \theta) \sin \theta + (y_r - y) \omega \cos \theta \\ &= [-(x_r - x) \sin \theta + (\dot{y}_r - y) \cos \theta] \omega - v + \dot{x}_r \cos \theta + \dot{y}_r \sin \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_e &= y_e \omega - v + \dot{x}_r \cos(\theta_r - \theta_e) + \dot{y}_r \sin(\theta_r - \theta_e) \\
&= y_e \omega - v + \dot{x}_r (\cos \theta_r \cos \theta_e + \sin \theta_r \sin \theta_e) + \dot{y}_r (\sin \theta_r \cos \theta_e - \cos \theta_r \sin \theta_e) \\
\dot{x}_e &= y_e \omega - v + (\dot{x}_r \cos \theta_r + \dot{y}_r \sin \theta_r) \cos \theta_e + (\dot{x}_r \sin \theta_r - \dot{y}_r \cos \theta_r) \sin \theta_e
\end{aligned}$$

จากเงื่อนไขบังคับบนีออนโฮโลโนมิกในสมการ (4.4) จะทำให้พจน์สุดท้ายมีค่าเท่ากับศูนย์ จึงได้ว่า

$$\dot{x}_e = y_e \omega - v + (\dot{x}_r \cos \theta_r + \dot{y}_r \sin \theta_r) \cos \theta_e$$

เนื่องจากสมการย่อยที่ 1 และ 2 ของสมการ (4.5) ได้แก่  $\dot{x} = v \cos \theta$  และ  $\dot{y} = v \sin \theta$  ดังนั้น  $\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta = v \cos^2 \theta + v \sin^2 \theta = v$  จะได้ว่า

$$\dot{x}_e = y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \quad (4.12)$$

อนุพันธ์ของสมการย่อยที่ 2 ของสมการ (4.11) สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{y}_e &= -(\dot{x}_r - \dot{x}) \sin \theta + (x_r - x) \dot{\theta} \cos \theta + (\dot{y}_r - \dot{y}) \cos \theta - (\dot{y}_r - \dot{y}) \dot{\theta} \sin \theta \\
&= [(x_r - x) \cos \theta - (y_r - y) \sin \theta] \omega - (\dot{x}_r - v \cos \theta) \sin \theta + (\dot{y}_r - v \sin \theta) \cos \theta \\
&= -x_e \omega - \dot{x}_r \sin \theta + \dot{y}_r \cos \theta \\
&= -x_e \omega - \dot{x}_r \sin(\theta_r - \theta_e) + \dot{y}_r \cos(\theta_r - \theta_e) \\
&= -x_e \omega - \dot{x}_r [\sin \theta_r \cos \theta_e - \cos \theta_r \sin \theta_e] + \dot{y}_r [\cos \theta_r \cos \theta_e + \sin \theta_r \sin \theta_e] \\
&= -x_e \omega + (-\dot{x}_r \sin \theta_r + \dot{y}_r \cos \theta_r) \cos \theta_e + (\dot{x}_r \cos \theta_r + \dot{y}_r \sin \theta_r) \sin \theta_e \\
\dot{y}_e &= -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \quad (4.13)
\end{aligned}$$

สมการ (4.12), (4.13) และอนุพันธ์ของสมการย่อยที่ 3 ในสมการ (4.11) สามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & y_e \\ 0 & x_e \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_e & 0 \\ \sin \theta_e & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

จะเห็นได้ว่า ระบบที่จะควบคุมมีความไม่เชิงเส้น ดังนั้นตัวควบคุมที่ใช้จึงเลือกให้เป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยกำหนดให้ฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov function) [28] เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและมุม  $\theta_e$  มีค่าอยู่ในช่วง  $-90$  และ  $90$  องศา คือ

$$V = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + \frac{1 - \cos \theta_e}{k_y}$$

โดยที่  $k_y$  คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมการกระจัดในทิศทาง  $y$

อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟคือ

$$\dot{V} = x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{\omega_e \sin \theta_e}{k_y}$$

เมื่อแทนค่าด้วยสมการ (4.12) และ (4.13) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_e (y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e) + y_e (-x_e \omega + v_r \sin \theta_e) + \frac{\omega_e \sin \theta_e}{k_y} \\ \dot{V} &= x_e (v_r \cos \theta_e - v) + \left( y_e v_r + \frac{\omega_r - \omega}{k_y} \right) \sin \theta_e \end{aligned} \quad (4.15)$$

เมื่อเลือกให้กฎการควบคุม (Control law) คือ ความเร็วของหุ่นยนต์ที่ต้องการในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการหมุน ( $v_d$  และ  $\omega_d$ ) ที่คำนวณได้จากความเร็วอ้างอิง, ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ และค่าเกณฑ์ของการควบคุม มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$v_d = v_r \cos \theta_e + k_x x_e \quad (4.16)$$

และ 
$$\omega_d = \omega_r + v_r (k_y y_e + k_\theta \sin \theta_e) \quad (4.17)$$

โดยที่  $k_x$  คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมการกระจัดในทิศทาง  $x$  และ  $k_\theta$  คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์ ถ้าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต้องการ ( $v = v_d$  และ  $\omega = \omega_d$ ) จะทำให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟในสมการ (4.15) กลายเป็น

$$\dot{V} = -k_x x_e^2 - \frac{k_\theta v_r \sin^2 \theta_e}{k_y}$$

จะเห็นได้ว่า  $\dot{V} < 0$  เมื่อ  $k_x, k_\theta \geq 0$  และ  $k_y > 0$  โดยมีทิศทางอ้างอิงคือ ทิศไปข้างหน้า ( $v_r \geq 0$ ) จึงจะทำให้ค่าผิดพลาด  $x_e, y_e$  และ  $\theta_e$  มีเสถียรภาพและเข้าสู่จุดสมดุล (Equilibrium point) ซึ่งมีความผิดพลาดเท่ากับศูนย์ ดังนั้นกฎการควบคุมในสมการ (4.16) และ (4.17) จึงเป็นตัวควบคุมติดตามเส้นทางที่จะนำมาใช้ควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิง

ข้อสังเกตจากตัวควบคุมติดตามเส้นทางคือ จำนวนองศาอิสระในการควบคุมน้อยกว่าจำนวนตัวแปรที่จะต้องควบคุม กล่าวคือ กฎการควบคุมในสมการ (4.16) จะนำค่าผิดพลาดของการกระจัดทิศทาง  $x$  มาคำนวณเพื่อแก้ไขความเร็วอ้างอิงของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ( $v_r$ ) ให้เป็นค่าที่ต้องการ ( $v_d$ ) ในขณะที่กฎการควบคุมในสมการ (4.17) จะต้องแก้ไขค่าผิดพลาดของการกระจัดทิศทาง  $y$



และทิศทางการหมุน (มุม  $\theta$ ) พร้อมกัน ด้วยการแก้ไขความเร็วอ้างอิงในการหมุนของหุ่นยนต์ ( $\omega_r$ ) ให้เป็นค่าที่ต้องการ ( $\omega_d$ ) เนื่องจากเงื่อนไขของฮอโลโนมิกจำกัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทางตามแนวแกนของล้อ จึงไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในทิศทาง  $y$  ได้โดยตรง

#### 4.4.2 การควบคุมมอเตอร์

ผลลัพธ์จากตัวควบคุมการติดตามเส้นทางคือ ความเร็วของหุ่นยนต์ที่ต้องการในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการหมุน ( $v_d$  และ  $\omega_d$ ) จะถูกนำมาคำนวณด้วยสมการจลศาสตร์ผกผันดังสมการ (4.7) เพื่อหาค่าอ้างอิงในการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อด้านหน้าแต่ละข้างด้วยตัวควบคุมพีไอดี

#### 4.4.3 การระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ในการควบคุมการติดตามเส้นทาง

การกระจัด  $x$  และ  $y$  และทิศทาง  $\theta$  ของหุ่นยนต์ถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิงจะหาได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้อุปกรณ์ตรวจรู้สองชนิด ได้แก่ เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) และล้อ มาประมวลผลร่วมกัน เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจรู้ดังกล่าวแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจรู้หลายตัวร่วมกันจะสามารถเลือกใช้ข้อดีและหลีกเลี่ยงข้อเสียของอุปกรณ์ตรวจรู้ได้

โดยทั่วไปตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์จะหาได้จากคำนวณความเร็วการหมุนของเอ็นโค้ดเดอร์ (Odometry) ซึ่งติดตั้งไว้ที่มอเตอร์หรือล้อของหุ่นยนต์ ความเร็วการหมุนล้อแต่ละข้างจะสามารถคำนวณด้วยสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้าดังสมการ (4.6) และ (4.5) ตามลำดับ จะได้ความเร็วของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปทิศทาง  $x$ ,  $y$  และการหมุน  $\theta$  ของหุ่นยนต์ และสามารถนำมาหาการกระจัดของการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\Delta x_j = \dot{x}_j T_s$$

โดยที่  $\Delta x_j$  คือ การกระจัดในทิศทาง  $x$  ที่เปลี่ยนแปลงไปในคาบเวลาของการสุ่มข้อมูล (Sampling period,  $T_s$ ) ครั้งที่  $j$  ดังนั้นการกระจัดตั้งแต่หุ่นยนต์เริ่มต้นเคลื่อนที่ จะหาได้จากการกระจัดในคาบเวลาของการสุ่มข้อมูลครั้งก่อนรวมกับการเปลี่ยนแปลงการกระจัดนี้

$$x_j = x_{j-1} + \Delta x_j \quad (4.18)$$

โดยที่การกระจัดในทิศทาง  $y$  และมุมหมุน  $\theta$  สามารถหาได้ด้วยวิธีการเดียวกัน

อย่างไรก็ตามการคำนวณการหมุนของเอ็นโค้ดเดอร์จะหาได้เพียงค่าประมาณของตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ เนื่องจากอาจมีความผิดพลาดสองประเภทคือ ความผิดพลาดเนื่องจากระบบ (Systematic error) และความผิดพลาดไม่เนื่องจากระบบ (Non-systematic error) [29] ความผิดพลาดเนื่องจากระบบอาจเกิดจากการสร้างขึ้นส่วนของหุ่นยนต์ เช่น ความผิดพลาดจากการผลิตที่ทำให้ขนาดของล้อด้านหน้าทั้งสองล้อไม่เท่ากันพอดี หรือความผิดพลาดจากการประกอบชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ที่อาจทำให้แกนหมุนของล้อด้านหน้าทั้งสองไม่อยู่ในแนวเดียวกัน เป็นต้น นอกจากนี้การประมาณตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ยังอาจเกิดความผิดพลาดไม่เนื่องจากระบบเช่น การเคลื่อนที่ข้ามผ่านอุปสรรคซึ่งทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่บนระนาบของล้อด้านหน้า

ทั้งสองไม่เท่ากัน หรือการไถ่ระหว่างล้อกับพื้นซึ่งทำให้การหมุนของล้อไม่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ความผิดพลาดเหล่านี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้และความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจทำให้การประมาณตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ผิดพลาดมากสำหรับการเคลื่อนที่ระยะทางไกล

ในทางกลับกัน การใช้กล้องในการบันทึกภาพหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่จะสามารถระบุตำแหน่งและทิศทางจากหุ่นยนต์ได้โดยตรง จึงไม่เกิดความผิดพลาดของข้อมูลเช่นเดียวกับการใช้เอ็นโค้ดเดอร์ อย่างไรก็ตามการใช้กล้องเพียงหนึ่งตัวจะสามารถรับรู้ตำแหน่งของวัตถุในภาพได้เพียง 2 มิติเท่านั้น โดยจะต้องติดตั้งกล้องให้มีระนาบรับภาพของกล้อง (Image plane) ขนานกับผนังเหล็กเพื่อให้ได้ภาพที่สามารถระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ได้ตรงกับเคลื่อนที่จริง นอกจากนี้รอบการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการรับและประมวลผลภาพจากกล้องจะใช้คาบเวลาของการสุ่มข้อมูลค่อนข้างมาก (จากการทดสอบพบว่า มีคาบเวลาประมาณครึ่งวินาที) ทำให้ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่ได้จากกล้องมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือ หุ่นยนต์อาจเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอื่นในขณะที่ข้อมูลจากกล้องยังคงไม่เปลี่ยนแปลง การใช้กล้องเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้เพียงชนิดเดียวในการระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์จึงต้องกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ช้ามากหรือต้องใช้คาบเวลาของการสุ่มข้อมูลของโปรแกรมการควบคุมติดตามเส้นทางให้มากขึ้นกว่าปกติซึ่งอาจส่งผลให้สมรรถนะและเสถียรภาพของการควบคุมลดลง [30]

การนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ทั้งสองมาประมวลผลร่วมกันเป็นวิธีที่สามารถปรับปรุงความแม่นยำของตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ และลดคาบเวลาในการสุ่มข้อมูลของโปรแกรมติดตามเส้นทางได้ โดยการแยกการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการติดตามเส้นทางออกจากโปรแกรมการรับและประมวลผลภาพ สำหรับตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่ใช้ในโปรแกรมการควบคุมติดตามเส้นทาง จะต้องเปรียบเทียบข้อมูลจากกล้องของรอบการทำงานปัจจุบันกับรอบการทำงานก่อนหน้า ถ้าข้อมูลของทั้งสองรอบการทำงานแตกต่างกันแสดงว่า ข้อมูลในภาพเป็นตำแหน่งและทิศทางปัจจุบันของหุ่นยนต์ โปรแกรมจะเลือกใช้ข้อมูลจากกล้องโดยตรง แต่ถ้าข้อมูลของทั้งสองรอบการทำงานเหมือนกันอาจจะหมายความว่า การทำงานของโปรแกรมการรับและประมวลผลภาพ ยังไม่จบการทำงานในรอบนั้น ก็จะนำค่าการเปลี่ยนแปลงการกระจัดและการหมุนของหุ่นยนต์จากการคำนวณด้วยเอ็นโค้ดเดอร์มารวมเข้ากับข้อมูลล่าสุดที่ได้จากกล้องด้วยสมการ (4.18)

