

การเปรียบเทียบแบบออนไลน์ของระบบวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรีโดยใช้กล้องภายนอก



นายวุฒินันท์ สุนทรธ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

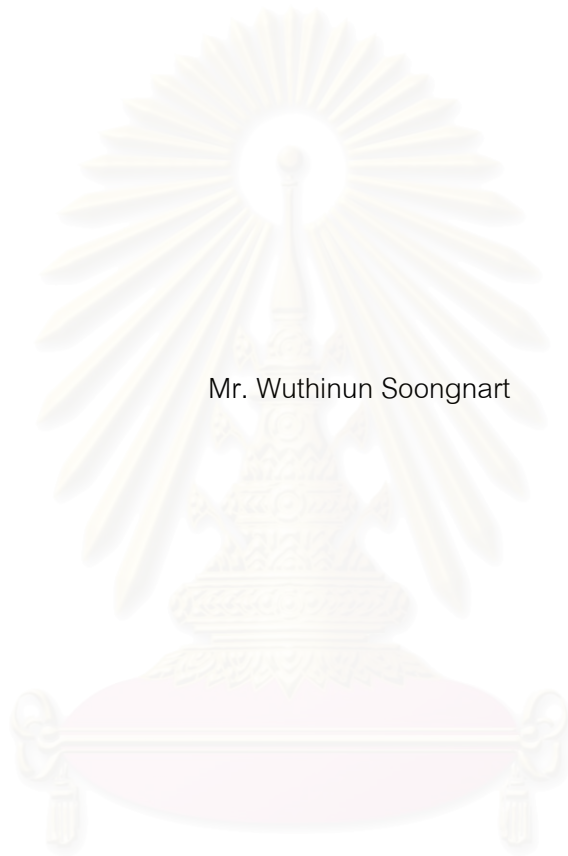
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5354-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ONLINE CALIBRATION OF ODOMETRY-BASED LOCALIZATION USING AN EXTERNAL CAMERA



Mr. Wuthinun Soongnart

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-5354-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบแบบออนไลน์ของระบบวัดตำแหน่งแบบออดิโอมิติทรีโดยใช้กล้องภายนอก
โดย	นายวุฒินันท์ สูงนารถ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทรใจเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทรใจเจริญ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

วุฒินันท์ สูงนารถ : การปรับเทียบแบบออนไลน์ของระบบวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรีโดยใช้กล้อง
ภายนอก. (ONLINE CALIBRATION OF ODOMETRY-BASED LOCALIZATION USING AN
EXTERNAL CAMERA) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร. ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์ อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. รัชทิน
จันทร์เจริญ 101 หน้า. ISBN 974-17-5354-3.

ในการใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง
ของตัวหุ่นยนต์เองภายในพื้นที่ใช้งาน วิธีการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่วิธีหนึ่งที่เรียกว่า ออดโดมิทรี
เนื่องด้วยความสามารถในการตรวจวัดที่รวดเร็วและมีราคาถูกจึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมาก แต่ปัญหามีอยู่
ว่าเมื่อทำการตรวจวัด ค่าความผิดพลาดในการวัดแต่ละครั้งจะมีการสะสมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตามระยะทาง
ที่หุ่นยนต์ได้เคลื่อนที่ไป ดังนั้นเมื่อใช้การวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรีจึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขค่าความ
ผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในบทความนี้ได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าความผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำของการวัด
แบบออดโดมิทรีด้วยระบบวัดตำแหน่งที่ใช้กล้องวิดีโอ ซึ่งจะติดตั้งตัวกล้องวิดีโอในบางตำแหน่งของ
บริเวณพื้นที่ใช้งานที่เป็นเส้นทางผ่านของหุ่นยนต์ เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ตรวจวัด กล้องจะวัด
ตำแหน่งของหุ่นยนต์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่วัดจากออดโดมิทรี ถ้ามีค่าผิดพลาดของการวัด
แบบออดโดมิทรีเกิดขึ้นก็จะทำการแก้ไข พร้อมทั้งปรับปรุงสมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่
วัดด้วยออดโดมิทรี

ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจาก การเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อของหุ่นยนต์ และความเร่งที่
หุ่นยนต์ใช้ในการเคลื่อนที่ วิธีการปรับแก้ค่าผิดพลาดที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ เรียกว่าการปรับแก้แบบ
ออนไลน์ วิธีการนี้จะนำค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่วัดด้วยกล้องมาปรับปรุง ค่ารัศมีล้อของหุ่นยนต์ให้ตรง
กับขนาดจริงในขณะที่หุ่นยนต์ถูกใช้งาน และนำมาสร้างสมการความผิดพลาด เพื่อใช้ประมาณค่าผิดพลาด
ที่จะเกิดขึ้น เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดค่าใดๆ เมื่อประมาณค่าผิดพลาดได้แล้ว
ก็สามารถที่จะนำไปใช้ในสมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ จากการทดลองพบว่า การ
ปรับแก้แบบออนไลน์ สามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของการวัดแบบออดโดมิทรีได้ดีพอสมควรเมื่อ
เทียบกับการวิ่งแบบไม่มีการปรับแก้ค่าผิดพลาดเลย ระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้จริงเทียบกับระยะเป้าหมาย
ที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป ใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อมีการปรับแก้ค่าผิดพลาดหลายครั้ง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

4470553721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: MOBILE ROBOT / LOCALIZATION / DEAD RECKONNING / ODOMETRY

WUTHINUN SOONGNART : ONLINE CALIBRATION OF ODOMETRY-BASED LOCALIZATION USING AN EXTERNAL CAMERA. THESIS ADVISOR : PROF. SUPAVUT CHANTRANUWATHANA, COADVISER : ASST. PROF. RATCHATIN CHANCHAREON 101 pp. ISBN 974-17-5354-3

The effective use of mobile robot relies mainly on how accurate its position could be indicated in the working area. One of the most popular methods for measuring the mobile robot position is called "Odometry". This method is readily available at low cost, easy to use, and less time-consuming. However, position error at each measuring position tends to increase as the moving distance progressed.

Therefore, error correction is required to make this method feasible and more reliable. This research illustrated a method for error correction using VDO camera position measuring system. A camera is mounted in the working area where the robot is passing-by and records its movement to be further compared to the distance measured by "Odometry". The shift or error would be immediately corrected and adjusted to the odometric position equation. Most error was found to come from either the wheel radius changes or the moving acceleration of the robot itself. This proposed correction is an "on-line" method using the shifting position value measured by the camera to re-correct the true value of wheel radius at work. It was then used to formulate the correction equation to estimate the possible error at any acceleration and fastest movement value of the robot. This estimated error is then put into the equation to calculate the moving distance of the robot. The "on-line" correction has proven to be more accurate in measuring the real test distance as seen from the target movement of the robot done by "Odometry" method.

Department Mechanical Engineering

Student's signature

Field of study Mechanical Engineering

Advisor's signature

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย วิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบผลสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุกๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณอาจารย์ รศ.ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์ ผศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ และ อ.ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ สำหรับโอกาสในการร่วมทำงานในโครงการวิจัยของ MTEC ที่นำมาซึ่งประสบการณ์และทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบคุณ ชมรมนักประดิษฐ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ รุ่นน้องในชมรมทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยสนับสนุนอุปกรณ์และขอขอบคุณสำหรับทุกๆ ท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียนไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดี แก่กันเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 การปรับปรุงความแม่นยำของระบบวัดตำแหน่งแบบออตโดมิทรี.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่.....	5
2.2 การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่.....	8
2.2.1 การวัดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์.....	8
2.2.2 การวัดตำแหน่งแบบสัมบูรณ์.....	8
2.3 ระบบตรวจวัดตำแหน่งที่ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้.....	9
2.3.1 ออตโดมิทรี.....	9
2.3.2 การวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ด้วยกล้องวีดีโอ.....	10
2.4 สาเหตุของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากวิธีการวัดตำแหน่งแบบออตโดมิทรี.....	10
2.5 การลดค่าความผิดพลาดของวิธีวัดแบบออตโดมิทรี.....	12
2.5.1 การลดค่าความผิดพลาดของออตโดมิทรีโดยไม่ใช้ระบบตรวจวัดภายนอก แบบอื่นเข้าช่วย.....	13

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การลดค่าความผิดพลาดของฮอดโดมิทรีโดยใช้ระบบตรวจวัดภายนอกแบบอื่นเข้าช่วย.....	14
2.6 การลดค่าความผิดพลาดของวิธีวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรีโดยการใช้อัลเลียดวีดีโอ.....	14
บทที่ 3 การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยฮอดโดมิทรีและอัลเลียดวีดีโอ.....	16
3.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	16
3.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	19
3.2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	19
3.3 การใช้อัลเลียดวีดีโอวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์.....	20
3.3.1 การคำนวณตำแหน่งจากอัลเลียดวีดีโอ.....	23
3.3.1.1 การคำนวณหาจุดศูนย์กลางของวงกลมสีน้ำเงินและวงกลมสีแดง.....	24
3.3.2 การปรับตั้งอัลเลียดวีดีโอ.....	25
3.3.2.1 ขั้นตอนการปรับตั้งอัลเลียดวีดีโอ.....	27
3.4 การปรับค่าความผิดพลาดของระบบวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรี.....	29
3.5 การปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์.....	37
3.5.1 ขั้นตอนการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์.....	38
3.6 ข้อดีของการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์.....	42
3.7 ข้อจำกัดการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์.....	43
บทที่ 4 การทดลองและการปรับค่าความผิดพลาด.....	44
4.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการทดลอง.....	44
4.2 การทดลองเพื่อปรับค่าความผิดพลาดที่เป็นระบบ.....	45
4.2.1 การทดลองครั้งที่ 1.....	45
4.2.1.1 รายละเอียดของการทดลอง.....	45
4.2.1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	46

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.1.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	46
4.2.1.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	46
4.2.1.5 การแก้ไขค่าความผิดพลาดที่เป็นระบบ.....	48
4.2.2 การทดลองครั้งที่ 2.....	49
4.2.2.1 รายละเอียดของการทดลอง.....	49
4.2.2.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	49
4.2.2.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	49
4.2.2.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	49
4.2.3 การทดลองครั้งที่ 3.....	51
4.2.3.1 รายละเอียดของการทดลอง.....	51
4.2.3.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	51
4.2.3.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	52
4.2.3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	52
4.2.4 การทดลองครั้งที่ 4.....	54
4.2.4.1 รายละเอียดของการทดลอง.....	54
4.2.4.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	54
4.2.4.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	54
4.2.4.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	54
4.3 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะค่าความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบ.....	56
4.3.1 การทดลองครั้งที่ 5.....	56
4.3.1.1 รายละเอียดของการทดลอง.....	57
4.3.1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	57
4.3.1.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	57
4.3.1.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	57
4.3.1.5 วิเคราะห์ผลการทดลองครั้งที่ 5.....	58
4.4 การทดลองปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์จากการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ด้วยวิธี ถอดโดมิทรีแบบใช้กล้องภายนอก.....	64
4.4.1 รายละเอียดของการทดลอง.....	65

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	65
4.4.3 อุปกรณ์การทดลอง.....	65
4.4.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	65
4.4.5 ผลการทดลองการปรับค่าผิดพลาดแบบออนไลน์.....	75
4.5 สรุปผลการทดลอง.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่ใช้.....	88
ก.1 กล้องวีดีโอ.....	89
ก.2 รายละเอียดของหุ่นยนต์.....	90
ภาคผนวก ข. การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย LM629.....	91
ข.1 ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	92
ข.2 ขั้นตอนการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย LM629.....	93
ภาคผนวก ค. บทที่ได้ตีพิมพ์.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	101

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1.....	47
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2.....	50
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3.....	53
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองครั้งที่ 4.....	55
ตารางที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองครั้งที่ 5.....	58
ตารางที่ 4.6 ค่า Correlation coefficient ตามสมการที่ (4.1) ที่ค่า k ต่างๆ.....	64
ตารางที่ 4.7 ผลทดลองของการวิ่งเพื่อปรับค่าความผิดพลาดที่เป็นระบบ.....	66
ตารางที่ 4.8 ผลทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งครั้งที่ 2.....	67
ตารางที่ 4.9 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎี.....	70
ตารางที่ 4.10 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากการทดลอง.....	70
ตารางที่ 4.11 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎี.....	73
ตารางที่ 4.12 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากการทดลอง.....	73
ตารางที่ 4.13 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 1 ที่ความเร่ง $A_d = 50 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 100 \text{ mm/s}$	75
ตารางที่ 4.14 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 2 ที่ความเร่ง $A_d = 500 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 600 \text{ mm/s}$	76
ตารางที่ 4.15 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 3 โดยใช้โมเดลจากการทฤษฎีที่ความเร่ง $A_d = 300$ mm/s^2 และความเร็วสูงสุด $V_d = 300 \text{ mm/s}$	76
ตารางที่ 4.16 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 3 โดยใช้โมเดลจากการทดลองที่ความเร่ง $A_d = 300$ mm/s^2 และความเร็วสูงสุด $V_d = 300 \text{ mm/s}$	77
ตารางที่ 4.17 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 4 โดยใช้โมเดลจากการทฤษฎีที่ความเร่ง $A_d = 100$ mm/s^2 และความเร็วสูงสุด $V_d = 600 \text{ mm/s}$	77
ตารางที่ 4.18 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 4 โดยใช้โมเดลจากการทดลองที่ความเร่ง $A_d = 100$ mm/s^2 และความเร็วสูงสุด $V_d = 600 \text{ mm/s}$	78
ตารางที่ 4.19 รายละเอียดของการวิ่งแต่ละครั้งของหุ่นยนต์.....	78

สารบัญรูปร่าง

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบขับเคลื่อนแบบ Differential Drive.....	6
รูปที่ 2.2 ระบบขับเคลื่อนแบบ Tricycle Drive.....	6
รูปที่ 2.3 ระบบขับเคลื่อนแบบ Ackerman Steering.....	6
รูปที่ 2.4 ระบบขับเคลื่อนแบบ Synchro Drive.....	7
รูปที่ 2.5 ระบบขับเคลื่อนแบบ Omni directional Drive.....	7
รูปที่ 2.6 วงรีค่าความผิดพลาด	12
รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของล้อหุ่นยนต์.....	17
รูปที่ 3.2 ทิศทางของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ด้วยล้อซ้ายและล้อขวาในระยะที่ไม่เท่ากัน.....	18
รูปที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่.....	19
รูปที่ 3.4 กราฟความเร็วของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับเวลาที่ถูกร่างโดยตัวควบคุม.....	20
รูปที่ 3.5 ลักษณะจุดสีของภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ.....	21
รูปที่ 3.6 ลักษณะชุดอาร์เรย์ข้อมูลที่ได้รับจากกล้องวิดีโอ.....	21
รูปที่ 3.7 ลักษณะภาพจากกล้องที่ถูกแบ่งเป็นชั้นของแม่สีทั้ง 3.....	22
รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์ที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์เพื่อให้กล้องวัดตำแหน่ง.....	23
รูปที่ 3.9 ลักษณะภาพที่ถ่ายจากกล้องวิดีโอ.....	24
รูปที่ 3.10 การตรวจวัดด้วยกล้องวิดีโอ.....	26
รูปที่ 3.11 การติดตั้งกล้องวิดีโอสำหรับวัดตำแหน่ง.....	27
รูปที่ 3.12 ลักษณะของแผ่นเปรียบเทียบ.....	28
รูปที่ 3.13 ลักษณะภาพที่ถ่ายของแผ่นเปรียบเทียบได้จากกล้องวิดีโอ.....	29
รูปที่ 3.14 รัศมีล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อหุ่นยนต์มีภาระบรรทุก.....	30
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสิ้นไถลกับอัตราส่วนแรงเร่งหรือแรงเบรก.....	31
รูปที่ 3.16 กราฟความเร็วที่ล้อและความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์.....	32
รูปที่ 4.1 ความเร็วของหุ่นยนต์ตลอดการเคลื่อนที่.....	45
รูปที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการทดลอง.....	46
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายในการเคลื่อนที่ครั้งที่ 1.....	48
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายในการเคลื่อนที่ครั้งที่ 2.....	51
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายในการเคลื่อนที่ครั้งที่ 3.....	53
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายในการเคลื่อนที่ครั้งที่ 3.....	56

รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็ว (V_d) ที่ล้อยับความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์ (V) ที่เคลื่อนที่ ด้วยความเร่ง 10 cm/s^2 และความเร็วสูงสุด 50 cm/s	59
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_{ac} กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1$	60
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_{ac} กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/2$	61
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_{ac} กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/3$	61
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_{ac} กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/4$	62
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_{ac} กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/5$	62
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_{ac} กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/6$	63
รูปที่ 4.14 ผลการวิ่งแบบไม่มีการปรับค่าผิดพลาด.....	79
รูปที่ 4.15 ผลการวิ่งแบบมีการปรับค่าผิดพลาดภายในแต่ไม่มีการปรับค่าผิดพลาดที่ไม่เป็น ระบบ.....	79
รูปที่ 4.16 ผลการวิ่งแบบมีการปรับค่าผิดพลาดที่เป็นระบบและปรับค่าผิดพลาดที่ไม่เป็น ระบบแบบออนไลน์โดยใช้โมเดลจากการทฤษฎี.....	80
รูปที่ 4.17 ผลการวิ่งแบบมีการปรับค่าผิดพลาดภายในและปรับค่าผิดพลาดภายนอกแบบ ออนไลน์โดยใช้โมเดลจากการทดลอง.....	80
รูปที่ ก.1 กล้องวีดีโอที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อ HITACHI รุ่น KP-D50.....	88
รูปที่ ก.2 การ์ดจับภาพจากกล้องวีดีโอ.....	88
รูปที่ ก.3 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง.....	89
รูปที่ ข.1 พังค์ชันก์ของ LM629.....	90
รูปที่ ข.2 การสัญญาณแอนโคเดเดอร์.....	90
รูปที่ ข.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากกับมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นในด้านการผลิต ภาคอุตสาหกรรม การสำรวจ การรักษาความปลอดภัย ด้านการแพทย์ ความบันเทิง รวมไปถึง หุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบขึ้นเฉพาะภารกิจอีกหลาย ๆ อย่าง ประโยชน์ของหุ่นยนต์ที่เห็นได้ชัดเจนก็คือ ความสะดวกรวดเร็ว ความแม่นยำ ทำงานตามคำสั่งได้ตลอดเวลา และทำงานแทนมนุษย์ในงานที่มีความเสี่ยงสูง

การใช้งานหุ่นยนต์จะมีทั้งที่เป็นแบบลักษณะของแขนกลที่มีฐานยึดอยู่กับที่ (ส่วนแขนสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้) ซึ่งจะใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมที่เป็นการประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ เช่น อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อีกแบบหนึ่งก็คือ หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งมักจะถูกใช้ในงานขนถ่ายสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรม งานด้านการสำรวจพื้นที่อันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปสำรวจเองได้ เช่น ในเหมือง การเก็บกู้ระเบิด ได้ ทะเลลึก หรือในอวกาศ อีกทั้งยังสามารถช่วยเหลืออำนวยความสะดวกให้กับผู้ป่วย คนสูงอายุ หรือผู้ที่พิการไม่สามารถที่จะช่วยเหลือตัวเองได้

ลักษณะระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ใช้กันหลายระบบ เช่น ระบบล้อ ระบบขาเดิน และระบบล้อสายพาน แต่ระบบที่ใช้กันมากก็คือระบบล้อ เนื่องจากว่าระบบล้อมีข้อดีกว่าระบบอื่นตรงที่กลไกไม่มีความสลับซับซ้อน การควบคุมทำได้ง่ายและการประสิทธิภาพในการส่งกำลังที่ดีกว่า อีกทั้งในปัจจุบันยังได้มีการออกแบบระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ใช้ล้อให้สามารถวิ่งได้บนสภาพพื้นที่ขรุขระด้วยการออกแบบกลไกเพิ่มเติมให้กับล้ออีกด้วย

แม้ว่าจะมีการใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่ หลายรูปแบบและหลายพื้นที่ใช้งาน แต่การใช้งานโดยทั่วไปนั้น ข้อแรกหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะต้องสามารถระบุตำแหน่งของตัวเองให้ได้เสียก่อน เพื่อกำหนดทิศทางของเป้าหมายและวิเคราะห์เส้นทางเดินต่อไป งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยในเรื่องของการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และการปรับปรุงประสิทธิภาพของการวัด โดยใช้ระบบตรวจวัดตำแหน่งที่เรียกว่า ออดโดมิทรี (Odometry) เป็นระบบวัดที่ระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยการวัดปริมาณการหมุนของล้อแล้วแปลงมาเป็นระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้น มีข้อดีตรงที่เป็นระบบที่ตรวจวัดค่อนข้างง่าย วัดข้อมูลได้เร็วและราคาถูก แต่มีข้อเสียคือค่าความผิดพลาด (ความแตกต่างระหว่างระยะที่วัดได้กับระยะจริงที่หุ่นยนต์ได้เคลื่อนที่ไป) นั้นจะสะสมเพิ่มขึ้นตามระยะทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุง

ค่าตำแหน่งที่วัดได้ด้วยตัวตรวจวัดตำแหน่งอีกชุดหนึ่งที่ไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดเพื่อที่จะจำกัดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น และยังสามารถที่จะปรับให้การวัดด้วยออดโดมิทรี (Odometry) มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพิ่มขีดความสามารถของหุ่นยนต์และสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆได้มากขึ้น

1.2 การปรับปรุงความแม่นยำของระบบวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรี (Odometry)

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการปรับปรุงความแม่นยำของการวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรี (Odometry) โดยการนำระบบวัดตำแหน่งแบบกล้องวิดีโอซึ่งเป็นระบบวัดตำแหน่งที่ไม่มีการสะสมค่าผิดพลาด และนำข้อมูลที่ได้ไปแก้ไขพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่ง เพื่อให้การวัดแบบออดโดมิทรีมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) นั้นมาจากปัจจัยหลายอย่างซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ ความผิดพลาดที่เป็นระบบ (Systematic Errors) และความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบ (Non-Systematic Errors)[1,4] (ดูรายละเอียดได้ในบทที่ 2 ในหัวข้อระบบตรวจวัดที่ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้)ซึ่งจะพบว่าระบบการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) สามารถปรับปรุงให้แม่นยำขึ้นได้โดยการลดค่าผิดพลาดที่เป็นระบบ(ที่ส่วนใหญ่เกิดจากขนาดรัศมีล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากภาวะบรรทุก) ด้วยวิธีการนำระบบตรวจวัดแบบอื่นที่ไม่มีการสะสมของค่าผิดพลาดมาวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ และนำค่าที่ได้ไปทำการแก้ไขความผิดพลาด อันเกิดจากการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry)

ระบบการวัดตำแหน่งที่ไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาด ตัวตรวจวัดที่ใช้อาจเป็นเลเซอร์อัลตราโซนิก หรือกล้องวิดีโอ จากที่ผู้วิจัยได้ศึกษาในเรื่องระบบตรวจวัดแบบต่างๆ เห็นว่ากล้องวิดีโอมีความน่าสนใจ เนื่องจากว่ามีความแม่นยำ ตรวจวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ได้หลายตัวพร้อมกันถ้าติดตั้งไว้รอบตัวหุ่นยนต์ ข้อมูลที่ได้จากการวัดสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นในคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงได้ ยิ่งตัวโปรแกรมมีความสามารถสูงก็จะทำให้หุ่นยนต์มีความฉลาดเพิ่มมากยิ่งขึ้นด้วย และปัจจุบันแนวโน้มการนำกล้องวิดีโอกับหุ่นยนต์มีมากขึ้น สาเหตุอาจเป็นเพราะเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์และกล้องวิดีโอก้าวหน้าไปอย่างมาก การใช้งานกล้องวิดีโอกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้น จะมีทั้งแบบที่ตัวกล้องวิดีโอติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ และติดตั้งภายนอกตัวหุ่นยนต์ การติดตั้งกล้องบนตัวหุ่นยนต์นั้นมีข้อดีตรงที่หุ่นยนต์มีความเป็นอิสระสูง สามารถนำไปใช้งานได้หลายพื้นที่ แต่ข้อเสียก็คือหุ่นยนต์หนึ่งตัวต้องมีตัวประมวลผลที่มีความสามารถสูงและใช้กล้องวิดีโออย่างน้อยหนึ่งชุด ถ้าต้องใช้งานหุ่นยนต์หลายตัวจำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลและกล้องวิดีโอหลายชุดตามจำนวนของหุ่นยนต์เช่นกัน ทำให้การนำไปใช้งานโดยทั่วไปไม่เหมาะสมเนื่องจากค่าใช้จ่ายจะสูงมาก ส่วนการติดตั้งกล้องภายนอกตัว

หุ่นยนต์นั้นสามารถที่จะใช้กล้องเพียงตัวเดียวควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์หลายตัวได้ แต่ก็มีข้อเสียตรงที่สามารถใช้งานได้ในบริเวณที่จำกัด ถ้าพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์มีขนาดใหญ่ก็จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมากขึ้น

การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยออดโดมิทรี (Odometry) ร่วมกับกล้องวีดีโอเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความเหมาะสม ยิ่งเมื่อพื้นที่การใช้งานหุ่นยนต์มีขนาดใหญ่จะประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดตั้งกล้องวีดีโอให้ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานทั้งหมด แต่จะเลือกติดตั้งเพียงบางตำแหน่งเท่านั้น บริเวณที่กล้องไม่สามารถที่จะวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้ก็จะใช้วิธีการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ที่กล้องสามารถวัดได้ ระบบกล้องวีดีโอก็ทำการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) และทำการปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของการวัดด้วยออดโดมิทรี (Odometry) ซึ่งจะทำให้ความแม่นยำในการวัดมีมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่จะนำการวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอมาปรับแก้ค่าผิดพลาดของการวัดแบบออดโดมิทรี เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความยืดหยุ่นของหุ่นยนต์ขณะปฏิบัติงาน ในกรณีที่หุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงค่าการบรรทุกหรือแม้แต่การวิ่งบนพื้นที่ใช้งานที่มีความเสียดทานแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดความเป็นไปได้สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งก็มีหลายแบบเช่น การใช้งานด้านการสำรวจ การสร้างแผนที่ ขนถ่ายสินค้าวัสดุ งานทำความสะอาด ใช้ช่วยเหลือคนพิการหรือคนชรา เป็นต้น

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาและเสนอวิธีการแก้ไขความผิดพลาดของการวัดแบบออดโดมิทรี โดยใช้ระบบตรวจวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอ
- 2) ออกแบบและสร้างระบบวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรีที่สามารถแก้ไขค่าผิดพลาดได้ด้วยระบบวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบใช้ล้อที่ใช้งานภายในอาคารเพื่อศึกษาถึงความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้วิธีวัดแบบออดโดมิทรีในการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่
- 2) ออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์แบบออดโดมิทรีโดยใช้เครื่องวัดรอบที่สามารถแก้ไขค่าผิดพลาดด้วยกล้องวีดีโอ

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาถึงวิธีการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในพื้นที่ใช้งานแบบต่างๆจากงานวิจัยที่ผ่านมา
- 2) ออกแบบระบบการวัดแบบฮอดโดมิทรีที่สามารถแก้ไขความผิดพลาดได้
- 3) ออกแบบระบบวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอ
- 4) ออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ใช้การวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรีร่วมกับกล้องวีดีโอ
- 5) สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่พร้อมทั้งระบบวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรีและระบบวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอ
- 6) ติดตั้งระบบวัดแห่งทั้งสองแบบกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่และทดสอบการใช้งานโดยรวม
- 7) ทำการทดสอบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในพื้นที่ใช้งานจำลองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยฮอดโดมิทรีมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 2) ทำให้เกิดแนวทางการพัฒนาระบบควบคุมที่ลดค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และสามารถประยุกต์ใช้งานกับการควบคุมระบบอื่น
- 3) เพิ่มขีดความสามารถในการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่และทำให้เห็นถึงแนวทางการนำไปใช้งานในพื้นที่ต่างๆ

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

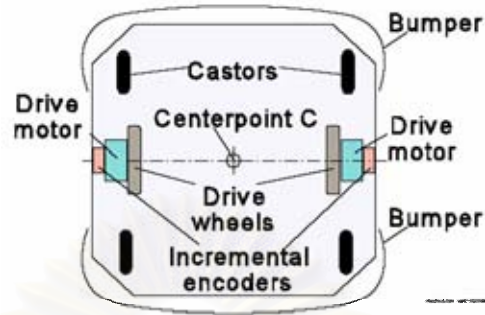
ในหลายปีที่ผ่านมาหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ถูกพัฒนาไปทั้งในด้านของความสามารถในการตรวจรู้สภาวะแวดล้อมควบคุมไปการการเพิ่มแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เทคโนโลยีที่ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยหลักแล้วมีอยู่ 3 ระบบคือ ระบบคอมพิวเตอร์ (computational resources) ระบบการสื่อสาร (communications) และระบบตรวจรู้ (sensors) ระบบตรวจรู้เป็นส่วนสำคัญมากที่ใช้ในหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ถ้าเปรียบตัวหุ่นยนต์เหมือนร่างกายมนุษย์ตัวตรวจรู้จะทำหน้าที่คล้ายประสาทสัมผัสของมนุษย์ การนำไปใช้งานกับหุ่นยนต์จะต้องเลือกให้เหมาะสมพิจารณาได้ดังนี้ [2]

- ความเหมาะสมในเรื่องของการตรวจวัดได้ตรงกับลักษณะของภารกิจ
- ความเหมาะสมเกี่ยวกับช่วงของการวัดที่ใช้งาน
- ความแม่นยำและความละเอียด
- ความสามารถในการตรวจวัดเป้าหมายได้ดีภายในสภาพแวดล้อมของการทำงาน
- ความเร็วของการตรวจวัด
- ความสมบูรณ์ของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
- ระบบสำรองในการตรวจวัด
- ความง่ายในการซ่อมแซมและราคาของตัวตรวจวัด
- พลังงานที่ใช้ของตัวตรวจวัด
- ขนาดของตัวตรวจวัด

2.1 ระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

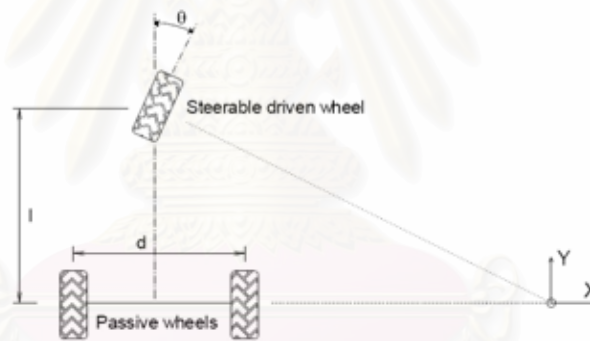
หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ถูกออกแบบมาใช้งานมีด้วยกันหลายแบบ ซึ่งแต่ละตัวย่อมมีจุดประสงค์ในการสร้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับภารกิจของหุ่นยนต์ แต่โดยทั่วไปลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มักจะใช้ล้อหรือไมก็ขาช่วยในการเคลื่อนที่ การใช้ล้อมีข้อดีตรงที่ การออกแบบไม่สลับซับซ้อน เคลื่อนที่ได้รวดเร็ว และไม่สิ้นเปลืองพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้กลไกขาเดิน ส่วนการใช้ขาเดินก็มีข้อดีตรงที่สามารถเดินไปบนพื้นขรุขระได้ สำหรับหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อในการเคลื่อนที่ก็มีอีกหลายลักษณะที่แตกต่างกันดังเช่น

- แบบ Differential Drive[1] จะเป็นระบบขับเคลื่อนที่มีล้อขับ 2 ล้อ ส่วนล้อที่นอกเหนือจากนี้จะเป็นล้อตาม ระบบขับเคลื่อนชนิดนี้ถือว่ามีข้อดีข้อน้อย และราคาถูกเนื่องจากใช้มอเตอร์เพียง 2 ตัว ดังรูปที่ 2.1



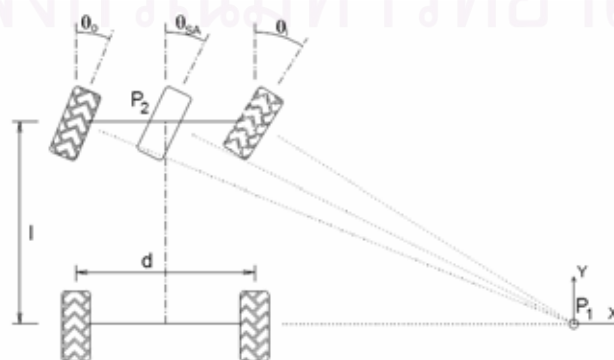
รูปที่ 2.1 ระบบขับเคลื่อนแบบ Differential Drive [1]

- แบบ Tricycle Drive[1] จะเป็นระบบขับเคลื่อนที่ใช้ล้อขับ 2 ล้อ และมีล้อที่ 3 ใช้สำหรับบังคับทิศทาง การเคลื่อนที่ ใช้มอเตอร์อย่างน้อย 3 ตัว ดังรูปที่ 2.2



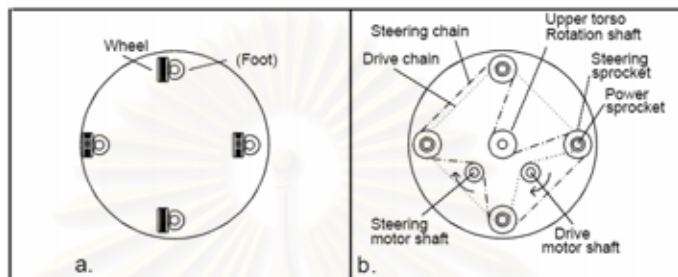
รูปที่ 2.2 ระบบขับเคลื่อนแบบ Tricycle Drive [1]

- แบบ Ackerman Steering[1] จะเป็นระบบขับเคลื่อนที่ใช้ล้อขับ 2 ล้อหรืออาจเป็น 4 ล้อ โดยล้อหน้าทั้งสองจะเป็นตัวบังคับทิศทาง การเคลื่อนที่ ใช้มอเตอร์อย่างน้อย 3 ตัว ดังรูปที่ 2.3



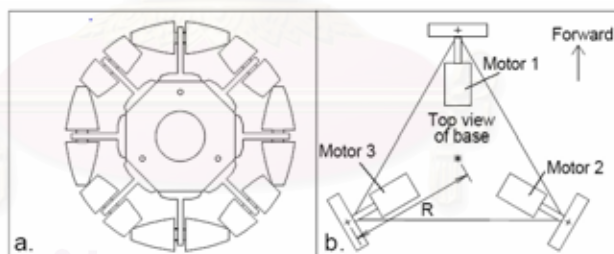
รูปที่ 2.3 ระบบขับเคลื่อนแบบ Ackerman Steering [1]