#### 4.4.4 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ระบบการควบคุมการติดตามเส้นทางอ้างอิงดังรูปที่ 4.6 ถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปซ้อนกันคือการควบคุมการติดตามเส้นทางซึ่งทำงานในรูปนอก และการควบคุมมอเตอร์ซึ่งทำงานในรูปใน ระบบควบคุมจะทำงานโดยเปรียบเทียบตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์กับเส้นทางอ้างอิง ค่าผิดพลาดและความเร็วอ้างอิงของการเคลื่อนที่จะถูกนำมาคำนวณด้วยกฎการควบคุมของตัวควบคุมติดตามการเคลื่อนที่ดังสมการ (4.16) และ (4.17) จะได้ความเร็วของหุ่นยนต์ที่ต้องการในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการหมุน ( $v_d$  และ  $\omega_d$ ) จากนั้นจะคำนวณความเร็วเชิงมุมที่ต้องการของล้อแต่ละข้างด้วยสมการจลศาสตร์ผกผันในสมการ (4.7) จึงได้ค่าปริพันธ์ของความเร็วนี้เป็นตำแหน่งมุมหมุนที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการควบคุมมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อด้านหน้า มุมหมุนของมอเตอร์แต่ละตัวจะถูกนำมา



## บทที่ 5

### โปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้นำระบบควบคุมหุ่นยนต์มาพัฒนาในโปรแกรม LabVIEW 2011 ซึ่งทำงานบนคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Windows 7 เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่สามารถพัฒนาชุดคำสั่งได้ง่าย และสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ NI-cRIO9074 เพื่อใช้ในการควบคุมแบบเวลาจริง นอกจากการคำนวณในระบบควบคุมแล้ว โปรแกรมยังต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ของหุ่นยนต์ด้วยขั้นตอนที่เหมาะสม

#### 5.1 การพัฒนาโปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์ด้วย LabVIEW

โปรแกรม LabVIEW มีการทำงานสองส่วนคือ ส่วนการรับคำสั่งและแสดงผลที่เรียกว่า Front Panel และส่วนการเขียนคำสั่งการทำงานที่เรียกว่า Block Diagram ในส่วน Front Panel จะสามารถรับคำสั่งจากปุ่มกดและสเกลปรับตัวเลขเพื่อใช้เป็นอินพุตการทำงานของคำสั่งในโปรแกรม และแสดงผลด้วยตัวเลขและกราฟได้ ในขณะที่การกำหนดคำสั่งในส่วน Block Diagram จะใช้การเชื่อมต่อระหว่างรูปภาพของคำสั่งแทนการใช้คำสั่งแบบบรรทัด ทำให้เห็นความสัมพันธ์ของคำสั่งและข้อมูลภายในโปรแกรมและสามารถแก้จุดบกพร่อง (Bug) ได้ง่าย นอกจากนี้คำสั่งภายในโปรแกรมยังมีอย่างหลากหลายได้แก่ คำสั่งพื้นฐานที่ใช้ในการเขียนรูปการทำงานและการคำนวณโดยทั่วไป รวมทั้งคำสั่งขั้นสูงเช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นต้น รวมไปถึงคำสั่งที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจสอบ เช่น กล้อง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเครือข่ายบนอินเทอร์เน็ตที่รวบรวมกระทู้คำถามการใช้งานเพื่อแสดงความคิดเห็น การแก้ไขปัญหาและข้อเสนอแนะจึงทำให้มีแนวคิดอย่างหลากหลายในการเขียนชุดคำสั่ง ดังนั้นโปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์ด้วย LabVIEW จึงง่ายต่อการพัฒนาและการใช้งานอย่างมาก

ถึงแม้ว่าคอมพิวเตอร์จะทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows ซึ่งให้เน้นการสื่อสารกับผู้ใช้ และให้ความสำคัญกับการทำงานของโปรแกรมต่างๆ เท่ากัน [31] จึงมักทำให้โปรแกรมตอบสนองได้ค่อนข้างช้าและเหมาะสมกับโปรแกรมที่ไม่ต้องการความแน่นอนของเวลาที่ใช้ในการทำงานเท่านั้น อย่างไรก็ตามการสร้างโปรเจกแบบเวลาจริง (Real time project) ในโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับอุปกรณ์ NI-cRIO9074 ทำให้โปรแกรมสามารถทำงานแบบเวลาจริงได้ด้วยการเลือกเป้าหมายที่จะใช้ในการประมวลผลคำสั่งได้แก่ คอมพิวเตอร์ (Host), ตัวประมวลผลแบบเวลาจริง (Real time processor) และอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array, FPGA) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ NI-cRIO9074

โปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์จึงต้องแบ่งออกเป็นหลายส่วนเพื่อประมวลผลบนเป้าหมายที่เหมาะสม โดยส่วนของโปรแกรมที่ต้องการให้ทำงานแต่ละลูปให้เสร็จภายในเวลาที่กำหนดหรือเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผ่านมอดูลไอโอ (I/O module) ของอุปกรณ์ NI-cRIO9074 จะต้องเลือกให้ประมวลผลด้วยตัวประมวลผลแบบเวลาจริงหรืออุปกรณ์ลอจิกแบบ

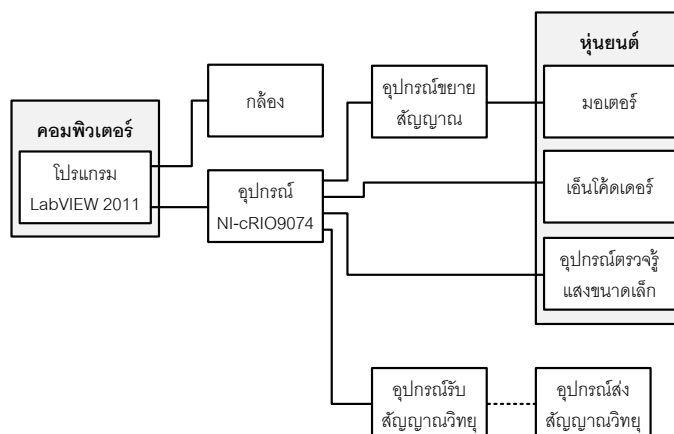
โปรแกรมได้ สำหรับส่วนอื่นของโปรแกรมที่ไม่ต้องการความแม่นยำของเวลาในการทำงานหรือเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์จะต้องเลือกให้ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

## 5.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับโปรแกรม

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกใช้ในการสั่งการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากกล่องเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยตรงด้วยสายสัญญาณ USB ดังนั้นโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการรับและประมวลผลจึงต้องเลือกให้ประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ในขณะที่อุปกรณ์อื่นๆ เชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ NI-cRIO9074 จึงต้องประมวลผลโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์เหล่านี้ด้วยตัวประมวลผลแบบเวลาจริงและอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ ดังนั้นโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์จึงสามารถทำงานแบบเวลาจริงได้

คำสั่งของโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานของหุ่นยนต์ได้แก่

- ส่วนขับเคลื่อนล้อ
  - ผลลัพธ์จากตัวควบคุมการเคลื่อนที่จะถูกจ่ายเป็นสัญญาณแรงดันจากมอดูลแอนะล็อกเอาต์พุต (Analog output module) ของอุปกรณ์ NI cRIO-9074 ไปขยายกำลังด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ในส่วนขับเคลื่อนล้อ รวมทั้งต้องอ่านสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ผ่านทางมอดูลดิจิทัลอินพุต (Digital input module) เพื่อป้อนกลับเข้าสู่ระบบควบคุม
- การรับคำสั่งจากอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณวิทยุ
  - สัญญาณจากการสั่งการเคลื่อนที่ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณวิทยุและเข้าสู่มอดูลดิจิทัลอินพุต (Digital input module) เพื่อคำนวณค่าอ้างอิงของอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าและทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์
- การรับและประมวลผลภาพ
  - โปรแกรมจะต้องค้นหาตำแหน่งพอร์ตที่กล่องเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ แล้วรับภาพมาประมวลผลเพื่อกำหนดข้อมูลเกี่ยวกับเส้นทางอ้างอิงและหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ รวมทั้งการแสดงผลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับโปรแกรม

- การกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ของล้อแม่เหล็กด้านหลัง  
 เนื่องจากทิศทางแกนหมุนของล้อแม่เหล็กด้านหลังของหุ่นยนต์จะต้องถูกควบคุมให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดังนั้นก่อนการสั่งการเคลื่อนที่หุ่นยนต์จึงต้องตั้งตำแหน่งของล้อด้านหลังให้มีแกนหมุนขนานกับแนวแกนหมุนของล้อด้านหน้าเป็นตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อให้รู้ทิศทางแกนหมุนได้อย่างแน่ชัด แต่การใช้เอ็นโค้ดเดอร์แบบเพิ่มค่า (Incremental encoder) ซึ่งหามุมหมุนได้จากการนับจำนวนสัญญาณที่เกิดขึ้นตามการหมุนที่เพลลาของมอเตอร์ (และเอ็นโค้ดเดอร์) มีค่าเท่ากับศูนย์ทุกครั้งที่เริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม ดังนั้นเอ็นโค้ดเดอร์ชนิดนี้จึงไม่สามารถระบุทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแสงขนาดเล็ก (Photomicrosensor) เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งเริ่มต้นของล้อด้านหลัง โปรแกรมที่ใช้ในการสั่งการทำงานของหุ่นยนต์จึงต้องสามารถควบคุมทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังให้อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นด้วยอุปกรณ์ดังกล่าว

### 5.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์ประกอบด้วย โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้แก่ การสั่งการเคลื่อนที่ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุและการติดตามเส้นทาง รวมถึงโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัดอื่นๆ เช่น กล้องและอุปกรณ์ตรวจวัดแสงขนาดเล็ก โดยมีขั้นตอนการทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้งานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของแต่ละโปรแกรม

#### 5.3.1 โปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ

การควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและทิศทางที่กำหนด จะใช้โปรแกรมนี้นในการรับคำสั่งจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ จะได้ค่าอ้างอิงอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าและทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วและทิศทางที่กำหนด

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 5.2 เริ่มต้นจากการอ่านค่าเริ่มต้นของตำแหน่งก้านโยกของอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่มีการส่งการเคลื่อนที่ให้กับหุ่นยนต์ หลังจากนั้นแกนหมุนของล้อด้านหลังจะถูกกำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น แล้วจึงเริ่มต้นการส่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยการบังคับก้านโยกของอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุเพื่อส่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ค่าอ้างอิงทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังจะถูกใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง ทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังขณะปัจจุบันจะถูกนำมาคำนวณร่วมกับค่าอ้างอิงอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าตามลักษณะการเลี้ยวโค้งของหุ่นยนต์และสมการจลศาสตร์ผกผันเพื่อหาค่าอ้างอิงของมุมหมุนสำหรับการควบคุมมอเตอร์ในส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้า โปรแกรมจะทำงานด้วยขั้นตอนนี้จนกว่าผู้ใช้งานจะกดปุ่มหยุดในหน้าต่างรับคำสั่งของโปรแกรมจึงสิ้นสุดการทำงาน

### 5.3.2 โปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง

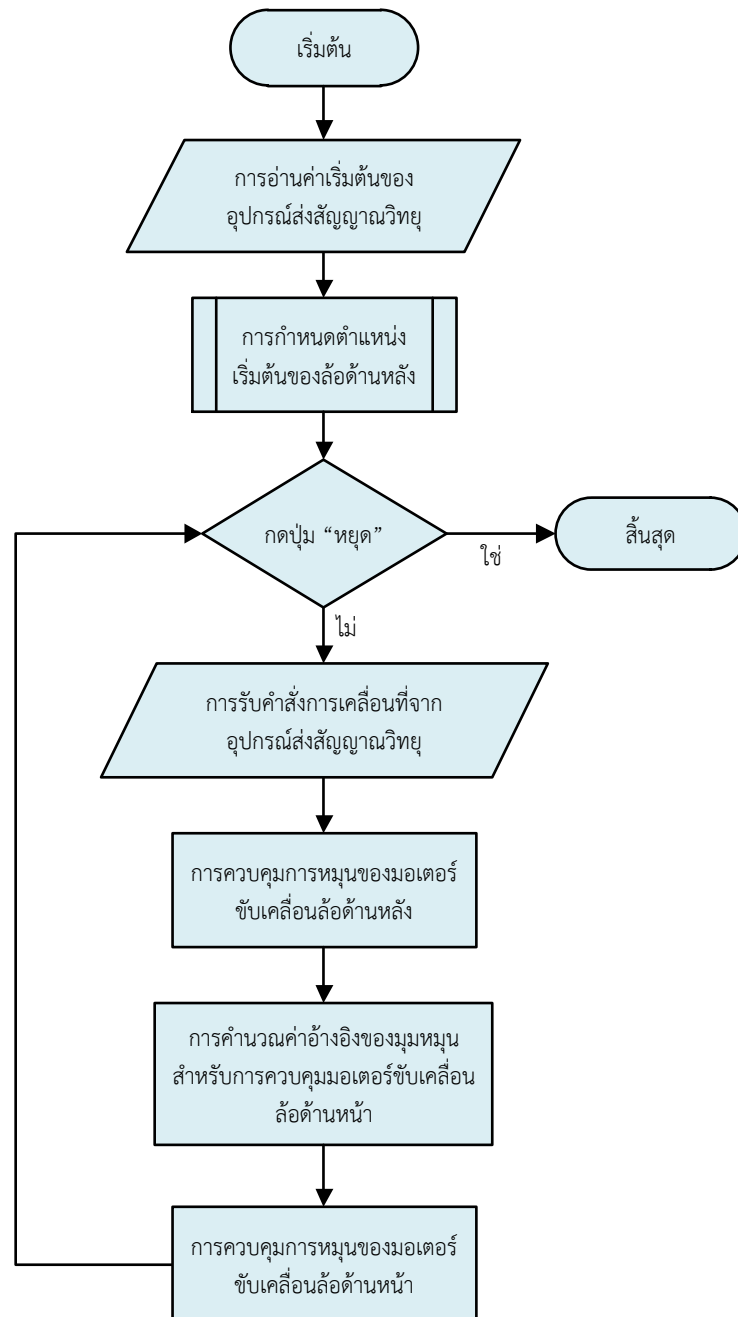
โปรแกรมนี้ใช้ตัวควบคุมติดตามเส้นทางโดยนำตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ได้แก่ เอ็นโค้ดเดอร์และกล้อง มาเปรียบเทียบกับเส้นทางอ้างอิงเพื่อควบคุมมอเตอร์ที่ส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหน้าแต่ละข้าง ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางอ้างอิงได้

เมื่อกำหนดการกระจัด อัตราเร็ว และอัตราเร่งของเส้นทางอ้างอิงแล้ว โปรแกรมจะทำงานดังขั้นตอนในรูปที่ 5.3 โดยเริ่มจากกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของล้อด้านหลังของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแสงขนาดเล็ก จากนั้นหุ่นยนต์จะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิง โดยตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่จะนำมาใช้ในระบบควบคุมได้มาจากภาพที่กล้องถ่ายได้มาประมวลค่าร่วมกับข้อมูลจากเอ็นโค้ดเดอร์ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่จนกว่าจะจบเส้นทางที่กำหนดไว้หรือผู้ใช้กดปุ่ม “หยุด” ระหว่างการทำงาน

### 5.3.3 โปรแกรมการรับและประมวลผลภาพ

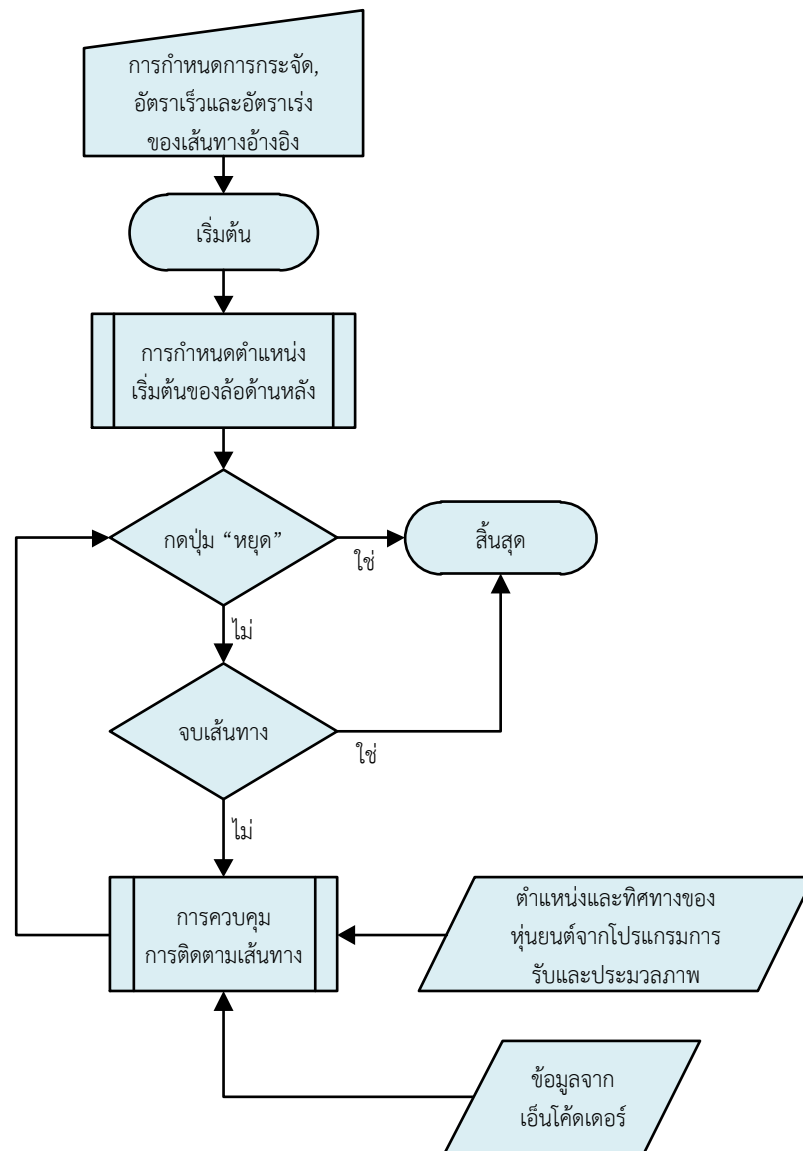
โปรแกรมนี้ใช้ในการกำหนดทิศทางของเส้นทางอ้างอิงรวมทั้งหาค่าตำแหน่งและทิศทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากการประมวลผลภาพโดยเปรียบเทียบกับทิศทางอ้างอิงนี้ ดังนั้นโปรแกรมนี้นี้จึงต้องใช้ร่วมกับโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางเสมอ

เมื่อหุ่นยนต์อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น (ก่อนการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง) โปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนดังรูปที่ 5.4 โดยเริ่มรับภาพที่ได้จากกล้องแล้วแสดงในหน้าต่างแสดงผล จากนั้นจึงกำหนดขอบเขตที่สนใจ (Region of interest, ROI) รูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5.5 (ก) โปรแกรมจะตรวจหาเส้นตรงที่อยู่ภายในขอบเขตที่สนใจแล้วแสดงบนหน้าต่างแสดงผล เส้นตรงนี้ถูกกำหนดให้เป็นทิศทางอ้างอิงสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หลังจากนั้นจะต้องกำหนดบริเวณที่สนใจรูปวงกลมให้ครอบคลุมรูปวงกลมสองรูปที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์ดังรูปที่ 5.5 (ข) โปรแกรมจะตรวจหารูปวงกลมที่อยู่ภายในขอบเขตที่สนใจซึ่งจะเลื่อนตำแหน่งตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ตำแหน่งของรูปวงกลมทั้งสองจะถูกคำนวณเป็นตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์แล้วจึงส่งค่าไปยังโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางแล้ว จึงสามารถกดปุ่มหยุดเพื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมการรับและประมวลผลภาพ



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์  
ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ





รูปที่ 5.3 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง

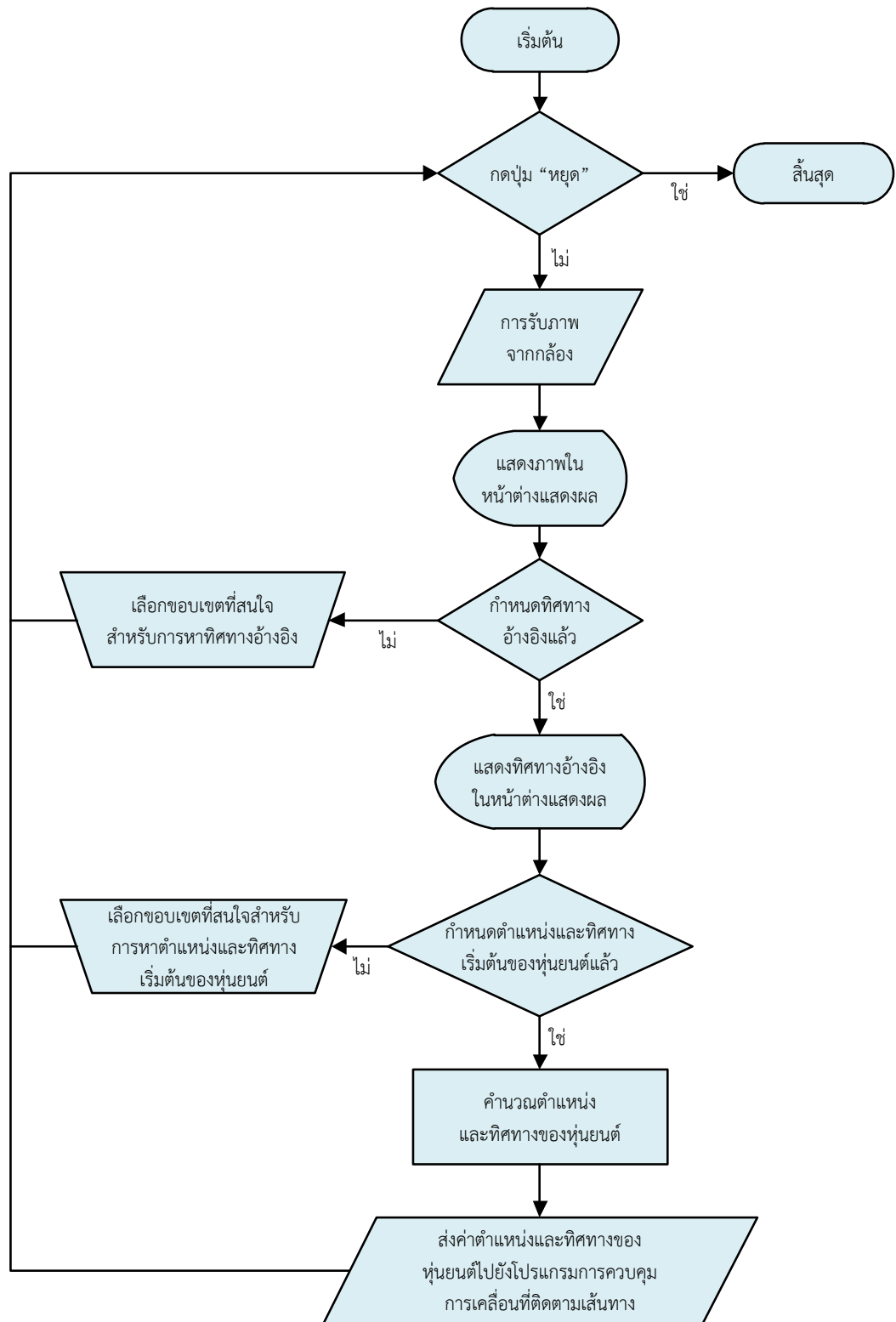
ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่หาด้วยโปรแกรมนี้ได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งของวงกลมสองรูปที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์และทิศทางอ้างอิง ในรูปที่ 5.6 (ก) ตำแหน่งของหุ่นยนต์จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของตำแหน่งของรูปวงกลมทั้งสองในแต่ละทิศทาง (ทิศทาง  $x$  และ  $y$ ) ส่วนทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์จะกำหนดให้เป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างจุดศูนย์กลางของวงกลมทั้งสอง ก่อนการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางหุ่นยนต์อาจมีตำแหน่งและทิศทางคลาดเคลื่อนจากทิศทางอ้างอิงดังรูปที่ 5.6 (ข) อย่างไรก็ตามการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 5.6 (ค) จะทำให้มีค่าเท่ากับศูนย์  $(x_0, y_0) = (0, 0)$  ในขณะที่ทิศทางเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับมุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางอ้างอิง  $(\theta_0)$  ซึ่งให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ของการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่

นอกจากตำแหน่งเริ่มต้น โปรแกรมจะหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์โดยเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นและทิศทางอ้างอิงดังรูปที่ 5.6 (ง) ระยะห่างระหว่างตำแหน่งปัจจุบันกับตำแหน่งเริ่มต้นตามทิศทางอ้างอิงและตั้งฉากกับทิศทางอ้างอิงคือ ตำแหน่ง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ และทิศทางของหุ่นยนต์คือ มุมแตกต่างระหว่างทิศทางไปข้างหน้าและทิศทางอ้างอิง ตำแหน่งของหุ่นยนต์จะถูกแปลงหน่วยจากจุดภาพ (Pixel) ให้เป็นหน่วยเมตร สุดท้ายจึงส่งค่าตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่หาได้จากภาพไปยังโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง

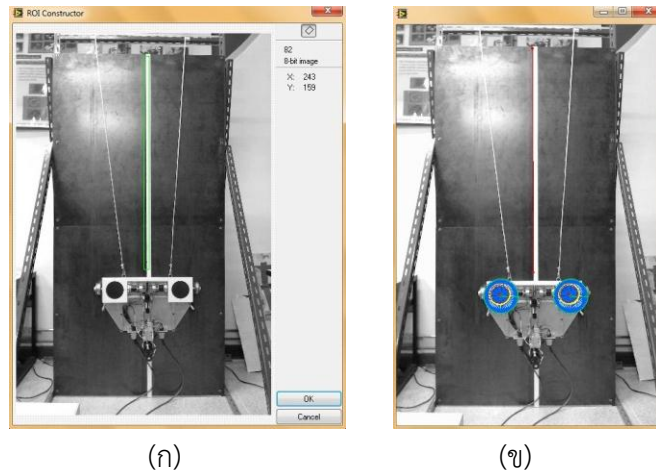
#### 5.3.4 โปรแกรมการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของล้อแม่เหล็กด้านหลัง

ล้อด้านหลังจะต้องมีทิศทางแกนหมุนขนานกับแนวแกนของล้อด้านหน้าก่อนเริ่มต้นการเคลื่อนที่เพื่อให้มั่นใจว่า ล้อด้านหลังจะมีทิศทางของแกนหมุนสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ขั้นตอนของโปรแกรมหาดังรูปที่ 5.7 เริ่มต้นจากการตรวจสอบว่าล้อด้านหลังอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นหรือไม่ ในกรณีที่ล้อด้านหลังไม่อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น โปรแกรมก็จะกำหนดให้อุปกรณ์ NI cRIO-9074 จ่ายแรงดันต่ำไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ในส่วนขับเคลื่อนล้อด้านหลัง ทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังจะเปลี่ยนไปจนกว่าอุปกรณ์ตรวจรู้จะตรวจพบตำแหน่งของล้อ จากนั้นจึงสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมนี้อีกแล้วกลับเข้าสู่ขั้นตอนต่อไปของโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรมรับและประมวลผลภาพ



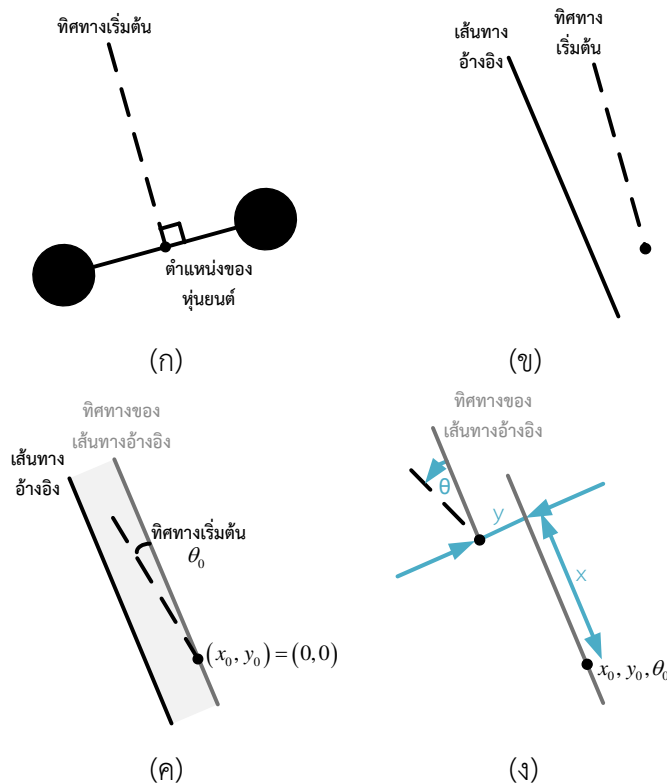
(ก)