- แบบ Synchro Drive[1] เป็นระบบขับเคลื่อนที่ล้อต้องมีทิศทางที่สอดคล้องกันในขณะที่เคลื่อนที่ไปให้ทิศทางใดๆ แนวแกนของล้อทุกต้องตัดกันที่จุดใดจุดหนึ่ง ใช้มอเตอร์อย่างน้อยจำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบขับเคลื่อนแบบ Synchro Drive [1]

- แบบ Omni directional Drive[1] เป็นระบบขับเคลื่อนที่ล้อแต่ละล้อมี 2 องศาอิสระคือล้อสามารถที่จะหมุนรอบแกนและเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกนของตัวเอง แต่มีปัญหาเรื่องการเคลื่อนไถลของล้อเนื่องจากแรงเสียดทานต่ำ ใช้มอเตอร์เท่ากับจำนวนล้อ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบขับเคลื่อนแบบ Omni directional Drive [1]

การเลือกใช้ระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ก็ขึ้นอยู่กับภาระกิจของหุ่นยนต์ ต้นทุนค่าใช้จ่าย รวมถึงการบำรุงรักษา ถ้าเทียบกันด้านราคาแล้วระบบ Differential Drive จะมีราคาถูกที่สุด เนื่องจากใช้จำนวนมอเตอร์แค่ 2 ตัวในขณะที่ระบบอื่นๆ ใช้มอเตอร์อย่างน้อย 3 ตัวขึ้นไปอีกทั้งยังบำรุงรักษาง่ายเนื่องจากระบบไม่ซับซ้อน และในงานวิจัยนี้ก็เลือกใช้หุ่นยนต์ที่มีระบบขับเคลื่อนแบบ Differential Drive

2.2 การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่

ปัญหาพื้นฐานเบื้องต้น 3 ข้อของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หรือหุ่นยนต์ตรวจการ ที่ถูกออกแบบเพื่อใช้งานกับภารกิจต่างๆ ที่หุ่นยนต์จะต้องตอบให้ได้ก็คือ “ตำแหน่งปัจจุบันคืออะไร?” “ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ที่ไหน?” และ “วิธีการไปยังเป้าหมายทำอะไร?” [1] การจะแก้ปัญหาข้างต้นได้นั้น หุ่นยนต์จะต้องมีการวัดตำแหน่งของตัวเองเทียบกับบริเวณพื้นที่ใช้งาน ระบบการวัดตำแหน่งที่ใช้กันมีหลายแบบ สามารถแบ่งอย่างคร่าวๆ ได้ 2 ชนิด ที่เรียกกันว่า การวัดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ และการวัดตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ แต่ละแบบก็จะมีวิธีการและอุปกรณ์ที่แตกต่างกันแยกย่อยลงไปอีก การนำไปใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีนั้นอาจจำเป็นต้องใช้ทั้งสองรูปแบบพร้อมกันแล้วแต่ผู้ออกแบบจะเห็นสมควรตามภาระการใช้งานและงบประมาณ

2.2.1 การวัดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

1) **Odometry** เป็นวิธีการที่วัดรอบการหมุนของล้อและการหมุนตัวของหุ่นยนต์ แล้วคำนวณไปเป็นระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นและทิศทางของหุ่นยนต์ ข้อดีของออดโดเมทรีคือ ติดตั้งไปกับตัวหุ่นยนต์ได้ ราคาถูก คำนวณง่าย ตรวจวัดได้เร็ว แต่มีข้อเสียตรงที่ ความผิดพลาดจากการวัดมีการสะสมเพิ่มตามระยะทางที่หุ่นยนต์วิ่ง การนำไปใช้จึงจำเป็นต้องมีการจำกัดและปรับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้มันน้อยที่สุด

2) **Inertial navigation** เป็นวิธีการวัดข้อมูลความเร็ว หรือความเร่งของหุ่นยนต์แล้วนำไปหาค่าตำแหน่ง ซึ่งอาจจะใช้ไจโรสโคปหรือบางทีก็ใช้ accelerometers ในการวัดความเร็วเชิงมุมหรือความเร่งเชิงมุมของล้อ จากนั้นก็อินทิเกรตหนึ่งหรือสองครั้ง เพื่อหาค่าตำแหน่ง ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถติดตั้งอุปกรณ์ไปกับหุ่นยนต์ได้ ข้อเสียคือ ความแม่นยำของข้อมูลขึ้นอยู่กับอัตราการตรวจวัดถ้าอัตราการตรวจวัดสูงความแม่นยำก็สูงตาม ค่าความผิดพลาดในการตรวจวัดแต่ละครั้งมีการสะสมเนื่องจากการคำนวณตำแหน่งต้องใช้การอินทิเกรต และราคาค่อนข้างสูง

2.2.2 การวัดตำแหน่งแบบสัมบูรณ์

1) **Active Beacons** เป็นวิธีการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ เทียบกับตัวส่งสัญญาณในทิศทางที่ต่างกัน อย่างน้อย 3 ตัว สัญญาณที่ใช้ อาจเป็น แสง หรือ คลื่นวิทยุ ซึ่งส่งจากตัวส่งที่ตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม ภายในพื้นที่ใช้งาน มีข้อดีตรงที่ มีความแม่นยำ วัดตำแหน่งได้ 3 มิติ แต่ข้อเสียคือ ราคาสูง ต้องติดตั้งอุปกรณ์บางส่วนภายนอกตัวหุ่นยนต์ขาดความยืดหยุ่นในการใช้งาน

2) **Artificial Landmark Recognition** เป็นวิธีการวัดตำแหน่งโดยการใส่สัญลักษณ์บางอย่างติดตั้งในพื้นที่ใช้งานในตำแหน่งที่ต้องการเพื่อให้หุ่นยนต์ได้ตรวจสอบ ทำให้หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของตัวเองได้ ข้อดีของวิธีการนี้ก็คือว่า สามารถออกแบบสัญลักษณ์ให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ใช้งานแม้ว่าสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไป ค่าความผิดพลาดไม่มีการสะสม แต่การตรวจสอบสัญลักษณ์เพื่อระบุตำแหน่งไม่สามารถที่จะทำได้แบบต่อเนื่องเพราะสัญลักษณ์ถูกติดตั้งเพียงบางตำแหน่งของพื้นที่ใช้งาน และความละเอียดของการวัดค่อนข้างต่ำ

3) **Natural Landmark Recognition** เป็นวิธีการวัดโดยใช้ตัวตรวจรู้วัดลักษณะของสภาพสิ่งแวดล้อมซึ่งผู้ใช้งานรู้ตำแหน่งและนำไปใช้สำหรับให้หุ่นยนต์อ้างอิง เช่น ระยะห่างจากแนวกำแพงหรือผนัง เป็นต้น ความละเอียดที่สามารถวัดได้มีค่าค่อนข้างต่ำ

4) **Model Matching** เป็นวิธีการวัดที่ใช้การอ้างอิงข้อมูลของสภาพแวดล้อมภายนอกที่หุ่นยนต์วัดได้จากตัวตรวจวัดเปรียบเทียบกับแผนที่ของพื้นที่ใช้งานที่ผู้ออกแบบได้โปรแกรมเข้าไปในหน่วยความจำของหุ่นยนต์ มีข้อดีตรงที่ค่าความผิดพลาดไม่เกิดการสะสม แต่การนำหุ่นยนต์ไปใช้งานจำเป็นต้องมีข้อมูลแผนที่ของพื้นที่ใช้งานเพื่อบันทึกในหน่วยความจำของหุ่นยนต์

2.3 ระบบตรวจวัดตำแหน่งที่ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้

การเลือกใช้ระบบวัดตำแหน่งกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นมีหลายทางเลือก ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบโดยอาจจะคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งาน ความแม่นยำ ราคา หรือการซ่อมบำรุง เป็นต้น งานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบวัดตำแหน่ง 2 แบบคือ

2.3.1 ออดโดมิทรี (Odometry)

เดดเรคคองนิง (Dead Reckoning) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยการใช้ข้อมูลของตำแหน่งและความเร็วที่วัดได้ในอดีตตามช่วงของเวลาที่กำหนดมาหาตำแหน่งและความเร็วในปัจจุบัน [2] ออดโดมิทรี (Odometry) เป็นวิธีการวัดที่ใช้การคำนวณแบบเดดเรคคองนิง (Dead Reckoning) ซึ่งวิธีการนี้จะวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากระยะการหมุนของเพลาล้อแล้วนำไปคำนวณเป็นระยะทางการเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยใช้ตัวตรวจวัดที่วัดรอบการหมุนของล้อที่เรียกว่า เอนโคดเดอร์ (Encoder)

วิธีการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากว่า การวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) ให้ความแม่นยำสูงในช่วงการวัดระยะสั้น ราคาถูก และอัตราการวัดสูง (high sampling rate) พื้นฐานของการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) คือการนับค่าข้อมูลที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะเวลาในการวัด ซึ่งก็ส่งผลทำให้ค่าผิดพลาดของการนับในแต่ละครั้ง

สะสมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการวัดเช่นเดียวกัน ถึงอย่างไรก็ตามการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) ยังเป็นที่นิยม แต่การนำไปใช้ต้องมีการปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัด เพื่อให้เกิดความแม่นยำ ในงานวิจัยนี้จะวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ด้วยวิธีการวัดแบบออดโดมิทรีเป็นหลัก ส่วนการวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอ นั้นจะใช้สำหรับปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบออดโดมิทรี

2.3.2 การวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ด้วยกล้องวีดีโอ (Absolute Position by Camera)

วิธีการวัดตำแหน่งด้วยกล้องวีดีโอ ข้อมูลที่ได้นั้นจะเป็นตำแหน่งสัมบูรณ์ การนำไปใช้กับหุ่นยนต์นั้นสามารถติดตั้งได้ทั้งภายนอกและภายใน การติดตั้งภายนอกก็คือ การใช้กล้องวีดีโอ วัดตำแหน่งหุ่นยนต์ในพื้นที่บริเวณหนึ่ง ซึ่งเป็นที่ที่หุ่นยนต์ต้องทำงานอยู่ในบริเวณนั้น โดยตัวกล้องจะถูกติดตั้งตายตัวกับที่ยึด ซึ่งอยู่เหนือพื้นที่ใช้งานหุ่นยนต์ขึ้นไป ส่วนการติดตั้งภายในก็คือ การติดตั้งกล้องไปบนตัวหุ่นยนต์นั่นเอง และงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีแบบติดตั้งภายนอก

2.4 สาเหตุของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรี (Odometry)

การวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรี (Odometry) จะใช้วิธีการคำนวณที่เรียกว่า เดดเรคคองนิง (Dead reckoning) ข้อมูลที่ใช้คำนวณจะได้จากเอนโคดเดอร์ (Encoder) ซึ่งเพลลาของเอนโคดเดอร์ (Encoder) จะหมุนไปพร้อมกับเพลลาล้อของหุ่นยนต์ การคำนวณทำได้โดยวัดระยะการหมุนของเพลลาล้อหุ่นยนต์ด้วยการนับลูกคลื่นสัญญาณจากเอนโคดเดอร์ (Encoder) และแปลงไปเป็นระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้น การนับลูกคลื่นสัญญาณและคำนวณให้เป็นระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแต่ละครั้งจะมีค่าผิดพลาดระหว่างระยะที่ได้จากการคำนวณกับระยะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้จริง ด้วยสาเหตุนี้ค่าความผิดพลาดจะสะสมเพิ่มขึ้นไปตามระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแยกได้ 2 ประเภทที่เรียกว่า ความผิดพลาดที่เป็นระบบ (Systematic Errors) ความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบ (Non-Systematic Errors) [4]

ความผิดพลาดที่เป็นระบบ (Systematic Errors) เกิดจาก

- รัศมีของล้อหุ่นยนต์ไม่เท่ากัน
- ค่าความแตกต่างระหว่างรัศมีจริงของล้อในขณะที่หุ่นยนต์วิ่งกับขนาดรัศมีของล้อที่วัดได้
- การเอียงของล้อหุ่นยนต์
- ความละเอียดของเอนโคดเดอร์
- อัตราการตรวจวัดข้อมูลจากเอนโคดเดอร์

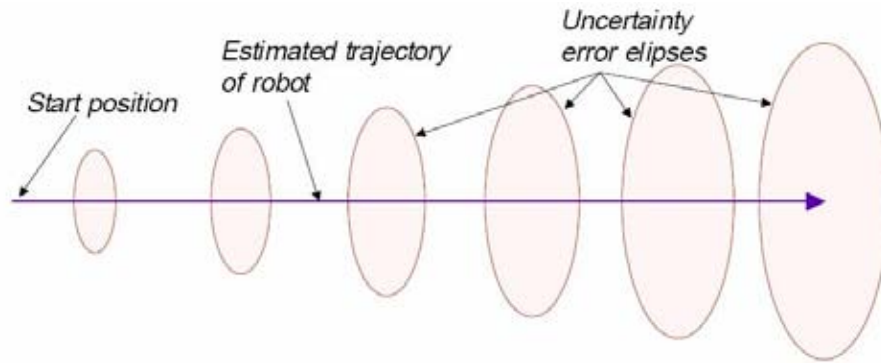
ความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบ (Non-Systematic Errors) เกิดจาก

- หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นขรุขระ
- มีวัตถุที่เป็นอุปสรรคขัดขวางการเคลื่อนที่
- ล้อหุ่นยนต์มีการลื่นไถล (Slip) สาเหตุอาจเกิดมาจาก
 - พื้นผิวของล้อมีค่าความเสียดทานต่ำ
 - ความเร่งที่ล้อสูงเกินไป
 - มีแรงจากภายนอกมากกระทำเช่น หุ่นยนต์ชนกับสิ่งกีดขวาง
 - ล้อของหุ่นยนต์ไม่สัมผัสกับพื้น

ค่าผิดพลาดที่เป็นระบบ(Systematic Errors) จะเป็นค่าที่เกิดขึ้นคงที่ในแต่ละช่วงเวลาที่เราตรวจวัดตำแหน่ง และจะสะสมเพิ่มขึ้นไปตามระยะการเคลื่อนที่ ส่วนค่าผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบจะเป็นค่าที่เกิดในลักษณะแบบสุ่ม วัดได้ค่อนข้างลำบาก การจำแนกความผิดพลาดให้ชัดเจนเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยในการปรับปรุงความแม่นยำในการวัดแบบออดโดมิทรี (Odometry) เพราะจะเป็นตัวช่วยให้เห็นรูปแบบของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น และสามารถปรับปรุงได้ตรงตามสาเหตุ

ค่าความผิดพลาดที่ต้องทำการแก้ไขส่วนใหญ่ จะแก้ที่ความผิดพลาดที่เป็นระบบ ซึ่งเป็นค่าที่เห็นได้ชัดเจน สามารถประมาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและทำการชดเชยให้หายไปได้ ส่วนค่าความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบเป็นค่าความผิดพลาดที่ค่อนข้างที่จะคาดเดาได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบแล้วเราสามารถที่กำจัดไปได้บางส่วน โดยการออกแบบหุ่นยนต์ให้เหมาะสมกับพื้นที่ใช้งาน เช่นการใช้ล้อที่มีความเสียดทานสูง พื้นที่ใช้งานหุ่นยนต์ไม่มีสิ่งกีดขวาง หรือการชดเชยค่าผิดพลาดจากการประมาณด้วยความเร่ง เป็นต้น

การประมาณตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ด้วยออดโดมิทรี (Odometry) เห็นได้ชัดเจนตามรูปที่ 1 การระบุตำแหน่งด้วยออดโดมิทรีจะบอกเป็นพื้นที่รูปวงรี(ไม่สามารถระบุเป็นจุดใดจุดหนึ่งได้เนื่องจากการวัดมีค่าผิดพลาดรวมอยู่ด้วย) วงรีจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ เนื่องจากค่าผิดพลาดมีการสะสม การใช้ออดโดมิทรีวัดตำแหน่งจึงจำเป็นต้องจำกัดหรือปรับปรุงขนาดให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้



รูปที่ 2.6 วงรีค่าความผิดพลาด [1]

2.5 การลดค่าความผิดพลาดของวิธีวัดแบบออกโดมิทรี

ความแม่นยำของการวัดแบบออกโดมิทรีขึ้นอยู่กับ การออกแบบของเสาอิสระของการเคลื่อนที่และขนาดของตัวหุ่นยนต์ เป็นต้นว่า หุ่นยนต์ที่มีขนาดของฐานล้อที่กว้างจะมีค่าผิดพลาดที่น้อยกว่าหุ่นยนต์ที่มีฐานล้อแคบ อีกทั้งเรื่องของจุดศูนย์ถ่วง น้ำหนักของหุ่นยนต์ ความสมดุลของน้ำหนักที่ล้อรับภาระยกตัวอย่างเช่น

- ถ้าล้อตามของหุ่นยนต์รับน้ำหนักมาก เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่กลับทิศทางจะเกิดค่าความผิดพลาดมากกว่าหุ่นยนต์ที่ล้อตามรับน้ำหนักน้อยกว่า

- ล้อของหุ่นยนต์ที่ใช้หมุนเอนโคเดอร์ควรจะมีขอบเล็ก “knife-edge” และต้องแข็งเพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูป เช่น ล้อที่ทำจากอะลูมิเนียมโดยหุ้มยางที่ขอบเพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบให้ล้อบางนั้นไม่สามารถที่จะรับน้ำหนักได้มาก และล้อจะต้องมีความเสียดทานเพียงพอสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่ต้องการ ตัวล้อเองจึงจำเป็นต้องมีผิวสัมผัสกับพื้นให้มากนั่นเอง

- ออกแบบระบบขับเคลื่อนก็มีผลกับความแม่นยำของการวัดแบบออกโดมิทรี การเลือกใช้จำนวนล้อขับหุ่นยนต์ที่มากเกินไปจนความจำเป็นเช่น การใช้ล้อขับ 4 ล้อ กับแบบ 2 ล้อ เมื่อนำหุ่นยนต์ไปวิ่งบนพื้นที่มีความขรุขระ แบบ 4 ล้อนั้นอาจจะมียางล้อที่ไม่สัมผัสพื้นซึ่งไม่เหมือนกับแบบ 2 ล้อที่โอกาสที่ล้อไม่สัมผัสพื้นมีน้อยกว่า อีกอย่างการที่มีล้อขับมากแรงขับก็มากตามไปด้วย เมื่อมีแรงมากก็จะเกิดปัญหาการลื่นไถลอีกด้วย [1]

ดังที่ทราบกันความผิดพลาดที่เป็นระบบส่วนใหญ่เกิดจากการออกแบบ และวัดขนาดของส่วนประกอบของหุ่นยนต์ผิดจากความเป็นจริงกับตอนที่นำหุ่นยนต์ไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็น ขนาดของล้อที่ไม่เท่ากัน หรือขนาดล้อที่เปลี่ยนไปเมื่อหุ่นยนต์มีภาระบรรทุก ดังนั้นการแก้ไขจำเป็นต้องให้ความสนใจในเรื่องของการออกแบบ ส่วนค่าผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบก็ต้องให้ความสนใจกับแรงภายนอกที่มากกระทำ การแก้ค่าผิดพลาดของระบบวัดแบบออกโดมิทรีที่ได้ทำมาแล้วมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีความแตกต่างกันไป แต่ในที่นี่จะแบ่งลักษณะของวิธีการออกเป็น 2 แบบคือ

2.5.1 การลดค่าความผิดพลาดของฮอดโดมิทรีโดยไม่ใช้ระบบตรวจวัดภายนอกแบบอื่นเข้าช่วย

วิธีการในลักษณะนี้จะปรับปรุงความแม่นยำของการวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรีโดยใช้ข้อมูลที่วัดได้จากฮอดโดมิทรีมาประมาณค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น[3, 9, 10, 11, 12] หรือใช้วิธีการปรับเทียบล่วงหน้าเพื่อหาโมเดลที่แม่นยำสำหรับใช้คำนวณตำแหน่ง[4, 7] จากบทความของ Borenstein [1, 3, 4, 5] ได้มีการระบุลักษณะที่มาของความผิดพลาดทั้งสองชนิดที่เรียกว่า Systematic Error และ Non-systematic Error Borenstein[4] คิดวิธีปรับเทียบเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เป็นระบบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 2 ล้อแบบ Differential Drive ด้วยวิธีการที่เรียกว่า UMBmark ซึ่งเป็นวิธีการปรับเทียบขนาดของรัศมีล้อและระยะห่างของฐานล้อให้ถูกต้องตามความเป็นจริงในขณะที่หุ่นยนต์ถูกใช้งาน และวิธีการนี้ยังถูกนำไปใช้ลดค่าความผิดพลาดที่เป็นระบบใน [10] อีกด้วย Borenstein[5] ใช้ข้อมูลจากไจโรสโคปร่วมกับข้อมูลจากเอนโคเดอร์เรียกวิธีการนี้ว่า Gyrodometry โดยนำข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจวัดทั้งสองมาเปรียบเทียบและแก้ค่าผิดพลาด Borenstein ยังได้ออกแบบวิธีการลดค่าความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบโดยไม่ใช้ระบบวัดภายนอกอย่างอื่นมาร่วมด้วย วิธีการนี้เรียกว่า IPEC (Internal Position Error Correction) [3] โดยได้ออกแบบให้หุ่นยนต์สองตัวพ่วงกัน และให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกัน เรียกหุ่นยนต์ลักษณะนี้ว่า MDOF (Multi Degree of Freedom) ซึ่งมีชื่อว่า Omnimate ซึ่งแต่ละตัวสามารถตรวจสอบค่าผิดพลาดซึ่งกันและกันได้

วิธีการหาโมเดลความผิดพลาด [7, 9, 10] ก็เป็นอีกรูปแบบที่ใช้ลดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น Asensio และ Chiaverini [7] หาโมเดลโดยการทดลองให้หุ่นยนต์วิ่ง แล้วนำข้อมูลตำแหน่งที่วัดได้ของหุ่นยนต์มาใช้วิธี Least-Squares Technique เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปใช้ในสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ Agostino [9] สร้างโมเดลที่ใช้ประมาณค่าผิดพลาดของหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบ Synchronous Drive โดยใช้พารามิเตอร์ 4 ตัวคือ ความเร็วและตำแหน่งเริ่มต้นกับความเร็วและตำแหน่งสุดท้าย เพื่อประมาณค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ Chong และ Kleeman [10] สร้างโมเดลค่าผิดพลาดโดยอิงจากลักษณะของเส้นทางที่หุ่นยนต์วิ่ง โดยจะแบ่งเส้นทางออกเป็นช่วงย่อย แล้วหาโมเดลแต่ละช่วงย่อย จากนั้นนำมารวมกันทั้งเส้นทางได้เป็นรูปแบบโมเดลค่าผิดพลาดของเส้นทางทั้งช่วงและก็สามารถประมาณค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ Nakju, Howie และ Chung[11] ได้เสนอวิธีการปรับเทียบเพื่อลดค่าผิดพลาดที่เป็นระบบของฮอดโดมิทรีที่ใช้กับหุ่นยนต์แบบ Synchronous Drive ที่เรียกว่า PC(POSTECH MCU) โดยการปรับค่าผิดพลาดมีหลักสำคัญอยู่ที่ การหาสาเหตุของค่าผิดพลาดที่เป็นระบบ การปรับพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าผิดพลาด และการประมาณหา Covariance Matrix

De Xu, Min Tang และ Gang Chen[12] ใช้วิธีเพิ่มเอนโคเดเดอร์เพื่อตรวจข้อมูลตำแหน่งจากหลายแหล่ง โดยตัวเอนโคเดเดอร์หลักจะติดตั้งกับแกนหมุนของล้อขับเคลื่อนทั้งสอง ส่วนเอนโคเดเดอร์รองอีกสองอันจะติดตั้งไปกับล้อตาม โดยจะติดที่แกนหมุนล้อตามหนึ่งตัว และมุมการหมุนในแนวตั้งฉากกับพื้นอีกหนึ่งตัว ข้อมูลที่ได้รับจากเอนโคเดเดอร์รอง จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเอนโคเดเดอร์หลัก เพื่อปรับค่าความผิดพลาด

2.5.2 การลดค่าความผิดพลาดของฮอดโดมิทรีโดยใช้ระบบตรวจวัดภายนอกแบบอื่นเข้าช่วย

การใช้ระบบตรวจวัดภายนอกที่สามารถวัดตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ ร่วมกับการวัดแบบฮอดโดมิทรีสามารถจำกัดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ ทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากระบบตรวจวัดภายนอกไปปรับปรุงโมเดลที่ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งของระบบวัดแบบฮอดโดมิทรีได้อีกด้วย Nsasi Bakambu, Polotski และ Cohen[13] ออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่สำหรับสำรวจเหมืองโดยใช้การวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรีร่วมกับไจโรสโคป และอินคลิโนมิเตอร์(Inclinometer) เพื่อปรับแก้ Drift rate ของไจโรสโคป รวมทั้งติดตั้งระบบตรวจวัดสภาพแวดล้อมบริเวณพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำงานด้วยเลเซอร์และโซนาร์พร้อมกับรวมข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจวัดทั้งหมดผ่าน Kalman Filter เพื่อหาตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์ Huosheng และDongbing[15] ปรับค่าผิดพลาดโดยการใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ตรวจสอบสภาพแวดล้อมพร้อมกับวัดค่าตำแหน่งอ้างอิงจาก Landmark และใช้ Kohonen neural network ในการเรียนรู้เพื่อจำลักษณะและตำแหน่งของ Landmark ซึ่งจะช่วยให้การเปรียบเทียบทำได้ได้ง่ายขึ้นเมื่อนำหุ่นยนต์ไปใช้งานที่อื่น Agostino, Nicola, Adriana และ Roland[16] ใช้วิธีการปรับค่าผิดพลาดทั้งสองแบบในขณะที่หุ่นยนต์ทำงาน ด้วยโมเดลความผิดพลาดผ่าน Extended Kalman Filter โดยข้อมูลจะได้มาจากเอนโคเดเดอร์และเลเซอร์ที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ Hans-Joachim และ Didier[17] ใช้วิธีการประมาณค่าผิดพลาดของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบใช้ภายนอกที่มีชื่อเรียกว่า ROMANE ด้วยโมเดลความผิดพลาดผ่าน Extended Kalman Filter โดยได้วัดข้อมูลจาก เอนโคเดเดอร์ เซมิทิสคอปเล็กทรอนิกส์ และไจโรสโคป นอกจากนี้ Antonelli และ Montiel [6] ได้ใช้ระบบตรวจวัดภายนอกที่ใช้เลเซอร์และกล้องวีดีโอสำหรับการตรวจจับสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่ใช้งานเพื่อระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ แล้วนำค่าตำแหน่งที่ได้ปรับแก้ความผิดพลาด

2.6 การลดค่าความผิดพลาดของวิธีวัดตำแหน่งแบบฮอดโดมิทรีโดยการใส่กล้องวีดีโอ

การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปใช้งานนั้นผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการเริ่มตั้งแต่ชนิดของงานที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ทำ ประโยชน์ที่ได้รับ ซึ่งคงเป็นเรื่องของ ต้นทุนในการ

สร้างเทียบกับการที่หุ่นยนต์ทำ ถ้าหากหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้หลายอย่าง หรือเอาไปใช้ได้หลายที่ ก็ถือว่าคุ้มค่าที่จะสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขึ้นมาใช้งาน

ประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการระบุตำแหน่งตัวเอง และตำแหน่งของเป้าหมายที่กำลังจะเคลื่อนที่ไป ระบบวัดตำแหน่งที่ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ส่วนใหญ่คือ ระบบออดโดมิทรี เนื่องจากมีราคาถูก ไม่ซับซ้อน และวัดได้ค่อนข้างแม่นยำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่นิยม แต่ก็มีข้อเสียเรื่องการสะสมค่าผิดพลาด ดังนั้นเมื่อนำไปใช้ ก็จำเป็นที่จะต้องแก้ปัญหาเรื่องการสะสมค่าผิดพลาด เนื่องจากค่าผิดพลาดได้ถูกนิยามเป็น 2 สาเหตุ[1, 3, 4, 5] คือ Systematic Errors และ Non-Systematic Errors งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการลดค่าผิดพลาดของระบบวัดแบบออดโดมิทรีจากการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีล้อหุ่นยนต์อันเนื่องมาจากการการะบรทุกที่เปลี่ยนไปของหุ่นยนต์ ซึ่งถูกจัดเป็นค่าผิดพลาดที่อยู่ในส่วนของ Systematic Errors และค่าผิดพลาดอันเนื่องมาจากการที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ด้วยการใช้กล้องวีดีโอแบบติดตั้งภายนอกตัวหุ่นยนต์ ที่เรียกว่า"การปรับเทียบแบบออนไลน์" วิธีการปรับเทียบแบบออนไลน์นี้จะใช้กล้องเป็นตัววัดค่าผิดพลาดของออดโดมิทรี จากนั้นก็นำค่าผิดพลาดที่ได้ไปปรับปรุงค่ารัศมีล้อให้ถูกต้องตามขนาดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการการะบรทุก และนำไปสร้างโมเดลที่ใช้ประมาณค่าผิดพลาดอันเกิดจากความเร่งของหุ่นยนต์ให้เหมาะสมสำหรับการคำนวณตำแหน่ง ซึ่งจากงานวิจัย [4] ค่าผิดพลาดจากความเร่งจะถูกจัดอยู่ในส่วน Non-Systematic Errors แต่เนื่องจากผู้วิจัยได้หาโมเดลที่ใช้สำหรับการประมาณค่าผิดพลาดจากความเร่งที่จะเกิดขึ้น จึงจะจัดค่าผิดพลาดลักษณะนี้ให้อยู่ในส่วนของ Systematic Errors โดยโมเดลนี้จะสร้างขึ้นจากการกำหนดระยะลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ คือจะต้องกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบมีความเร่งคงที่และต้องเบรคด้วยความหน่วงคงที่ถึงจะสามารถใช้โมเดลนี้ได้ โมเดลค่าผิดพลาดนี้จะใช้ความเร่งและความเร็วที่กำหนดให้หุ่นยนต์วิ่งมาประมาณค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น เมื่อประมาณค่าผิดพลาดได้แล้วจึงนำไปใช้ในสมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปตามระยะที่ต้องการ โมเดลที่ใช้ประมาณค่าผิดพลาดนี้สามารถที่จะนำไปใช้ได้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ทุกตัว การปรับค่าผิดพลาดแบบออนไลน์ทำได้ในขณะที่หุ่นยนต์ทำงาน ซึ่งเป็นข้อดีเพราะไม่ต้องเสียเวลาในการปรับเทียบเหมือนวิธีการใน [5, 7] เมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่อื่น ต้นทุนในการสร้างไม่สูงมากนักเนื่องจากวิธีการนี้สามารถใช้กับหุ่นยนต์ได้หลายตัวโดยที่ใช้กล้องเพียงไม่กี่ตัว

บทที่ 3

การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยออกโดมิทรีและกล้องวีดีโอ

ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์แบบออกโดมิทรีพร้อมทั้งการใช้กล้องวีดีโอแบบที่ติดตั้งภายนอกวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ของหุ่นยนต์ รวมไปถึงแนวทางการปรับค่าผิดพลาดที่จะช่วยให้การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่มีความแม่นยำมากขึ้น

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่า ความผิดพลาดของออกโดมิทรีนั้นมีการสะสมเมื่อระยะเวลาเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มากขึ้นซึ่งเกิดมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน การแก้ไขก็ต้องอาศัยวิธีการใช้ระบบการวัดตำแหน่งสัมบูรณ์แบบอื่นมาช่วยในการจำกัดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยให้ระบบออกโดมิทรีแก้ค่าตำแหน่งที่ได้ให้มีความตรงกับค่าตำแหน่งที่วัดจากระบบวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ที่เราเลือกใช้ แต่การจำกัดความผิดพลาดลักษณะนี้ไม่ได้ช่วยให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แม่นยำขึ้นไปกว่าค่าความแม่นยำของระบบวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ที่เอามาใช้ร่วมกับระบบออกโดมิทรี ดังนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น จึงควรมีวิธีการเพิ่มความแม่นยำในการวัดให้มากกว่าความแม่นยำของระบบวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ แต่ก่อนที่จะถึงกระบวนการดังกล่าวเราจำเป็นต้องเลือกระบบวัดตำแหน่งสัมบูรณ์ที่จะใช้ร่วมกับระบบออกโดมิทรี

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กล้องวีดีโอเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน กล่าวคือ ข้อมูลจากกล้องวีดีโอนั้นวิเคราะห์ได้ง่าย และมีความแม่นยำสูง สามารถวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้หลายตัวพร้อมกัน การติดตั้งไม่ยากลำบากมากนัก ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการติดตั้งกล้องวีดีโอภายนอกตัวหุ่นยนต์ โดยจะติดตั้งเหนือทางเดินของหุ่นยนต์ ก่อนใช้งานต้องมีการปรับเทียบกล้องเพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง โดยจะต้องระบุตำแหน่งและทิศทางให้กับกล้องวีดีโอได้ทราบว่ายู่บริเวณใดของพื้นที่ใช้งาน ขนาดที่วัดได้จากภาพเทียบกับขนาดจริงเป็นเท่าไร และเมื่อใดก็ตามที่มีการเคลื่อนย้ายกล้อง จะต้องทำการปรับเทียบทุกครั้งไป

3.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

การวัดตำแหน่งหุ่นยนต์โดยออกโดมิทรีนั้นจะวัดจากระยะที่ล้อหมุนไป ตัวตรวจรู้(เอนโคเดอร์)จะวัดมุมการหมุนของล้อ เมื่อต้องการคำนวณหาตำแหน่งของหุ่นยนต์จะต้องแปลงค่าที่ได้จากการนับรอบการหมุนด้วยเอนโคเดอร์ไปเป็นระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้น

การเปลี่ยนจำนวนรอบของการหมุนไปเป็นระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้น



รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของล้อหุ่นยนต์

ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นคำนวณได้จาก

$$S = C_m N \quad (3.1)$$

$$C_m = \frac{2\pi R_n}{nC_e}$$

โดยที่ S คือ ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้น (mm)

N_R คือ จำนวนลูกคลื่นที่นับได้จากเอนโคดเดอร์ (pulse)

C_m คือ ค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนมุมการหมุนเชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น

R_n คือ ขนาดรัศมีของล้อ (mm)

C_e คือ ความละเอียดของเอนโคดเดอร์ (pulse/rev)

n คือ อัตราส่วนการทดระหว่างเฟลามาเตอร์กับเฟลาเอนโคดเดอร์

ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นของล้อขวา คือ S_{oR} และล้อซ้าย คือ S_{oL} คำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} S_{oR} &= C_m N_R \\ S_{oL} &= C_m N_L \end{aligned} \quad (3.2)$$