(ข)

## รูปที่ 5.5 การเลือกขอบเขตที่สนใจ

(ก) รูปสี่เหลี่ยมสำหรับการหาทิศทางอ้างอิง

(ข) รูปวงกลมสำหรับการหาตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของหุ่นยนต์



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

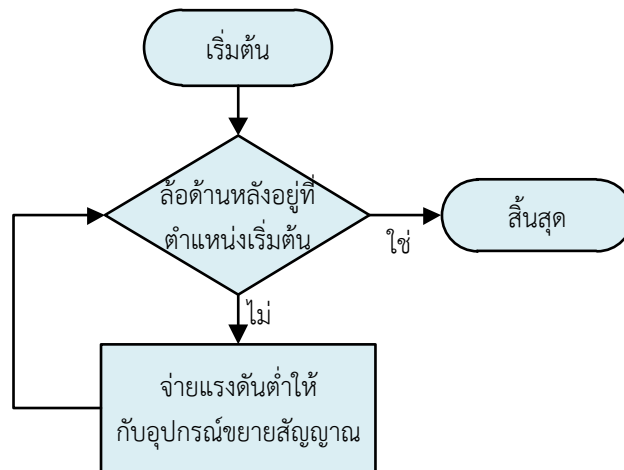
รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์โดยเปรียบเทียบกับทิศทางอ้างอิง

(ก) การระบุตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของหุ่นยนต์ด้วยรูปวงกลมทั้งสองที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์

(ข) การเปรียบเทียบตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์กับเส้นทางอ้างอิง

(ค) การกำหนดตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของหุ่นยนต์

(ง) การหาตำแหน่งและทิศทางระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของลือดแม่เหล็กด้านหลัง

## บทที่ 6

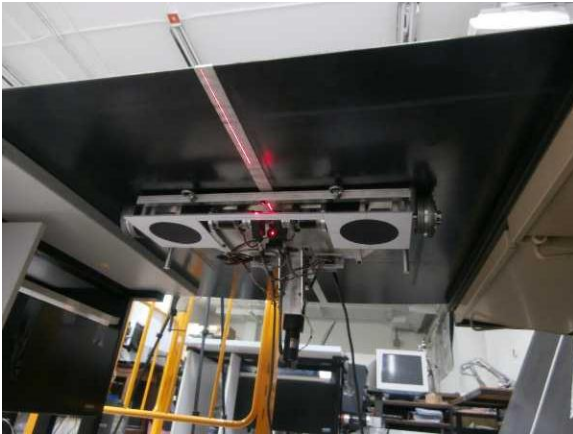
### การทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์

หลังจากการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนัง การศึกษาสมการจลศาสตร์และตัวควบคุม การเคลื่อนที่รวมทั้งพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้ว หุ่นยนต์ไต่ผนังจึงถูกนำมาทดสอบการใช้งานโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การทดสอบการยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็ก ระบายเอียง และการทดสอบการเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นทางอ้างอิงบนผนังเหล็กแนวตั้ง โดยผนังเหล็กที่ใช้ในการทดสอบทั้งสองส่วนมีลักษณะแบนและมีความหนา 4 มิลลิเมตร

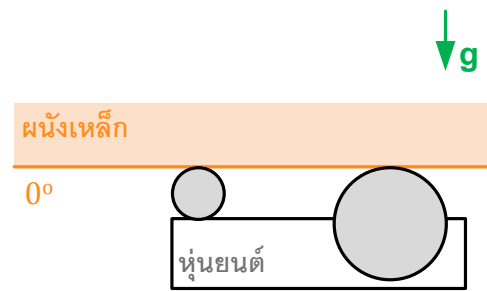
#### 6.1 การทดสอบการยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กระบายเอียง

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อพิสูจน์ว่าล้อแม่เหล็กที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 สามารถติดตั้งกับหุ่นยนต์ไต่ผนังเพื่อยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังเหล็กระบายเอียง และตัวควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการสั่งการจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุตั้งอธิบายในหัวข้อที่ 4.3 สามารถบังคับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ตามทิศทางและอัตราเร็วที่กำหนด ถึงแม้ว่าจากการเปรียบเทียบแรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กกับค่าที่วิเคราะห์ได้จากแผนภาพวัตถุอิสระจะพบว่า แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กด้านหน้ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ และพบว่า แรงดึงดูดของล้อแม่เหล็กด้านหลังจะมีค่ามากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ รวมทั้งส่วนขับเคลื่อนล้อมีแรงบิดมากพอที่จะขับเคลื่อนให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนผนังเหล็กระบายเอียงได้ อย่างไรก็ตามหุ่นยนต์ไต่ผนังที่สร้างขึ้นมีพารามิเตอร์ไม่ตรงกับค่าเบื้องต้นที่กำหนดไว้ในการวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระ ดังนั้นจึงต้องทดสอบเพื่อให้มั่นใจว่า ล้อแม่เหล็ก ส่วนขับเคลื่อนล้อและหุ่นยนต์ไต่ผนังสามารถใช้งานตามที่ต้องการได้จริง

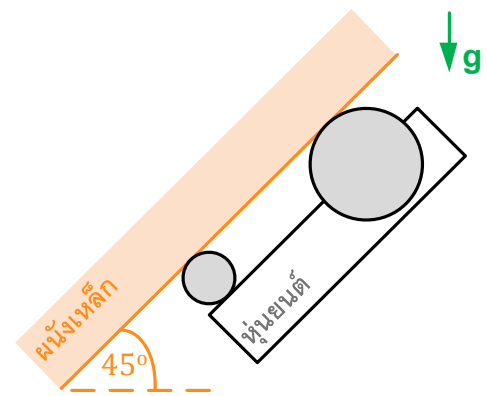
ในการทดสอบนี้หุ่นยนต์ไต่ผนังที่ประกอบล้อแม่เหล็ก ส่วนขับเคลื่อนล้อและอุปกรณ์ต่างๆ แล้ว จะต้องยึดเกาะบนผนังเหล็กที่มีระนาบเอียงต่างๆ และเคลื่อนที่ตามการสั่งการด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุ จากรูปที่ 6.1 ถึง 6.8 จะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์ไต่ผนังสามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่ได้โดยไม่หลุดออกจากผนังเหล็กที่มีระนาบเอียงตั้งแต่ 0 ถึง 315 องศา แสดงว่า ล้อแม่เหล็กสามารถสร้างแรงดึงดูดได้อย่างเพียงพอที่จะทำให้หุ่นยนต์ยึดเกาะบนผนังเหล็กได้โดยไม่หล่น และอุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนล้อสามารถสร้างแรงบิดเพียงพอต่อการขับเคลื่อนหุ่นยนต์บนระนาบเอียงได้ นอกจากนี้ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยการสั่งการจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุยังสามารถบังคับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไต่ผนังให้เคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการด้วยอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการหมุนที่กำหนด



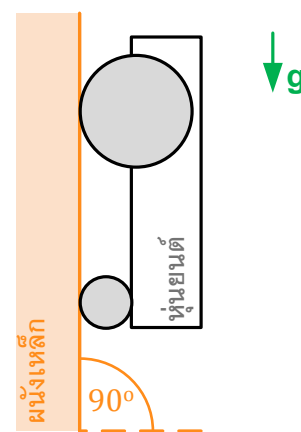
รูปที่ 6.1 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 0 องศา

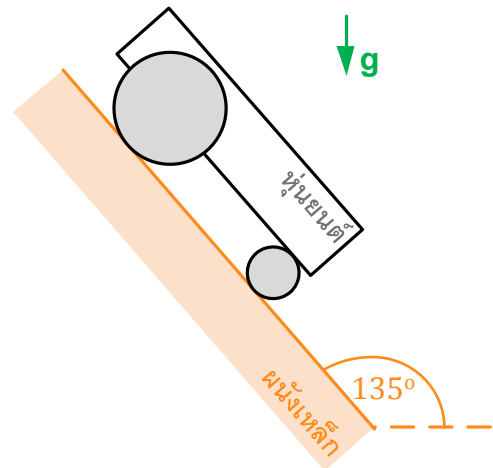


รูปที่ 6.2 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 45 องศา

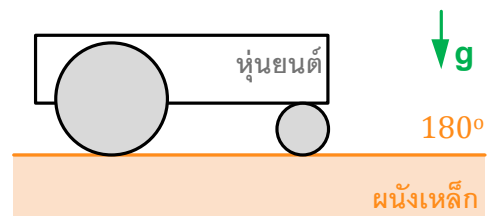


รูปที่ 6.3 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 90 องศา

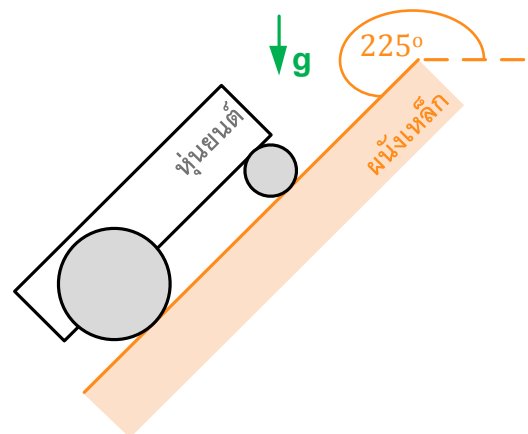
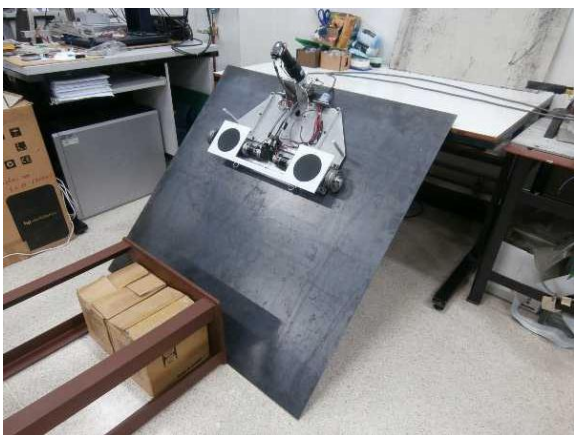




รูปที่ 6.4 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผืนเหล็กเอียง 135 องศา

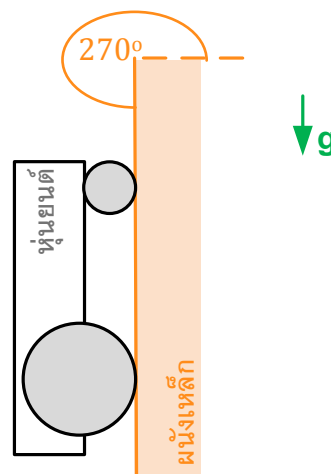


รูปที่ 6.5 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผืนเหล็กเอียง 180 องศา

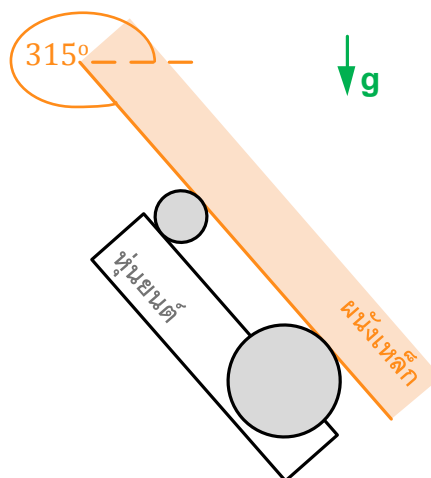


รูปที่ 6.6 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผืนเหล็กเอียง 225 องศา





รูปที่ 6.7 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 270 องศา



รูปที่ 6.8 การยึดเกาะและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังเหล็กเอียง 315 องศา

## 6.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิงบนผนังเหล็กแนวตั้ง

การทดสอบนี้ต้องการเปรียบเทียบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อไม่ใช้และใช้ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางดังอธิบายในหัวข้อที่ 4.4 ชุดการทดสอบดังรูปที่ 6.9 ประกอบด้วยผนังเหล็กที่มีระนาบในแนวตั้ง โดยติดตั้งกล้องหนึ่งตัวไว้เป็นระยะห่างจากผนังเหล็กประมาณ 1.6 เมตรเพื่อให้สามารถถ่ายภาพได้ครอบคลุมพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์บนผนังเหล็ก ระนาบของกล้องจะต้องอยู่ในแนวตั้งและขนานกับผนังเหล็กเพื่อให้ภาพจากกล้องมีสัดส่วนสมจริงและไม่บิดเบี้ยว (เพื่อให้โปรแกรมการรับและประมวลผลภาพสามารถอ่านค่าตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ได้อย่างถูกต้อง)



รูปที่ 6.9 การจัดชุดการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนผนังแนวตั้ง

เส้นทางอ้างอิงที่จะใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นเส้นตรงในแนวตั้งและแนวเอียง 25 องศา โดยมีระยะทาง 1.2 และ 1 เมตรตามลำดับ และมีทิศทางจากด้านล่างไปยังด้านบนของเส้นทาง นอกจากนี้ยังกำหนดให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์กับเวลาเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เคลื่อนที่กับเวลาจึงเป็นรูปตัวอักษรเอส) กล่าวคือ อัตราเร็วจะเริ่มต้นจากศูนย์ แล้วเพิ่มด้วยอัตราเร่งคงที่ จนกระทั่งอัตราเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงค่าอัตราเร็วสูงสุดที่กำหนด อัตราเร็วจะคงที่อยู่ที่ค่าสูงสุดจนกระทั่งก่อนจบการเคลื่อนที่ อัตราเร็วจะลดลงด้วยอัตราเร่งคงที่ที่มีขนาดเท่ากับอัตราเร่ง (ในช่วงต้นของการเคลื่อนที่) เมื่ออัตราเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์จึงจบเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยมีระยะทางที่เคลื่อนที่ทั้งหมดเป็นไปตามที่ต้องการ การกำหนดอัตราเร็วการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ดีกว่าการกำหนดให้มีความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น เนื่องจากฟังก์ชันขั้นมีอัตราเร่งและหน่วงสูงซึ่งมีโอกาสที่ล้อของหุ่นยนต์จะไถลบนพื้นมาก [32] ในการทดสอบนี้จะกำหนดให้อัตราเร็วสูงสุดมีค่าเท่ากับ 10 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่มีอัตราเร็วแตกต่างกัน สำหรับอัตราเร่งและการหน่วงจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับอัตราเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ในแต่ละกรณี คือ 10 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ทำให้เส้นทางนี้ใช้ระยะเวลา 1 วินาทีในการเปลี่ยนอัตราเร็วระหว่างหยุดนิ่งและอัตราเร็วสูงสุด ระยะเวลาในการเร่งและหน่วงอัตราเร็วของหุ่นยนต์นี้ถือว่าไม่มากเกินไปจนทำให้อัตราเร็วเปลี่ยนแปลงรวดเร็วเกินไป อีกทั้งยังเป็นระยะเวลาที่ไม่มากเกินไปเพื่อให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ตามเส้นทางส่วนใหญ่มีค่าเท่ากับอัตราเร็วสูงสุดที่ต้องการ (การตรวจสอบรอยเชื่อมต่อต้องเลื่อนอุปกรณ์ด้วยอัตราเร็วคงที่) ดังนั้นจึงสามารถสรุปค่าอ้างอิงของเส้นทางนี้ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s - \text{curve trajectory} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{trapezoidal trajectory} \\ 0 \end{bmatrix}$$

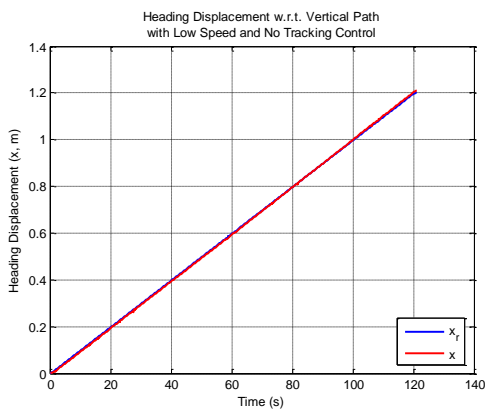
## 6.2.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

ในการทดสอบแรก ล้อด้านหน้าแต่ละข้างจะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งถูกควบคุมให้หมุนตามตำแหน่งมุมหมุนอ้างอิงด้วยตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) ตำแหน่งมุมหมุนอ้างอิงของล้อด้านหน้าทั้งสองข้าง (ข้างขวาและซ้าย) ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันในแต่ละช่วงเวลาเพราะต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง มุมหมุนอ้างอิงนี้สามารถคำนวณได้จากอัตราเร็วของการเคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและสมการจลศาสตร์ผกผันในบทที่ 4 ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงไม่มีการใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง (Trajectory tracking controller) เพื่อที่จะศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

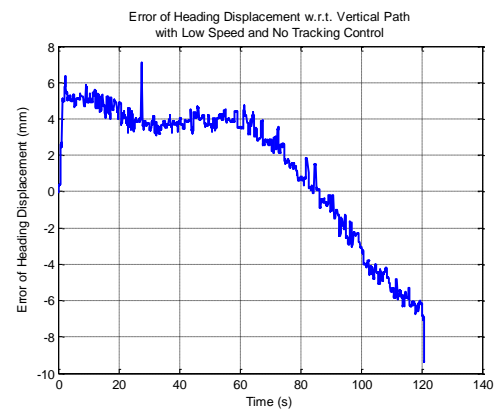
ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นเส้นทางตรงในแนวตั้งและแนวเอียง 25 องศาตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6.10 ถึง 6.13 จะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้การกระจัดเป็นไปตามเส้นทางอ้างอิง โดยมีค่าผิดพลาดของการกระจัดในทิศทาง  $x$  เป็นแนวโน้มเดียวกัน ในรูปที่ 6.10 (ข) ถึง 6.13 (ข) จะเห็นได้ว่า ค่าผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากเริ่มต้นการเคลื่อนที่ จากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ และลดลงก่อนจบการเคลื่อนที่ จากแนวโน้มดังกล่าวจะสังเกตได้ว่า ค่าผิดพลาดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขณะที่หุ่นยนต์กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว โดยเมื่อเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงก็จะมีค่าผิดพลาดสูง ดังที่สังเกตได้จากค่าผิดพลาดในรูปที่ 6.11 (ข) และ 6.13 (ข) ซึ่งมีอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> มีค่าสูงสุดประมาณ 25 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าผิดพลาดในรูปที่ 6.10 (ข) และรูปที่ 6.12 (ข) ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> มีค่าสูงสุดประมาณ 5 มิลลิเมตร นอกจากนี้ในรูปที่ 6.10 (ข) ถึง 6.13 (ข) ยังแสดงให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดในช่วงการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมีค่ามากกว่าในช่วงการเคลื่อนที่ด้วยอัตราหน่วง และในช่วงที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับศูนย์ (อัตราเร็วคงที่) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดน้อยที่สุด

จากรูปที่ 6.10 ถึง 6.13 (ค) และ (ง) สามารถสังเกตได้ว่า หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างเป็นเส้นตรง กล่าวคือ การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ ) ในแต่ละกรณี มีค่าไม่เกิน 10 มิลลิเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางอ้างอิงซึ่งมีการกระจัด 1200 มิลลิเมตร (1.2 เมตร) และมุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ ) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่เกิน 0.025 เรเดียน หรือ 1.4 องศาเท่านั้น แนวโน้มของการมุม  $\theta$  มีลักษณะลดลงตลอดการเคลื่อนที่หมายความว่า หุ่นยนต์เลี้ยวไปทางขวา (ทิศทาง  $-y$ ) มากขึ้น การที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เบี่ยงออกจากเส้นทางอ้างอิงอาจมีสาเหตุมาจากความผิดพลาด 2 ชนิด คือ ความผิดพลาดเนื่องจากระบบและความผิดพลาดไม่เนื่องจากระบบ โดยพบว่า ขนาดของล้อแม่เหล็กข้างขวาและซ้ายของหุ่นยนต์แตกต่างกันเล็กน้อย คือ ล้อข้างขวามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 71.180 มิลลิเมตรซึ่งเล็กกว่าล้อข้างซ้ายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 71.260 มิลลิเมตรเป็นความผิดพลาดเนื่องจากระบบที่อาจมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ นอกจากนี้ความผิดพลาดไม่เนื่องจากระบบเช่น การเคลื่อนที่ข้ามผ่านอุปสรรค ยังคงเป็นสาเหตุที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางได้อีกด้วย ดังรูปที่ 6.10 (ง) ถึง 6.13 (ง) จะสังเกตได้ว่า มุม  $\theta$  ในช่วงท้ายการเคลื่อนที่ตามเส้นทางแนวเอียง 25 องศา มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ตามเส้นทางในแนวตั้งซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงมุมค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการเคลื่อนที่ตามเส้นทางแนวเอียง ล้อข้างขวา

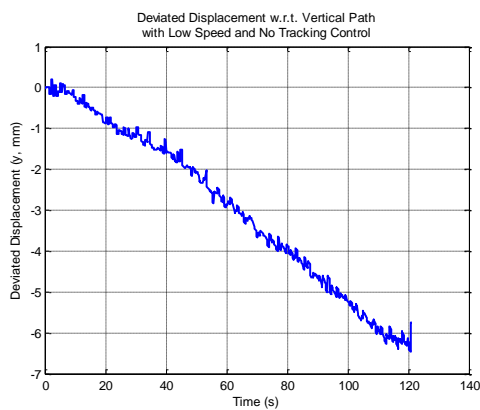
ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ทับเทปกาวที่ติดไว้บนแผ่นเหล็กในช่วงท้ายของการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 6.14 ล้อข้างขวาของหุ่นยนต์จะหมุนข้ามผ่านเทปกาวซึ่งมีความหนา 0.3 มิลลิเมตร ดังนั้นล้อข้างซ้ายจึงเคลื่อนที่ได้ระยะทางบนผนังเหล็กมากกว่าล้อข้างขวา ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เบี่ยงไปทางขวามากขึ้น ถึงแม้ว่าในการทดสอบนี้หุ่นยนต์จะมีการกระจัดในทิศทาง  $y$  เพียงเล็กน้อย แต่แนวโน้มของการเคลื่อนที่ลักษณะนี้อาจบ่งบอกได้ว่า หุ่นยนต์อาจเคลื่อนที่ออกจากเส้นทางเป็นการกระจัดมากขึ้นเมื่อหุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ในระยะทางไกล



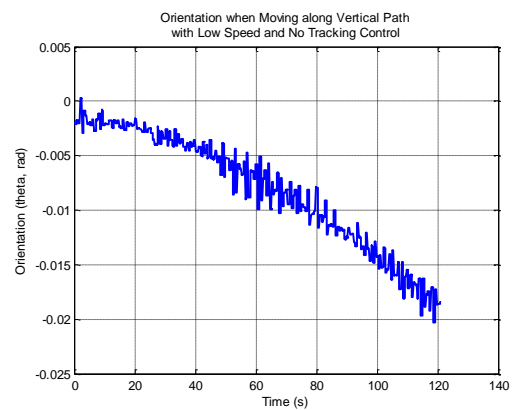
(ก)



(ข)



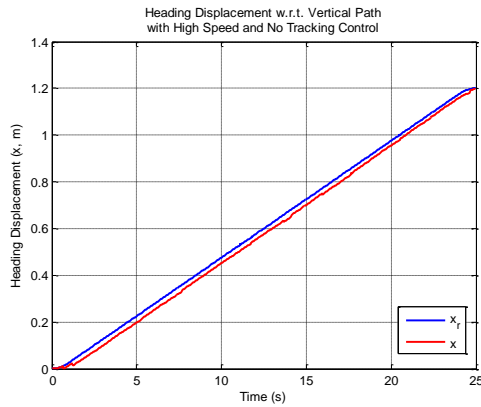
(ค)



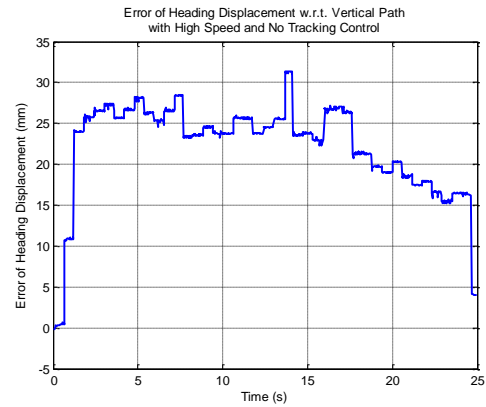
(ง)

รูปที่ 6.10 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวตั้งโดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

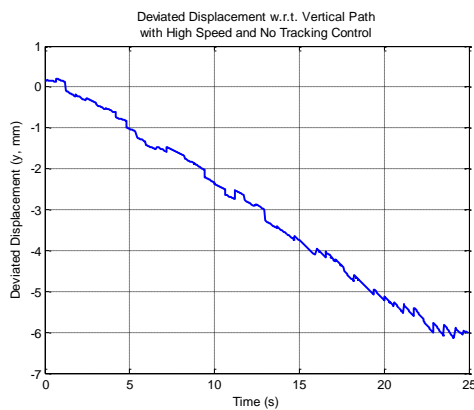
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
- (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง
- (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
- (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



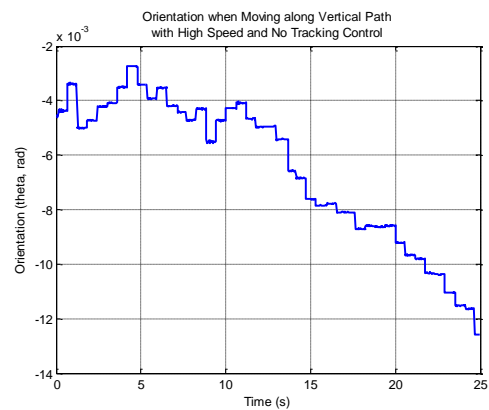
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 6.11 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

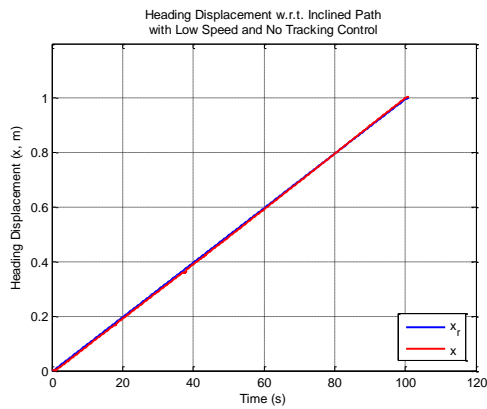
บนเส้นทางตรงในแนวดิ่ง โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

(ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )

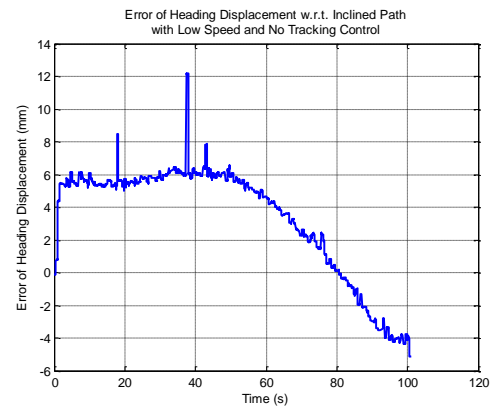
(ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับกระจัดอ้างอิง

(ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )

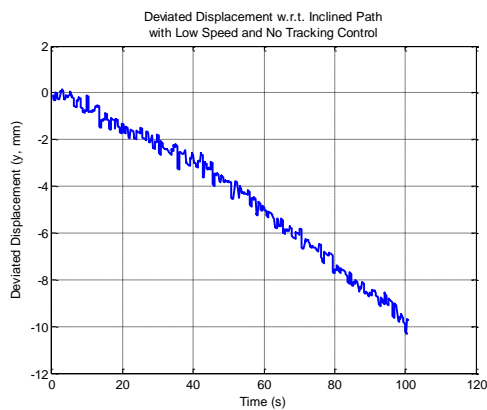
(ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



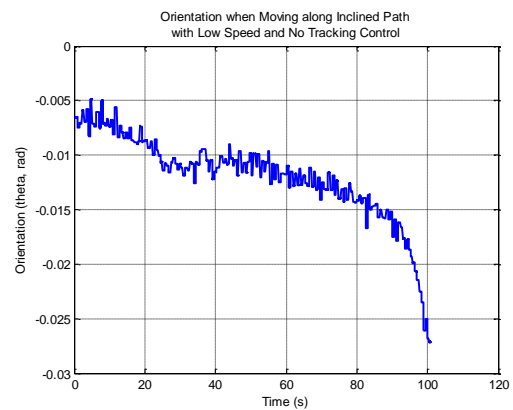
(ก)