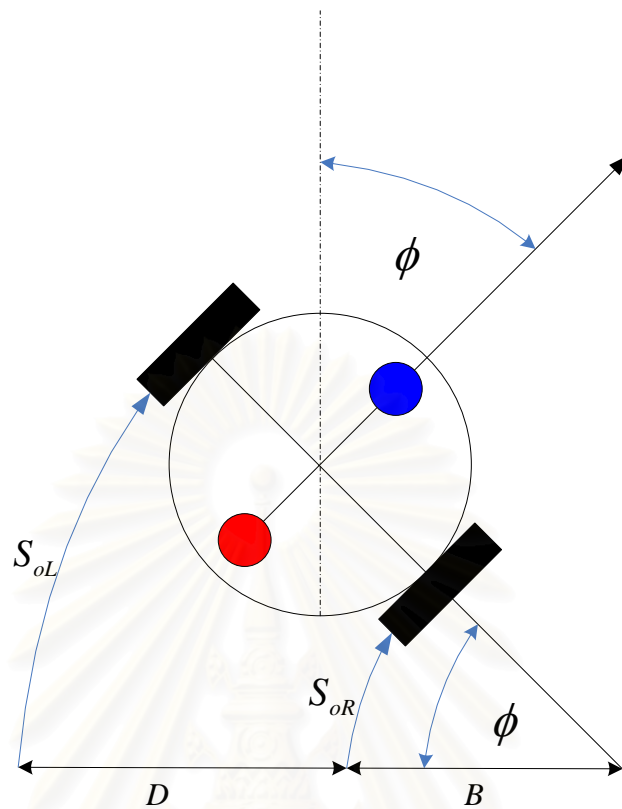
โดยที่ S_{oR} คือ ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นของล้อขวา (mm)

S_{oL} คือ ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นของล้อซ้าย (mm)

N_R คือ จำนวนลูกคลื่นที่นับได้จากเอนโคดเดอร์ล้อขวา (pulse)

N_L คือ จำนวนลูกคลื่นที่นับได้จากเอนโคดเดอร์ล้อซ้าย (pulse)

การคำนวณทิศทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์



รูปที่ 3.2 ทิศทางของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ด้วยล้อซ้ายและล้อขวาในระยะที่ไม่เท่ากัน

ระยะทางเฉลี่ย หาได้จากสมการ

$$S_{oA} = \frac{S_{oR} + S_{oL}}{2} \quad (3.3)$$

ทิศทางของหุ่นยนต์หาได้จากสมการ

$$\phi = \frac{S_{oL}}{D + B}$$

$$B = \frac{S_{oR}}{\alpha}$$

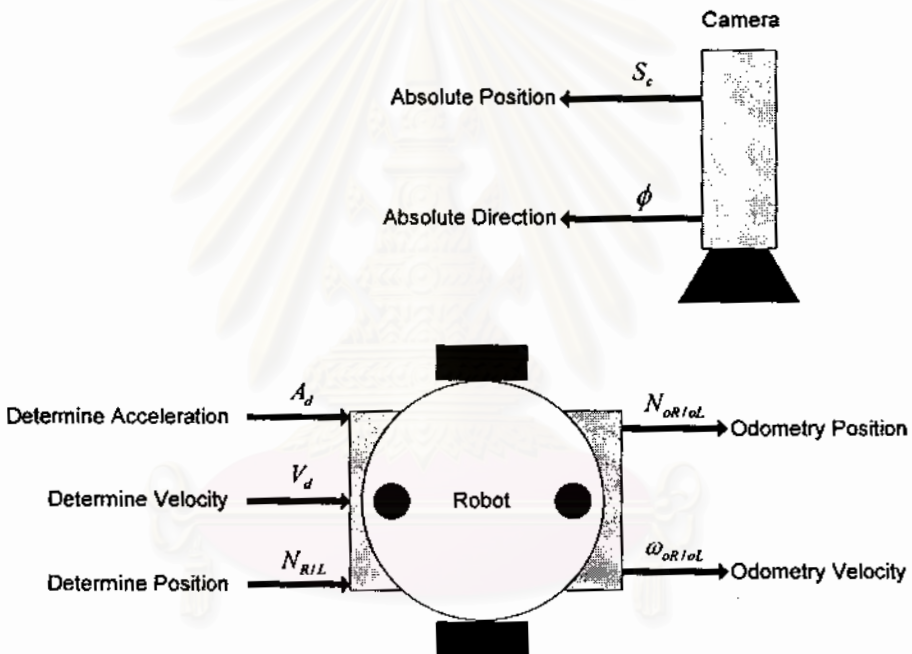
$$\phi = \frac{S_{oL}}{D + \frac{S_{oR}}{\phi}} = \frac{S_{oL} - S_{oR}}{D} \quad (3.4)$$

โดยที่ D คือ ระยะห่างของฐานล้อ (mm)

3.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

การใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยทั่วไปจะต้องควบคุมพารามิเตอร์ 3 ค่าได้แก่ ระยะการเคลื่อนที่ ความเร่ง และความเร็ของหุ่นยนต์ ซึ่งแต่ละค่าจะมีขนาดเท่าใดหรือมีทิศทางอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้งาน สำหรับงานวิจัยนี้เราจะควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าดังกล่าว โดยตัวควบคุมจะสร้างความเร็วอ้างอิงเพื่อใช้สำหรับควบคุมความเร็วหุ่นยนต์จากพารามิเตอร์ทั้ง 3 ที่เป็นตัวกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ ได้แก่ ระยะการเคลื่อนที่ ความเร่งและความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ ซึ่งถูกกำหนดให้กับหุ่นยนต์โดยผู้ใช้งาน ตัวควบคุมจะต้องควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ที่เวลาต่างให้มีค่าเหมือนความเร็วอ้างอิงที่สร้างขึ้น

3.2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่

โดยที่พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้แก่

- A_d คือ ความเร่งกำหนด
- V_d คือ ความเร็วสูงสุดกำหนด
- $N_{R/L}$ คือ ระยะทางกำหนดมีหน่วยเป็นลูกคลื่น

และค่าที่วัดได้จากหุ่นยนต์ได้แก่

- $N_{oR/oL}$ คือ ระยะการหมุนของล้อขวาและล้อซ้าย
- $\omega_{oR/oL}$ คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อขวาและล้อซ้าย

S_c คือ ระยะทางที่วัดจากกล้อง

ϕ คือ มุมทิศทางของหุ่นยนต์ที่วัดจากกล้อง

การกำหนดการเคลื่อนที่ให้กับหุ่นยนต์จำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ ระยะทางกำหนดที่จะให้หุ่นยนต์วิ่ง (N_{RIL}) ความเร็วสูงสุดกำหนด (V_d) และความเร่งกำหนด (A_d) เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่านี้แล้ว ตัวควบคุมการเคลื่อนที่จะนำค่าทั้ง 3 ไปสร้างกราฟความเร็วอ้างอิงของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับเวลา เพื่อควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามกราฟ หุ่นยนต์จะวิ่งจากจุดเริ่มต้นด้วยความเร่งตามที่กำหนดไปจนกระทั่งความเร็วของหุ่นยนต์มีค่าเท่ากับความเร็วสูงสุดที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นหุ่นยนต์จะวิ่งไปด้วยความเร็วระดับสูงสุดไปจนถึงช่วงเวลาที่จำเป็นต้องเบรก เพื่อให้หุ่นยนต์ไปหยุดที่เป้าหมายตามระยะที่กำหนดไว้ในตอนต้น ด้วยความหน่วงที่เท่ากับความเร่งตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟความเร็วของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับเวลาที่ถูกสร้างโดยตัวควบคุม

ตลอดระยะเวลาที่หุ่นยนต์วิ่งไปตามระยะที่กำหนด ตัวควบคุมสามารถที่จะวัดค่าจากหุ่นยนต์ได้ 2 ค่าคือ ระยะการหมุนของล้อ (N_{orIoL}) และความเร็วเชิงมุมของล้อ (ω_{orIoL}) เมื่อหุ่นยนต์หยุดที่บริเวณเป้าหมาย กล้องวิดีโอจะวัดค่าตำแหน่งหยุดของหุ่นยนต์ (S_c) พร้อมทั้งทิศทางของหุ่นยนต์ (ϕ)

3.3 การใช้กล้องวิดีโอวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์

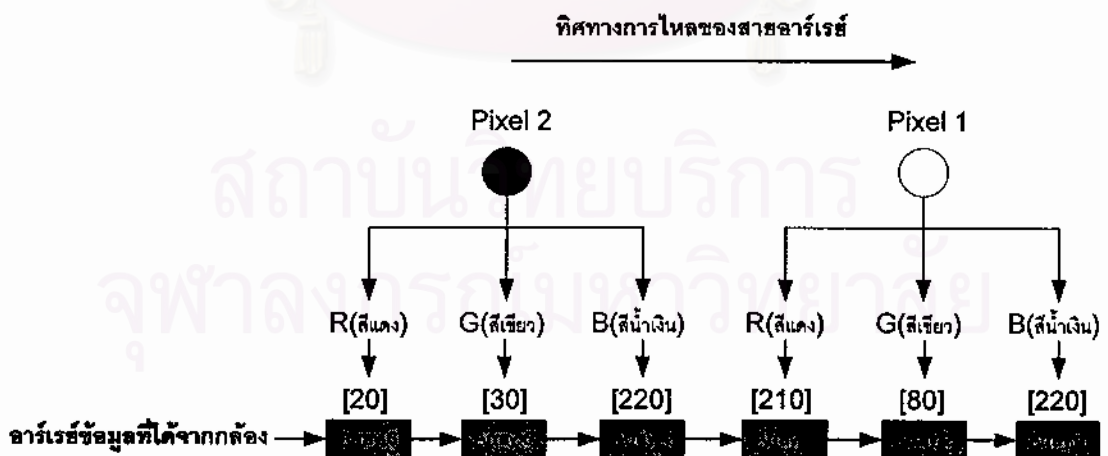
กล้องวิดีโอจะเป็นตัวตรวจวัดค่าตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ที่ให้เอาชุด 3 สีแบบ RGB (สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน) ภาพที่ได้จะอยู่ในรูปของอาร์เรย์ที่บรรจุไปด้วยค่าของสีที่จุดต่าง การนำข้อมูลที่

ได้จากกล้องมาคำนวณจะต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบอาร์เรย์ข้อมูลที่มาเป็นสาย ให้กลายเป็น อาร์เรย์ 2 มิติ ขนาด 320×240 ที่บรรจุค่าสี R, G และ B ทั้งหมด 3 ชุด



รูปที่ 3.5 ลักษณะจุดสีของภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ

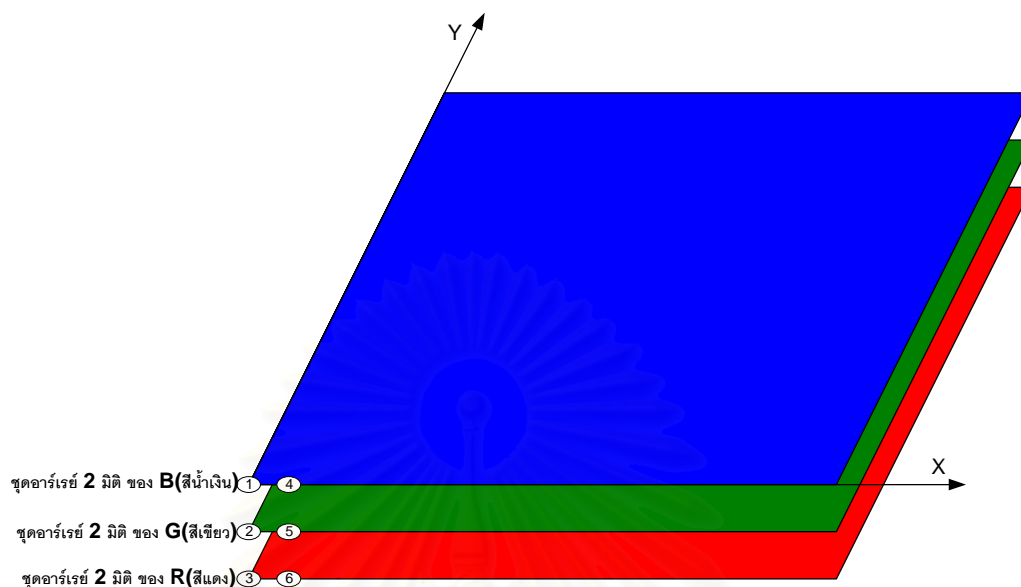
จากรูปที่ 3.5 ที่จุดสีแต่ละจุดของภาพจะมีค่าของแม่สี ที่เป็น สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง ทั้งหมด 3 ค่าด้วยกัน แต่ลักษณะของข้อมูลรูปภาพที่ได้รับจากการ์ด จะส่งเข้ามาเป็นสายข้อมูลใน ลักษณะเรียงกันเป็นแถวดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะของชุดอาร์เรย์ข้อมูลที่ได้รับจากกล้องวิดีโอ

เมื่อความละเอียดของภาพมีขนาด 320×240 ดังนั้นอาร์เรย์ของข้อมูลทั้งหมดจะมีทั้งสิ้น

$320 \times 240 \times 3 = 230400$ อาร์เรย์ ขั้นตอนต่อไปคือการจัดรูปอาร์เรย์ข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นอาร์เรย์ 2 มิติ 3 ชุด คือชุดข้อมูลของ B (สีน้ำเงิน) G (สีเขียว) และ R (สีแดง)



รูปที่ 3.7 ลักษณะภาพจากกล้องที่ถูกแบ่งเป็นชั้นของแม่สีทั้ง 3

ภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอจะอยู่ในระนาบภาพ (X-Y) มีความละเอียดขนาด 320×240 พิกเซลหรือก็คือมีจำนวนจุดสีทั้งหมด 76800 จุดซึ่งแต่ละจุดสีจะระบุด้วยคู่อันดับ (x,y) และมีค่าของแม่สีที่กำกับอยู่ 3 ค่าคือ ค่าสีน้ำเงิน ค่าสีเขียว และค่าสีแดง ซึ่งทั้ง 3 ค่านี้จะนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่ง

เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ค่าจุดสีแต่ละจุดจะต้องมีการแปลงค่าตำแหน่ง (x,y) ให้เป็นตำแหน่งของอาร์เรย์ข้อมูลแบบเรียงเดียวที่ได้จากกล้องวิดีโอ จากนั้นจึงจะนำค่าที่อยู่ในอาร์เรย์มาวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ สมการที่ใช้กับการแปลงค่าตำแหน่งเป็นดังนี้

$$k = (x + (\text{Height}-y) \times (\text{Width})) \times 3 \quad (3.5)$$

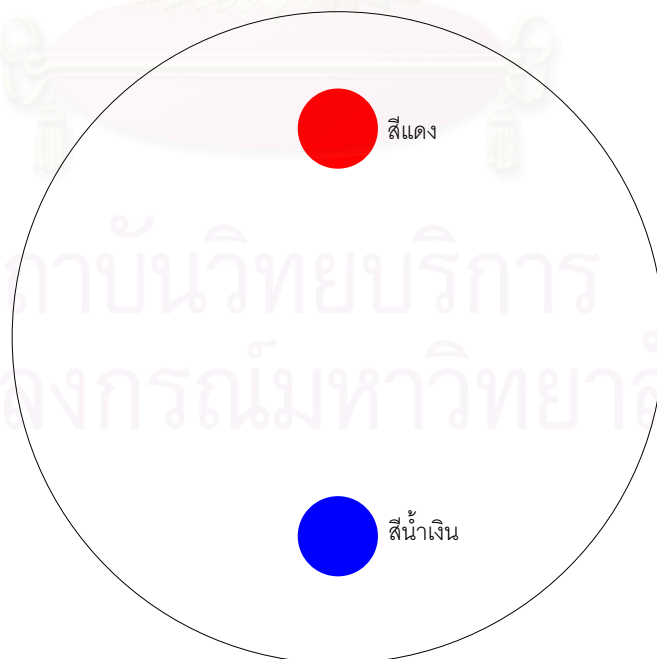
โดยที่ k คือ ตำแหน่งอาร์เรย์ข้อมูลแบบเรียงเดียวที่ได้จากกล้องที่เป็นค่าของสีน้ำเงิน
 $k+1$ คือ ตำแหน่งอาร์เรย์ข้อมูลแบบเรียงเดียวที่ได้จากกล้องที่เป็นค่าของสีเขียว
 $k+2$ คือ ตำแหน่งอาร์เรย์ข้อมูลแบบเรียงเดียวที่ได้จากกล้องที่เป็นค่าของสีแดง
 Height คือ ความสูงของภาพ (Pixel)
 Width คือ ความกว้างของภาพ (Pixel)

และ x มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 319

y มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 239

3.3.1 การคำนวณตำแหน่งจากกล้องวิดีโอ

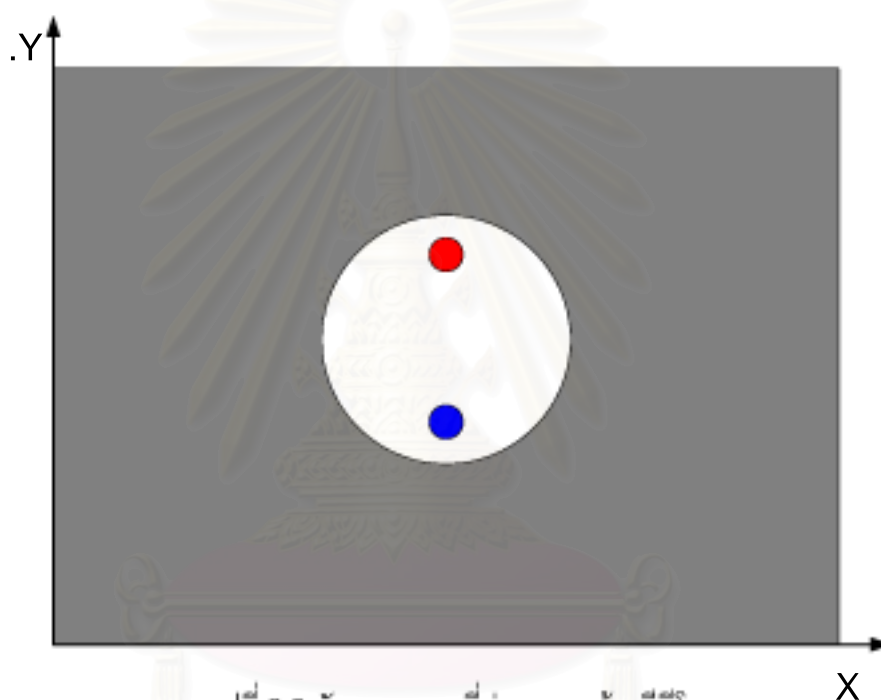
การคำนวณตำแหน่งจากกล้องวิดีอนั้นจะใช้วิธีการถ่ายภาพแล้วนำมาวิเคราะห์ภาพที่ถ่ายได้นั้นจะต้องมีลักษณะพิเศษที่จะต้องบอกได้ว่าเป็นหุ่นยนต์ เพื่อให้ง่ายเราจะใช้วิธีการตีรูปแบบสัญลักษณ์ที่กล้องสามารถแยกแยะได้ง่าย โดยสัญลักษณ์ที่ว่าเป็นวงกลม 2 วง วางห่างกันในระยะ 12 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละวงจะมีสีที่แตกต่างกัน เช่น สีแดง และสีน้ำเงิน การเลือกใช้สีก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่ง ควรเลือกใช้สีที่ไม่กลมกลืนกับสิ่งแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ที่ตรวจจับภาพเพื่อให้การแยกแยะสีทำได้ง่าย ถ้าหากสีของวงกลมที่ใช้มีความใกล้เคียงกับสีของสภาพแวดล้อมอาจจะทำการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมผิดพลาด ในทางปฏิบัติเราจะตีวงกลมทั้งสองวงบนพื้นกระดาษสีขาวเนื่องจากว่าสีขาวนั้นสามารถแยกให้ออกจากสีของสิ่งแวดล้อมได้ง่าย แล้วก็นำสัญลักษณ์ที่ออกแบบนี้ไปติดบนหุ่นยนต์ในตำแหน่งที่กล้องวิดีโอสามารถตรวจจับได้อย่างชัดเจน การหาตำแหน่งหุ่นยนต์จะหาจากตำแหน่งของวงกลมสีทั้งสองวง โดยขั้นแรกกล้องวิดีโอจะถ่ายภาพ จากนั้นก็นำข้อมูลของภาพที่ได้มาคำนวณหาจุดศูนย์กลางของวงกลมทั้งสอง เมื่อได้จะศูนย์กลางของทั้งสองวงแล้วจะสามารถหาตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ได้



รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์ที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์เพื่อให้กล้องวัดตำแหน่ง

3.3.1.1 การคำนวณหาจุดศูนย์กลางของวงกลมสีน้ำเงินและวงกลมสีแดง

การหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมจากข้อมูลภาพที่ได้รับจากกล้องหาได้จากการพิจารณาค่าแม่สีทั้งสามของแต่ละจุดบนภาพที่ได้รับมาจากกล้องโดยภาพที่ได้รับมานั้นจะอยู่ในระนาบภาพบนพิกัด (X-Y) แต่ข้อมูลจะอยู่ในสายอาร์เรย์เรียงต่อกันดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การหาจุดศูนย์กลางวงกลมจะนำจุดสีแต่ละจุดของภาพไปพิจารณา ถ้าจุดสีมีค่าแม่สีทั้งสามสอดคล้องกับค่าสีแม่สีทั้งสามของวงกลมก็สามารถบอกได้ว่าจุดสีนั้นคือจุดในพื้นที่ของวงกลม และเมื่อตรวจสอบทุกค่าจุดสีบนภาพก็สามารถนำจำนวนจุดสีที่สอดคล้องดังกล่าวไปคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมได้



รูปที่ 3.9 ลักษณะภาพที่ถ่ายจากกล้องวิดีโอ

กำหนดให้ $n_r(x, y)$ เป็นจุดสีที่ตำแหน่ง (x, y) โดยบนภาพที่มีค่าแม่สีสอดคล้องกับค่าแม่สีทั้งสามของวงกลมสีแดง $n_{r,x}$ คือค่าในแนวแกน X ของจุด $n_r(x, y)$ และ $n_{r,y}$ คือค่าในแนวแกน Y ของ $n_r(x, y)$ การคำนวณจุดศูนย์กลางของวงกลมสีแดงหาได้ดังนี้

ค่าตำแหน่งในแนวแกน X ของจุดสีแดง

$$\bar{X}_R = \frac{\sum n_{r,x}}{N_R} \quad (3.6)$$

ค่าตำแหน่งในแนวแกน Y ของจุดสีแดง

$$\bar{Y}_R = \frac{\sum n_{r,y}}{N_R} \quad (3.7)$$

และกำหนดให้ $n_B(x, y)$ เป็นจุดสี่ที่ตำแหน่ง (x, y) ในรูปบนภาพที่มีค่าแม่สีสอดคล้องกับค่าแม่สีทั้งสามของวงกลมสีน้ำเงิน $n_B x$ คือค่าในแนวแกน X ของจุด $n_B(x, y)$ และ $n_B y$ คือค่าในแนวแกน Y ของจุด $n_B(x, y)$ การคำนวณจุดศูนย์กลางของวงกลมสีน้ำเงินหาได้ดังนี้

ค่าตำแหน่งในแนวแกน X ของจุดสีน้ำเงิน

$$\bar{X}_B = \frac{\sum n_B x}{N_B} \quad (3.8)$$

ค่าตำแหน่งในแนวแกน Y ของจุดสีน้ำเงิน

$$\bar{Y}_B = \frac{\sum n_B y}{N_B} \quad (3.9)$$

โดยที่ N_R คือ จำนวนจุดสีทั้งหมดที่สอดคล้องกับวงกลมสีแดงของสัญลักษณ์

N_B คือ จำนวนจุดสีทั้งหมดที่สอดคล้องกับวงกลมสีน้ำเงินของสัญลักษณ์

ตำแหน่งของหุ่นยนต์ กำหนดให้เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์กลางวงกลมสีแดงและจุดศูนย์กลางวงกลมสีน้ำเงินซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_R - \bar{X}_B}{2} \quad (3.10)$$

$$\bar{Y} = \frac{\bar{Y}_R - \bar{Y}_B}{2} \quad (3.11)$$

โดยที่ (\bar{X}, \bar{Y}) คือตำแหน่งของหุ่นยนต์บนระนาบภาพ

ทิศทางของหุ่นยนต์ ที่คำนวณได้จากกล่องเป็นดังนี้

$$\phi = \arctan\left(\frac{\bar{X}_R - \bar{X}_B}{\bar{Y}_R - \bar{Y}_B}\right) \quad (3.12)$$

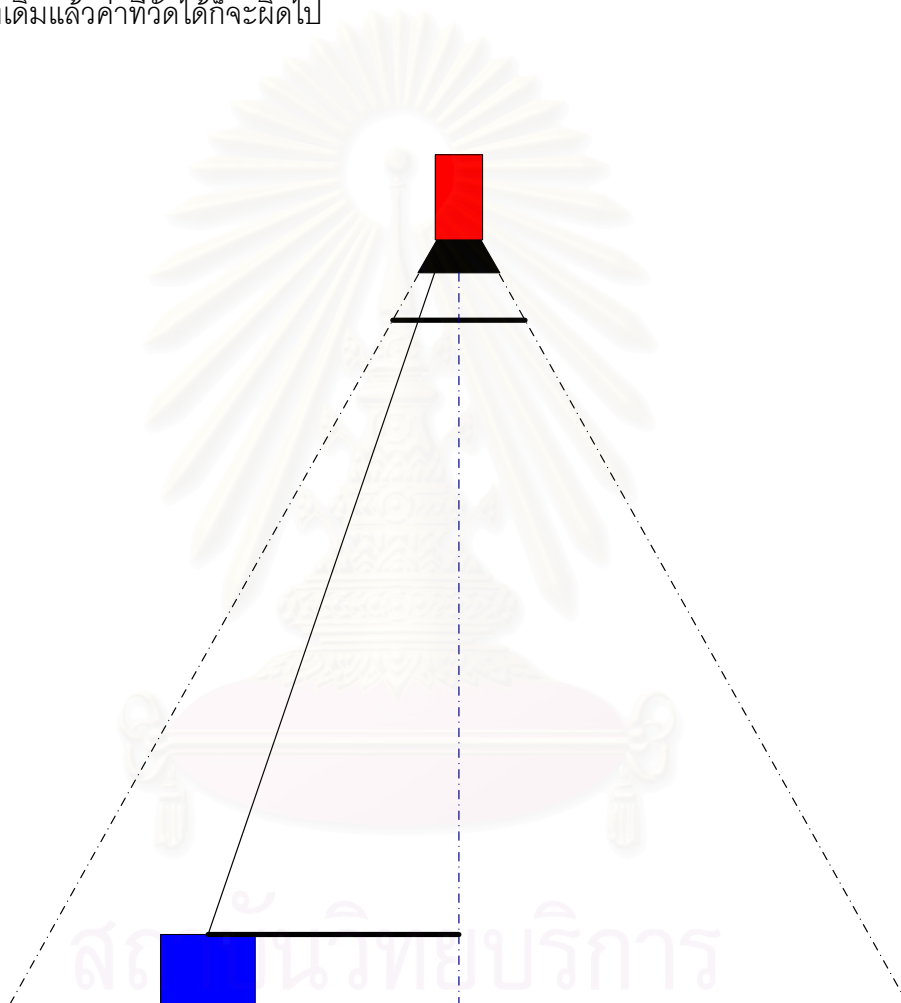
โดยเป็นทิศทางที่วัดจากแนวแกน Y

3.3.2 การปรับตั้งกล่องวิดีโอ

การนำกล่องวิดีโอมาใช้ในการวัดนั้น ในขั้นแรกต้องมีการเลือกตำแหน่งที่จะวัดซึ่งจะต้องเป็นบริเวณที่เป็นเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ และต้องเป็นบริเวณมีสภาพแวดล้อมที่คงที่ ไม่มีแสงรบกวนหรือมีวัตถุที่เคลื่อนไหวเข้ามาในพื้นที่ตรวจวัด การติดตั้งจะนำกล่องติดไว้กับเสายึดเหนือเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ ความละเอียดของการวัดก็ขึ้นอยู่กับความสูงของกล่องวิดีโอวัดจากตำแหน่งส่วนบนสุดของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดสัญลักษณ์วงกลมสีแดงกับสีน้ำเงิน ถ้าติดตั้งกล่องสูง พื้นที่ที่กล่องสามารถตรวจวัดจะมีมากขึ้น แต่ความละเอียดของการวัดจะลดลงเมื่อเทียบ

กับตำแหน่งติดตั้งกล้องที่ต่ำกว่า เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณที่กล้องสามารถตรวจวัดได้ กล้องก็ทำการถ่ายภาพแล้วจึงนำไปคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาตำแหน่งต่อไป

การปรับตั้งจะต้องทำก็ต่อเมื่อมีการติดตั้งกล้องใหม่หรือกล้องได้เคลื่อนย้ายผิดไปจากตำแหน่งเดิมที่ได้ปรับตั้งไว้ก่อนหน้านี้ การวัดโดยทั่วไปนั้นต้องการความละเอียดของการวัดให้มากที่สุดเพื่อความแม่นยำแต่ทั้งนี้ก็ต้องพิจารณาขนาดของพื้นที่ที่ตรวจวัดและความสะดวกในการติดตั้งตัวกล้องวีดีโอด้วยเพราะถ้าติดตั้งต่ำเกินไปอาจจะจะมีอะไรไปชนซึ่งจะทำให้กล้องเคลื่อนย้ายจากตำแหน่งเดิมแล้วค่าที่วัดได้ก็จะผิดไป



รูปที่ 3.10 การตรวจวัดด้วยกล้องวีดีโอ

ความละเอียดของการวัดมีค่าเท่ากับ

$$\text{Re}_y = \frac{H_A}{\text{Height}} \quad (3.13)$$

และ

$$\text{Re}_x = \frac{W_A}{\text{Width}} \quad (3.14)$$

โดยที่ Re_y คือ ความละเอียดของการวัดในแนวแกน Y จากภาพ (mm/pixel)

Re_x คือ ความละเอียดของการวัดในแนวแกน X จากภาพ (mm/pixel)

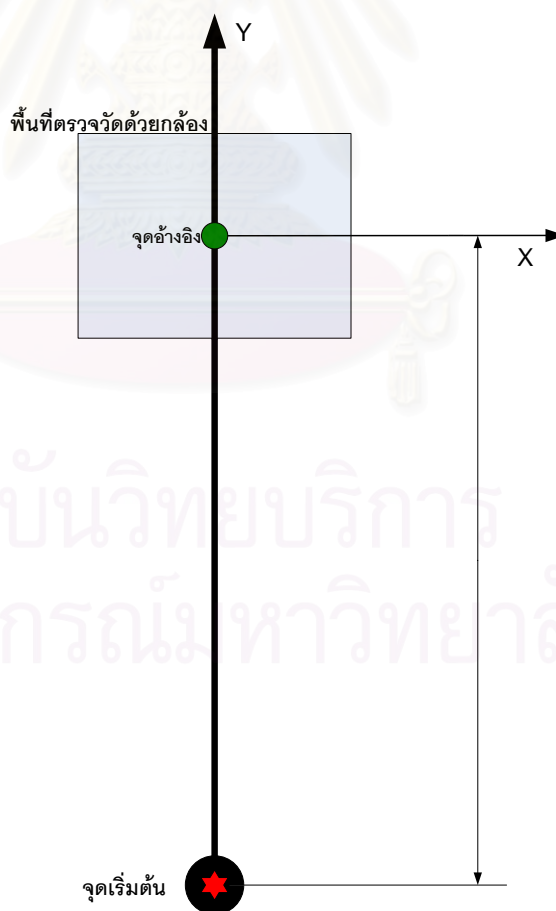
H_A คือ ความกว้างของพื้นที่ตรวจวัดที่อยู่บนแนวแกน Y ของภาพ (mm)

W_A คือ ความยาวของพื้นที่ตรวจวัดที่อยู่บนแนวแกน X ของภาพ (mm)

หมายเหตุ ระยะที่วัดได้จากกล้องอาจมีการเบี่ยงเบนไปตามระยะจากจุดศูนย์กลางของภาพ เนื่องจากเลนส์ของกล้องวีดีโอ และขนาดการเบี่ยงเบนนี้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงที่กล้องถูกติดตั้ง แต่จากการทดลองเปรียบเทียบแล้วพบว่าระยะการเบี่ยงเบนนี้มีค่าน้อยมากเนื่องจากทำการติดตั้งกล้องที่ระดับไม่สูงมากนักจึงไม่นำค่าเบี่ยงเบนมาคิดคำนวณ

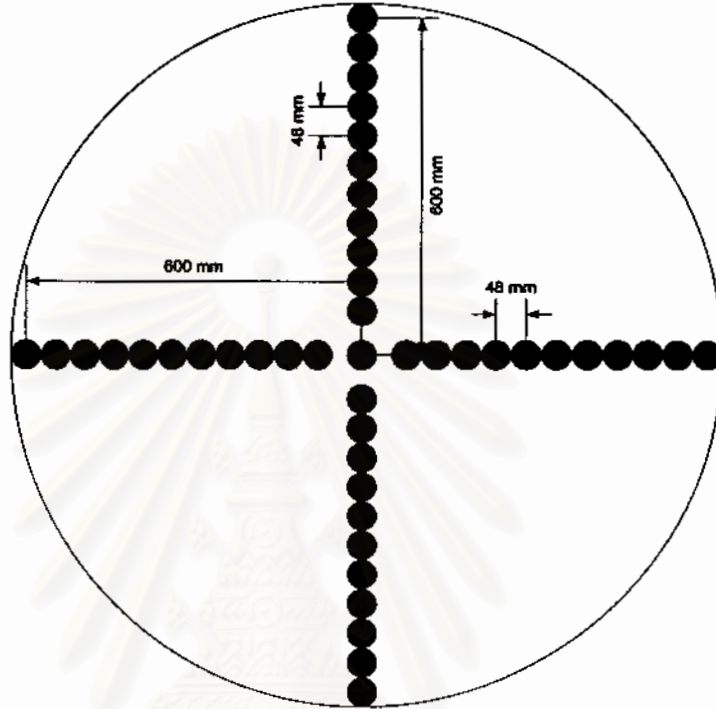
3.3.2.1 ขั้นตอนการปรับตั้งกล้องวีดีโอ

1) ติดตั้งกล้องให้อยู่บนพื้นที่ที่เป็นเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ โดยยึดให้แน่นบนเสาที่แข็งแรงเพื่อไม่ให้กล้องเคลื่อนย้าย และต้องจัดให้กรอบอ้างอิงของพื้นที่ตรวจวัดอยู่แนวเดียวกันกับกรอบอ้างอิงของภาพที่ได้จากกล้อง ซึ่งทำได้โดยการหมุนตัวกล้องรอบแกนที่ตั้งฉากกับพื้นที่ตรวจวัด