(ข)

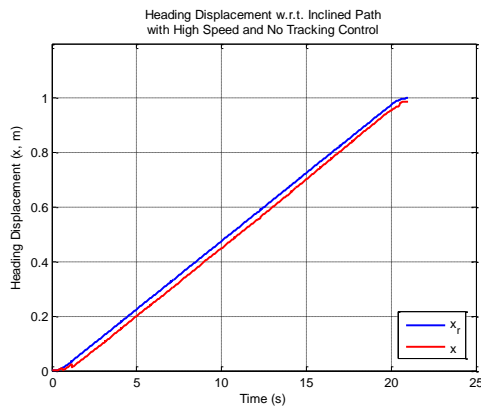


(ค)

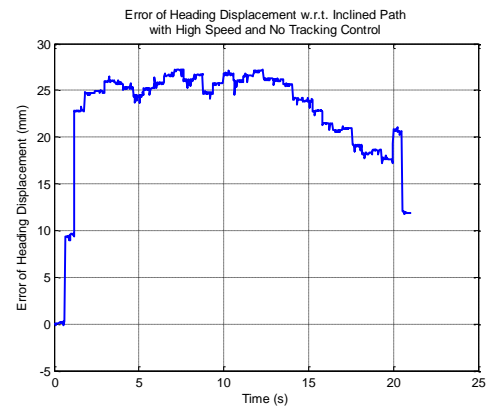


(ง)

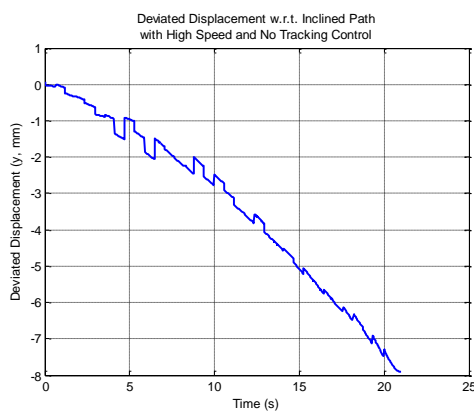
- รูปที่ 6.12 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
  - (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง
  - (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
  - (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



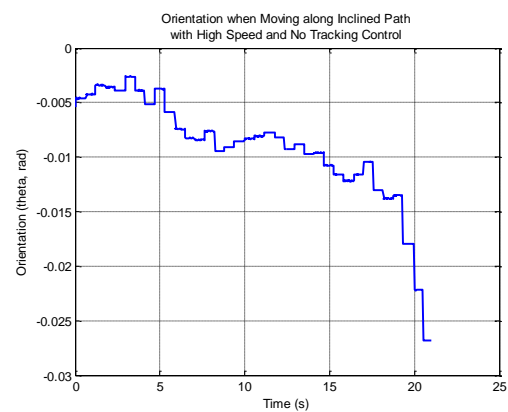
(ก)



(ข)

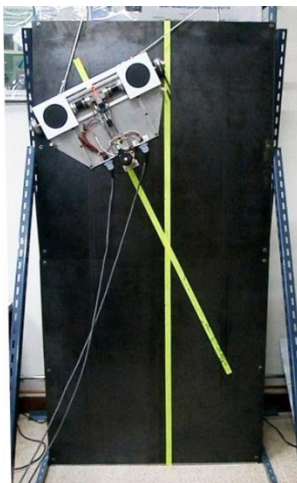


(ค)



(ง)

- รูปที่ 6.13 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
  - (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง
  - (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
  - (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



รูปที่ 6.14 ช่วงถ่ายของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามเส้นทางเอียง 25 องศา

### 6.2.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

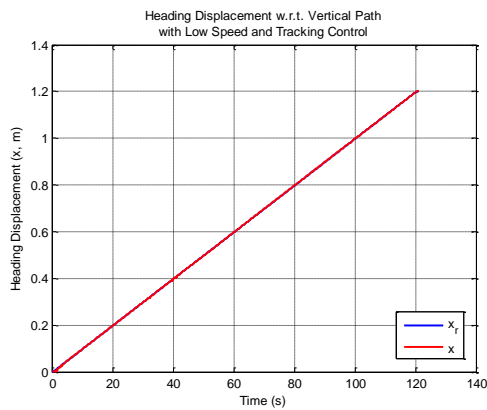
ในการทดสอบนี้ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นเส้นทางตรงที่มีทิศทางในแนวตั้งและแนวเอียงทำมุม 25 องศา กับแนวตั้ง โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทางดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.4 ลักษณะของการเคลื่อนที่ได้แก่ การกระจัด อัตราเร็วและอัตราเร่ง ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับการทดสอบโดยไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวควบคุมนี้ ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมการติดตามเส้นทางคือ  $k_x$  เท่ากับ 0.5 และ  $k_\theta$  เท่ากับ 10 สำหรับการเคลื่อนที่ตามเส้นทางตรงในแนวตั้งมีค่า  $k_y$  เท่ากับ 100 แต่การเคลื่อนที่ในแนวเอียงทำมุม 25 องศา กับแนวตั้งมีค่า  $k_y$  เท่ากับ 200 ค่าเกณฑ์ของการควบคุมนี้ได้มาจากการสุ่มค่าและทดสอบเพื่อให้มีค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

รูปที่ 6.15 ถึง 6.18 แสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีบนเส้นทางตรงในแนวตั้งและแนวเอียง 25 องศาตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิงในทิศทาง  $x$  มีค่าน้อยมาก แต่ยังคงสังเกตเห็นว่า การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งสูงยังคงมีค่าผิดพลาดมากกว่ากรณีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งต่ำ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ตัวควบคุมการเคลื่อนที่นี้สามารถลดค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในทิศทาง  $x$  ได้อย่างมาก

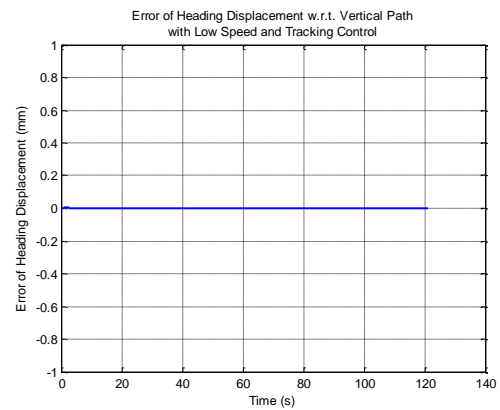
นอกจากนี้รูปที่ 6.15 ถึง 6.18 (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทางทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกนอกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ ) มีค่าสูงสุดประมาณ 1 มิลลิเมตร และมุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ ) มีค่าสูงสุดประมาณ 0.02 เรเดียนเท่านั้น ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่ที่จะยังมีความผิดพลาดเนื่องจากระบบและไม่เนื่องจากระบบก็ตาม จะสังเกตเห็นว่า ไม่มีแนวโน้มที่ค่าผิดพลาดทั้งสองจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังกรณีที่ไม่ใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง ลักษณะของการทำงานของตัวควบคุมติดตามเส้นทางสามารถสังเกตได้คือ ในช่วงที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางน้อย มุม  $\theta$  จะถูกควบคุมและมีค่าประมาณศูนย์ แต่เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางมากขึ้น หุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่เพื่อควบคุมให้



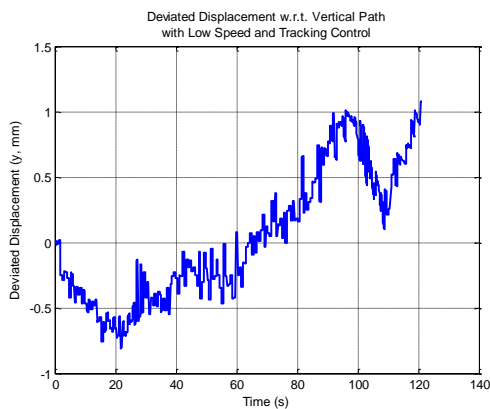
การกระจัดที่คลาดเคลื่อนจากเส้นทางอ้างอิงมีค่าน้อยลง แล้วจึงเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ให้มีค่าเท่ากับศูนย์อีกครั้งเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับเส้นทางอ้างอิง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าหุ่นยนต์อาจสามารถเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางที่มีระยะทางไกลกว่าในการทดลองนี้โดยมีค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



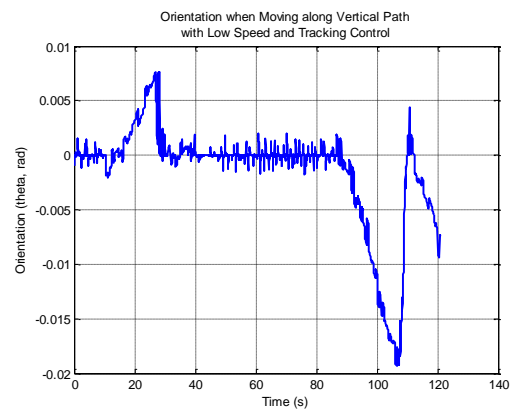
(ก)



(ข)



(ค)

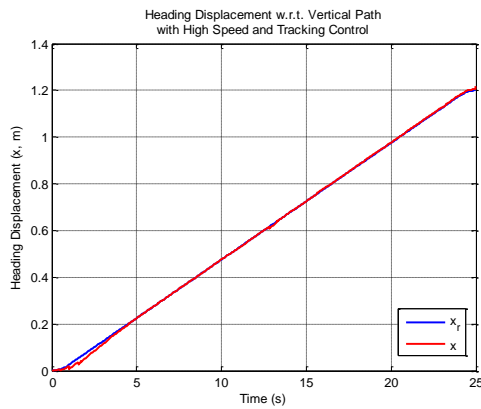


(ง)

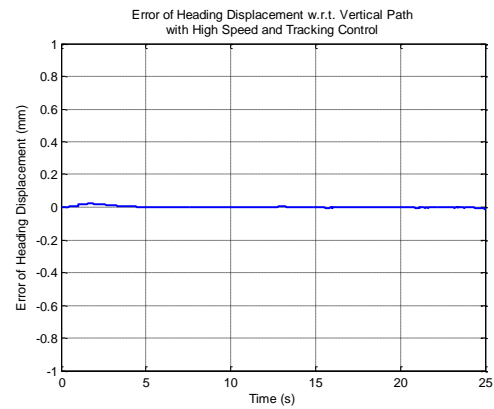
รูปที่ 6.15 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

บนเส้นทางตรงในแนวดิ่ง โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

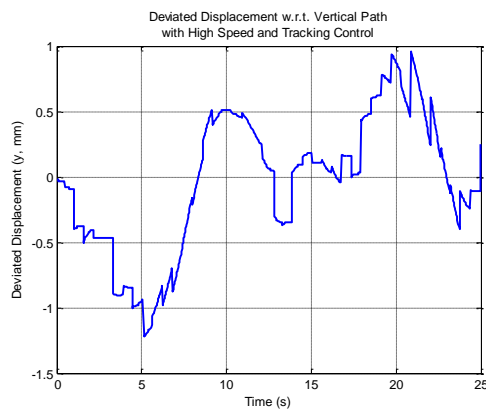
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
- (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับกระจัดอ้างอิง
- (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
- (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



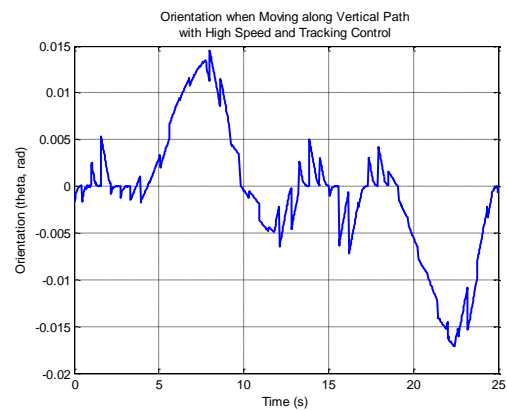
(ก)



(ข)



(ค)

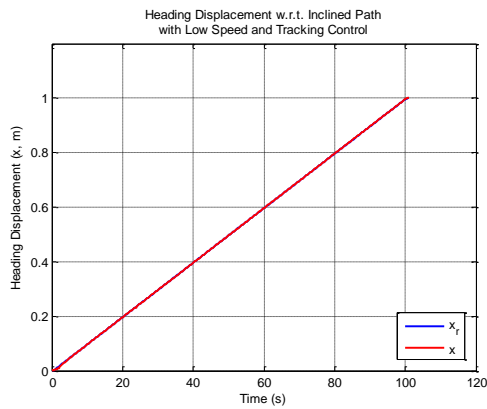


(ง)

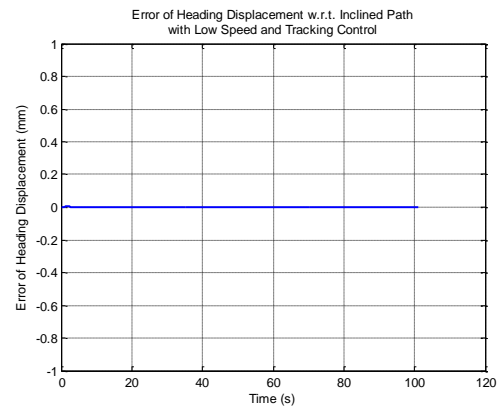
รูปที่ 6.16 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

บนเส้นทางตรงในแนวดิ่ง โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง

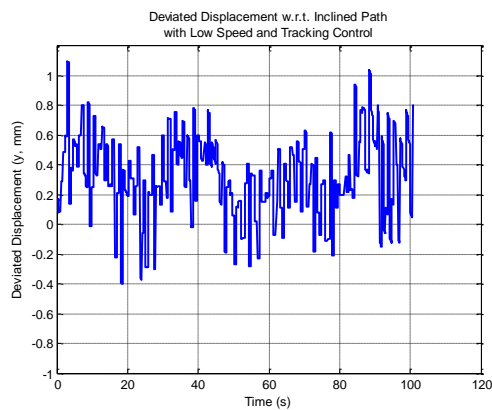
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
- (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับกระจัดอ้างอิง
- (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
- (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



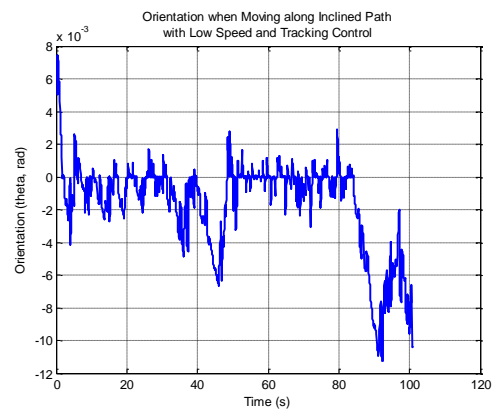
(ก)



(ข)

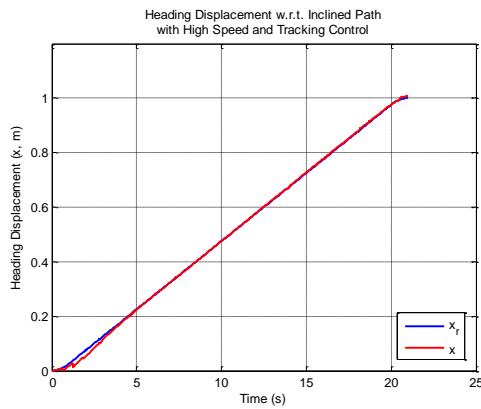


(ค)

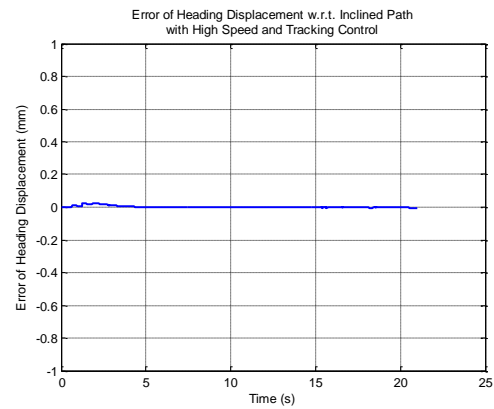


(ง)

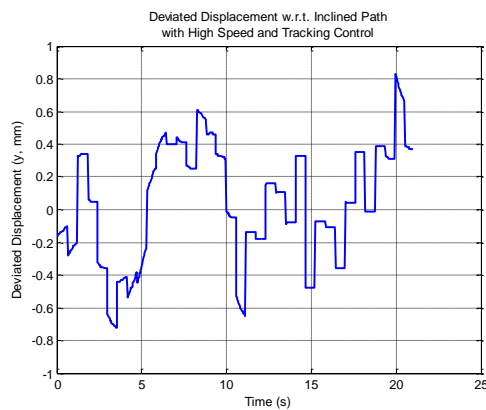
- รูปที่ 6.17 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
  - (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง
  - (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
  - (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )



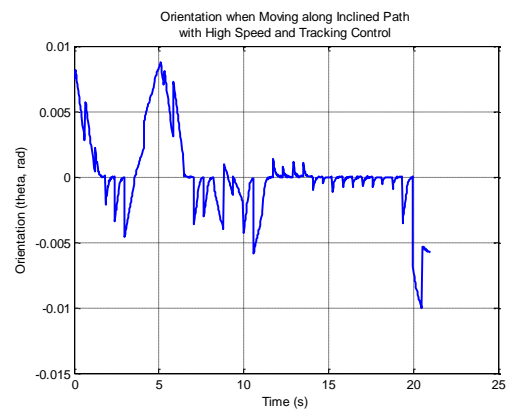
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

- รูปที่ 6.18 ผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที บนเส้นทางตรงในแนวเอียง 25 องศา โดยใช้ตัวควบคุมการติดตามเส้นทาง
- (ก) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง (ทิศทาง  $x$ )
  - (ข) ค่าผิดพลาดของการกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับการกระจัดอ้างอิง
  - (ค) การกระจัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากเส้นทางอ้างอิง (ทิศทาง  $y$ )
  - (ง) มุมระหว่างทิศทางไปข้างหน้าของหุ่นยนต์กับทิศทางของเส้นทางอ้างอิง (มุม  $\theta$ )

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

หุ่นยนต์ไต่ผนังถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายกับถังเหล็กขนาดใหญ่ในโรงงานอุตสาหกรรมเช่น การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมบนถังเหล็ก เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการตรวจสอบเมื่อเปรียบเทียบกับตรวจสอบด้วยมนุษย์ อีกทั้งการทำงานด้วยหุ่นยนต์ยังมีความปลอดภัยและสามารถระบุตำแหน่งของเส้นทางการเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์ไต่ผนังโดยใช้ล้อแม่เหล็ก สร้างแรงยึดเกาะกับผนัง และสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางและเวลาที่กำหนด

ขั้นตอนในการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการยึดเกาะผนังด้วยแม่เหล็กด้วยวิธีการต่างๆ โดยสรุปได้ว่า การใช้ล้อแม่เหล็กเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ เพราะล้อแม่เหล็กสามารถสร้างแรงดึงดูดกับผนังเหล็กได้มาก จึงเป็นการลดโอกาสการเกิดการไถระหว่างล้อกับผนังเหล็ก ล้อแม่เหล็กที่ใช้กับหุ่นยนต์ไต่ผนังถูกแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือ ล้อด้านหน้าสำหรับขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และล้อด้านหลังที่จะต้องมีทิศทางของแกนหมุนสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โครงสร้างของล้อแม่เหล็กทั้งสองมีลักษณะเหมือนกันคือ การใช้แม่เหล็กถาวรแรงสูงที่ผลิตจากวัสดุแร่เอิพท์และแผ่นเหล็กซึ่งประกอบที่ทั้งสองด้านของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มแรงดึงดูดกับผนังเหล็ก สำหรับล้อด้านหน้าของหุ่นยนต์จะใช้แผ่นเหล็กตันเพื่อสร้างแรงดึงดูดแม่เหล็กที่มีขนาดมากกว่า 30 กิโลกรัมบนผนังเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร ในขณะที่ล้อด้านหลังใช้ตั้ลูปปิ่น (ซึ่งสร้างจากวัสดุเหล็กเช่นกัน) เพื่อลดแรงต้านในการเปลี่ยนทิศทางแกนหมุนของล้อ โดยมีแรงดึงดูดแม่เหล็กกับผนังเหล็กหนา 4 มิลลิเมตรประมาณ 12 กิโลกรัม หุ่นยนต์ที่ประกอบล้อแม่เหล็ก ส่วนขับเคลื่อนล้อและอุปกรณ์ต่างๆ แล้วมีความกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร สูง 27 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 7.1 กิโลกรัม โดยสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยอัตราเร็วสูงสุดประมาณ 0.2 เมตรต่อวินาที

งานวิจัยนี้ยังศึกษาสมการจลศาสตร์ของหุ่นยนต์เพื่อออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่สองวิธีคือ การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณวิทยุและการควบคุมการติดตามเส้นทาง จากนั้นจึงพัฒนาโปรแกรมการสั่งการทำงานหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม LabVIEW 2011 เพื่อรับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ และควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยคำสั่งที่คำนวณได้จากตัวควบคุมที่ออกแบบไว้

จากการทดสอบหุ่นยนต์ไต่ผนัง พบว่า หุ่นยนต์สามารถยึดเกาะและเคลื่อนที่บนผนังเหล็กแบนหนา 4 มิลลิเมตรที่มีระนาบเอียงมุมต่างๆ ได้ นอกจากนี้การใช้ตัวควบคุมติดตามเส้นทางยังทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนผนังเหล็กตามเส้นทางในแนวตั้งและแนวเอียง 25 องศาด้วยอัตราเร็วที่กำหนด พบว่า มีค่าผิดพลาดของการกระจัดตามเส้นทางอ้างอิงน้อยมาก อีกทั้งยังมีการกระจัดออกจากเส้นทางอ้างอิงประมาณ 1 มิลลิเมตร และมีค่าผิดพลาดของทิศทางไม่เกิน 0.02 เรเดียน เนื่องจากค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่มีค่าน้อย ตัวควบคุมการติดตามเส้นทางจึงอาจนำไปใช้กับหุ่นยนต์ไต่ผนังสำหรับการตรวจสอบรอยเชื่อมของถังเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรมได้

## 7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

ถึงแม้ว่าผลการทดลองในบทที่ 6 จะแสดงให้เห็นว่า หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นทางอ้างอิง โดยมีค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการทำงานของหุ่นยนต์ยังคงมีข้อจำกัด และปัญหาที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้ภายในขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งควรได้รับการปรับปรุงเพื่อพัฒนาหุ่นยนต์ใต้น้ำในงานวิจัยในอนาคตให้สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบของถังเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรมได้จริง

### 7.2.1 การใช้กล้องเพื่อระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง

การเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางอ้างอิงในงานวิจัยนี้ ใช้กล้องที่ติดตั้งห่างจากผนังเหล็กเพื่อให้มุมมองของกล้องครอบคลุมพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ จากนั้นจึงระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ด้วยรูปวงกลมสองรูปบนหุ่นยนต์โดยเปรียบเทียบกับเส้นทางอ้างอิง การใช้กล้องในลักษณะนี้อาจทำให้ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์มีความคลาดเคลื่อนได้จากสาเหตุหลายประการดังนี้

- การใช้กล้องหนึ่งตัวทำให้การระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ทำได้เพียงสองมิติเท่านั้น ดังนั้นระนาบของกล้องจึงต้องขนานกับแผ่นเหล็กทดสอบเพื่อให้ภาพจากกล้องมีมุมมองที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตามการจัดวางกล้องอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย จึงอาจส่งผลให้ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่คำนวณจากภาพมีความผิดพลาดด้วย
- การตั้งกล้องห่างจากผนังเหล็กทำให้การระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์มีข้อจำกัดคือพื้นที่ระหว่างกล้องและหุ่นยนต์จะต้องไม่มีอุปสรรคมาขัดขวาง เพราะถ้าหุ่นยนต์ถูกบดบังจนทำให้กล้องไม่สามารถตรวจหารูปวงกลมทั้งสองบนหุ่นยนต์ได้แล้ว อาจทำให้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ที่ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ดังนั้นการติดตั้งกล้องลักษณะนี้จะใช้งานได้เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนผนังเหล็กแบนเท่านั้น การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จึงไม่สามารถทำในกรณีที่หุ่นยนต์ไต่รอบถังเหล็กเพราะกล้องไม่สามารถหาตำแหน่งของรูปวงกลมเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปที่ด้านหลังของถังได้
- สภาพแวดล้อมมีผลต่อการรับภาพจากกล้อง เช่น ในกรณีที่บริเวณทดสอบมีแสงสว่างมากเกินไป การย้อนแสงของกล้องจะทำให้ภาพมืดและระบุตำแหน่งของวงกลมได้ยากขึ้น
- โปรแกรมการรับและประมวลผลภาพใช้ระยะเวลาการทำงานต่อรอบการทำงานค่อนข้างมาก (ประมาณครึ่งวินาที) ความช้าของโปรแกรมส่วนหนึ่งมาจากการรับภาพจากกล้องซึ่งโดยทั่วไปมีอัตราประมาณ 30 ภาพต่อวินาที นอกจากนี้โปรแกรมจะต้องหาตำแหน่งของรูปวงกลมที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์ และนำข้อมูลมาประมวลผลเพื่อระบุตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ โปรแกรมนี้จึงมีขั้นตอนในการทำงานและใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก ความช้าในการทำงานของโปรแกรมจึงจำกัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เนื่องจากถ้าหุ่นยนต์

เคลื่อนที่เร็วเกินไป อาจทำให้รูปวงกลมบนหุ่นยนต์อยู่ด้านนอกบริเวณที่สนใจ ทำให้รอบทำงานครั้งต่อไปของโปรแกรมจึงหาตำแหน่งของรูปวงกลมไม่พบ

งานวิจัยในอนาคตจึงควรเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งกล้องสำหรับการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทาง เช่น การติดตั้งกล้องบนหุ่นยนต์เพื่อหาตำแหน่งรอยเชื่อมบนผนังเหล็ก นอกจากนี้จะสามารถกำหนดเส้นทางอ้างอิงให้มีความสมจริงมากขึ้นแล้ว (รอยเชื่อมบนผนังเหล็กอาจไม่เป็นแนวตรงอย่างสมบูรณ์) การติดตั้งกล้องลักษณะนี้ทำให้กล้องสามารถตรวจพบรอยเชื่อมได้เสมอ หุ่นยนต์จะสามารถนำมาทดสอบการเคลื่อนที่บนถังเหล็กได้ นอกจากนี้ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์จะสามารถระบุได้แม่นยำมากขึ้น เพราะระยะห่างระหว่างกล้องและผนังเหล็กน้อย ถึงแม้ว่าระยะนาบของกล้องจะไม่ขนานกับผนังเหล็กอย่างสมบูรณ์ แต่ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่คำนวณได้จากภาพอาจผิดพลาดไม่มาก

## 7.2.2 การพัฒนาการติดต่อแบบไร้สายกับหุ่นยนต์

สายส่งกำลังและสายส่งสัญญาณอาจเป็นอุปสรรคต่อการทำงานของหุ่นยนต์บนถังเหล็กขนาดใหญ่ เพราะสายไฟอาจมีความยาวและน้ำหนักมาก ทำให้หุ่นยนต์ต้องรับภาระเพิ่มในการยึดเกาะกับผนังเหล็ก อีกทั้งน้ำหนักของสายไฟอาจเป็นสิ่งรบกวนในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และส่งผลเสียต่อการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางของหุ่นยนต์ นอกจากนี้หุ่นยนต์จะต้องเคลื่อนที่อย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้ล้อเคลื่อนที่ทับสายไฟ เพราะจะทำให้ล้อไม่สัมผัสกับผนังเหล็ก ทำให้แรงดึงดูดแม่เหล็กระหว่างล้อและผนังเหล็กลดลง หุ่นยนต์จึงอาจหล่นลงมาจากผนังเหล็กได้ การติดต่อแบบไร้สายยังทำให้การเก็บรักษาและการเคลื่อนย้ายหุ่นยนต์ง่ายขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามการติดต่อแบบไร้สายจะทำได้ก็ต่อเมื่อมีการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ รวมทั้งอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณไร้สายบนหุ่นยนต์ ขนาดและน้ำหนักของหุ่นยนต์จึงอาจเพิ่มมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] de Oliveira, A. S., de Arruda, L. V. R., Neves, F., Espinoza, R.V., and Nadas, J.P.B. Adhesion force control and active gravitational compensation for autonomous inspection in LPG storage spheres. In Kellenberger, P. (ed.), In Proceedings Brazilian Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium, pp. 232-238. 2012.
- [2] NDT Education Resource Center. Storage tank inspection [Online]. Available from : <http://www.ndt-ed.org/AboutNDT/SelectedApplications/TankInspection/TankInspection.htm> [2013, August 28].
- [3] Fernández, R., González, E., Feliú, V. and Rodríguez, A.G. A wall climbing robot for tank inspection. An autonomous prototype. In Proceedings of the 36<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1424 – 1429. 2010.
- [4] Eich, M., and Vögele, T. Design and control of a lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection. In Proceedings of the 19th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp. 1200-1205. 2011.
- [5] Blakeley, B. NDT tool makes light work of tank inspection [Online]. 2005. Available from : <http://www.twi.co.uk/news-events/bulletin/archive/2005/may-june/ndt-tool-makes-light-work-of-tank-inspection/> [2013, August 28].
- [6] Fischer, W., Tâche, F., Caprari, G., and Siegwart R. Magnetic wheeled robot with high mobility but only 2 DOF to control. In Proceedings of the 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. 2008.
- [7] Kalra, L.P. and Gu, J. An autonomous self contained wall climbing robot for non-destructive inspection of above-ground storage tanks, Industrial Robot: An International Journal 34 (2007) : 122–127.
- [8] ห้องปฏิบัติการทดสอบทางกล ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. คุณสมบัติอื่นๆของวัสดุ [ออนไลน์].แหล่งที่มา: <http://www.mtec.or.th/laboratory/mech/index.php/knowledge/30-2009-04-20-04-11-44> [2013, August 31].
- [9] NDT Education Resource Center. Diamagnetic, paramagnetic, and ferromagnetic materials [Online]. Available from : <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/MagneticMatls.htm> [2013, August 31].
- [10] Magnet Sales & Manufacturing Inc. Catalog7 [Online]. Available from : [http://www.magnetsales.com/Info\\_R2.htm](http://www.magnetsales.com/Info_R2.htm) [2011, October 31].