รูปที่ 3.11 การติดตั้งกล้องวีดีโอสำหรับวัดตำแหน่ง

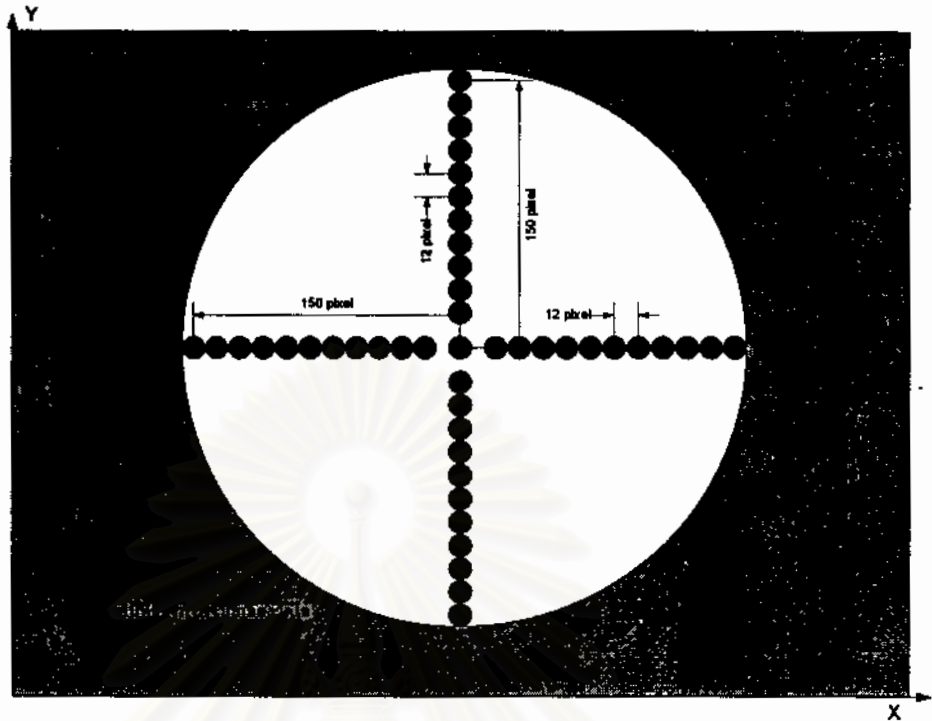
2) จัดทำอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเทียบโดยจะใช้การวาดสัญลักษณ์ลงบนแผ่นระนาบที่ทำจากกระดาษแข็งหรือแผ่นพลาสติกแข็ง กำหนดระยะของสัญลักษณ์ที่ใช้เพื่อใช้สำหรับคำนวณความละเอียดที่สามารถวัดได้ ลักษณะเช่น



รูปที่ 3.12 ลักษณะของแผ่นปรับเทียบ

3) นำแผ่นปรับเทียบไปวางไว้บนตำแหน่งของเส้นทางของหุ่นยนต์ โดยให้จุดศูนย์กลางของแผ่นปรับเทียบเป็นจุดเดียวกับจุดเป้าหมายของระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

4) ถ่ายภาพแผ่นปรับเทียบหลังจากที่ได้วางซ้อนบนจุดอ้างอิงของเส้นทางเดิน แล้วภาพที่ได้มาหาจุดอ้างอิงบนเส้นทางของหุ่นยนต์ในที่นี้คือจุดศูนย์กลางของแผ่นปรับเทียบ ซึ่งตำแหน่งที่ได้บนภาพจะใช้อ้างอิงในการคำนวณ และคำนวณหาความละเอียดของการวัดโดยนำค่าระยะที่วัดได้ในภาพซึ่งมีหน่วยเป็นพิกเซล (pixel) ทั้งในแนวแกน X และแนวแกน Y ไปเปรียบเทียบกับระยะที่ได้กำหนดไว้บนแผ่นปรับเทียบ (มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร) ซึ่งความละเอียดที่ได้นี้จะป็นตัวแปลงค่าตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่วัดได้ในกรอบอ้างอิงของภาพไปเป็นค่าตำแหน่งจริงแบบสัมบูรณ์ของหุ่นยนต์บนพื้นที่ใช้งาน



รูปที่ 3.13 ลักษณะภาพถ่ายของแผ่นปรับเทียบได้จากกล้องวิดีโอ

ตัวอย่างการคำนวณความละเอียดในแนวแกน X ของภาพ

$$Re_x = \frac{600}{150} = 4 \text{ mm/pixel}$$

ตัวอย่างการคำนวณความละเอียดในแนวแกน Y ของภาพ

$$Re_y = \frac{600}{150} = 4 \text{ mm/pixel}$$

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งกล้องพร้อมกับปรับเทียบแล้ว จากนั้นไปก็สามารถทำการตรวจวัดหุ่นยนต์ได้ แต่ข้อควรระวังดังที่ได้กล่าวไว้แล้วคือ "จะไม่มีการเคลื่อนย้ายกล้องหลังจากทำการปรับเทียบแล้วตลอดการทดลอง" ถ้ามีการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นจะต้องทำการปรับเทียบตามขั้นตอนข้างต้นอีกครั้งหนึ่ง

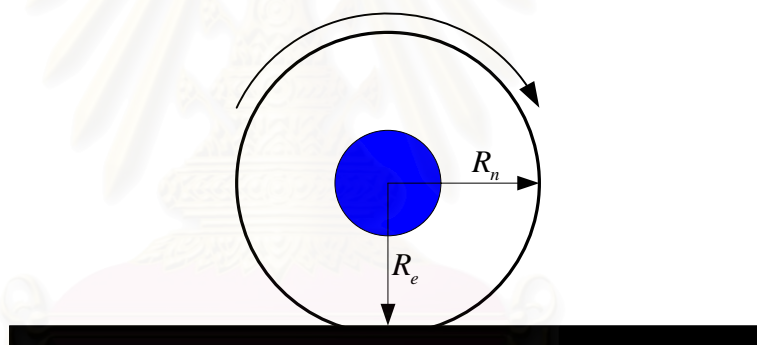
3.4 การปรับค่าความผิดพลาดของระบบวัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรี

การปรับค่าความผิดพลาดของระบบวัดแบบออดโตมิทรีมีความจำเป็นเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นระยะทางที่มากขึ้น การปรับความผิดพลาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานนั้นควรเป็นวิธีการที่ทำได้โดยง่าย ไม่เสียเวลา และมีความแม่นยำ โดยทั่วไปเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถูกนำไปใช้งานในพื้นที่ต่าง ๆ พื้นที่หรือบริเวณที่หุ่นยนต์ทำงานนั้นมีผลต่อความผิดพลาดของระบบวัดแบบออดโตมิทรี เนื่องจากพื้นมีความเสียดทานที่แตกต่างกัน และโดยหน้าที่ของหุ่นยนต์

ก็อาจมีผลต่อความผิดพลาดของการวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรีด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่นการใช้หุ่นยนต์เคลื่อนที่บรรทุกสิ่งของจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง ในขณะที่หุ่นยนต์มีภาระบรรทุกค่ารัศมีของล้อหุ่นยนต์อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากรัศมีล้อเมื่อหุ่นยนต์ไม่มีภาระบรรทุก ซึ่งก็ส่งผลไปถึงการคำนวณตำแหน่งเกิดความผิดพลาด การปรับปรุงอาจทำได้โดยทำการวัดขนาดของล้อขณะที่หุ่นยนต์มีภาระบรรทุกซึ่งคงเป็นเรื่องที่ลำบากพอสมควร และจะต้องเสียเวลาในการวัดและปรับค่าใหม่อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการปรับค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ที่เรียกว่าการปรับแบบออนไลน์ โดยก่อนที่จะมีการปรับค่าผิดพลาดจากสาเหตุต่างๆ จำเป็นต้องมีการจำแนกสาเหตุที่มาของความผิดพลาดให้ชัดเจน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 แบบดังนี้

1) ค่าผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจาก *ขนาดรัศมีของล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไป* ค่าผิดพลาดชนิดนี้มีสาเหตุจากเมื่อล้อหุ่นยนต์(ซึ่งทำจากยางที่ยืดหยุ่นเพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงระหว่างพื้นกับล้อ) รับภาระน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ ล้อจะมีการเปลี่ยนรูปซึ่งทำให้รัศมีจริงของล้อผิดพลาดไปจากค่าที่วัดได้ในตอนออกแบบ ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 รัศมีล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อหุ่นยนต์มีภาระบรรทุก

เมื่อ R_n คือ รัศมีล้อหุ่นยนต์ที่วัดได้ตอนออกแบบ

R_e คือ รัศมีล้อหุ่นยนต์ขณะที่รับภาระบรรทุก

เมื่อหุ่นยนต์ถูกใช้งานในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุก เราไม่สามารถที่จะวัดได้ว่าขนาดรัศมีของล้อหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงไปเท่าใด ทำให้การคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์เกิดความผิดพลาด การใช้งานหุ่นยนต์ในลักษณะนี้จำเป็นต้องมีการปรับพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งอยู่เสมอเมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุก ความผิดพลาดชนิดนี้แก้ไขด้วยพารามิเตอร์ (C_m)

2) ค่าผิดพลาดที่เกิดจาก *ความเร่ง หรือ ความหน่วง* ค่าผิดพลาดชนิดนี้มีสาเหตุจากการที่มีแรงภายนอกกระทำกับหุ่นยนต์ โดยเฉพาะในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือในขณะที่

หุ่นยนต์ลดความเร็ว(เบรค) แรงเสียดทานที่พื้นกระทำกับหุ่นยนต์ จะส่งผลให้ล้อหุ่นยนต์ลื่นไถลกับพื้น ทำให้ความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุมของล้อไม่สัมพันธ์กัน ซึ่งเราจะนิยามเป็นอัตราส่วนการลื่นไถล λ [8] ซึ่งมีค่าดังนี้

ในกรณีที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

$$\lambda = \frac{\omega R - V}{\omega R} \quad (3.15)$$

ในกรณีเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง

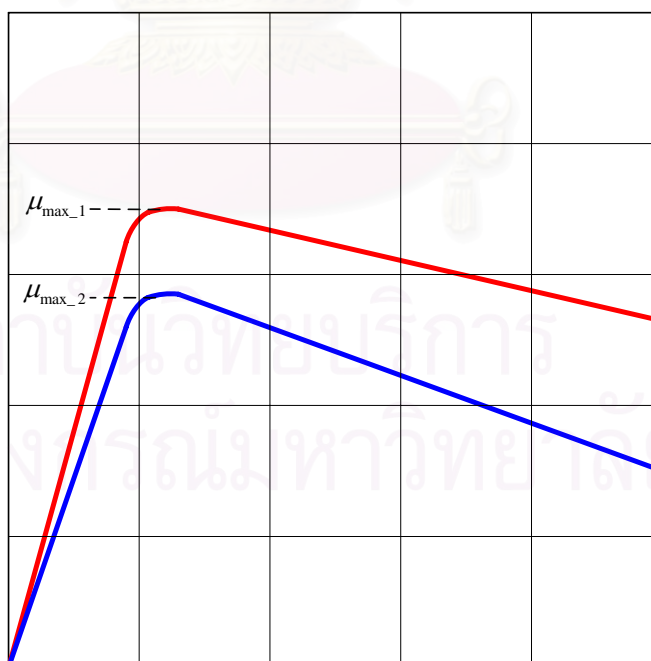
$$\lambda = \frac{V - \omega R}{V} \quad (3.16)$$

โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อหุ่นยนต์ (Rad/s)

R คือ รัศมีของล้อหุ่นยนต์ (mm)

V คือ ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์ (mm/s)

อัตราส่วนการลื่นไถลนี้มีความสัมพันธ์กับความเร่งในลักษณะที่เมื่อความเร่งมีค่ามากอัตราส่วนการลื่นไถลก็มีค่ามากตามไปด้วยโดยจะเป็นแบบเชิงเส้นในช่วงค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากศูนย์ไปจนถึงค่ามากที่สุดดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราลื่นไถลกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพื้นกับล้อ [8]

ค่า Acceleration Coefficient (μ) คือความเสียหายของล้อหุ่นยนต์กับพื้นซึ่งจะแปรตามความเร่งหรือความหน่วงของหุ่นยนต์ แนวคิดของเราก็คือ ถ้าเราควบคุมความเร่งและความหน่วงเชิงมุมของล้อให้คงที่ ความเร่งและความหน่วงเชิงเส้นของหุ่นยนต์ซึ่งแปรตามความเร่งและความหน่วงเชิงมุมของล้อ(ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดระหว่างล้อกับพื้น)ก็จะคงที่ ส่งผลให้ค่า Wheel Slip ซึ่งคืออัตราการลื่นไถลที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าคงที่ตามไปด้วย จากรูปที่ 3.15 และแนวคิดดังกล่าวจะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมของล้อกับอัตราการลื่นไถลของล้อในช่วงที่เป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\lambda = m\alpha R$$

หรือประมาณได้ว่า

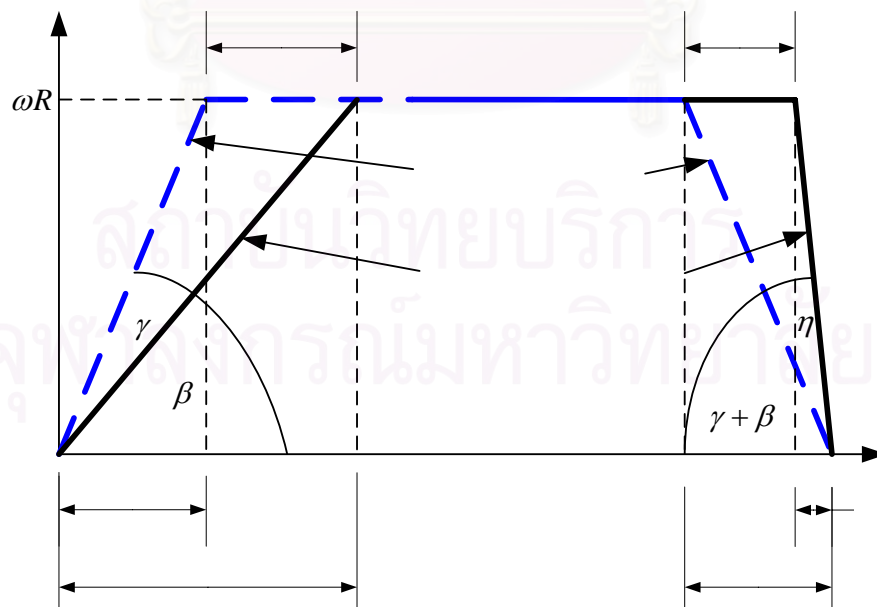
$$\lambda \approx mA_d \quad (3.17)$$

โดยที่ A_d คือ ความเร่งที่ล้อหุ่นยนต์ (mm/s^2)

α คือ ความเร่งเชิงมุมของล้อ (Rad/s^2)

m คือ สัมประสิทธิ์ของความเร่งที่ล้อ (s^2/mm)

การเคลื่อนที่ในช่วงที่กำลังเร่งถ้าควบคุมความเร่งให้คงที่ขณะเคลื่อนที่อัตราการลื่นไถลก็จะคงที่ด้วย หากกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งโดยมีความเร่งและความหน่วงคงที่ เส้นกราฟของความเร็วที่ล้อเทียบกับเวลาจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 3.16 แต่ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์จะแตกต่างกันเนื่องจากมีอัตราการลื่นไถลระหว่างล้อกับพื้น เมื่ออัตราการลื่นไถลคงที่เส้นกราฟความเร็วเทียบกับเวลาของล้อและของหุ่นยนต์จะประมาณได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟความเร็วของล้อ(ความเร็วที่จุดสัมผัสพื้นเทียบกับจุดศูนย์กลางของล้อ)และความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์เทียบกับเวลา

จากรูปที่ 3.16 กราฟเส้นประคือความเร็วของล้อที่ถูกควบคุม ส่วนกราฟเส้นทึบคือความเร็วของเชิงเส้นของหุ่นยนต์ เนื่องจากความเร่งเชิงมุมของล้อถูกควบคุมให้คงที่ส่งผลทำให้อัตราสิ้นไถลคงที่และมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.17) เมื่อกำหนดให้ R คือรัศมีล้อ $\alpha R = A_d$ (ความเร่งควบคุมที่ล้อ) และ $\omega R = V_d$ (ความเร็วที่จุดสัมผัสพื้นเทียบกับจุดศูนย์กลางของล้อ) เมื่อหุ่นยนต์มีการเปลี่ยนแปลงภาระบรรทุก รัศมีล้อหุ่นยนต์ (R) จะมีค่าเปลี่ยนไป แต่การกำหนด ความเร่งควบคุมที่ล้อ (A_d) และความเร็วสูงสุดกำหนด (V_d) ที่ให้อ้างอิงให้กับหุ่นยนต์ จะใช้ค่า R_n ซึ่งเป็นค่ารัศมีล้อที่วัดได้ตอนออกแบบ ดังนั้นความเร่งควบคุมที่ล้อจะมีค่าเป็น $\alpha R_n = A_d$ และความเร็วสูงสุดกำหนดจะมีค่าเป็น $\omega R_n = V_d$ เนื่องจากว่าค่ารัศมีล้อที่เปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมาก(เปลี่ยนไป 1.3 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจะเห็นได้จากการทดลองที่ 1 ในบทที่ 4) จากสมการ (3.15) และ (3.16) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

จากสมการ (3.15) กรณีเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

$$V = (1 - \lambda)\omega R_n \quad (3.18)$$

$$V = (1 - \lambda)V_d \quad (3.19)$$

จากสมการ (3.16) กรณีเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง

$$V = \frac{\omega R_n}{(1 - \lambda)} \quad (3.20)$$

$$V = \frac{V_d}{(1 - \lambda)} \quad (3.21)$$

เมื่อความเร่งที่ล้อมีค่าคงที่ ทำให้อัตราสิ้นไถล (λ) คงที่ไปด้วยและจะได้ว่า

กรณีเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

$$A_a = (1 - \lambda)A_d \quad (3.22)$$

กรณีเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง

$$A_b = \frac{A_d}{(1 - \lambda)} \quad (3.23)$$

โดยที่ A_a คือ ความเร่งของหุ่นยนต์

A_b คือ ความหน่วงของหุ่นยนต์

เมื่อการเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดให้ล้าหนุมด้วยความเร่งคงที่ไปจนถึงความเร็วสูงสุด เส้นกราฟระหว่างความเร็วของล้ากับเวลาจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและด้วยเหตุที่ล้าหนุมด้วยความเร่งคงที่ส่งผลให้อัตราสิ้นไกลคงที่ไปด้วยตามความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.17) ทำให้มุม γ มีค่าคงที่ เมื่อมุม γ มีค่าคงที่ เส้นกราฟระหว่างความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์กับเวลาก็เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเช่นเดียวกัน เพียงแต่ช่วงที่หุ่นยนต์กำลังเร่ง เส้นกราฟความเร็วเชิงเส้นหุ่นยนต์จะทำมุม γ และตอนเบรคจะทำมุม η กับเส้นกราฟความเร็วที่ล้า

เมื่อล้าล้นไกลกับพื้นส่งผลทำให้การวัดระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผิดพลาด ซึ่งค่าผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดประมาณได้จากพื้นที่สามเหลี่ยม abc ลบด้วยพื้นที่สามเหลี่ยม onq ซึ่งเราจะนำแนวคิดนี้ไปสร้างโมเดลของสมการค่าผิดพลาดซึ่งทำได้ดังนี้

จากรูปที่ 3.16 ค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับ

$$\text{พื้นที่ } abc - \text{พื้นที่ } onq \quad (3.24)$$

กรณีเคลื่อนที่แบบเร่ง พื้นที่ abc มีค่าเท่ากับ

$$\text{พื้นที่ } abc = \frac{1}{2} \times V_d \times t1 \quad (3.25)$$

$$T1 = \frac{V_d}{\tan(\beta)} \quad (3.26)$$

$$t3 = \frac{V_d}{\tan(\beta + \gamma)} \quad (3.27)$$

$$A_a = \tan(\beta) \quad (3.28)$$

$$A_d = \tan(\beta + \gamma) \quad (3.29)$$

แทนค่าสมการที่ (3.28) ในสมการที่ (3.26)

$$T1 = \frac{V_d}{A_a} \quad (3.30)$$

$$t3 = \frac{V_d}{A_d} \quad (3.31)$$

$$t1 = T1 - t3 \quad (3.32)$$

แทนค่าสมการที่ (3.30) และ (3.31) ในสมการที่ (3.32)

$$t1 = \frac{V_d}{A_a} - \frac{V_d}{A_d} \quad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.22) แทนค่าในสมการที่ (3.33)

$$t1 = \frac{V_d}{(1-\lambda)A_d} - \frac{V_d}{A_d} \quad (3.34)$$

แทนค่า $t1$ ลงในสมการที่ (3.25) เพื่อหาพื้นที่สามเหลี่ยม abc จะได้

$$\text{พื้นที่ } abc = \frac{1}{2} \times \frac{V_d^2}{A_d} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right) \quad (3.35)$$

กรณีเคลื่อนที่แบบหน่วง พื้นที่ onq มีค่าเท่ากับ

$$\text{พื้นที่ } onq = \frac{1}{2} \times V_d \times t2 \quad (3.36)$$

$$T2 = \frac{V_d}{\tan(\beta + \gamma)} \quad (3.37)$$

$$t4 = \frac{V_d}{\tan(\beta + \gamma + \eta)} \quad (3.38)$$

$$A_b = \tan(\beta + \gamma + \eta) \quad (3.39)$$

$$A_d = \tan(\beta + \gamma) \quad (3.40)$$

แทนค่าสมการที่ (3.40) ในสมการที่ (3.37)

$$T2 = \frac{V_d}{A_d} \quad (3.41)$$

$$t4 = \frac{V_d}{A_b} \quad (3.42)$$

$$t2 = T2 - t4 \quad (3.43)$$

แทนค่าสมการที่ (3.41) และ (3.42) ในสมการที่ (3.43)

$$t_2 = \frac{V_d}{A_d} - \frac{V_d}{A_b} \quad (3.44)$$

จากสมการที่ (3.23) แทนค่าในสมการที่ (3.44)

$$t_2 = \frac{V_d}{A_d} - \frac{V_d(1-\lambda)}{A_d} \quad (3.45)$$

แทนค่า t_1 ลงในสมการที่ (3.363) เพื่อหาพื้นที่สามเหลี่ยม onq จะได้

$$\text{พื้นที่ } onq = \frac{1}{2} \times \frac{V_d^2 \lambda}{A_d} \quad (3.46)$$

จากสมการที่ (3.24) ค่าผิดพลาดทั้งหมดของการเคลื่อนที่หาได้ดังนี้

$$e_{ac} = \frac{1}{2} \times \frac{V_d^2}{A_d} \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right) - \frac{1}{2} \times \frac{V_d^2 \lambda}{A_d}$$

$$e_{ac} = \frac{1}{2} \times \frac{V_d^2}{A_d} \left(\frac{\lambda^2}{1-\lambda} \right) \quad (3.47)$$

$$e_{ac} = \frac{1}{2} \times V_d^2 \left(\frac{m^2 A_d}{1 - mA_d} \right)$$

โดยที่ e_{ac} คือ ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งทั้งหมดของระยะการเคลื่อนที่

จากสมการที่ (3.47) จะเห็นว่าค่าผิดพลาดจะขึ้นกับความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ ซึ่งก็เป็นไปตามแนวคิดที่ว่า เมื่อหุ่นยนต์มีแรงกระทำ หุ่นยนต์จะมีความเร่ง ซึ่งก็ส่งผลให้ล้อเลื่อนไถลกับพื้นทำให้การวัดตำแหน่งผิดพลาด และถ้าระยะเวลาในการเร่งมากค่าผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์ก็จะมากตามไปด้วย ค่าผิดพลาดที่ประมาณได้จากสมการที่ (3.47) นี้ สามารถนำไปปรับปรุงความแม่นยำของการวัดระยะ เมื่อต้องการเคลื่อนที่ตามระยะทางที่กำหนด ด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดค่าใดๆ ในครั้งต่อไปแต่หุ่นยนต์จะต้องใช้ความเร่งและความหน่วงขนาดเท่ากันในการเคลื่อนที่

3) ค่าผิดพลาดมุมการหมุนตัวของหุ่นยนต์ (ทิศทางของหุ่นยนต์) ค่าความผิดพลาดชนิดนี้เกิดขึ้นจากการที่ระยะการวิ่งของหุ่นยนต์บนพื้นของแต่ละล้อไม่เท่ากัน

การแบ่งความผิดพลาดออกเป็น 3 แบบ เพื่อแยกลักษณะของค่าผิดพลาดให้ชัดเจนทำให้ง่ายในการปรับแก้เป็นส่วนใหญ่ โดยทั่วไปค่าผิดพลาดที่เกิดจากขนาดรัศมีของล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการปรับแก้ในครั้งแรกแล้วส่วนใหญ่ค่าผิดพลาดจะหายไปเกือบทั้งหมด(จะเห็นได้

จากการทดลองในบทต่อไป) ส่วนค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากความเร่ง และค่าผิดพลาดของทิศทาง จะเกิดขึ้นเสมอเมื่อมีการเคลื่อนที่โดยเฉพาะมีการเปลี่ยนความเร่งบ่อยครั้ง ค่าผิดพลาดในส่วนนี้ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ตลอดเวลา

งานวิจัยนี้จะเน้นเฉพาะการแก้ค่าผิดพลาดจาก ข้อ 1 และข้อ 2 ส่วนการแก้ค่าความผิดพลาดจากข้อที่ 3 จะต้องเน้นไปทางเรื่องของการกำหนดเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ (Path Planning, Path Tracking) ซึ่งเป็นเรื่องที่ต้องทำต่อไปในอนาคตถ้าต้องการนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปใช้งานแบบมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ใช้ในสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

3.5 การปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์

การปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์จะเป็นการปรับปรุงความแม่นยำของการวัดตำแหน่งแบบวีดิทัศน์โดมิทรีในขณะที่ใช้งานหุ่นยนต์ โดยใช้กล้องวีดีโอเป็นตัววัดค่าผิดพลาดเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านบริเวณตรวจวัด ข้อมูลของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาพิจารณาว่าเกิดจากสาเหตุใด ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 สาเหตุ คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อเมื่อหุ่นยนต์มีการบรรทุกทุกเปลี่ยนไป และค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งและความเร็วสูงสุดที่กำหนดให้หุ่นยนต์ ในขั้นแรกจะแก้ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ โดยนำค่าผิดพลาดที่วัดด้วยกล้องหลังจากปล่อยให้หุ่นยนต์วิ่งในครั้งแรกมาปรับค่าพารามิเตอร์ C_m เมื่อแก้ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการแก้ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง โดยจะใช้หลักการประมาณค่าความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดค่าใดๆ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งนี้มีความสัมพันธ์กันกับความเร่งและความเร็วสูงสุดที่เรากำหนดให้กับหุ่นยนต์ ถ้าเราหาฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าความผิดพลาดได้ เราก็จะสามารถประมาณค่าผิดพลาดล่วงหน้าที่เกิดจากการกำหนดค่าความเร่งและความเร็วสูงสุดใดๆให้กับหุ่นยนต์ เมื่อประมาณค่าผิดพลาดได้แล้วก็สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามระยะเป้าหมายที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง

วิธีการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์จะใช้สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นที่เรียกว่า สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เป็นดังนี้

$$S_T = C_{R/L} C_m N_{R/L} + e_{ac} \quad (3.48)$$

โดยที่ S_T คือ ระยะเป้าหมายในการเคลื่อนที่เชิงเส้นของหุ่นยนต์

$C_{R/L}$ คือ แฟคเตอร์การปรับมุมหุ่นยนต์ที่ล้อขวาและล้อซ้ายในที่นี่มีค่าเท่ากับ 1

C_m คือ ค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนระยะการหมุนเชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น

$N_{R/L}$ คือ ระยะเวลากำหนดหน่วยเป็นลูกคลื่นที่นับได้โดยเฉลี่ยจากเอนโคเดอรัของล้อซ้ายและล้อขวา

e_{ac} คือ ค่าประมาณความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์ที่เกิดจากความเร่งและความเร็วสูงสุด

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.47) ในสมการที่ (3.48) จะได้สมการคำนวณระยะเวลาการเคลื่อนที่เชิงเส้นเป็นดังนี้

$$S_T = C_m N_{R/L} + \frac{1}{2} \times V_d^2 \left(\frac{m^2 A_d}{1 - mA_d} \right) \quad (3.49)$$

ค่าความผิดพลาดที่วัดจากกล้องหาได้จาก

$$e_i = S_{ci} - S_T \quad (3.50)$$

โดยที่ e_i คือ ค่าความผิดพลาดของการวิ่งครั้งที่ i

S_{ci} คือ ระยะที่วัดได้จริงจากกล้องวิดีโอของการวิ่งครั้งที่ i

S_T คือ ระยะทางกำหนดของเป้าหมาย

3.5.1 ขั้นตอนการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์

ขั้นตอนที่ 1 การปรับค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ

ในส่วนของขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับค่าผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อหรืออีกความหมายหนึ่งก็คือปรับค่ารัศมีล้อของหุ่นยนต์ให้ตรงกับค่ารัศมีล้อจริงในขณะที่หุ่นยนต์ทำงาน พารามิเตอร์ที่ถูกปรับคือ C_m ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับรัศมีล้อ การปรับค่า C_m จะใช้ระยะผิดพลาดที่วัดได้จากกล้อง (e_m) มาเป็นตัวปรับแก้เพื่อให้การวิ่งครั้งต่อไปของหุ่นยนต์เข้าใกล้ระยะเป้าหมายมากขึ้น ลำดับขั้นตอนทำได้ดังนี้

1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ C_m ที่วัดได้ตอนออกแบบให้กับหุ่นยนต์ และระยะเป้าหมายของหุ่นยนต์ S_T

2) กำหนดความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ ซึ่งควรใช้ค่าเร่งและความเร็วสูงสุดที่ต่ำสมมติให้เป็น A_{dm} และ V_{dm} เพื่อลดผลของความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง ($e_{ac} = 0$) พร้อมทั้งคำนวณระยะเวลาการเคลื่อนที่ $N_{R/L}$ จากสมการที่ (3.48)

3) ปรับตั้งกล้องวิดีโอ ขนาดของพื้นที่ตรวจวัด และความละเอียดในการวัด

4) ปลอ่ยให้หุ่นยนต์ (วิ่งครั้งที่ 1) เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมาย (เป็นเส้นตรงระยะ S_T) และวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยกล้องวิดีโอซึ่งคำนวณได้

จากสมการที่ (3.50) พร้อมทั้งบันทึกค่า A_{dm} และ V_{dm} จากนั้นนำค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไปปรับพารามิเตอร์ C_m ตามวิธีการดังนี้

วิธีการปรับพารามิเตอร์ C_m

วัดค่าความผิดพลาดของระบบจากกล้อง ซึ่งหาได้ดังนี้

$$e_m = S_c - S_T \quad (3.51)$$

โดยที่ e_m คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อที่วัดจากกล้อง (mm)

S_c คือ ระยะที่วัดได้จากกล้อง (mm)

S_T คือ ระยะเป้าหมาย (mm)

การปรับพารามิเตอร์จะปรับตามค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นตามสมการดังนี้

$$C_m = \frac{S_c}{N_{R/L}} \quad (3.52)$$

5) นำค่า C_m ที่ถูกปรับปรุง ไปใช้ในการคำนวณสำหรับการเคลื่อนที่ครั้งต่อไปตามสมการการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

$$S_T = C_m N_{R/L} + e_{ac} \quad (3.53)$$

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างสมการความผิดพลาดเพื่อประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง

ในส่วนนี้จะเป็นขั้นตอนการสร้างสมการความผิดพลาดสำหรับใช้ประมาณค่าผิดพลาดล่วงหน้าที่จะเกิดขึ้น จากความเร่งหรือความหน่วงของหุ่นยนต์ สมการความผิดพลาดนี้จะสร้างจากระยะผิดพลาดที่วัดได้จากกล้อง กับความเร่งและความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์ได้วิ่ง ลำดับขั้นตอนเป็นดังนี้

6) กำหนด ความเร่งและความเร็วสูงสุด ค่าใหม่ให้กับหุ่นยนต์สมมติให้เป็น A_{d1} และ V_{d1} คำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ $N_{R/L}$ ตามสมการ (3.53) โดยที่ $e_{ac} = 0$

7) ปลอ่ยหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่(วิ่งครั้งที่2)ไปหาเป้าหมายภายในพื้นที่ตรวจวัดด้วยกล้อง จากนั้นทำการวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งด้วยกล้องวีดีโอ และนำไปหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งกับความเร่งและความเร็วสูงสุด โดยทำได้ดังนี้

การประมาณค่าฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับความเร่งและความเร็วสูงสุด

กำหนดให้ สมการความผิดพลาด อยู่ในรูป

$$e_{ac} = f(A_d, V_d) \quad (3.54)$$

โดยที่ e_{ac} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่ประมาณได้

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกับความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์เป็นดังนี้

$$e_{ac} = \frac{1}{2} \times V_d^2 \left(\frac{m^2 A_d}{1 - mA_d} \right) \quad (3.55)$$

โดยที่ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร่งที่ต้องปรับแบบออนไลน์

วัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งครั้งที่ 1 ที่วัดจากกล้องตามสมการ (3.50) ซึ่งเป็นดังนี้

$$e_{a1} = S_{c1} - S_T \quad (3.56)$$

โดยที่ e_{a1} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดได้จากกล้องในการหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 1 (mm)

นำค่า e_{a1} , A_{d1} , V_{d1} ที่ได้ไปแทนค่าในสมการ(3.55) เพื่อหาสมการความผิดพลาด จะได้ว่า

$$e_{a1} = \frac{1}{2} \times V_{d1}^2 \left(\frac{m_1^2 A_{d1}}{1 - m_1 A_{d1}} \right) \quad (3.57)$$

8) แก้สมการที่ (3.57) จะได้ m_1 ที่จะใช้ในการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์โดย สมการความผิดพลาด จะอยู่ในรูป

$$e_{aci+1} = \frac{1}{2} \times (V_{di+1})^2 \left(\frac{m_i^2 A_{di+1}}{1 - m_i A_{di+1}} \right) \quad (3.58)$$

โดยที่ e_{aci+1} คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่ได้จากการประมาณของการเคลื่อนที่ครั้งต่อไป

A_{di+1} คือ ค่าความเร่งกำหนดของการวิ่งครั้งต่อไป

V_{di+1} คือ ค่าความเร็วสูงสุดกำหนดของการวิ่งครั้งต่อไป

m_i คือ สัมประสิทธิ์ของความเร่งในสมการความผิดพลาดครั้งที่ i

9) นำสมการที่ (3.58) ไปใช้ประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง (A_{di+1}) และความเร็วสูงสุด (V_{di+1}) ของการวิ่งครั้งต่อไป ซึ่งค่าตำแหน่งของหุ่นยนต์หาได้ตามสมการ คำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังนี้

$$S_T = C_m N_{R/L} + e_{aci+1} \quad (3.59)$$

ขั้นตอนที่ 3 การปรับปรุงสมการความผิดพลาด

ในส่วนนี้จะเป็ขั้นตอนของการปรับปรุงสมการความผิดพลาดให้มีความแม่นยำในการประมาณค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือความหน่วง วิธีการจะเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 การสร้างสมการความผิดพลาดเพื่อประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง ซึ่งก็คือการหาค่าสัมประสิทธิ์ของความเร่งนั่นเอง แต่มีส่วนเพิ่มเติมจากขั้นตอนที่แล้วคือการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 2 และที่ได้ในขั้นตอนนี้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อจะได้นำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปแทนในสมการความผิดพลาด ซึ่งลำดับขั้นตอนทำได้ดังนี้

10) กำหนดความเร่งและความเร็วสูงสุด (A_{d2} และ V_{d2}) แล้วประมาณค่าผิดพลาด e_{ac2} ที่จะเกิดขึ้นตามสมการที่ (3.58) จากนั้นก็คำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.59) ได้ดังนี้

$$N_{R/L} = \frac{S_T - e_{ac2}}{C_m} \quad (3.60)$$

11) จากนั้นสั่งให้หุ่นยนต์วิ่งไปตามระยะที่ได้กำหนด ($N_{R/L}$) ด้วยความเร่ง A_{d2} และความเร็วสูงสุด V_{d2} เมื่อถึงเป้าหมายทำการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ด้วยกล้องเพื่อหาค่าผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์ e_{a2} ตามสมการ

$$e_{a2} = S_{c2} - S_T \quad (3.61)$$

ค่า e_{a2} ที่เกิดขึ้นนี้ชี้ให้เห็นว่าการประมาณค่าความผิดพลาดจากสมการความผิดพลาดมีความคลาดเคลื่อนจากค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงของการวิ่งด้วยความเร่ง A_{d2} และความเร็วสูงสุด V_{d2} ถ้าการประมาณค่าผิดพลาดมีความแม่นยำค่า e_{a2} ควรจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อค่า e_{a2} มีค่าไม่เท่ากับศูนย์เราจึงต้องมีการปรับปรุงสมการประมาณค่าผิดพลาดให้ประมาณได้แม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งค่าที่ควรจะได้มีค่าตามสมการนี้

$$e_{rai} = e_{aci} + e_{ai} \quad (3.62)$$

โดยที่ e_{rai} คือ ค่าผิดพลาดที่ควรจะได้ของการหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ i

ในลำดับนี้ค่าผิดพลาดที่ควรประมาณได้ของการวัดด้วยความเร่ง A_{d2} และความเร็วสูงสุด V_{d2} เป็นดังนี้

$$e_{ra2} = e_{ac2} + e_{a2} \quad (3.63)$$

จากค่าผิดพลาด e_{ra2} เราจะนำไปปรับปรุงสัมประสิทธิ์ของความเร่งของสมการความผิดพลาด (m_2)

การหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 2

นำค่า e_{ra2} , A_{d2} , V_{d2} ที่ได้ไปหาสมการความผิดพลาด จะได้ว่า

$$e_{ra2} = \frac{1}{2} \times V_{d2}^2 \left(\frac{m_2^2 A_{d2}}{1 - m_2 A_{d2}} \right) \quad (3.64)$$

แก้สมการที่ (3.64) เพื่อหา m_2

จากการหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 1 เราได้ m_1 และจากการหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 2 เราได้ m_2 นำค่า m_1 และ m_2 ที่ได้ไปปรับปรุงสมการโดยซึ่งในที่นี้ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยจะได้

$$\bar{m}_2 = \left(\frac{m_1 + m_2}{2} \right) \quad (3.65)$$

$$e_{aci+1} = \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{\bar{m}_2^2 A_{di+1}}{1 - \bar{m}_2 A_{di+1}} \right) \quad (3.66)$$

สมการที่(3.66) นี้จะเป็นสมการที่ใช้ประมาณค่าความผิดพลาดของการวัดครั้งต่อไป

เมื่อหุ่นยนต์วิ่งไปตามเส้นทางและมีการปรับค่าความผิดพลาดหลายครั้งสมการความผิดพลาดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังนี้

$$e_{aci+1} = \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{\bar{m}_i^2 A_{di+1}}{1 - \bar{m}_i A_{di+1}} \right) \quad (3.67)$$

โดยที่ \bar{m}_i คือ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของความเร่งของการหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ i

$$\bar{m}_i = \left(\frac{m_1 + m_2 + \dots + m_i}{i} \right) \quad (3.68)$$

3.6 ข้อดีของการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์

- 1) สามารถลดค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีของล้อหุ่นยนต์
- 2) สามารถลดค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งและความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่
- 3) สามารถปรับแก้ค่าผิดพลาดได้ในขณะกำลังใช้งานหุ่นยนต์ทำให้ประหยัดเวลาในการปรับตั้งหรือวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้คำนวณตำแหน่ง
- 4) การวัดตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อมีการป้อนค่าพารามิเตอร์ C_m และ \bar{m}_i หลายครั้ง

3.7 ข้อจำกัดของการปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์

- 1) ต้องควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในลักษณะที่ต้องกำหนดระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร่งและความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่เพื่อสร้างกราฟความเร็วของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา แล้วควบคุมความเร็วให้เป็นไปตามกราฟ
- 2) การเคลื่อนที่ในครั้งแรกต้องกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุด ค่าต่ำเพื่อปรับปรุงค่าผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ และจะต้องทำทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนภาระบรรทุกของหุ่นยนต์

บทที่ 4

การทดลองและการปรับค่าความผิดพลาด

การทดลองในบทนี้จะทำการทดสอบให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่วิ่งเป็นทางตรงระยะ 4.5 เมตรเพื่อจะศึกษาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบการวัดตำแหน่งแบบออดโดมิทรี จากนั้นเมื่อทราบถึงลักษณะของความผิดพลาดแล้ว ก็ต้องทำการปรับแก้โดยใช้การปรับแบบออนไลน์ เพื่อให้การวัดตำแหน่งมีความแม่นยำ โดยการปรับแก้จะพิจารณาเฉพาะปัจจัยที่มีผลกระทบกับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่เท่านั้นซึ่งมี 2 แบบ คือ

1. ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจาก **ขนาดรัศมีของล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไป** ซึ่งแก้ไขค่าผิดพลาดด้วย (C_m)
2. ค่าผิดพลาดที่เกิดจาก **ความเร่ง ความหน่วง และ ความเร็วสูงสุด** ซึ่งแก้ไขค่าผิดพลาดด้วย (e_{ac})

4.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการทดลอง

รูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยทั่วไปหุ่นยนต์ต้องวิ่งไปยังเป้าหมายที่ต้องการซึ่งต้องกำหนดระยะและทิศทางให้กับหุ่นยนต์ เมื่อหุ่นยนต์เริ่มวิ่งจากหยุดนิ่งจะวิ่งด้วยความเร่งจนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้หรือความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถวิ่งได้ และจะรักษาระดับความเร็วนี้ไว้ จนกระทั่งเมื่อใกล้ถึงเป้าหมายก็จะเบรคจนไปหยุดที่เป้าหมายที่กำหนดไว้ การวิ่งในลักษณะอย่างนี้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นตอนเร่งส่วนหนึ่ง จะหักล้างกันกับค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นตอนเบรค

การทดลองนี้จะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แล้วไปหยุดที่เป้าหมาย โดยก่อนที่จะให้หุ่นยนต์วิ่ง หุ่นยนต์จะถูกกำหนดลักษณะการวิ่งด้วยค่าพารามิเตอร์ 3 ตัวคือ A_d (ความเร่งที่กำหนด) V_d (ความเร็วสูงสุดกำหนด) และ $N_{R/L}$ (ระยะทางที่กำหนด) ตัวควบคุมจะใช้พารามิเตอร์ทั้งสามเป็นค่าอ้างอิงเพื่อควบคุมความเร็วและระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

จากความเร่งกำหนด ความเร็วกำหนด และระยะกำหนด ตัวควบคุมการเคลื่อนที่จะนำค่าทั้งสามนี้มาประมาณหาช่วงเวลาของการเร่ง ช่วงเวลาของการรักษาระดับความเร็วคงที่และช่วงเวลาของการเบรค ซึ่งสร้างเป็นเส้นกราฟระหว่างความเร็วของหุ่นยนต์เทียบกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.1 และจากเส้นกราฟที่ได้นี้ ตัวควบคุมจะควบคุมให้ความเร็วที่ล้อหุ่นยนต์เป็นไปตามกราฟตลอดระยะทางที่วิ่งไปยังเป้าหมาย



รูปที่ 4.1 ความเร็วของหุ่นยนต์ตลอดการเคลื่อนที่

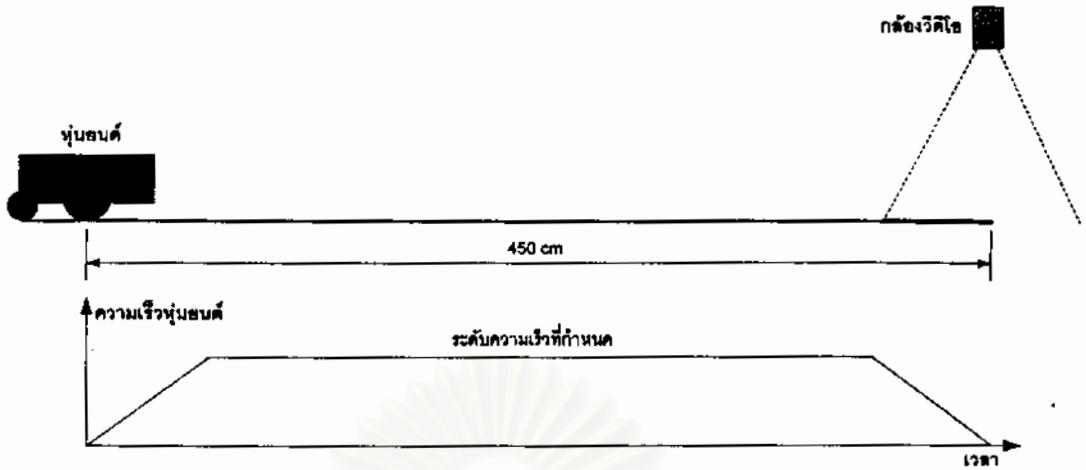
4.2 การทดลองเพื่อปรับค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการปรับค่าความผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีล้อหุ่นยนต์ โดยจะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น และไปหยุดตรงเป้าหมาย ตามที่ได้กำหนดระยะให้หุ่นยนต์วิ่ง เพื่อลดผลกระทบจากความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่อาจจะมีผลต่อการทดลองครั้งที่ 1 นี้ เราจะใช้ความเร่งและความเร็วสูงสุดที่กำหนดให้มีค่าต่ำโดยความเร่งกำหนดมีค่า 50 mm/s^2 และความเร็วสูงสุดมีค่า 100 mm/s หลังจากได้ทดลองในครั้งที่ 1 แล้ว เราจะทราบถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ค่าความผิดพลาดที่ได้ในการทดลองนี้ จะนำไปปรับค่าพารามิเตอร์ C_m ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แก้ไข ขนาดรัศมีล้อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงของรัศมีล้อหุ่นยนต์นั้น มีสาเหตุจากภาวะบวมทุกของหุ่นยนต์ หรือน้ำหนักรวมทั้งหมดของหุ่นยนต์

4.2.1 การทดลองครั้งที่ 1 การทดลองเพื่อปรับค่าความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นจากขนาดรัศมีของล้อหุ่นยนต์ ที่เปลี่ยนไปของการวิ่งแบบเส้นตรงซึ่งแก้ไขด้วยพารามิเตอร์ C_m

4.2.1.1 รายละเอียดของการทดลอง

การทดลองจะให้หุ่นยนต์วิ่งเป็นเส้นตรงด้วยระยะ 4500 มิลลิเมตร โดยเริ่มวิ่งจากหยุดนิ่งด้วยความเร่งตามค่าที่กำหนดจนความเร็วสูงสุดมีค่าตามกำหนดและเบรคด้วยความหน่วงขนาดเดียวกันกับความเร่งในตอนต้นจนหยุดพร้อมทั้งวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.2 โดยจะใช้ความเร่งกำหนดขนาด 50 mm/s^2 และความเร็วสูงสุดกำหนดขนาด 100 mm/s



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในการทดลอง

4.2.1.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

- 1) เพื่อศึกษาถึงค่าผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากขนาดของรัศมีล้อหุ่นยนต์เปลี่ยนแปลง
- 2) ประเมินค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อโดยการปรับค่าพารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่

4.2.1.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และนับสัญญาณแอนโคเดเตอร์ยี่ห้อ Dallas Semiconductor รุ่น DS89C420 และ National Semiconductor รุ่น LM629
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

4.2.1.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) กำหนดระยะเป้าหมายของหุ่นยนต์โดยให้เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปตามเส้นทางตรงระยะ 4500 มิลลิเมตร
- 2) กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้แก่ค่า A_d , V_d และจำนวน $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.48) พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้แก่ C_m , e_{ac} , C_R , C_L พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในการทดลองครั้งที่ 1 แต่ละตัวมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.1571$$

$$e_{ac} = 0$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

$$A_d = 50 \text{ mm} / s^2$$

$$V_d = 100 \text{ mm} / s$$

$$N_{R/L} = \frac{4500}{C_m} = 28644 \text{ pulse}$$

3) จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกโปรแกรมลงไปในตัวหุ่นยนต์ โปรแกรมควบคุมจะใช้ค่าพวกนี้ในการควบคุมการเคลื่อนที่และคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดการวิ่งแต่ละรอบสำหรับการทดลองครั้งที่ 1

4) ปล่ยหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหยุดบริเวณเป้าหมาย

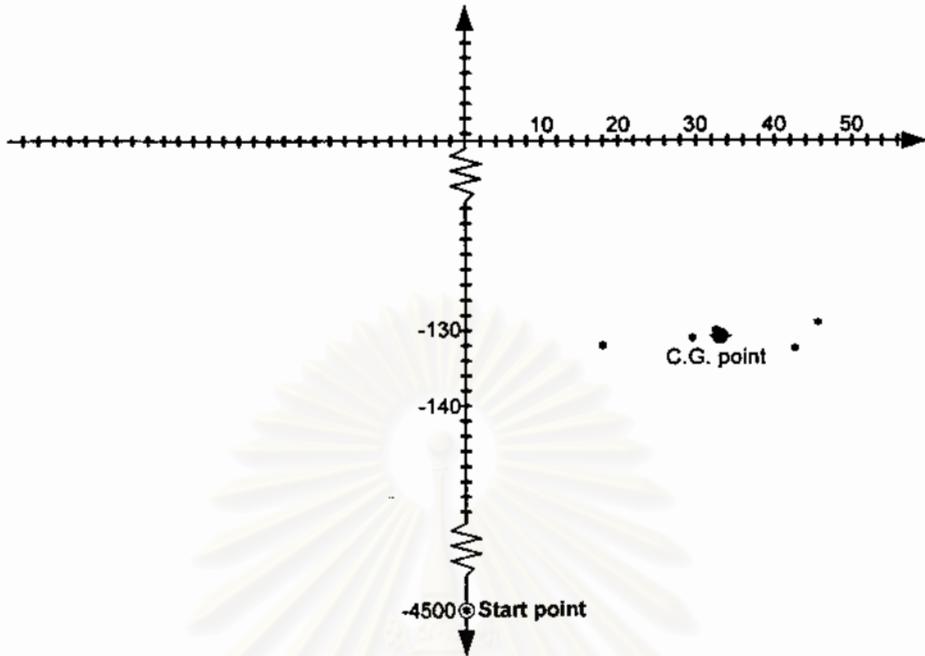
5) บันทึกค่าตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์พร้อมทั้งค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์

6) นำหุ่นยนต์มาที่จุดเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งพร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งสุดท้ายและค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทั้งหมด ผลการทดลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3

7) หาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยแล้วนำไปคำนวณเพื่อปรับพารามิเตอร์ C_m

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1

การทดลอง	ตำแหน่งในแนวแกน X (mm)	ตำแหน่งในแนวแกน Y (mm)	ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยทั้งสองล้อ (mm)	ค่าความผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ (mm)	มุมการเคลื่อนที่ (degree)
1	18	-132	4368.037	-131.963	0.24
2	29.5	-131	4369.100	-130.900	0.39
3	32.5	-130	4370.121	-129.879	0.43
4	42.5	-132.5	4367.707	-132.293	0.56
5	45.5	-129	4371.237	-128.763	0.60
เฉลี่ย	33.6	-130.9	4369.229	-130.771	0.44



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายของการทดลองครั้งที่ 1

4.2.1.5 การแก้ไขค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ

การปรับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนที่หุ่นยนต์จะวิ่งครั้งต่อไปสามารถทำได้ โดยการนำค่าผิดพลาดในปัจจุบันไปปรับพารามิเตอร์ C_m และจากการทดลองครั้งที่ 1 พบว่าเกิดความผิดพลาดตลอดการทดลองวิ่งทั้ง 5 ครั้งโดยระยะผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ -130.77 มิลลิเมตรและระยะเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 4369.23 มิลลิเมตร ซึ่งให้เห็นว่าเราได้ทำการวัดค่ารัศมีของล้อผิดไปโดยวัดได้มากกว่าความเป็นจริงในขณะที่หุ่นยนต์วิ่งนั่นเอง เพื่อให้การวัดตำแหน่งมีความถูกต้องเราต้องปรับค่าพารามิเตอร์ C_m ใหม่ จากสมการที่ (3.52) ค่า C_m ที่ปรับปรุงใหม่มีค่างดังนี้

$$C_m = \frac{S_c}{N_{R/L}} = \frac{4369.23}{28644} = 0.152536$$

หมายเหตุ จากค่า C_m ที่คำนวณได้นี้พบว่าเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงขนาดรัศมีล้อมีค่า 2.9 เปอร์เซ็นต์ การกำหนดค่าความเร่ง ($A_d = \alpha R_n$) และความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ ($V_d = \omega R_n$) มีการใช้ค่ารัศมีล้อในการคำนวณ แต่เนื่องจากว่าเมื่อหุ่นยนต์รับน้ำหนักตัวเองแล้ว

จากการทดลองที่ 1 นำค่า C_m ไปใช้ในการคำนวณตำแหน่งใหม่ครั้งต่อไป ตามสมการที่ (3.53)

4.2.2 การทดลองครั้งที่ 2 การทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์

$$C_m = 0.152536$$

4.2.2.1 รายละเอียดของการทดลอง

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งหลังจากได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ C_m แล้ว

4.2.2.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1) ศึกษาผลของการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ C_m ที่ใช้แก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ

4.2.2.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไคโรว
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และนับสัญญาณเอนโคเดอร์ยี่ห้อ Dallas Semiconductor รุ่น DS89C420 และ National Semiconductor รุ่น LM629
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

4.2.2.4 ขั้นตอนการทดลอง

1) กำหนดระยะเป้าหมายของหุ่นยนต์โดยให้เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปตามเส้นทางตรงระยะ 4500 มิลลิเมตร

2) กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้แก่ค่า A_d V_d และคำนวณ $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.53) พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้แก่ C_m , e_{ac} , C_R , C_L พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในการทดลองครั้งที่ 2 แต่ละตัวมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.152535$$

$$e_{ac} = 0$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

$$A_d = 50 \text{ mm} / s^2$$

$$V_d = 100 \text{ mm} / s$$

$$N_{R/L} = \frac{4500}{C_m} = 29501 \text{ pulse}$$

3) จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกโปรแกรมลงไปในตัวหุ่นยนต์ โปรแกรมควบคุมจะใช้ค่าพวกนี้ในการควบคุมการเคลื่อนที่และคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดการวิ่งแต่ละรอบสำหรับการทดลองครั้งที่ 2

4) ปล่อยหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหยุดบริเวณเป้าหมาย

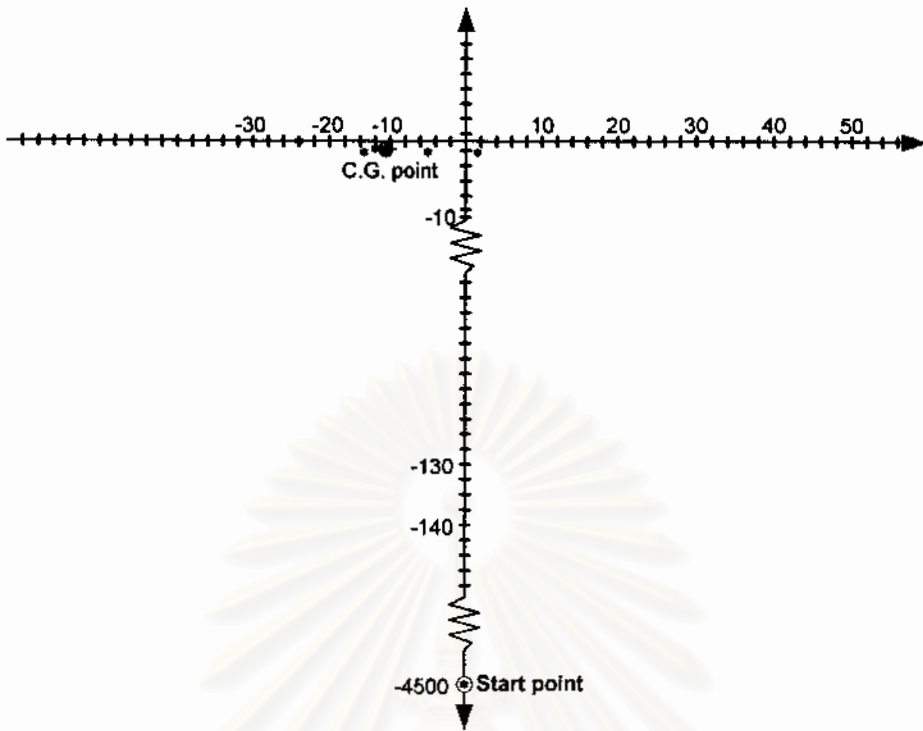
5) บันทึกค่าตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์พร้อมทั้งค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์

6) นำหุ่นยนต์มาที่จุดเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งพร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งสุดท้ายและค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทั้งหมด ผลการทดลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองครั้งที่ 2

การทดลอง	ตำแหน่งในแนวแกน X (mm)	ตำแหน่งในแนวแกน Y (mm)	ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยทั้งสองล้อ (mm)	ค่าความผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ (mm)	มุมการเคลื่อนที่ (degree)
1	-24	0	4500.064	0.064	-0.31
2	-13.5	-1.5	4498.520	-1.480	-0.17
3	-12	-1	4499.016	-0.984	-0.15
4	-5	-1.5	4498.503	-1.497	-0.06
5	1.5	-1	4499.000	-1.000	0.02
เฉลี่ย	-10.6	-1	4499.012	-0.988	-0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายของการทดลองครั้งที่ 2

จากการทดลองเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของการวัดตำแหน่งมีค่าน้อยลงคือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.988 มิลลิเมตรเท่านั้น

4.2.3 การทดลองครั้งที่ 3 การทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งโดยเพิ่มภาระบรรทุกขึ้นอีก 3 กิโลกรัม

4.2.3.1 รายละเอียดของการทดลอง

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพิ่มภาระบรรทุกให้กับหุ่นยนต์หลังจากได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ C_m จากการทดลองครั้งที่ 1 เนื่องจากการเปลี่ยนน้ำหนักหุ่นยนต์มีผลต่อการเปลี่ยนขนาดรัศมีล้อ น้ำหนักที่ใส่เข้าไบนั้นต้องวางในตำแหน่งที่สมดุล โดยให้ถ่ายแรงลงไปทีล้อให้เท่ากันมากที่สุด เพื่อป้องกันการยุบตัวของล้อที่ไม่เท่ากัน

4.2.3.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1) ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนน้ำหนักรวมของหุ่นยนต์ที่มีต่อค่าความผิดพลาดในการวัดตำแหน่งพร้อมทั้งปรับพารามิเตอร์ C_m เพื่อแก้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

4.2.3.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และนับสัญญาณเอนโคเดอร์ที่หือ Dallas Semiconductor รุ่น DS89C420 และ National Semiconductor รุ่น LM629
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

4.2.3.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) กำหนดระยะเป้าหมายของหุ่นยนต์โดยให้เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปตามเส้นทางตรงระยะ 4500 มิลลิเมตร
- 2) เพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้หุ่นยนต์ขนาด 3 กิโลกรัม
- 3) กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้แก่ค่า A_d , V_d และจำนวน $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.53) พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้แก่ C_m , e_{ac} , C_R , C_L พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในการทดลองครั้งที่ 3 แต่ละตัวมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 C_m &= 0.152536 \\
 e_{ac} &= 0 \\
 C_R &= 1 \\
 C_L &= 1 \\
 A_d &= 50 \text{ mm} / \text{s}^2 \\
 V_d &= 100 \text{ mm} / \text{s} \\
 N_{R/L} &= \frac{4500}{C_m} = 29501 \text{ pulse}
 \end{aligned}$$

- 4) จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกโปรแกรมลงไปในตัวหุ่นยนต์ โปรแกรมควบคุมจะใช้ค่าพวกนี้ในการควบคุมการเคลื่อนที่และคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดการวิ่งแต่ละรอบสำหรับการทดลองครั้งที่ 3

5) ปลอยหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหยุดบริเวณเป้าหมาย

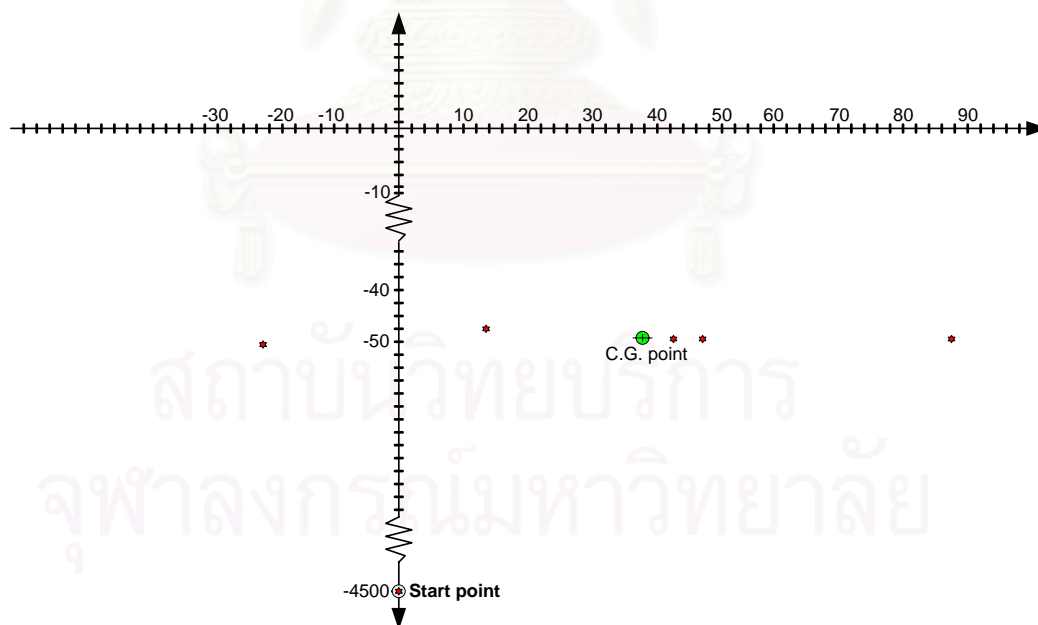
6) บันทึกค่าตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์พร้อมทั้งค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์

7) นำหุ่นยนต์มาที่จุดเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งพร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งสุดท้ายและค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทั้งหมด ผลการทดลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5

8) หาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยแล้วนำไปคำนวณเพื่อปรับพารามิเตอร์ C_m

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองครั้งที่ 3

การทดลอง	ตำแหน่งในแนวแกน X (mm)	ตำแหน่งในแนวแกน Y (mm)	ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยทั้งสองล้อ (mm)	ค่าความผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ (mm)	มุมการเคลื่อนที่ (degree)
1	-23	-50.5	4449.559	-50.441	-0.30
2	13.5	-48	4452.020	-47.980	0.17
3	42.5	-49.5	4450.703	-49.297	0.55
4	48	-49.5	4450.759	-49.241	0.62
5	87.5	-49.5	4451.360	-48.640	1.13
เฉลี่ย	33.7	-49.4	4450.728	-49.272	0.43



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายของการทดลองครั้งที่ 3

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแล้วให้หุ่นยนต์วิ่ง หลังจากที่ได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ C_m มาแล้ว จากการทดลองครั้งแรก เกิดความผิดพลาดในการวัด

ตำแหน่งที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -49.272 มิลลิเมตร คือหุ่นยนต์วิ่งไปไม่ถึงเป้าหมายนั่นเองซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่ว่าเมื่อหุ่นยนต์รับน้ำหนักเพิ่มขึ้น รัศมีล้อหุ่นยนต์จะเล็กลง ในขณะที่เมื่อให้วิ่งตามระยะที่กำหนด หุ่นยนต์น้ำหนักบรรทุกของล้อเท่าเดิมตามที่คำนวณ ส่งผลให้หุ่นยนต์วิ่งไปไม่ถึงหรือไม่ใกล้เคียงเป้าหมาย เหมือนเช่นการทดลองครั้งที่ 2 และเพื่อให้การวัดมีความถูกต้องสำหรับหุ่นยนต์ที่บรรทุกน้ำหนักเพิ่ม จำเป็นต้องมีการปรับค่า C_m ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$C_m = \frac{S_c}{N_{R/L}} = \frac{4450.728}{29501} = 0.150867$$

นำค่า C_m ไปใช้ในการคำนวณตำแหน่งใหม่ครั้งต่อไป ตามสมการที่ (3.53)

4.2.4 การทดลองครั้งที่ 4 การทดลองวิ่งหลังจากมีการปรับค่าพารามิเตอร์ C_m ของหุ่นยนต์ที่เพิ่มภาระบรรทุก

4.2.4.1 รายละเอียดของการทดลอง

การทดลองนี้จะเป็นการทดลองให้หุ่นยนต์ที่บรรทุกภาระเพิ่มขึ้นวิ่ง หลังจากได้มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ C_m แล้ว

4.2.4.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1) ศึกษาผลของการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ C_m ที่ใช้แก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อของหุ่นยนต์ที่มีการเปลี่ยนน้ำหนักรวม

4.2.4.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และนับสัญญาณเอนโคเดอร์ยี่ห้อ Dallas Semiconductor รุ่น DS89C420 และ National Semiconductor รุ่น LM629
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

4.2.4.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) กำหนดระยะเป้าหมายของหุ่นยนต์โดยให้เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปตามเส้นทางตรงระยะ 4500 มิลลิเมตร
- 2) เพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้หุ่นยนต์ขนาด 3 กิโลกรัม

3) กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้แก่ค่า A_d V_d และจำนวน $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.53) พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้แก่ C_m , e_{ac} , C_R , C_L พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในการทดลองครั้งที่ 1 แต่ละตัวมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.150867$$

$$e_{ac} = 0$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

$$A_d = 50 \text{ mm} / s^2$$

$$V_d = 100 \text{ mm} / s$$

$$N_{R/L} = \frac{4500}{C_m} = 29828 \text{ pulse}$$

4) จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกโปรแกรมลงไปในตัวหุ่นยนต์ โปรแกรมควบคุมจะใช้ค่าพวกนี้ในการควบคุมการเคลื่อนที่และคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดการวิ่งแต่ละรอบสำหรับการทดลองครั้งที่ 4

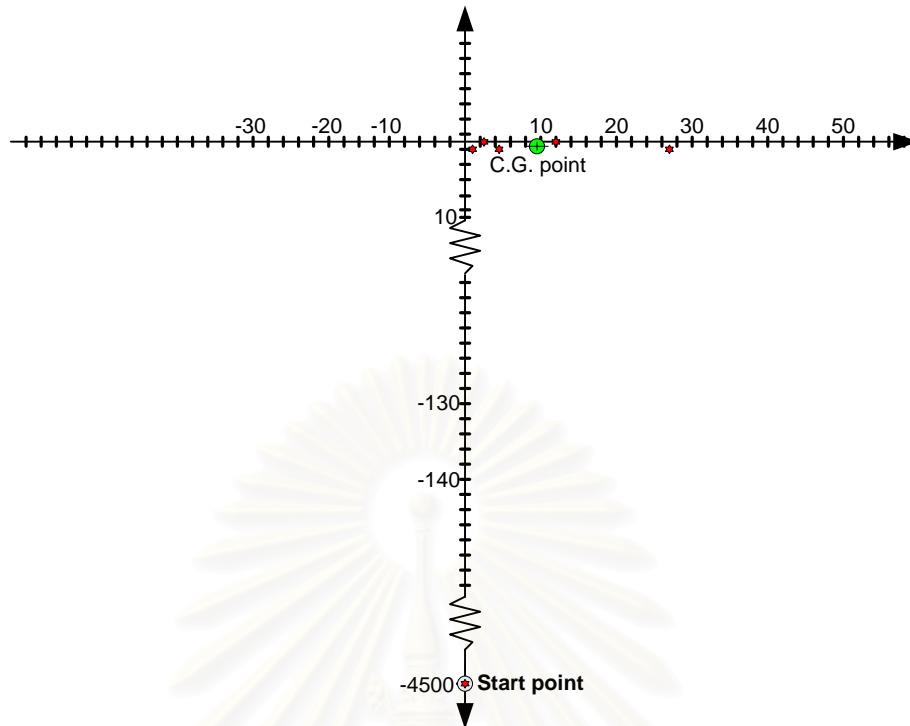
5) ปล่อยหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหยุดบริเวณเป้าหมาย

6) บันทึกค่าตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์พร้อมทั้งค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์

7) นำหุ่นยนต์มาที่จุดเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้งพร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งสุดท้ายและค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทั้งหมด ผลการทดลองที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองครั้งที่ 4

การทดลอง	ตำแหน่งในแนวแกน X (mm)	ตำแหน่งในแนวแกน Y (mm)	ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยทั้งสองล้อ (mm)	ค่าความผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ (mm)	มุมการเคลื่อนที่ (degree)
1	1	-1	4499.000	-1.000	0.01
2	2.5	0	4500.001	0.001	0.03
3	4.5	-1	4499.002	-0.998	0.06
4	12.5	0	4500.017	0.017	0.16
5	27	-1	4499.081	-0.919	0.34
เฉลี่ย	9.5	-0.6	4499.410	-0.590	0.12



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่บริเวณเป้าหมายของการทดลองครั้งที่ 4

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับค่า C_m ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนน้ำหนักรวมของหุ่นยนต์ ค่าความผิดพลาดของการวัดตำแหน่งมีค่าลดลงโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.59 มิลลิเมตร

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาลักษณะค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง

ค่าความผิดพลาดมีสาเหตุมาจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรือความหน่วง ส่งผลให้ล้อเกิดการลื่นไถลกับพื้น จากผลดังกล่าวทำให้ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของล้อหุ่นยนต์ไม่สัมพันธ์กัน การคำนวณระยะจากการวัดรอบด้วยเอนโคเดอร์จึงเกิดความผิดพลาด การนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปใช้งาน หุ่นยนต์เองต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ผู้ใช้ได้กำหนดไว้ ซึ่งต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอยู่เสมอ ด้วยเหตุนี้ความผิดพลาดที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วต้องเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นการแก้ไขความผิดพลาดจึงมีความจำเป็นเพื่อให้การใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นไปตามอย่างที่ต้องการ ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงลักษณะของค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งหาวิธีประมาณค่าความผิดพลาด e_{ac} เพื่อการคำนวณตำแหน่งมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

4.3.1 การทดลองครั้งที่ 5 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความผิดพลาดที่เกิดมาจากความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ค่าต่างๆ

4.3.1.1 รายละเอียดของการทดลอง

การทดลองจะให้หุ่นยนต์วิ่งเป็นเส้นตรงด้วยระยะ 4500 มิลลิเมตร โดยเริ่มวิ่งจากหยุดนิ่งด้วยความเร่งตามค่าที่กำหนดจนความเร็วสูงสุดมีค่าตามกำหนดและเบรคด้วยความหน่วงขนาดเดียวกันกับความเร่งในตอนต้นจนหยุดพร้อมทั้งวัดค่าความผิดพลาดที่ได้และทำการเปลี่ยนค่าความเร่งกำหนดพร้อมทั้งความเร็วสูงสุดกำหนดโดยความเร่งกำหนดจะมีค่าตั้งแต่ 50 mm/s^2 ไปจนถึง 500 mm/s^2 และความเร็วสูงสุดกำหนดจะมีค่าตั้งแต่ 100 mm/s ไปจนถึง 600 mm/s

4.3.1.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

- 1) เพื่อศึกษาถึงค่าความผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากการวิ่งด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดขนาดต่าง
- 2) หาโมเดลที่จะประมาณความผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากการวิ่งด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดขนาดต่างๆ

4.3.1.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และนับสัญญาณเอนโคเดอร์ยี่ห้อ Dallas Semiconductor รุ่น DS89C420 และ National Semiconductor รุ่น LM629
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

4.3.1.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 1) กำหนดระยะเป้าหมายของหุ่นยนต์โดยให้เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปตามเส้นทางตรงระยะ 4500 มิลลิเมตร
- 2) กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้แก่ค่า A_d , V_d และค่านวน $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.53) โดยให้ค่า $e_{ac} = 0$ และพารามิเตอร์ที่ใช้ค่านวนตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้แก่ C_m , C_R , C_L
- 3) จากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะถูกโปรแกรมลงไปในตัวหุ่นยนต์ โปรแกรมควบคุมจะใช้ค่าพวกในการควบคุมการเคลื่อนที่และค่านวนตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดการวิ่งแต่ละรอบสำหรับการทดลองครั้งที่ 5
- 4) ปล่อยหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหยุดบริเวณเป้าหมาย

5) บันทึกค่าตำแหน่งสุดท้ายของหุ่นยนต์พร้อมทั้งค่าความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์

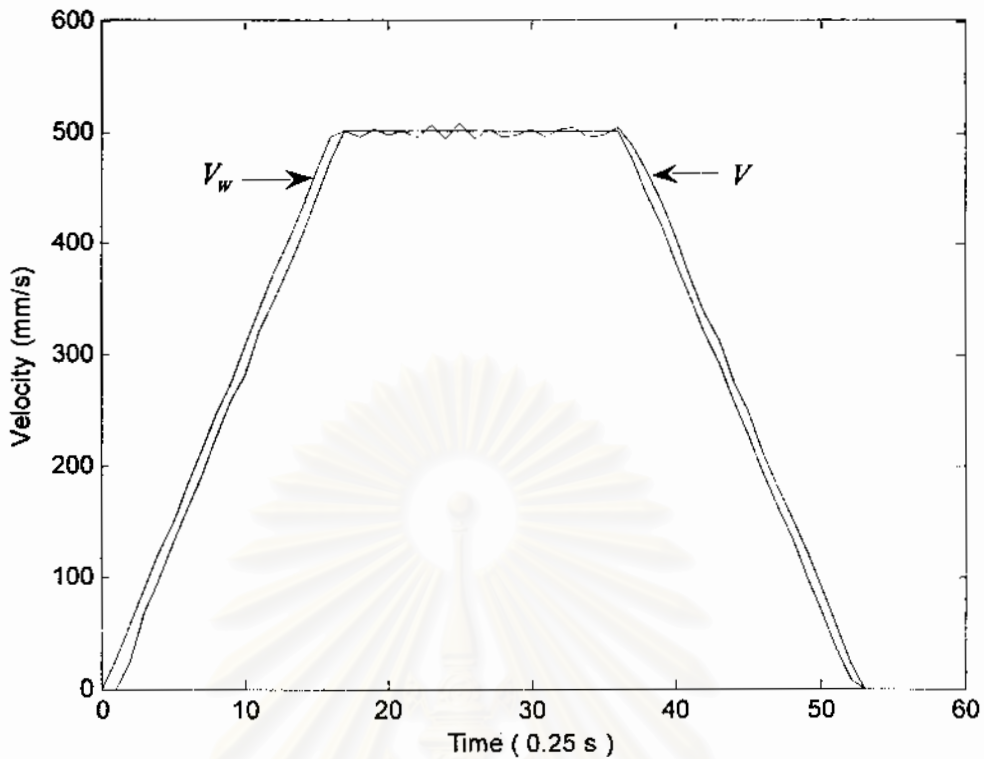
6) นำหุ่นยนต์มาที่จุดเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนค่าความเร่งและความเร็วสูงสุด ปล่อยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหยุดบริเวณเป้าหมายพร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งสุดท้ายและค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ทั้งหมด ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดจากการทดลองครั้งที่ 5

	ความเร็ว(cm/s)	10	20	30	40	50	60
ความเร่ง(cm/s^2)	ค่าผิดพลาด(mm)						
5		-1.0	2.5	7.2	9.6	10.2	11.8
10		-0.8	7.4	12.4	16.8	18.6	20.1
15		-0.2	7.7	12.7	18.2	22.0	26.0
20		-0.2	8.0	13.9	19.3	22.6	27.0
25		-0.6	7.7	15.6	18.0	21.0	23.1
30		-0.3	11.1	18.1	21.4	25.9	28.6
35		-1.1	7.5	13.9	20.4	25.8	31.1
40		-0.7	6.3	13.6	18.1	22.9	27.6
45		1.0	10.0	17.4	21.5	26.4	29.9
50		3.1	11.4	17.8	21.8	24.6	27.8

4.3.1.5 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ 5

จากผลการทดลองพบว่าค่าผิดพลาดขึ้นอยู่กับขนาดของ ความเร่ง และความเร็วสูงสุด แต่ขนาดของความเร่งจะมีผลน้อยกว่าขนาดของความเร็วสูงสุด สังเกตได้จากระหว่างค่าความเร่งจาก 50 cm/s^2 ลงมาถึงความเร่ง 15 cm/s^2 ที่ความเร็ว 60 cm/s มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันและค่อนข้างกว้างคือที่ความเร่งสูงค่าความผิดพลาดกับน้อยกว่าที่ความเร่งต่ำเช่น ที่ความเร่ง 50 cm/s^2 กับ 35 cm/s^2 เป็นต้น แต่ช่วงความเร่งจาก 15 cm/s^2 ลงมาที่ 5 cm/s^2 ค่าความผิดพลาดค่อนข้างแตกต่างกันเป็นเท่าตัวเลยทีเดียว ส่วนผลจากความเร่งจะเห็นได้เลยว่าที่ความเร็วสูงค่าผิดพลาดมากกว่าความเร็วต่ำไม่ว่าจะใช้ความเร่งขนาดเท่าใด



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความเร็ว (V_w) ที่ล้อยับความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์ (V) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง 100 mm/s^2 และความเร็วสูงสุด 500 mm/s

จากรูปที่ 4.7 เส้นกราฟ V_w คือความเร็วที่ล้อยับ (ความเร็วเชิงมุมคูณกับรัศมีจริงของล้อ) ส่วนเส้นกราฟ V คือความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์ ที่หุ่นยนต์วิ่งด้วยความเร่ง (A_d) เท่ากับ 100 mm/s^2 และความเร็วสูงสุด (V_d) เท่ากับ 500 mm/s จะเห็นว่าความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์เทียบกับความเร็วที่ล้อยับในขณะที่เร่งและเบรคจะมีค่าที่เหมือนกันอยู่ โดยในขณะที่เร่งความเร็วที่ล้อยับจะนำความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์และช่วงที่เบรคความเร็วที่ล้อยับจะตามความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์ ระยะตรงนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการสิ้นไกลตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ค่าความผิดพลาดจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างพื้นที่ใต้กราฟของความเร็วที่ล้อยับและความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์ โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเร่งและช่วงที่มีการเบรค การประมาณค่าความผิดพลาดจึงใช้สมการที่ (3.47) และเราจะเรียกสมการที่ (3.47) นี้ว่า สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี

$$e_a = \frac{1}{2} \times V_d^2 \left(\frac{m^2 A_d}{1 - mA_d} \right)$$

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 5 นี้ เราจะนำไปพล็อตกราฟเพื่อศึกษารูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับความเร่งและความเร็วสูงสุด ซึ่งอาจจะมีค่าแม่นยำสำหรับประมาณค่าผิดพลาดมากกว่า สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี โดยเราจะเรียกสมการที่ได้

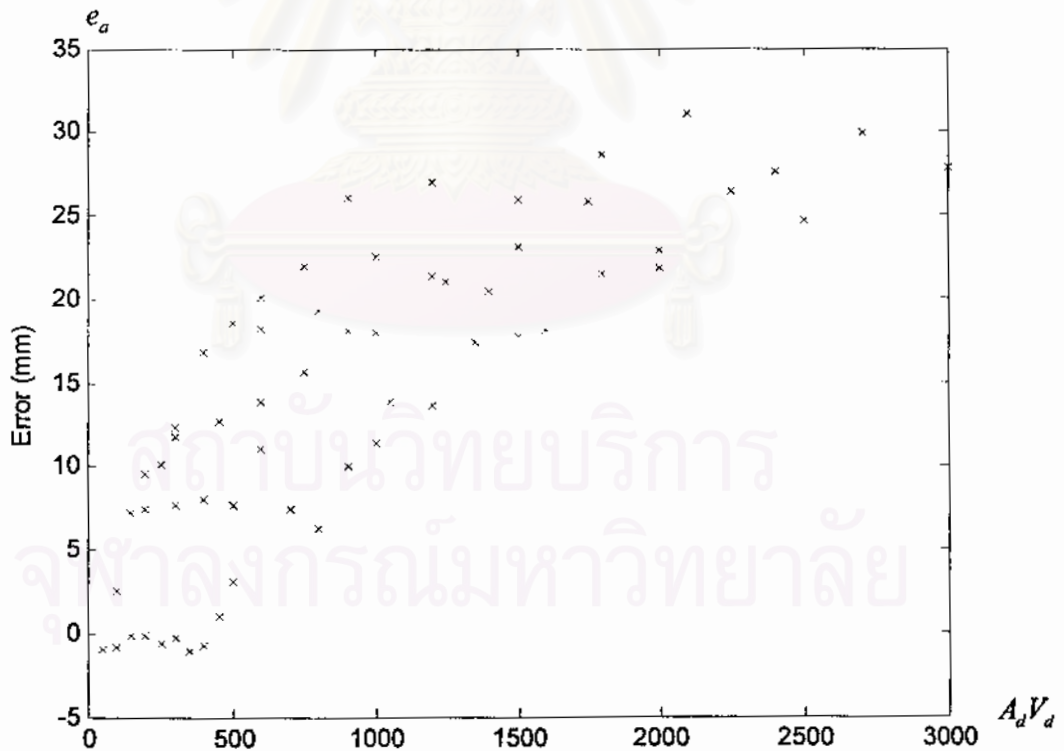
จากความสัมพันธ์ของข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 5 นี้ว่า สมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลอง จากสมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี เราพบว่าค่าผิดพลาดมีขนาดแปรตามความเร่งและความเร็วสูงสุด เราจึงสมมติสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับความเร่งสูงสุดและความเร็วเป็นดังนี้

$$e_a = pA_d^k V_d \quad (4.1)$$

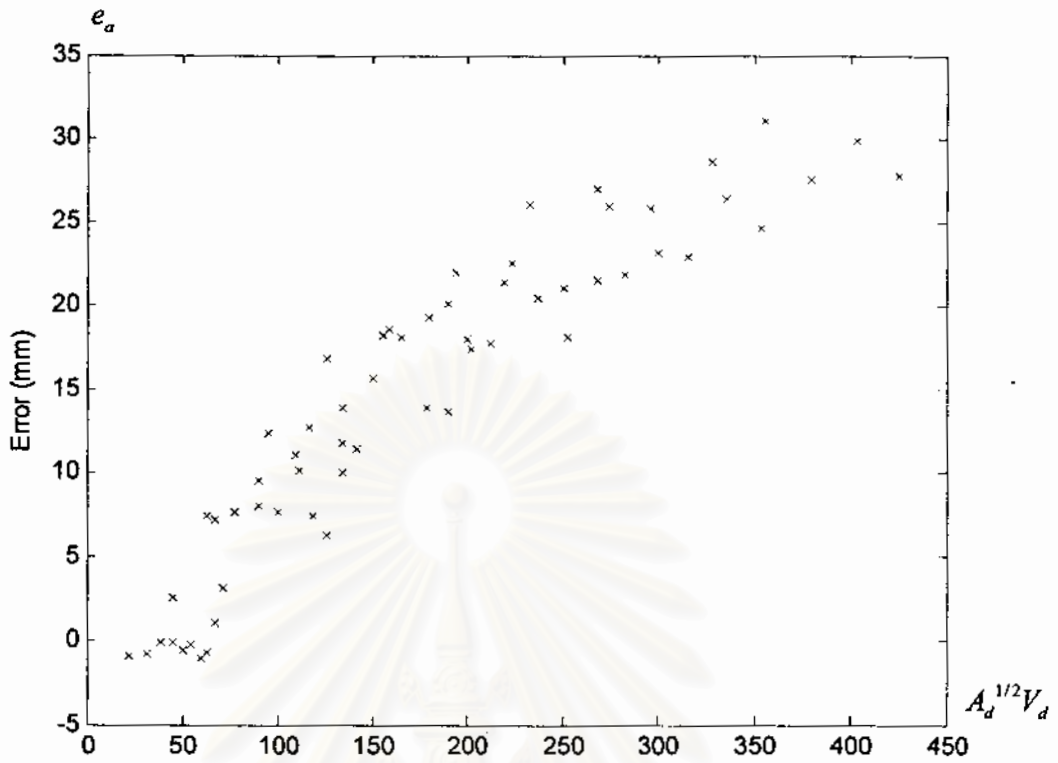
โดยที่ p คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ปรับแบบออนไลน์

k คือ ค่าประมาณจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น

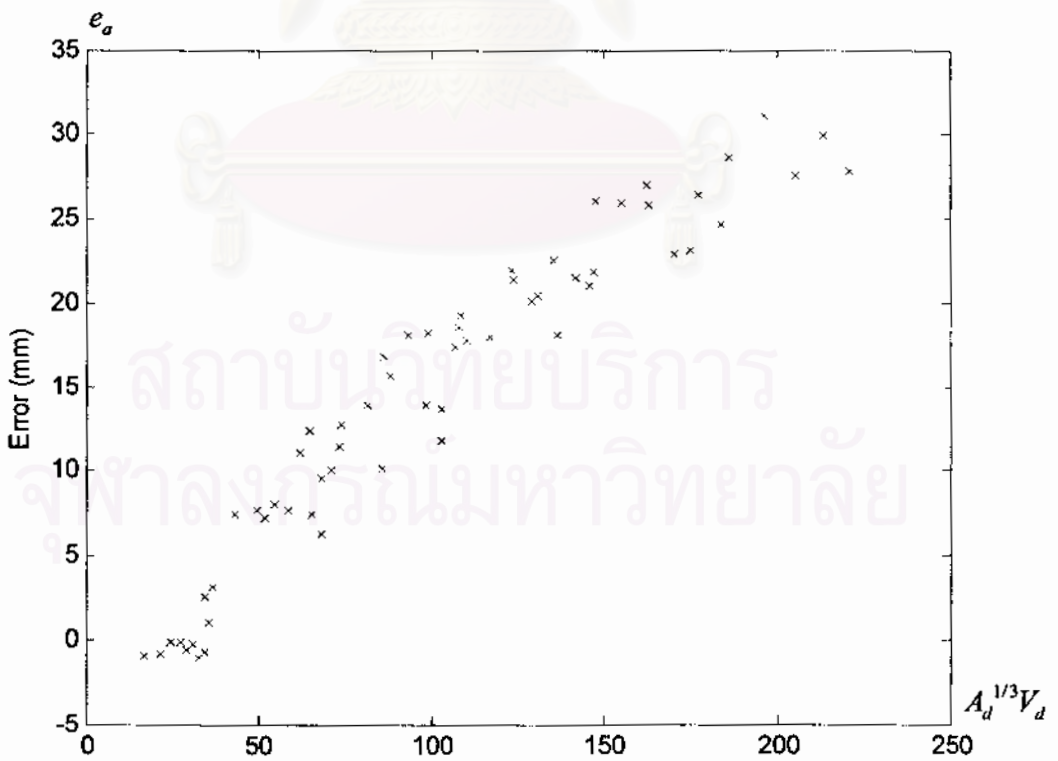
จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.1) เราจะเรียกสมการนี้ว่า สมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลอง และจากข้อมูลที่ได้ทำการทดลองเราจะพล็อตกราฟระหว่างค่าผิดพลาดเทียบกับค่าความเร่งและความเร็วตามสมการที่ (4.1) โดยจะให้แกน Y ของกราฟคือขนาดความผิดพลาด (e_a) ส่วนแกน X คือค่า $A_d^k V_d$ และค่าคงตัว k จะลองเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ทั้งนี้เพื่อหาค่าที่เหมาะสม



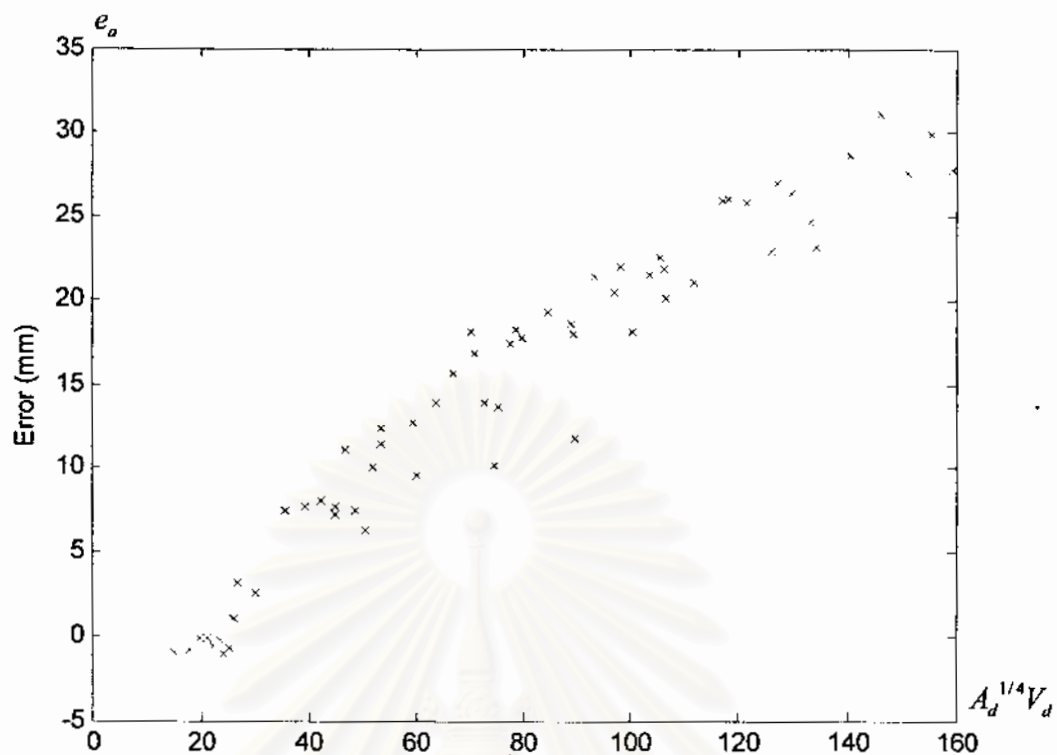
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_a กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1$



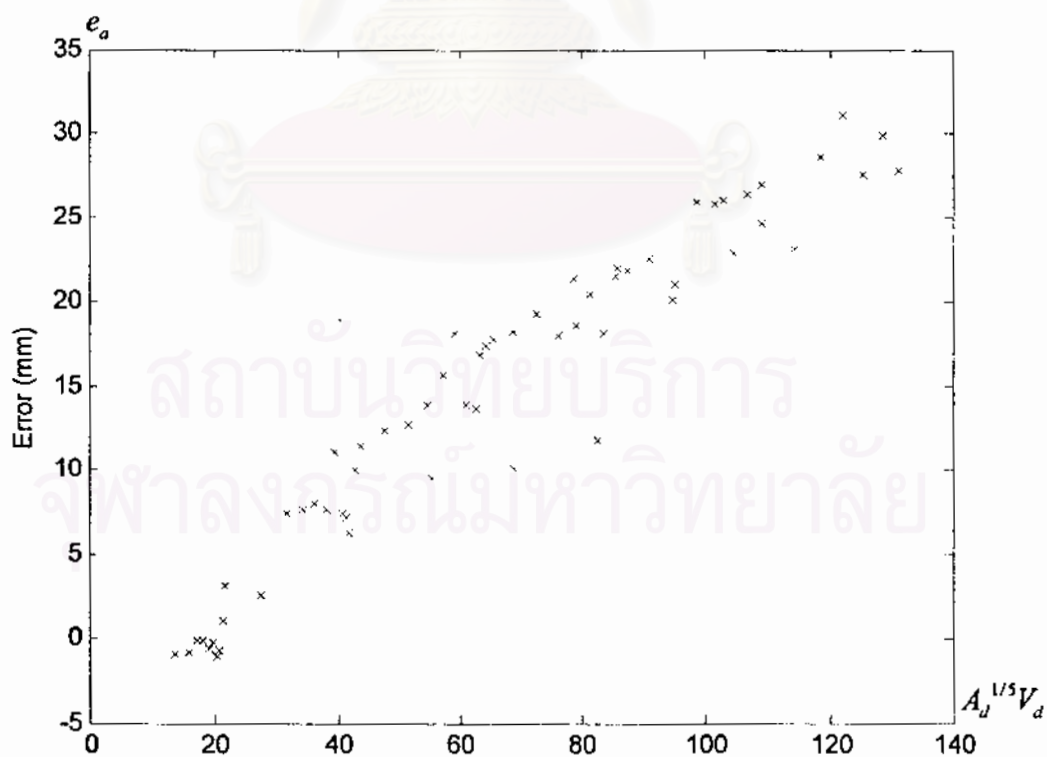
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_a กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/2$



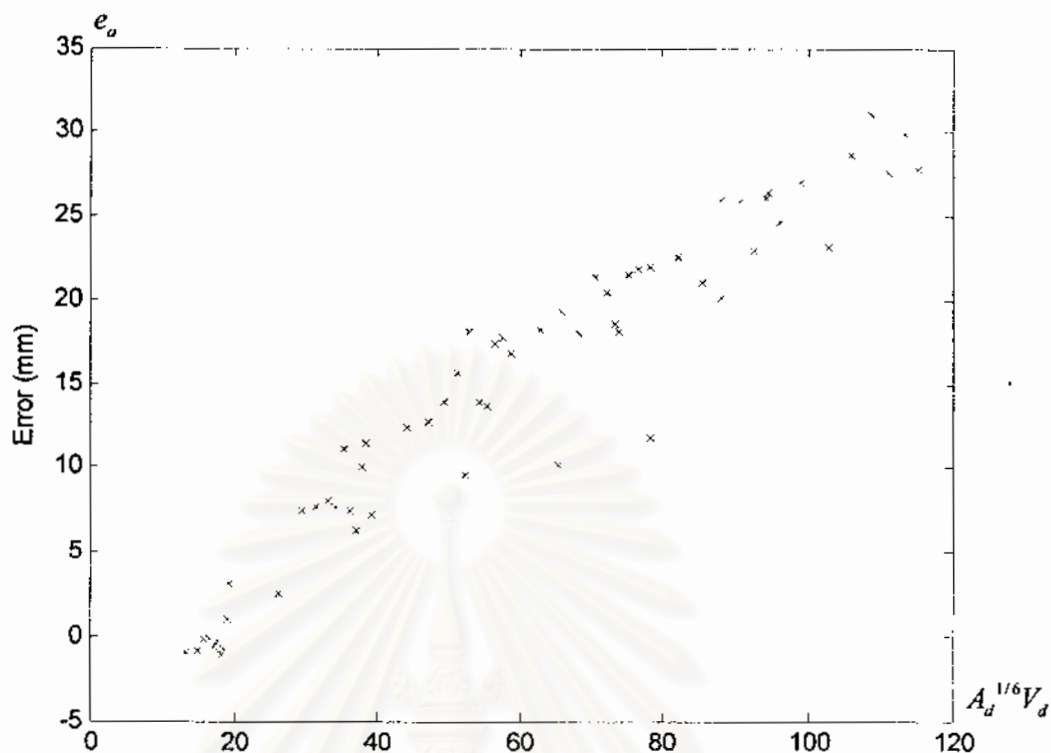
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_a กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/3$



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_a กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/4$



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_a กับ $A_d^k V_d$ ที่ค่า $k=1/5$



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาด e_d กับ $A_d^{1/6} V_d$ ที่ค่า $k = 1/6$

การพิจารณาจะดูจากความเป็นเชิงเส้นของกราฟ ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.13 เราจะวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นด้วยการหาค่า Correlation Coefficient [18] ตามวิธีการดังนี้ กำหนดให้ (X_i, Y_i) เป็นคู่อันดับความสัมพันธ์ใดๆ ค่า Correlation Coefficient ของคู่อันดับความสัมพันธ์ (X_i, Y_i) มีค่าเท่ากับ

$$\rho = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4.2)$$

โดยที่ ρ คือ Correlation Coefficient

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของ X_i

\bar{Y} คือ ค่าเฉลี่ยของ Y_i

ค่า ρ จะเป็นดัชนีที่บอกถึงขนาดความเป็นเชิงเส้นซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้าค่า ρ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แสดงว่าความสัมพันธ์มีความเป็นเชิงเส้นน้อย แต่ถ้าหากค่าเข้าใกล้ 1 หรือ -1 ความสัมพันธ์จะมีความเป็นเชิงเส้นมาก

จากสมการที่ (4.2) นำหาค่า Correlation Coefficient ระหว่างค่าผิดพลาด e_d กับ $A_d^{1/6} V_d$ ที่ค่า k ต่างตามที่ได้พล็อตกราฟ เพื่อเลือกค่า k ที่เหมาะสมไปใช้ในการประมาณ

ตารางที่ 4.6 ค่า Correlation coefficient ตามสมการที่ (4.1) ที่ค่า k ต่างๆ

k	Correlation coefficient
1	0.8076
1/2	0.9276
1/3	0.9578
1/4	0.9638
1/5	0.9627
1/6	0.9596

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ที่ค่า $k = 1/4$ ค่า Correlation coefficient มีค่ามากที่สุด ดังนั้นเราจะเลือกค่า $k = 1/4$ ไปแทนในสมการที่ (4.1) สมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลองจึงเป็นดังนี้

$$e_{ac} = pA_d^{1/4}V_d \quad (4.3)$$

4.4 การทดลองปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์ของการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ด้วยวิธีออกโตมิทรีแบบใช้กล้องภายนอก

การนำหุ่นยนต์ไปใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่แม่นยำเพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ด้วยวิธีออกโตมิทรีต้องการการปรับแก้ค่าผิดพลาดจากการวัดไม่ว่าจะเกิดจากความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อหรือความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง วิธีการปรับแก้ที่มีประสิทธิภาพต้องสามารถที่จะลดค่าความผิดพลาดของการวัดได้ ยิ่งลดได้มากยิ่งเป็นผลดี

การปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์ถือเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดค่าความผิดพลาดได้ทั้ง 2 สาเหตุ ประหยัดเวลาเนื่องจากการปรับแก้ค่าผิดพลาดโดยขณะที่หุ่นยนต์กำลังทำงานอยู่และการวัดตำแหน่งจะมีความแม่นยำขึ้นเรื่อยๆหลังจากที่ได้มีการปรับแก้แบบออนไลน์หลายรอบ ซึ่งในหัวข้อนี้เราได้อธิบายพร้อมกับการทดลองให้เห็นถึงขั้นตอนการปรับค่าผิดพลาดโดยใช้โมเดลจากทฤษฎีและโมเดลที่ได้จากการทดลองซึ่งมีสมการดังนี้

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากทฤษฎีในการประมาณ

$$S_T = C_m N_{R/L} + \frac{1}{2} \times V_d^2 \left(\frac{(\bar{m})^2 A_d}{1 - (\bar{m}) A_d} \right) \quad (4.4)$$

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่กรณีที่ใช้โมเดลจากการทดลองในการประมาณ

$$S_T = C_m N_{R/L} + \bar{P} A_d^{1/4} V_d \quad (4.5)$$

พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้รับหลังจากได้มีการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ และพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งค่าต่างๆ ว่ามีประสิทธิภาพดีขึ้นหรือไม่อย่างไร

4.4.1 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองนี้จะกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเส้นตรงไปถึงเป้าหมายซึ่งเป็นพื้นที่ที่วัดตำแหน่งด้วยกล้อง และปรับค่าความผิดพลาดทั้งที่เกิดจากความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ และความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งในลักษณะแบบออนไลน์ คือ หุ่นยนต์จะวิ่งไปจนถึงจุดตรวจวัดด้วยกล้องแล้วทำการแก้ไขค่าความผิดพลาด โดยจะแก้ไขค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อเป็นอันดับแรกจากนั้นก็นำค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวิ่งช่วงครั้งที่สอง มาหาสมการที่จะใช้ประมาณค่าผิดพลาด ที่เกิดจากการขนาดความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ ที่จะเคลื่อนที่ในช่วงต่อไป ผลการทดลองที่ได้รับจากการทดลองครั้งนี้ มี 2 แบบคือแบบที่ใช้สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โมเดลจากทฤษฎี ตามสมการที่ (4.4) และแบบที่ใช้สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โมเดลจากการทดลองตามสมการที่ (4.5) เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลที่ได้ของแต่ละสมการ

4.4.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1) ศึกษาถึงผลของการปรับแก้ค่าผิดพลาดแบบออนไลน์ โดยปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อก่อนแล้วจึงปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง ของการวัดตำแหน่ง หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยวิธีฮอดโดมิทรี

4.4.3 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์
- 2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่และนับสัญญาณเอนโคเดอร์ยี่ห้อ

Dallas Semiconductor รุ่น DS89C420 และ National Semiconductor รุ่น LM629

- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 4) กล้องวิดีโอภาพสียี่ห้อ HITACHI รุ่น KP-D50 ชนิดภาพสี
- 5) การ์ดจับภาพวิดีโอยี่ห้อ Pinnacle

4.4.4 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 การปรับค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ

- 1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ $C_m = 0.1571$ ซึ่งวัดได้ตอนออกแบบให้กับหุ่นยนต์

2) กำหนดระยะเป้าหมาย $S_T = 4500 \text{ mm}$ ความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ ซึ่งควรใช้ค่าเร่งและความเร็วสูงสุดที่ต่ำกำหนดให้เป็น $A_{dm} = 50 \text{ mm/s}^2$ และ $V_{dm} = 100 \text{ mm/s}$ เพื่อลดผลของความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง และคำนวณ $N_{R/L}$ ตามสมการที่ (3.48) พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$A_{dm} = 50 \text{ mm/s}^2$$

$$V_{dm} = 100 \text{ mm/s}$$

$$N_{R/L} = \frac{4500}{C_m} = 28644 \text{ pulse}$$

พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.1571$$

$$e_{ac} = 0$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

3) ปรับตั้งกล่องวิตติโอ ขนาดของพื้นที่ตรวจวัด และความละเอียดในการวัด

4) ปลอ่ยให้หุ่นยนต์(วิ่งครั้งที่ 1)เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมาย และวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยกล่องวิตติโอ พร้อมทั้งบันทึกค่า A_{dm} และ V_{dm} จากนั้นนำค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไปปรับพารามิเตอร์ C_m

ผลที่ได้รับ

ตารางที่ 4.7 ผลทดลองของการวิ่งเพื่อปรับค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ

	วัดจากกล่องวิตติโอ	วัดจากระยะจริง
ระยะตามแนวแกน X (mm)	-24	-22.5
ระยะตามแนวแกน Y (mm)	-132	-133.5
ระยะการเคลื่อนที่ S_c (mm)	4368.07	4366.56
ระยะผิดพลาด e_m (mm)	-131.93	-133.44

การปรับพารามิเตอร์ C_m

จากสมการที่ (3.52)

$$C_m = \frac{S_c}{N_{R/L}} = \frac{4368.07}{28644} = 0.15249$$

5) นำค่า C_m ไปใช้ในการคำนวณสำหรับหาพารามิเตอร์ $N_{R/L}$ ของการเคลื่อนที่ครั้งต่อไปตามสมการ

$$S_T = (1)(0.15249)N_{RIL}$$

ขั้นตอนที่ 2 การหาสมการความผิดพลาดภายนอกระบบครั้งที่ 1

6) กำหนดความเร่งและความเร็วสูงสุด ค่าใหม่ให้กับหุ่นยนต์ให้เป็น $A_{d1} = 500$
 mm/s^2 $V_{d1} = 600$ mm/s และระยะเป้าหมาย $S_T = 4500$ mm

พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$A_{d1} = 500 \text{ cm/s}^2$$

$$V_{d1} = 600 \text{ cm/s}$$

$$N_{RIL} = \frac{4500}{C_m} = 29510 \text{ pulse}$$

พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.15249$$

$$e_{ac} = 0$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

7) ปลอ่ยหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ (วิ่งครั้งที่ 2) ไปหาเป้าหมายภายในพื้นที่ตรวจวัดด้วย
 กล้อง จากนั้นทำการวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งด้วยกล้อง และประมาณค่าฟังก์ชัน
 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับความเร่งและความเร็วสูงสุด

ผลที่ได้รับ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งครั้งที่ 2

	วัดจากกล้องวิดีโอ	วัดจากระยะจริง
ระยะตามแนวแกน X (mm)	-16	-14.5
ระยะตามแนวแกน Y (mm)	28	27
ระยะการเคลื่อนที่ S_c (mm)	4528.03	4527.02
ระยะผิดพลาด e_{o1} (mm)	28.03	27.02

การประมาณค่าฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับความเร่งและความเร็วสูงสุด

กำหนดให้ สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี อยู่ในรูป

$$e_{ac} = \frac{1}{2} \times V_d^2 \left(\frac{m^2 A_d}{1 - mA_d} \right) \quad (4.6)$$

และสมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลอง อยู่ในรูป

$$e_{oc} = pA_d^{1/4} V_d \quad (4.7)$$

โดยที่ m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร่งที่ต้องปรับแบบออนไลน์ของสมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี

p คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ต้องปรับแบบออนไลน์ของสมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลอง

การหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 1

การหาสมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎีครั้งที่ 1

จากสมการที่ (4.6) แทนค่า e_{d1} , A_{d1} , V_{d1} เพื่อหาค่า m_1 ของสมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี

$$e_{d1} = \frac{1}{2} \times V_{d1}^2 \left(\frac{m_1^2 A_{d1}}{1 - m_1 A_{d1}} \right)$$

$$27.02 = \frac{1}{2} \times 600^2 \left(\frac{m_1^2 (500)}{1 - m_1 (500)} \right)$$

$$m_1 = 0.000486$$

การหาสมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลองครั้งที่ 1

จากสมการที่ (4.7) แทนค่า e_{d1} , A_{d1} , V_{d1} เพื่อหาค่า p_1 ของสมการความผิดพลาดด้วยโมเดลจากการทดลอง

$$e_{d1} = p_1 A_{d1}^{1/4} V_{d1}$$

$$27.02 = p_1 (500)^{1/4} (600)$$

$$p_1 = 0.009523$$

8) จากค่า m_1 และ p_1 นำไปแทนค่าในสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.7) ตามลำดับ เพื่อที่จะใช้ในการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์โดยสมการความผิดพลาดทั้งสองจะเป็นดังนี้

$$e_{aci+1} = \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{(0.000486)^2 A_{di+1}}{1 - (0.000486) A_{di+1}} \right) \quad (4.8)$$

$$e_{aci+1} = (0.009523) A_{di+1}^{1/4} V_{di+1} \quad (4.9)$$

9) นำสมการที่ได้จากข้อ (8) ไปใช้ประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง (A_{di+1}) และความเร็วสูงสุด (V_{di+1}) ของการวิ่งครั้งต่อไป ซึ่งค่าตำแหน่งของหุ่นยนต์หาได้ตามสมการดังนี้

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากทฤษฎีในการประมาณ

$$S_T = (1)(0.15249) N_{R/L} + \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{(0.000486)^2 A_{di+1}}{1 - (0.000486) A_{di+1}} \right) \quad (4.10)$$

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากการทดลองในการประมาณ

$$S_T = (1)(0.15249) N_{R/L} + (0.009523) A_{di+1}^{1/4} V_{di+1} \quad (4.11)$$

ขั้นตอนที่ 3 การปรับปรุงสมการความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งครั้งที่ 2

10) กำหนดความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ให้เป็น $A_{d2} = 300 \text{ mm/s}^2$
 $V_{d2} = 300 \text{ mm/s}$ และระยะ $S_T = 4500 \text{ mm}$ แล้วประมาณค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้ดังนี้

ประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎี

จากสมการที่ (4.8) ค่า e_{ac2} ประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎีหาได้ดังนี้

$$e_{ac2} = \frac{1}{2} \times 300^2 \left(\frac{(0.000486)^2 (300)}{1 - (0.000486)(300)} \right)$$

$$e_{ac2} = 3.73$$

ประมาณด้วยโมเดลจากการทดลอง

จากสมการที่ (4.9) ค่า e_{ac2} ประมาณด้วยโมเดลจากการทดลองหาได้ดังนี้

$$e_{ac2} = (0.009523)(300)^{1/4} (300)$$

$$e_{ac2} = 11.89$$

นำค่า e_{oc2} ที่ได้จากการประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎีไปแทนค่าในสมการ (4.10) และนำค่า e_{oc2} ที่ได้จากการประมาณด้วยโมเดลจากการทดลองไปแทนค่าในสมการ (4.11) เพื่อคำนวณหา ค่า $N_{R/L}$ ของแต่ละสมการ แล้วปล่อยให้หุ่นยนต์วิ่งจนถึงเป้าหมาย วัดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวิ่งทั้งสองครั้งด้วยกล้อง

พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$A_{d2} = 300 \text{ cm/s}^2$$

$$V_{d2} = 300 \text{ cm/s}$$

$$N_{R/L} = \frac{4500 - 3.73}{C_m} = 29486 \text{ pulse} \text{ โดยการใช้สมการความผิดพลาดโมเดล}$$

จากทฤษฎี

$$N_{R/L} = \frac{4500 - 11.89}{C_m} = 29432 \text{ pulse} \text{ โดยการใช้สมการความผิดพลาดโมเดล}$$

จากการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.15249$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

ผลที่ได้รับ

ตารางที่ 4.9 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎี

	วัดจากกล้องวิดีโอ	วัดจากระยะจริง
ระยะตามแนวแกน X (mm)	-28	-26.5
ระยะตามแนวแกน Y (mm)	12	13
ระยะการเคลื่อนที่ S_c (mm)	4512.09	4513.08
ระยะผิดพลาด e_{o2} (mm)	12.09	13.08

ตารางที่ 4.10 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากการทดลอง

ใช้สมการที่ (4.8)	วัดจากกล้องวิดีโอ	วัดจากระยะจริง
ระยะตามแนวแกน X (mm)	10	-13
ระยะตามแนวแกน Y (mm)	0	0.5
ระยะการเคลื่อนที่ S_c (mm)	4500.03	4500.52
ระยะผิดพลาด e_{o2} (mm)	0.03	0.52

การหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 2

การปรับปรุงสมการที่ (4.8) โมเดลจากทฤษฎี

จากสมการที่ (3.63) ค่าผิดพลาดที่ควรประมาณได้หาได้ดังนี้

$$e_{ra2} = 3.73 + 12.09$$

$$e_{ra2} = 15.82$$

แทนค่า e_{ra2} , A_{d2} , V_{d2} ในสมการที่ (4.6) เพื่อหาค่า m_2

$$e_{ra2} = \frac{1}{2} \times V_{d2}^2 \left(\frac{m_2^2 A_{d2}}{1 - m_2 A_{d2}} \right)$$

$$15.82 = \frac{1}{2} \times 300^2 \left(\frac{m_2^2 (300)}{1 - m_2 (300)} \right)$$

$$m_2 = 0.000921$$

นำค่า m_1 และ m_2 ที่ได้ไปปรับปรุงตามสมการ (3.68)

$$\bar{m}_2 = \left(\frac{m_1 + m_2}{2} \right) = \left(\frac{0.000486 + 0.000921}{2} \right)$$

ทำให้สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎีอันใหม่เป็นดังนี้

$$e_{act} = \frac{1}{2} \times V_{d+1}^2 \left(\frac{(0.000704)^2 A_{d+1}}{1 - (0.000704) A_{d+1}} \right) \quad (4.12)$$

การปรับปรุงสมการที่ (4.9) โมเดลจากการทดลอง

จากสมการที่ (3.63) ค่าผิดพลาดที่ควรประมาณได้หาได้ดังนี้

$$e_{ra2} = 11.89 + 0.03$$

$$e_{ra2} = 11.92$$

จากสมการที่ (4.7) แทนค่า e_{ra2} , A_{d2} , V_{d2} เพื่อหาค่า p_2

$$e_{ra2} = p_2 A_{d2}^{1/4} V_{d2}$$

$$11.92 = p_2 (300)^{1/4} (300)$$

$$p_2 = 0.009547$$

นำค่า p_1 และ p_2 ที่ได้ไปปรับปรุงตามสมการ (3.68)

$$\bar{p}_2 = \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) = \left(\frac{0.009523 + 0.009547}{2} \right)$$

ทำให้สมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลองอันใหม่เป็นดังนี้

$$e_{act+1} = (0.009535)A_{di+1}^{1/4}V_{di+1} \quad (4.13)$$

ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณตำแหน่งครั้งต่อไปเป็นดังนี้

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากทฤษฎีในการประมาณ

$$S_T = (1)(0.15249)N_{R/L} + \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{(0.000704)^2 A_{di+1}}{1 - (0.000704)A_{di+1}} \right) \quad (4.14)$$

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากการทดลองในการประมาณ

$$S_T = (1)(0.15249)N_{R/L} + (0.009535)A_{di+1}^{1/4}V_{di+1} \quad (4.15)$$

ขั้นตอนที่ 4 การปรับปรุงสมการความผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งครั้งที่ 3

11) กำหนดความเร่งและความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ให้เป็น $A_{d3} = 100 \text{ mm/s}^2$
 $V_{d3} = 600 \text{ mm/s}$ และระยะ $S_T = 4500 \text{ mm}$ แล้วประมาณค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้ดังนี้

ค่าผิดพลาดประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎี

จากสมการที่ (4.12) ค่า e_{ac3} ประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎีหาได้ดังนี้

$$e_{ac3} = \frac{1}{2} \times 600^2 \left(\frac{(0.000704)^2 (100)}{1 - (0.000704)(100)} \right)$$

$$e_{ac3} = 9.60$$

ค่าผิดพลาดประมาณด้วยโมเดลจากการทดลอง

จากสมการที่ (4.13) ค่า e_{ac3} ประมาณด้วยโมเดลจากการทดลองหาได้ดังนี้

$$e_{ac3} = (0.009535)(100)^{1/4}(600)$$

$$e_{ac3} = 18.09$$

นำค่า e_{ac3} ที่ได้จากการประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎีไปแทนค่าในสมการ (4.14) และนำค่า e_{ac3} ที่ได้จากการประมาณด้วยโมเดลจากการทดลองไปแทนค่าในสมการ (4.15) เพื่อคำนวณหา

ค่า $N_{R/L}$ ของแต่ละสมการ แล้วปล่อยให้หุ่นยนต์วิ่งจนถึงเป้าหมาย วัดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวิ่งทั้งสองครั้งด้วยกล้อง

พารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$A_{dm} = 100 \text{ cm/s}^2$$

$$V_{dm} = 600 \text{ cm/s}$$

$$N_{R/L} = \frac{4500 - 9.60}{C_m} = 29447 \text{ pulse โดยการใช้สมการความผิดพลาดโมเดล}$$

จากทฤษฎี

$$N_{R/L} = \frac{4500 - 18.09}{C_m} = 29392 \text{ pulse โดยการใช้สมการความผิดพลาดโมเดล}$$

จากการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งมีค่าดังนี้

$$C_m = 0.15249$$

$$C_R = 1$$

$$C_L = 1$$

ผลที่ได้รับ

ตารางที่ 4.11 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากทฤษฎี

	วัดจากกล้องวีดีโอ	วัดจากระยะจริง
ระยะตามแนวแกน X (mm)	20	21
ระยะตามแนวแกน Y (mm)	8	11.5
ระยะการเคลื่อนที่ S_c (mm)	4508.04	4511.55
ระยะผิดพลาด e_{o3} (mm)	8.04	11.55

ตารางที่ 4.12 ผลการวิ่งของหุ่นยนต์โดยประมาณด้วยโมเดลจากการทดลอง

	วัดจากกล้องวีดีโอ	วัดจากระยะจริง
ระยะตามแนวแกน X (mm)	4	4.5
ระยะตามแนวแกน Y (mm)	0	1.5
ระยะการเคลื่อนที่ (mm)	4500.01	4501.5
ระยะผิดพลาด (mm)	0.01	1.5

การหาสมการความผิดพลาดครั้งที่ 3

การปรับปรุงสมการที่ (4.12) โมเดลจากทฤษฎี

จากสมการที่ (3.63) ค่าผิดพลาดที่ควรประมาณได้หาได้ดังนี้

$$e_{ra3} = 9.60 + 8.04$$

$$e_{ra3} = 17.64$$

แทนค่า e_{ra3} , A_{d3} , V_{d3} ในสมการที่ (4.6) เพื่อหาค่า m_3

$$e_{ra3} = \frac{1}{2} \times V_{d2}^2 \left(\frac{m_3^2 A_{d3}}{1 - m_3 A_{d3}} \right)$$

$$15.82 = \frac{1}{2} \times 300^2 \left(\frac{m_2^2 (300)}{1 - m_2 (300)} \right)$$

$$m_3 = 0.000942$$

นำค่า m_1 , m_2 และ m_3 ที่ได้ไปปรับปรุงตามสมการ (3.68)

$$\bar{m}_3 = \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \right) = \left(\frac{0.000486 + 0.000921 + 0.000942}{3} \right)$$

ทำให้สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎีอันใหม่เป็นดังนี้

$$e_{aci} = \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{(0.000783)^2 A_{di+1}}{1 - (0.000783) A_{di+1}} \right) \quad (4.16)$$

การปรับปรุงสมการที่ (4.13) โมเดลจากการทดลอง

จากสมการที่ (3.63) ค่าผิดพลาดที่ควรประมาณได้หาได้ดังนี้

$$e_{ra3} = 18.09 + 0.01$$

$$e_{ra3} = 18.10$$

จากสมการที่ (4.7) แทนค่า e_{ra3} , A_{d3} , V_{d3} เพื่อหาค่า p_3

$$e_{ra3} = p_3 A_{d3}^{1/4} V_{d3}$$

$$18.10 = p_3 (100)^{1/4} (600)$$

$$p_3 = 0.00954$$

นำค่า p_1 , p_2 และ p_3 ที่ได้ไปปรับปรุงตามสมการ (3.75)

$$\bar{p}_3 = \left(\frac{p_1 + p_2 + p_3}{3} \right) = \left(\frac{0.009523 + 0.009547 + 0.009540}{3} \right)$$

ทำให้สมการความผิดพลาดไม่เกิดจากการทดลองอันใหม่เป็นดังนี้

$$e_{aci+1} = (0.009537)A_{di+1}^{1/4}V_{di+1} \quad (4.17)$$

ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณตำแหน่งครั้งต่อไปเป็นดังนี้

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากทฤษฎีในการประมาณ

$$S_T = (1)(0.15249)N_{R/L} + \frac{1}{2} \times V_{di+1}^2 \left(\frac{(0.000783)^2 A_{di+1}}{1 - (0.000783)A_{di+1}} \right) \quad (4.18)$$

สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กรณีที่ใช้โมเดลจากการทดลองในการประมาณ

$$S_T = (1)(0.15249)N_{R/L} + (0.009537)A_{di+1}^{1/4}V_{di+1} \quad (4.19)$$

สมการที่ (4.15) และ (4.16) จะเป็นสมการที่ใช้ในการประมาณค่าความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดค่าใดๆ ในครั้งต่อไป การปรับปรุงสมการความผิดพลาดสามารถทำได้ตลอดเวลาที่หุ่นยนต์วิ่งและมีการวัดค่าผิดพลาดจากกล้องวิดีโอโดยวิธีการปรับปรุงสามารถทำได้ตามขั้นตอนที่ 3 และ 4 ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น

4.4.5 ผลการทดลองการปรับค่าผิดพลาดแบบออนไลน์

ตารางที่ 4.13 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 1 ที่ความเร่ง $A_d = 50 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 100 \text{ mm/s}$

	การวิ่งครั้งที่ 1
ระยะที่หุ่นยนต์วิ่งวัดจากกล้อง (S_c)	4368.07
ระยะจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง	4366.56
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อที่วัดด้วยกล้อง (e_m)	-131.93
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อที่วัดจากระยะจริง	-133.44
พารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณตำแหน่ง	0.1571

ตารางที่ 4.14 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 2 ที่ความเร่ง $A_d = 500 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 600 \text{ mm/s}$

	การวิ่งครั้งที่ 2
ระยะที่หุ่นยนต์วิ่งวัดจากกล้อง (S_c)	4528.03
ระยะจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง	4527.02
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดด้วยกล้อง (e_{a1})	28.03
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดจากระยะจริง	27.02
พารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณตำแหน่ง	0.15249
ค่าสัมประสิทธิ์สมการความผิดพลาด (m_1)	0.000486
ค่าสัมประสิทธิ์สมการความผิดพลาด (p_1)	0.009527

ตารางที่ 4.15 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 3 โดยใช้โมเดลจากการทฤษฎีที่ความเร่ง $A_d = 300 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 300 \text{ mm/s}$

	การวิ่งครั้งที่ 3
ระยะที่หุ่นยนต์วิ่งวัดจากกล้อง (S_c)	4512.09
ระยะจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง	4513.08
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดด้วยกล้อง (e_{a2})	12.09
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดจากระยะจริง	13.08
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งจากการประมาณ (e_{ac2})	3.73
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่ควรจะสามารถได้ (e_{ra2})	15.82
พารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณตำแหน่ง	0.15249
ค่าสัมประสิทธิ์สมการความผิดพลาด (m_2)	0.000921

ตารางที่ 4.16 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 3 โดยใช้โมเดลจากการทดลองที่ความเร่ง $A_d = 300 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 300 \text{ mm/s}$

	การวิ่งครั้งที่ 3
ระยะที่หุ่นยนต์วิ่งวัดจากกล้อง (S_c)	4500.03
ระยะจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง	4500.52
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดด้วยกล้อง (e_{a2})	0.03
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดจากระยะจริง	0.52
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งจากการประมาณ (e_{ac2})	11.89
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่ควรจะได้ (e_{ra2})	11.92
พารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณตำแหน่ง	0.1571
ค่าสัมประสิทธิ์สมการความผิดพลาด (p_2)	0.009547

ตารางที่ 4.17 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 4 โดยใช้โมเดลจากการทฤษฎีที่ความเร่ง $A_d = 100 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 600 \text{ mm/s}$

	การวิ่งครั้งที่ 4
ระยะที่หุ่นยนต์วิ่งวัดจากกล้อง (S_c)	4508.04
ระยะจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง	4511.55
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดด้วยกล้อง (e_{a3})	8.04
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดจากระยะจริง	11.55
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งจากการประมาณ (e_{ac3})	9.60
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่ควรจะได้ (e_{ra3})	17.64
พารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณตำแหน่ง	0.1571
ค่าสัมประสิทธิ์สมการความผิดพลาด (m_3)	0.000942

ตารางที่ 4.18 สรุปข้อมูลการวิ่งครั้งที่ 4 โดยใช้โมเดลจากการทดลองที่ความเร่ง $A_d = 100 \text{ mm/s}^2$ และความเร็วสูงสุด $V_d = 600 \text{ mm/s}$

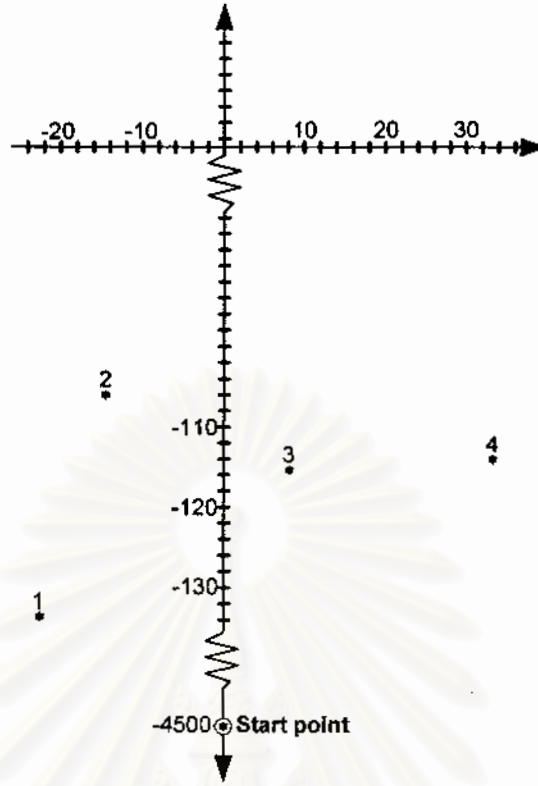
	การวิ่งครั้งที่ 4
ระยะที่หุ่นยนต์วิ่งวัดจากกล่อง (S_c)	4500.00
ระยะจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง	4501.5
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดด้วยกล่อง (e_{a3})	0.01
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่วัดจากระยะจริง	1.5
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งจากการประมาณ (e_{ac3})	18.09
ค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งที่ควรจะได้ (e_{ra3})	18.10
พารามิเตอร์ C_m ที่ใช้คำนวณตำแหน่ง	0.1571
ค่าสัมประสิทธิ์สัมผัการความผิดพลาด (p_3)	0.009540

4.4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองแต่ละแบบที่ให้หุ่นยนต์วิ่ง 4 ครั้ง

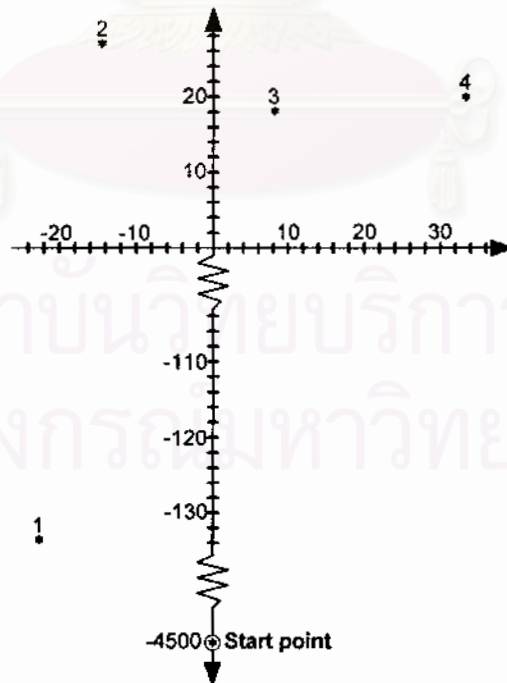
ตารางที่ 4.19 รายละเอียดของการวิ่งแต่ละครั้งของหุ่นยนต์

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
ความเร่งกำหนด $A_d \text{ (mm/s}^2\text{)}$	50	500	300	100
ความเร็วสูงสุด $V_d \text{ (mm/s)}$	100	600	300	600
ระยะกำหนด $S_d \text{ (mm)}$	4500	4500	4500	4500

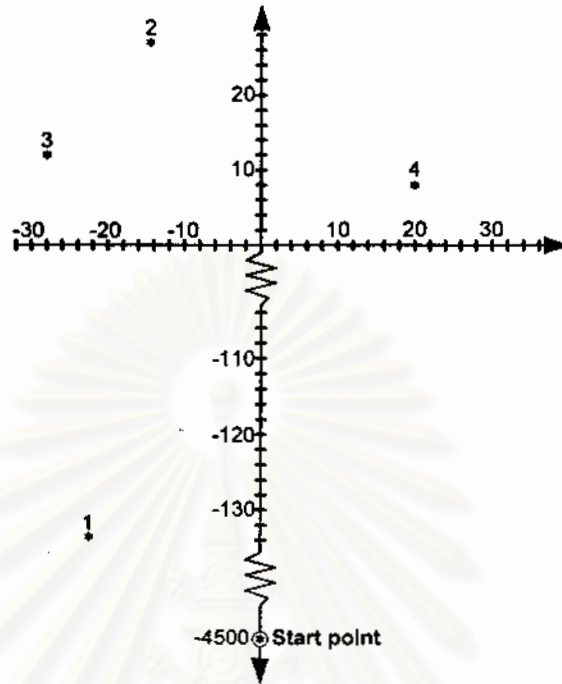
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



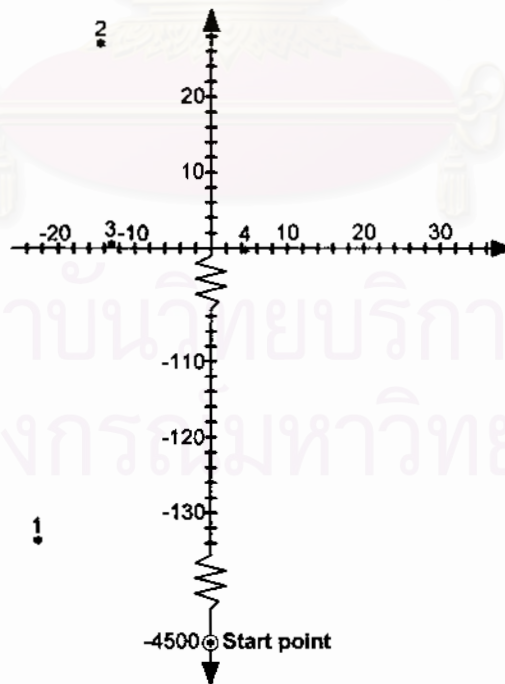
รูปที่ 4.14 ผลการวิ่งแบบไม่มีการปรับค่าผิดพลาด



รูปที่ 4.15 ผลการวิ่งแบบมีการปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อแต่ไม่มีการปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง



รูปที่ 4.16 ผลการวิ้งแบบมีการปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อและปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งแบบออนไลน์โดยใช้โมเดลจากการทฤษฎี



รูปที่ 4.17 ผลการวิ้งแบบมีการปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อและปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่งแบบออนไลน์โดยใช้โมเดลจากการทดลอง

4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการผลการทดลองครั้งที่ 1 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามระยะทางที่ได้กำหนดผลปรากฏว่าค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นประมาณ -131 มิลลิเมตร เทียบกับระยะทางวิ่งทั้งหมดคือ 4500 มิลลิเมตร กล่าวคือหุ่นยนต์วิ่งไปไม่ถึงเป้าหมายที่กำหนดนั่นเอง สาเหตุมาจากการที่ล้อหุ่นยนต์ต้องรับน้ำหนักจึงเป็นสาเหตุให้รัศมีที่แท้จริงของล้อเล็กลงจากที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อเรากำหนดจำนวนรอบการหมุนล้อเพื่อให้กับหุ่นยนต์วิ่งไปถึงเป้าหมายโดยคิดขนาดรัศมีล้อตามที่ได้ออกแบบ แต่ในความเป็นจริงขนาดรัศมีล้อเล็กกว่าที่นำไปคำนวณ จึงเป็นเหตุผลให้หุ่นยนต์วิ่งไปไม่ถึงเป้าหมาย

จากการทดลองครั้งที่ 2 เมื่อนำค่าผิดพลาดจากการทดลองที่ 1 มาทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ C_m (เพื่อบอกให้หุ่นยนต์ทราบถึงขนาดรัศมีล้อที่แท้จริง) เมื่อปล่อยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดิมตามการทดลองครั้งที่ 1 พบว่าขนาดความผิดพลาดลดลงมาอยู่ที่ -1 มิลลิเมตร

จากการทดลองครั้งที่ 3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักให้กับหุ่นยนต์อีก 3 กิโลกรัม พบว่าหุ่นยนต์วิ่งไปไม่ถึงเป้าหมาย โดยความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ -50 มิลลิเมตรซึ่งก็เป็นสาเหตุมาจากการที่ล้อหุ่นยนต์รับน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีกส่งผลให้รัศมีจริงของล้อเล็กลง

จากการทดลองครั้งที่ 4 เมื่อนำค่าผิดพลาดจากการทดลองที่ 3 มาทำการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ C_m แล้วปล่อยให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดิมตามการทดลองครั้งที่ 3 พบว่าขนาดความผิดพลาดลดลงมาอยู่ที่ -1 มิลลิเมตร

จากการทดลองทั้ง 4 ครั้งข้างต้นสรุปได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระบรรทุกของหุ่นยนต์ในแต่ละครั้งควรมีการปรับค่า C_m เพื่อให้การคำนวณตำแหน่งมีความแม่นยำ

จากการทดลองปรับค่าผิดพลาดแบบออนไลน์ พบว่าการใช้โมเดลจากทฤษฎีให้ผลได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับการใช้โมเดลจากการทดลอง แต่ในการนำไปใช้ก็ถือว่าสะดวกกว่าการใช้โมเดลจากการทดลองเนื่องจากว่าโมเดลจากการทดลองนั้นก่อนที่จะนำหุ่นยนต์ไปใช้งานแต่ละพื้นที่ต้องมีการทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งด้วยพารามิเตอร์ค่าต่างๆ แล้วจึงเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ ซึ่งเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากพอสมควรเมื่อเทียบกับการนำโมเดลจากทฤษฎีไปใช้เนื่องจากโมเดลจากทฤษฎีสามารถใช้ได้กับทุกพื้นที่การใช้งาน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าผิดพลาดของการวัดตำแหน่งแบบออกโดมิทรีมีหลายสาเหตุด้วยกัน สามารถแยกได้เป็น 2 แบบคือ ความผิดพลาดที่เป็นระบบ (Systematic Error) กับความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบ (Nonsystematic Error) ความผิดพลาดที่เป็นระบบจะมีขนาดเพิ่มขึ้นคงที่เมื่อระยะเวลาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพิ่มขึ้น ส่วนความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบจะมีค่าไม่แน่นอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงภายนอกที่มากกระทำกับหุ่นยนต์เช่น แรงจากการเร่งที่ล้อ หรือการชนกับสิ่งกีดขวาง เป็นต้น การปรับปรุงความแม่นยำของการวัดแบบออกโดมิทรี จำเป็นต้องลดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบ ค่าผิดพลาดที่เป็นระบบสามารถกำจัดให้หายไปได้ด้วยการปรับเทียบเพียงครั้งเดียว แต่ความผิดพลาดที่ไม่เป็นระบบจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามความเร่งและความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์ใช้ในการเคลื่อนที่

วิธีการที่นำมาใช้ในการลดค่าความผิดพลาดของระบบวัดตำแหน่งแบบออกโดมิทรีมี 2 ลักษณะ คือ การประมาณค่าผิดพลาดจากข้อมูลที่วัดด้วยออกโดมิทรี และ การใช้ระบบวัดตำแหน่งสัมบูรณ์แบบอื่นเข้ามาช่วย การประมาณค่าผิดพลาดจากข้อมูลที่วัดด้วยออกโดมิทรีนั้น จำเป็นจะต้องมีโมเดลสำหรับคำนวณค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยโมเดลแต่ละอันขึ้นอยู่กับระบบกลไกการเคลื่อนที่และเซนเซอร์ที่ใช้วัดข้อมูลของหุ่นยนต์ ส่วนการใช้ระบบวัดตำแหน่งสัมบูรณ์แบบอื่นเข้ามาช่วย ก็คือการ ใช้ระบบตรวจวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ร่วมกันมากกว่า 2 ระบบขึ้นไป ระบบตรวจวัดหลักที่ใช้ คือออกโดมิทรี ส่วนระบบวัดรองก็ขึ้นอยู่กับความพอใจของผู้ออกแบบที่จะเลือกใช้ ซึ่งก็มีอยู่หลายแบบด้วยกัน ตัวอย่างเช่น กล้องวีดีโอ เลเซอร์ คลื่นวิทยุ (GPS) ถ้าเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการลดค่าผิดพลาดแล้ว วิธีแรกจะดีกว่าวิธีที่สอง เนื่องจากการวัดแบบออกโดมิทรีเป็นแบบสัมพัทธ์ การตรวจวัดแต่ละครั้งค่าผิดพลาดก็ยังคงมีการสะสม ถึงแม้จะมีโมเดลที่แม่นยำก็ตาม ต่างจากวิธีที่สองที่ค่าผิดพลาดจะถูกจำกัดด้วยระบบตรวจวัดแบบสัมบูรณ์ แต่ถ้าเปรียบเทียบในเรื่องของงบประมาณการสร้าง ค่าบำรุงรักษา และความสะดวกในการนำไปใช้ วิธีแรกจะดีกว่าวิธีที่สอง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีน้อยกว่า ซ่อมง่าย ขนย้ายสะดวก ไม่เสียเวลาในการติดตั้งระบบวัดแบบอื่นที่นำมาใช้ร่วม

งานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าผิดพลาดของการวัดแบบออกโดมิทรี ด้วยการเลือกใช้กล้องวีดีโอเป็นระบบตรวจวัดร่วม สาเหตุที่เลือกใช้กล้องวีดีโอก็เพราะ กล้องวีดีโอเป็นระบบวัดแบบสัมบูรณ์ไม่มีการสะสมของค่าผิดพลาด อีกทั้งกล้องหนึ่งตัวสามารถใช้กับหุ่นยนต์ได้

หลายตัว(ใช้วิธีติดตั้งภายนอกตัวหุ่นยนต์) ส่วนวิธีการปรับค่าผิดพลาด เรียกว่าการปรับแบบออนไลน์ วิธีการนี้เป็นปรับปรุงสมการที่ใช้คำนวณตำแหน่งที่เรียกว่า สมการคำนวณระยะการเคลื่อนของหุ่นยนต์ โดยใช้ค่าผิดพลาดที่วัดจากกล้อง การปรับแบบออนไลน์สามารถปรับค่าผิดพลาดได้ในขณะที่หุ่นยนต์ถูกใช้งาน การปรับค่าผิดพลาดก็จะปรับทั้ง ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ และค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง ขั้นตอนการปรับ จะปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อก่อน จากนั้นค่อยปรับค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อ จะปรับโดยการแก้รัศมีล้อหุ่นยนต์ให้มีค่าถูกต้องตามความเป็นจริงในขณะที่หุ่นยนต์ถูกใช้งาน เนื่องจากรัศมีของล้อจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามภาวะบรรทุกของหุ่นยนต์ ส่วนค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง จะต้องประมาณล่วงหน้าว่าจะมีค่าเป็นเท่าใดเมื่อเราสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดที่กำหนด แล้วจึงนำค่าผิดพลาดที่ประมาณได้นี้ไปแก้ในสมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ การประมาณก็ต้องอาศัยโมเดลที่สร้างขึ้นจากลักษณะของค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแรงเร่งหรือแรงเบรค ที่เรียกว่า สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี แรงเร่งหรือแรงเบรคนี้จะทำให้ล้อหุ่นยนต์เกิดการลื่นไถลกับพื้น ซึ่งวัดค่าเป็น อัตราการลื่นไถล ถ้าอัตราการลื่นไถลมากค่าผิดพลาดก็จะมากตามไปด้วย และอัตราการลื่นไถลจะแปรผันตามแรงเร่งหรือแรงเบรค ถ้ามีแรงเร่งหรือแรงเบรคมากอัตราการลื่นไถลก็จะมาก จากสาเหตุตรงนี้ผู้วิจัยจึงนำค่าความเร่งและความเร็วสูงสุดที่กำหนดให้หุ่นยนต์วิ่ง ไปประมาณค่าผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นด้วยสมการความผิดพลาด และนำค่าประมาณที่ได้นี้ไปใช้ในสมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

จากการทดลองให้หุ่นยนต์วิ่งแล้วแก้ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อพบว่าหุ่นยนต์วิ่งได้ใกล้เคียงเป้าหมายที่กำหนดมากขึ้น และเมื่อเพิ่มภาวะบรรทุกให้กับหุ่นยนต์แล้วปล่อยให้หุ่นยนต์วิ่งก็จะเกิดค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีล้อขึ้นอีก เมื่อปรับแก้อีกรอบ หุ่นยนต์ก็วิ่งได้ดีขึ้น ดังนั้นการปรับแก้ค่ารัศมีล้อควรปรับทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุก

จากการทดลองเพื่อศึกษาค่าผิดพลาดที่เกิดจากความเร่ง ที่เกิดขึ้นจากการเร่งและการเบรค โดยให้หุ่นยนต์วิ่งด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดค่าต่างๆ พบว่าความความเร่งและความเร็วสูงสุดกำหนด มีผลกับค่าความผิดพลาด จากผลการทดลองในส่วนนี้ผู้วิจัยนำค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อหุ่นยนต์วิ่งด้วยความเร่งและความเร็วสูงสุดค่าต่างๆ ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับความเร่งและความเร็วสูงสุดกำหนด แล้วสร้างสมการประมาณค่าผิดพลาดที่เรียกว่า สมการความผิดพลาดโมเดลจากทดลอง เพื่อนำไปใช้ปรับแก้สมการคำนวณระยะการเคลื่อนที่แบบออนไลน์

จากการทดลองปรับแก้ค่าผิดพลาดแบบออนไลน์ ซึ่งใช้ทั้งสมการ สมการความผิดพลาดโมเดลจากทฤษฎี และ สมการความผิดพลาดโมเดลจากการทดลอง พบว่า การปรับแก้แบบออนไลน์ สามารถลดค่าผิดพลาดของการวัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรีได้ โดยสมการความผิดพลาดโมเดลที่ได้จากการทดลอง จะให้ผลดีกว่า สมการความผิดพลาดโมเดลที่ได้จากทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบถึงการนำไปใช้ โมเดลจากทฤษฎีจะสะดวกกว่าโมเดลจากการทดลอง เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาสำหรับการทดลองก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างเป็นโมเดล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) นอกเหนือไปจากการปรับค่าผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ดั่งที่งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าผิดพลาดแบบออนไลน์ต้องเพิ่มการปรับค่าความผิดพลาดของมุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เข้าไปด้วยเพื่อให้การวิ่งของหุ่นยนต์อยู่ในเส้นทางที่กำหนด เพราะค่าความผิดพลาดของมุมการเคลื่อนที่เป็นส่วนที่ทำให้หุ่นยนต์วิ่งออกนอกเส้นทางที่กำหนด ถึงแม้ว่าระยะการวิ่งคำนวณได้อย่างถูกต้องแต่หุ่นยนต์วิ่งออกนอกเส้นทางก็ไม่สามารถนำหุ่นยนต์ไปใช้งานได้

2) การปรับปรุงโมเดลให้ใช้ได้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบอื่น เช่น การใช้ล้อแบบ Omni Direction ซึ่งเป็นล้อที่มีอัตราการลื่นไถลสูง

3) การพัฒนาหุ่นยนต์ให้สามารถนำไปใช้กับงานจริงเช่น การขนถ่ายวัตถุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยการติดตั้งกล้องไว้ที่จุดรับส่งที่ต้นทางและปลายทาง และทดลองปรับค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์เพื่อทดสอบถึงผลการนำไปใช้จริงและหาทางปรับปรุงให้ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Borenstein, J., Everett, H.R., and Feng, L., (1996) "Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning", Report for the Oak Ridge National Lab (ORNL) D&D Program, University of Michigan.
- [2] Everett, H.R., (1995) "Sensors for Mobile Robots", A k peters, Lid., Natick, Massachusetts.
- [3] Borenstein, J., (1998) "Experimental Results from Internal Odometry Error Correction with the Omnimate Mobile Robot", IEEE Transaction on Robotic and Automation, Vol.14, No.6.
- [4] Borenstein, J., and Feng, L., (1995) "Correction of Systematic Odometry Error in Mobile Robots", Proceeding of the 1995 IEEE International Conference Robotics & Automation, pp.569-574.
- [5] Borenstein, J., and Feng, L., (1996) "Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots", Proceeding of the 1996 IEEE International Conference Robotics & Automation, pp.423-428.
- [6] Antonelli, G.R., Montiel, J.M.M., and Montano, L., (1999) "Goal Directed Reactive Robot Navigation with Relocation Using Laser and Vision", 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.2905-2910.
- [7] Asensio, J., Chiaverini, S., and Fusco, G., (2003) "An Odometry Calibration Method of Mobile Robots Based on the Least-Squares Technique", 2003 IEEE Proceeding of the American Control Conference, pp.3429-3434.
- [8] Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers.
- [9] Agostino, M., (2001) "A Possible Strategy to Evaluate the Odometry Error of a Mobile Robot", Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1946-1951.
- [10] Chong, K.S., and Kleeman, L., (1997) "Accurate Odometry and Error Modeling for a Mobile Robot", Proceeding of the 1997 IEEE International Conference Robotics & Automation, pp.2783-2788.

- [11] Nakju, D., Howie, C., and Chung, W.K., (2003) "Accurate Localization Using Odometry", Proceeding of the 2003 IEEE International Conference Robotics & Automation, pp.1606-1612.
- [12] De, X., Min, T., and Gang, C., (2002) "An Improved Dead Reckoning Method for Mobile Robot with Redundant Odometry Informantion", Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp.631-636.
- [13] Nsasi Bakambu, J., Polotski, V., and Cohen, P., (2000) "Heading-aided odometry and ranger-data integration for positioning of autonomous mining vehicles", Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Control Application, pp.279-284.
- [14] Jong-Woo, M., Chong-Kug, P., and Fumio, H., (1999) "Kinematic Correction of Differential Drive Mobile Robot and Design for Velocity Trajectory with Acceleration Constrains on Motor Controllers", Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, pp.930-935.
- [15] Huosheng, H., and Dongbing, G., (1999) "Landmark-based Navigation of Mobile Robot in Manufacturing", Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, pp.121-128.
- [16] Agostino, M., Nicola, T., Adriana, T., and Roland, S., (2003) "Simultaneous Localization and Odometry Calibration for Mobile Robot", Proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Robots and System, pp.1499-1504.
- [17] Hans-Joachim, v.d.M., and Didier, W.R.H., (1996) "The Dead Reckoning Localization System of The Wheeled Mobile Robot ROMANE", Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.603-610.
- [18] Jay, L.D., "Probability and Statistics for Engineering and the Sciences", Duxbury Press An Imprint of Wadsworth Publishing Company Belmont, California.
- [19] วุฒินันท์ สุนทรารอด, ศุภวุฒิ จันทรานุกัฒน์, และ รัชทิน จันทร์เจริญ, (พ.ศ.2547) "การเปรียบเทียบแบบออนไลน์ของระบบวัดตำแหน่งแบบถอดโดมิทรีโดยใช้กล้องภายนอก", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลครั้งที่ 17 พ.ศ. 2547



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ก.1 กล้องวิดีโอ



รูปที่ ก.1 กล้องวิดีโอที่ใช้ในงานวิจัย ยี่ห้อ HITACHI รุ่น KP-D50 ความละเอียดที่วัดได้ 410000 พิกเซลในระบบ NTSC และ 470000 พิกเซล ในระบบ PAL รายละเอียดสามารถหาเพิ่มเติมได้ที่ <http://www.hitachi-denshi-uk.com>



รูปที่ ก.2 การ์ดจับภาพจากกล้องวิดีโอ

การ์ด จับภาพจากกล้องวิดีโอ ติดต่อผ่านสล็อต PCI ของคอมพิวเตอร์รายละเอียดสามารถหาเพิ่มเติมที่

http://www.pinnaclesys.com/ProductPage_n.asp?Product_ID=103&Languge_ID=7

ก.2 รายละเอียดของหุ่นยนต์

ระบบขับเคลื่อน

ดีฟเฟอเรนเชียลไดรฟ์

มอเตอร์

แรงดันไฟจ่าย 24 โวลต์

ความเร็วรอบสูงสุดของเพล่าผ่านเฮดเกียร์ 240 rpm

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่วัดได้ของล้อทั้งสอง

$$D_n = 80 \text{ mm}$$

ระยะห่างของฐานล้อ

$$D = 325 \text{ mm}$$

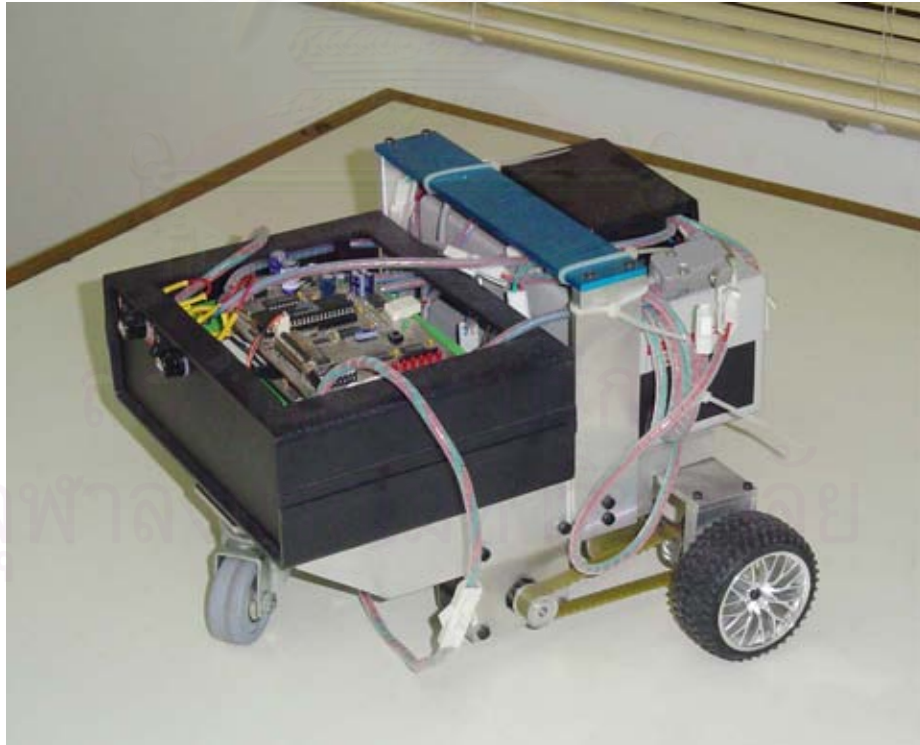
เอนโคเดอร์

ความละเอียด 200 ลูกคลื่นต่อหนึ่งรอบการหมุน

อัตราทดระหว่างเพลาล้อต่อเพล่าเอนโคเดอร์ $n = 2$

น้ำหนักของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์มีน้ำหนัก 6 กิโลกรัม

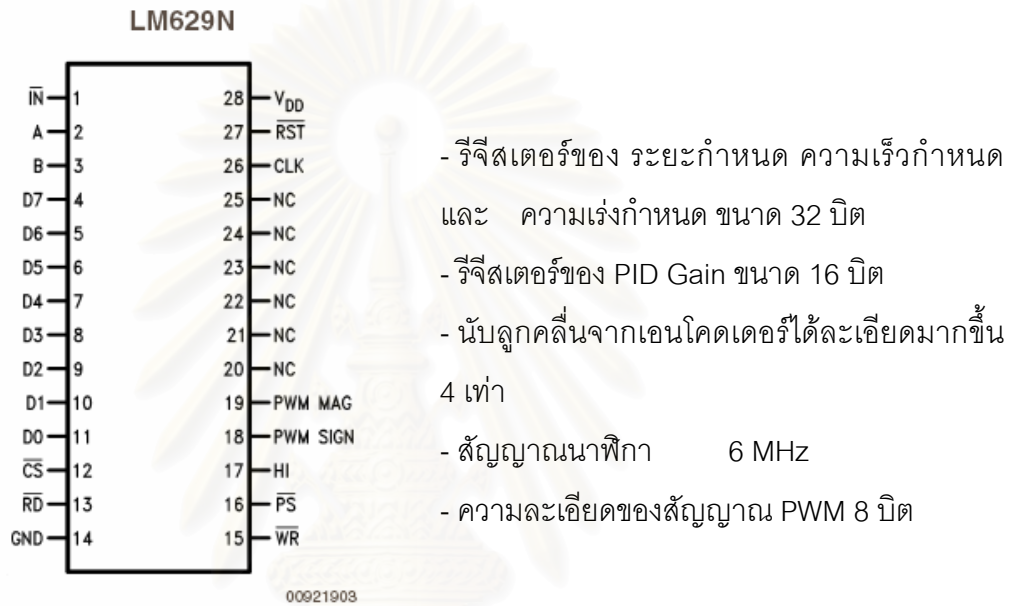


รูปที่ ก.3 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ข การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย LM 629

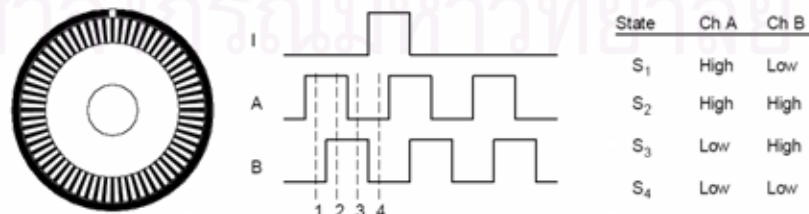
ข.1 ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ตัวประมวลผลที่ใช้จะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตและตัวควบคุมการเคลื่อนที่ที่ใช้ชิพ LM629 ควบคุมแบบ PWM (Pulse Width Modulate) มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ ข.1 ฟังก์ชันของ LM 629

เอนโคเดอร์ที่ใช้มีจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 200 ต่อการหมุนหนึ่งรอบ สายสัญญาณส่งออกของเอนโคเดอร์มีสองเส้นคือ เส้น A และเส้น B ทำให้สามารถนับลูกคลื่นได้ละเอียดมากขึ้นถึง 4 เท่าและยังสามารถกำหนดทิศทางได้อีกด้วย



รูปที่ ข.2 การนับสัญญาณเอนโคเดอร์

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถูกควบคุมโดย LM629 โดยในการเคลื่อนที่แต่ละครั้งจะต้องกำหนดระยะเวลาการเคลื่อนที่ ($N_{R/L}$) ความเร็วสูงสุด (V_d) และความเร่ง (A_d) ให้กับตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมก็จะสร้างกราฟความเร็วของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา เพื่อให้อ้างอิงสำหรับการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้เป็นไปตามกราฟในขณะหุ่นยนต์ได้เคลื่อนที่

การกำหนดค่า ($N_{R/L}$) ระยะเวลา (V_d) ความเร็วกำหนดและ (A_d) ความเร่งกำหนด ให้กับ LM629

การกำหนดค่าจะต้องส่งผ่านรีจิสเตอร์ของค่าแต่ละตัวโดยที่

- R_s คือ รีจิสเตอร์ของระยะกำหนด
- R_v คือ รีจิสเตอร์ของความเร็วกำหนด
- R_a คือ รีจิสเตอร์ของความเร่งกำหนด

การกำหนดค่ากำหนดได้ตามสมการดังนี้

$$R_s = \frac{S_d}{C_m} = N_{R/L} \quad (ข.1)$$

$$R_v = \frac{V_d}{C_{vd}} \quad (ข.2)$$

$$R_a = \frac{A_d}{C_{ad}} \quad (ข.3)$$

- โดยที่ S_d คือ ระยะกำหนดเชิงเส้น
- C_m คือ ค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนระยะการหมุนเชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น
- C_{vd} คือ ค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนความเร็วเชิงมุมเป็นเชิงเส้น
- C_{ad} คือ ค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนความเร่งเชิงมุมเป็นเชิงเส้น

ซึ่งค่า C_m C_{vd} และ C_{ad} หาได้ดังนี้

การหาค่า C_m

กำหนดให้

- C_m คือ ค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนระยะการหมุนเชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น
- R_n คือ ขนาดรัศมีของล้อ (mm)
- C_e คือ ความละเอียดของเอนโคเดอร์ (pulse/rev)
- n คือ อัตราส่วนการทดระหว่างเฟลวมอเตอร์กับเฟลาเอนโคเดอร์

$$C_m = \frac{2\pi R_n}{nC_e} = \frac{2\pi \times 40}{2 \times 200 \times 4} = 0.1571$$

การหาค่า C_{vd}

ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์หาได้จาก

$$V_d = \frac{\omega D_n}{2} \quad (ข.4)$$

กำหนดให้

T คือ อัตราการตรวจวัดข้อมูลของ LM629 มีค่าเท่ากับ 341×10^{-6} วินาที

Scl คือ แฟคเตอร์การแปลงข้อมูลของ LM629 มีค่าเท่ากับ 65,536

Rp คือ แฟคเตอร์การแปลงความเร็วเชิงมุมเป็น rpm มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2\pi} = 0.1591$

จากสมการที่ (ข.2)

$$R_v = \frac{V_d}{C_{vd}} = n \times 4C_e \times T \times Scl \times Rp \times \omega$$

จากสมการที่ (ข.4)

$$\omega = \frac{V_d}{R_n}$$

ดังนั้น

$$\frac{V_d}{C_{vd}} = n \times 4C_e \times T \times Scl \times Rp \times \frac{V_d}{R_n}$$

$$C_{vd} = \frac{2R_n}{n \times 4C_e \times T \times Scl \times Rp \times 2} = 0.007029$$

การหาค่า C_{ad}

ความเร่งเชิงเส้นของหุ่นยนต์หาได้จาก

$$A_d = \alpha R_n \quad (ข.5)$$

จากสมการที่ (ข.3)

$$R_a = \frac{A_d}{C_{ad}} = n \times 4C_e \times T \times T \times Scl \times Rp \times \alpha$$

จากสมการที่ (ข.5)

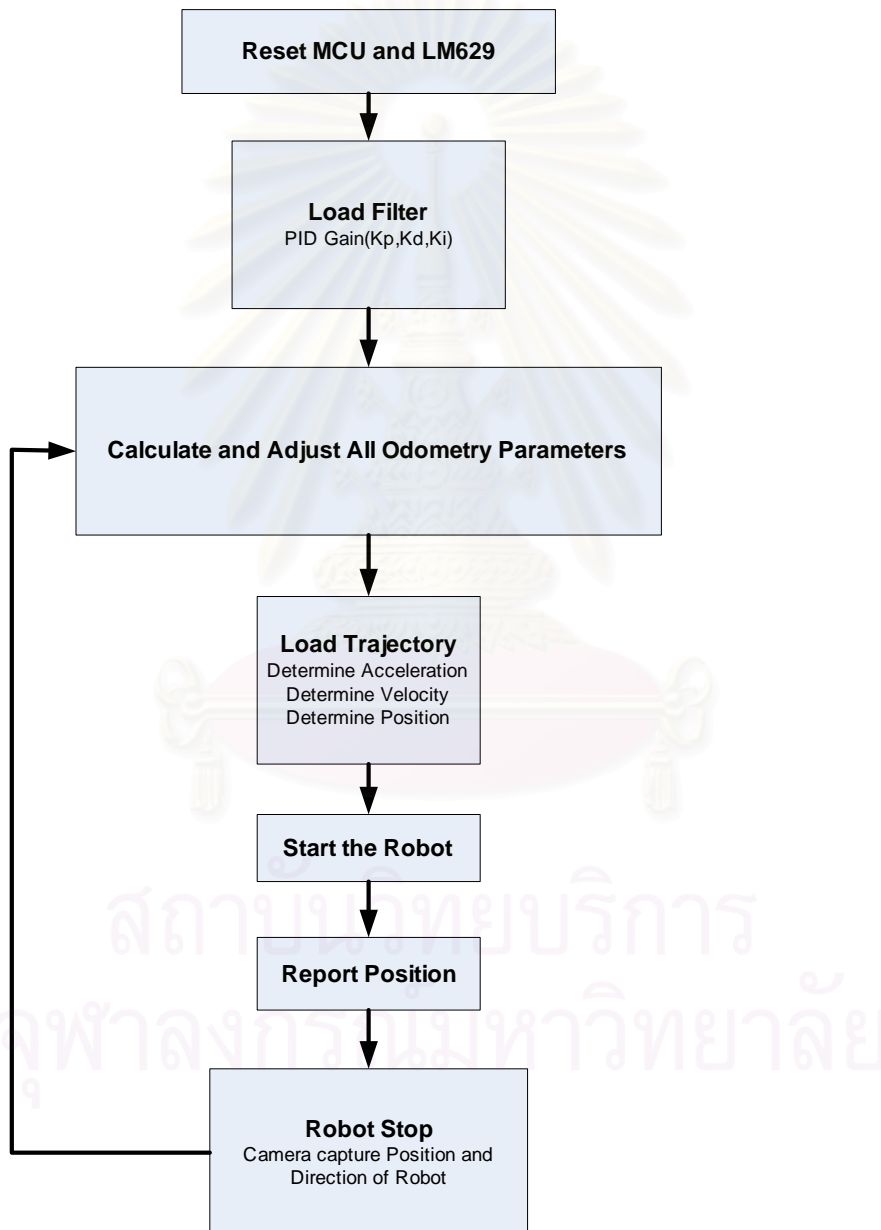
$$\alpha = \frac{A_d}{R_n}$$

ดังนั้น

$$\frac{A_d}{C_{ad}} = n \times 4C_e \times T \times T \times Scl \times Rp \times \frac{A_d}{R_n}$$

$$C_{ad} = \frac{2R_n}{n \times 4C_e \times T \times T \times Scl \times Rp \times 2} = 20.6186$$

ข.2 ขั้นตอนการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย LM629



รูปที่ ข.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ภาคผนวก ค

บทความที่ตีพิมพ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปรียบเทียบแบบออนไลน์ ของระบบวัดตำแหน่งแบบออดโตเมทรีโดยใช้กล้องภายนอก Online Calibration of Odometry-based Localization using an External Camera

วุฒินันท์ สุงนารถ , ศุภวุฒิ จันทร์ทรานูวัฒน์ , และ รัชทิน จันทร์เจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 02-2186588
mod_x@chula.com

Wuthinun Soongnart , Supavut Chantranuwathana and Ratchatin Chanchaoren,
Department of Mechanical Engineering
Chulalongkorn University,
Bangkok. 10300, Thailand
Tel : 2186588, Fax : 2522889

บทคัดย่อ

ในการใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์เองภายในพื้นที่ใช้งาน วิธีการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่วิธีหนึ่งเรียกว่า ออดโตเมทรี เนื่องจากความสามารถในการตรวจวัดที่รวดเร็วและมีราคาถูกจึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันมาก แต่ปัญหามีอยู่ว่าเมื่อทำการตรวจวัด ค่าความผิดพลาดในการวัดตำแหน่งจะมีการสะสมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางที่หุ่นยนต์ได้เคลื่อนที่ไป ดังนั้นเมื่อใช้การวัดตำแหน่งแบบออดโตเมทรีจึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในบทความนี้ได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าความผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการวัดแบบออดโตเมทรีหลังจากปรับแก้ด้วยการวัดตำแหน่งที่ใช้กล้องวิดีโอเป็นตัวตรวจวัด โดยวิธีการมีอยู่ว่า จะทำการติดตั้งตัวกล้องวิดีโอในบางจุดของพื้นที่ใช้งานซึ่งเป็นจุดบนเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การปรับแก้จะใช้ค่าความแตกต่างของการวัดตำแหน่งทั้งแบบออดโตเมทรีและกล้องวิดีโอนำไปปรับค่าพารามิเตอร์ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบออดโตเมทรี

Abstract

The effectiveness of the mobile robot in use depends on the precision to locate the position itself in working area. One of the methods in locating is called "Odometry". It is very popular due to its rapid locating capability together with low cost. Anyhow, the errors are accumulated along with the distance of the mobile robot. So when the Odometry method was applied. It should also be

calibrated an error. In this paper, we introduce a calibration method and enhance accuracy in Odometry by mounted cameras on some point in working area which is above robot path for measure position of the robot. The calibration method use different value between the value which measured by Odometry and camera. Then use the correct value to calibrate the parameter of mathematical model that use to calculate the position of mobile robot.

1. บทนำ

สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเมื่อนำวิธีการวัดแบบออดโตเมทรีมาใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นมาจากปัจจัยหลายอย่างซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ Systematic Errors และ Non-Systematic Errors จะเห็นได้ว่าระบบการวัดแบบออดโตเมทรี (Odometry) สามารถปรับปรุงให้แม่นยำขึ้นได้โดยการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองชนิดดังกล่าวไว้ข้างต้น วิธีการก็คือการนำระบบตรวจวัดตำแหน่งแบบอื่นที่ไม่มีการสะสมของค่าผิดพลาดติดตั้งเพิ่มเข้าไปในหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อทำการแก้ไขความผิดพลาดอันเกิดจากการวัดด้วยออดโตเมทรี (Odometry)

ระบบการตรวจวัดตำแหน่งที่ไม่มีการสะสมของค่าความผิดพลาด ตัวตรวจวัดที่ใช้ อาจจะเป็น เลเซอร์ [1] [2] [6] อัลตราโซนิก [1] [2] หรือกล้องวิดีโอ [2] [4] [6] [8] [9] แต่ตัวตรวจวัดที่มีความน่าสนใจก็คือกล้องวิดีโอ เนื่องจากว่า มีความแม่นยำ ตรวจวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้หลายตัวพร้อมกันถ้าติดตั้งไว้นอกตัวหุ่นยนต์ ข้อมูลที่ได้จากการวัดสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นในคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมที่เขียนขึ้นในคอมพิวเตอร์นั้นสามารถที่จะพัฒนาให้มี

ประสิทธิภาพสูงได้ ยิ่งตัวโปรแกรมมีความสามารถสูงก็จะทำให้หุ่นยนต์มีความฉลาดมากขึ้นด้วย และปัจจุบันแนวโน้มการใช้กล้องวีดีโอเป็นตัวตรวจวัดกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่มีมากขึ้น สาเหตุเป็นเพราะเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ที่มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก การใช้กล้องวีดีโอกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้น จะมีทั้งแบบที่ตัวกล้องวีดีโอถูกติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ [4] [6] [9] และติดตั้งภายนอกตัวหุ่นยนต์ [8] การติดตั้งกล้องบนตัวหุ่นยนต์นั้น มีข้อดีตรงที่หุ่นยนต์มีความเป็นอิสระสูง และสามารถนำไปใช้งานได้หลายพื้นที่ แต่ข้อเสียก็คือหุ่นยนต์หนึ่งตัวจะต้องมีตัวประมวลผลที่มีความสามารถสูงและใช้กล้องวีดีโออย่างน้อยหนึ่งชุด ถ้าต้องการใช้งานหุ่นยนต์หลายตัวจำเป็นต้องใช้ตัวประมวลผลและกล้องวีดีโอหลายชุดตามจำนวนของหุ่นยนต์เช่นกัน ทำให้การนำไปใช้งานโดยทั่วไปไม่เหมาะสมเนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงมาก ส่วนการติดตั้งกล้องภายนอกตัวหุ่นยนต์นั้น สามารถที่จะใช้กล้องตัวเดียวควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์หลายตัวได้ แต่ก็มีข้อเสียตรงที่สามารถที่จะงานหุ่นยนต์ได้ในบริเวณที่จำกัด ถ้าพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์มีขนาดใหญ่ก็จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัวกล้องวีดีโอมากขึ้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวัดแบบออดโตมิทรีร่วมกับกล้องวีดีโอซึ่งจะเหมาะสมเป็นอย่างมาก ถ้าบริเวณพื้นที่ทำงานมีขนาดใหญ่เนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดตั้งกล้องให้ครอบคลุมพื้นที่การทำงานทั้งหมด แต่จะเลือกติดตั้งเพียงบางตำแหน่งเท่านั้น บริเวณที่กล้องไม่สามารถที่จะวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้ก็จะใช้วิธีการวัดแบบออดโตมิทรี เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ที่กล้องสามารถวัดได้ ตัวกล้องก็จะทำการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดแบบออดโตมิทรีและทำการปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดด้วยออดโตมิทรี ส่งผลทำให้ความแม่นยำของการวัดแบบออดโตมิทรีมีค่ามากขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เดดเรคคองนึ่ง (Dead Reckoning) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยการใช้ข้อมูลของตำแหน่งและความเร็วที่วัดได้ในอดีตตามช่วงเวลาที่กำหนดแล้วนำมาคำนวณตำแหน่งและความเร็วในปัจจุบัน [2] ออดโตมิทรี (Odometry) เป็นวิธีการวัดที่ใช้การคำนวณแบบเดดเรคคองนึ่ง (Dead Reckoning) ซึ่งวิธีการนี้จะทำการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากระยะการหมุนของเพลาล้อแล้วนำไปคำนวณเป็นระยะทางของการเคลื่อนที่ โดยใช้ตัวตรวจวัดที่ใช้วัดรอบเพลาล้อที่เรียกว่า เอนโคดเดอร์ (Encoder)

2.1 สาเหตุของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดแบบออดโตมิทรี

การวัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรี (Odometry) จะใช้วิธีการพื้นฐานการคำนวณอย่างง่ายตามที่ได้อธิบายมาแล้ว ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจะได้จากเอนโคดเดอร์ (Encoder) ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดที่มีราคาถูก การคำนวณของออดโตมิทรี (Odometry) จะวัดการหมุนของล้อหุ่นยนต์แล้วคำนวณออกมาเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งค่าความผิดพลาดจะมีการสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป ค่าความผิดพลาด

ที่เกิดขึ้นแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดที่เรียกว่า Systematic Errors และ Non-Systematic Errors [1]

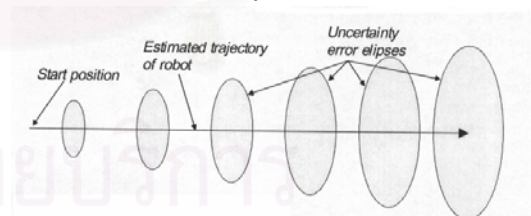
Systematic Errors

- รัศมีล้อของหุ่นยนต์ไม่เท่ากัน
- ค่าความแตกต่างระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางจริงของล้อขณะที่รับน้ำหนักของหุ่นยนต์กับเส้นผ่าศูนย์กลางของล้อในขณะที่ไม่รับน้ำหนักของหุ่นยนต์
- การเอียงของล้อหุ่นยนต์
- ความละเอียดของเอนโคดเดอร์
- อัตราการตรวจวัดข้อมูลจากเอนโคดเดอร์

Non-Systematic Errors

- หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในพื้นที่ขรุขระ
- มีวัตถุที่เป็นอุปสรรคของการเคลื่อนที่ขัดขวาง
- ล้อของหุ่นยนต์เกิดการลื่นไถลสาเหตุอาจเกิดจาก
 - พื้นที่หุ่นยนต์วิ่งมีความเสียดทานต่ำ
 - ความเร็วของล้อที่สูงเกินไป
 - แรงจากภายนอกมากกระทำเช่น เกิดการชนกันของหุ่นยนต์กับสิ่งกีดขวาง
 - ล้อของหุ่นยนต์ไม่สัมผัสกับพื้น

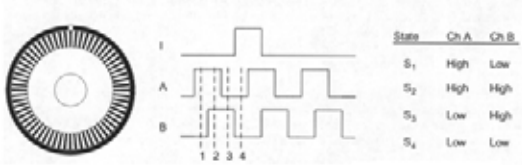
การประมาณตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยออดโตมิทรีที่เห็นภาพชัดเจนเห็นได้จากรูปที่ 1 ซึ่งจะประมาณตำแหน่งของหุ่นยนต์เป็นพื้นที่รูปวงรี ขนาดของวงรีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่หุ่นยนต์ได้เคลื่อนที่ไปจนกว่าจะมีการวัดตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ แล้วนำค่าไปปรับปรุงความแม่นยำของการวัดแบบออดโตมิทรี ซึ่งจะทำให้วงรีมีขนาดลดลง รูปแบบการประมาณตำแหน่งลักษณะนี้จะให้ความสนใจเฉพาะตัวแปรที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่เป็นระบบระบบ เนื่องจากว่าค่าความผิดพลาดนอกระบบสูงสุดไม่สามารถที่จะคาดเดาได้



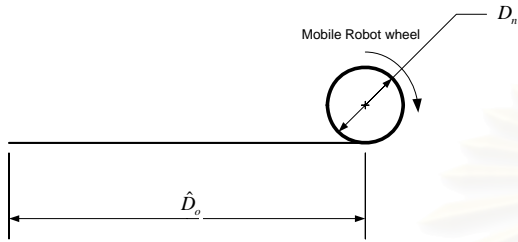
รูปที่ 1 วงรีของค่าความผิดพลาด [1]

2.2 ตัวตรวจวัดที่ใช้วัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรี (Odometry)

ตัวตรวจวัดตำแหน่งนั้นจะใช้เฟสควอดราเจอร์อินคลิเมนทอลเอนโคดเดอร์ (Phase-quadrature incremental encoder) ซึ่งถูกออกแบบให้มีการ 2 ช่องสัญญาณ โดยลูกคลื่นสี่เหลี่ยมที่ให้ออกมาจะมีเฟสต่างกัน 90 องศาที่แสดงในรูปที่ 2 ความละเอียดที่สามารถวัดได้ก็มีค่าสูงเป็น 4 เท่าของความละเอียดที่วัดได้จากจานช่องสัญญาณของเอนโคดเดอร์



รูปที่ 2 ลูกคลื่นจาก Phase-quadrature incremental [1]
 การคำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยวิธีออดโตเมทรี
 ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงเส้นคำนวณได้จาก



รูปที่ 3 ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงเส้น

$$C