- [11] K&J Magnetics Inc. Frequently asked questions [Online]. Available from : <http://www.kjmagnetics/FAQ.asp> [2013, August 31].
- [12] Silva, M. F., Barbosa, R. S., and Oliveira, A. L. C. Climbing robot for ferromagnetic surfaces with dynamic adjustment of the adhesion system. Journal of Robotics (2012).
- [13] Sliverwing (UK) Ltd. Scorpion B-scan [Online]. Available from : [http://www.silverwingndt.com/ultrasonic\\_testing/remote\\_ut\\_crawler/scorpion\\_bscan\\_ut\\_crawler\\_inspection.aspx](http://www.silverwingndt.com/ultrasonic_testing/remote_ut_crawler/scorpion_bscan_ut_crawler_inspection.aspx) [2013, August 31].
- [14] Bekey, G. A. Autonomous robots: From biological inspiration to implementation and control. A Bradford Book, 2005.
- [15] Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Giacomelli, M., Petitti, A., and Spirandelli, E. MARC: Magnetic autonomus robotic crawler development and exploitation in the MINOAS project. In Bertram, V. (ed.), Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, pp. 62-75. 2012.
- [16] Singhakajen, K., Wongsupphaluk, P., Ruengsukawanna, W., and Kamales, S. Wall-climbing mobile robot. ICE Senior project, International School of Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2010.
- [17] Jireh Industries Ltd. User guide tripod magnetic remote transport vehicle [Online]. Available from : [www.jireh-industries.com](http://www.jireh-industries.com) [2012, December 15].
- [18] Brown, W. F. Handbook of Chemistry and Physics. McGraw-Hill, 1958. Cited in Nave, C. R. Magnetic properties of ferromagnetic materials [Online]. Available from : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/magprop.html#c2> [2013, September 1].
- [19] Cullity, B. D., and Graham, C. D. Introduction to magnetic materials. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2008. Cited in Permeability (electromagnetism) [Online]. Available from : [http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)) [2012, December 14].
- [20] ตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล และวิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การศึกษาคุณลักษณะของการไถลที่ล้อแม่เหล็กสำหรับหุ่นยนต์ใต้น้ำ. ใน สำเร็จ จักรใจ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, หน้า 133. (2555)
- [21] Jin, Y., Chen, J., and Li, Z. A Magnetic Wheel Structure for an Omni-directional Microrobot to Limit Slip Effect. International Journal of Advanced Robotic Systems 6 (December 2009) : 277-284.
- [22] Olympus NDT Inc. Motorized Weld Scanner WeldROVER [Online]. Available from: <http://www.olympus-ims.com/en/scanners/weldrover/> [2011, July 15].

- [23] Fei, Y., Zhao, X., and Wan, J. Motion analysis of a modular inspection robot with magnetic wheels. In Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 8187-8190. 2006.
- [24] Zhang, Z., Dodd, T., Atallah, K., and Lyne, I., Design and optimization of magnetic wheel for wall and ceiling climbing robot. In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1393 – 1398. 2010.
- [25] Ramsdale, R. Reference tables -- coefficients of friction [Online]. Available from : <http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm> [2011, November 11].
- [26] Meriam, J. R. Engineering mechanics Dynamics. 2nd ed. John Wiley & Sons Inc, 1971.
- [27] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. Robotics modelling, planning and control. 1st ed. Advanced textbooks in control and signal processing. London: Springer, 2009.
- [28] Gholipour, A., and Yazdanpanah, M. J. Dynamic tracking control of nonholonomic mobile robot with model reference adaptation for uncertain parameters. In Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Control Conference, 2003.
- [29] Borenstein, J., and Feng L. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation 12 (December 1996) : 869-880.
- [30] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [31] National Instruments Corp. What is a real-time operating system (RTOS)? [Online]. Available from : <http://www.ni.com/white-paper/3938/en> [2013, August 29].
- [32] Nandy, S., Shome, S. N., Somani, R., Chakraborty, G., and Kumar, C. S. Detailed slip dynamics for nonholonomic mobile robotic system. In Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 519–524, 2011.
- [33] National Instruments Corp. NI cRIO-9074 integrated 400 MHz real-time controller and 2M gate FPGA [Online]. Available from : <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/203964> [2013, August 29].
- [34] National Instruments Corp. NI cRIO-9074 [Online]. Available from : [http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=203964&mTitle=NI%20cRIO-9074&mGallery=set\\_crio-9074](http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=203964&mTitle=NI%20cRIO-9074&mGallery=set_crio-9074) [2013, August 29].

- [35] National Instruments Corp. NI 9220 [Online]. Available from : [http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=210836&mTitle=NI%209220&mGallery=set\\_ni\\_9220](http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=210836&mTitle=NI%209220&mGallery=set_ni_9220) [2013, September 4].
- [36] Copley Controls Corp. Models 4122P, 4212P “PIN” Versions for PC board mounting [Online]. Available from: <http://www.clickautomation.com/PDF/items/4122P%204212P.pdf> [2013, August 29].
- [37] VEX Robotics Inc. 75 MHz Transmitter & Receiver [Online]. Available from : <http://www.vexrobotics.com/276-2153.html> [2013, August 29].
- [38] Logitech Ltd. C920 Technical Specifications [Online]. Available from : [http://logitech-en-amr.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/28927/related/1/session/L2F2LzEvdGltZS8xMzc3Nzg1NTA4L3NpZC9YaDRHbi15bA%3D%3D](http://logitech-en-amr.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/28927/related/1/session/L2F2LzEvdGltZS8xMzc3Nzg1NTA4L3NpZC9YaDRHbi15bA%3D%3D) [2013, August 29].
- [39] Logitech Ltd. Logitech HD Pro Webcam C920 [Online]. Available from : <http://www.logitech.com/en-us/product/hd-pro-webcam-c920> [2013, August 29]
- [40] OMRON Corp. EE-SX770/771/772/870/871/872(A/P/R) [Online]. Available from : [http://www.omron-ap.co.th/product\\_info/EE-SX77/index.asp](http://www.omron-ap.co.th/product_info/EE-SX77/index.asp) [2013, August 29].

ภาคผนวก

## ภาคผนวก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานของหุ่นยนต์

### ส่วนขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กด้านหน้า

ล้อแม่เหล็กด้านหน้าแต่ละข้างจะถูกขับเคลื่อนอย่างอิสระด้วยชุดอุปกรณ์รุ่นเดียวกันดังรูปที่ ผ.1 ได้แก่

- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปร่งถ่าน Tamagawa รุ่น TRE series 30 W มีกำลัง 30 วัตต์ เมื่อทำงานต่อเนื่องจะมีแรงบิด 0.098 นิวตัน·เมตรต่อแอมแปร์, ใช้กระแสไฟฟ้า 2.1 แอมแปร์ และมีอัตราเร็วการหมุน 3000 รอบต่อนาที
- เฟืองส่งกำลังแบบฮาร์โมนิก Hi-T Drive รุ่น H14b3402E5S มีอัตราทด 88:1 ถูกติดตั้งไว้ที่เพลาด้านหน้าของมอเตอร์เพื่อเพิ่มแรงบิดและลดอัตราความเร็วการหมุนของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการหมุนของล้อหุ่นยนต์
- เอ็นโค้ดเดอร์ US Digital รุ่น E5-500-394-IE-D-D-D-B มีความละเอียด 500 ครั้งต่อรอบการหมุน โดยถูกติดตั้งไว้ที่เพลาด้านหลังของมอเตอร์และทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบการวัดมุมหมุนของมอเตอร์เพื่อส่งค่ากลับไปยังระบบควบคุม

### ส่วนขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กด้านหลัง

ล้อแม่เหล็กด้านหลังถูกขับเคลื่อนให้เปลี่ยนทิศทางแกนหมุนของล้อให้สัมพันธ์กับลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ส่วนขับเคลื่อนล้อประกอบด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ ผ.2 ได้แก่

- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแปร่งถ่าน Maxon รุ่น RE35-118783 มีกำลัง 90 วัตต์ เมื่อทำงานต่อเนื่องจะมีแรงบิด 112 มิลลินิวตัน·เมตร และมีอัตราเร็วการหมุน 8200 รอบต่อนาที
- เฟืองส่งกำลังแบบฮาร์โมนิก Hi-T Drive รุ่น RP14i100 มีอัตราทด 100:1 ถูกติดตั้งไว้ที่เพลาด้านหน้าของมอเตอร์
- เอ็นโค้ดเดอร์ US Digital รุ่น E5-1024-157-I-D-H-D-B มีความละเอียด 1024 ครั้งต่อรอบการหมุน ถูกติดตั้งไว้ที่เพลาด้านหลังของมอเตอร์



รูปที่ ผ.1 อุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กด้านหน้า



รูปที่ ผ.2 อุปกรณ์ในส่วนขับเคลื่อนล้อแม่เหล็กด้านหลัง

### อุปกรณ์ NI-cRIO9074

อุปกรณ์ดังรูปที่ ผ.3 ประกอบด้วยตัวประมวลผลแบบเวลาจริง (Real time processor) และอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array, FPGA) โดยสามารถประกอบมอดูลไอโอ รุ่น NI C Series ดังรูปที่ ผ.4 ได้สูงสุด 8 ช่อง [33] เช่น แอนะล็อกอินพุตและเอาต์พุต ดิจิทัลอินพุตและเอาต์พุต เป็นต้น อุปกรณ์นี้สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสายต่ออีเทอร์เน็ต (Ethernet cable) เพื่อทำงานใน Real time project ของโปรแกรม LabVIEW โดยทำหน้าที่เป็นเป้าหมายหนึ่งในการประมวลผลคำสั่งของโปรแกรมสำหรับการทำงานแบบเวลาจริง

### อุปกรณ์ขยายสัญญาณ

อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Coppley รุ่น 4122P ดังรูป ผ.5 ได้รับกำลังไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ตามระดับสัญญาณแรงดันอ้างอิงขนาด -10 ถึง +10 โวลต์ โดยคำนวณจากโปรแกรม LabVIEW แล้วจ่ายแรงดันด้วยอุปกรณ์ NI-cRIO9074



รูปที่ ผ.3 อุปกรณ์ NI-cRIO9074 [34]



รูปที่ ผ.4 มอดูลไอโอ รุ่น NI C Series ที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ NI-cRIO9074 [35]



รูปที่ ผ.5 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Copley รุ่น 4122P [36]

## อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณวิทยุ

อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณวิทยุ VEX ดังรูปที่ ผ.6 สื่อสารกันด้วยความถี่ 75.970 เมกะเฮิรตซ์ มีจำนวน 6 ช่องสัญญาณ โดยแบ่งเป็น 4 ช่องสัญญาณแอนะล็อก และ 2 ช่องสัญญาณดิจิทัล สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้เพียง 2 ช่องสัญญาณแอนะล็อกเพื่อกำหนดค่าอ้างอิงอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อด้านหน้าและทิศทางแกนหมุนของล้อด้านหลังสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์

## กล้อง

กล้องที่ใช้ในการตรวจรู้ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ในการควบคุมการติดตามเส้นทางคือ กล้องเว็บแคม Logitech รุ่น HD Pro Webcam C920 ดังรูปที่ ผ.7 มีสายสัญญาณ USB 2.0 เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ภาพจากกล้องมีความละเอียด (Resolution) 1920×1080 จุดภาพ และมีอัตราการแสดงภาพ (Frame rate) สูงสุด 30 ภาพต่อวินาที [38]

## อุปกรณ์ตรวจวัดแสงขนาดเล็ก

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงขนาดเล็กดังรูปที่ ผ.8 ประกอบด้วยส่วนปล่อยแสงและส่วนรับแสงติดตั้งอยู่ที่แต่ละด้านของอุปกรณ์ จึงสามารถตรวจรู้เมื่อมีวัตถุมาคั่นระหว่างส่วนปล่อยแสงและส่วนรับแสงได้ ดังนั้นอุปกรณ์นี้จึงถูกนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของล้อแม่เหล็กด้านหลังของหุ่นยนต์



รูปที่ ผ.6 อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณวิทยุ VEX ความถี่ 75.970 เมกะเฮิรตซ์ [37]





รูปที่ ผ.7 กล้องเว็บแคม Logitech รุ่น HD Pro Webcam C920 [39]



รูปที่ ผ.8 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงขนาดเล็ก OMRON [40]

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายตฤณโชค เอี่ยมมนัสสกุล เกิดวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2532 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาต่อเนื่องในระดับปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย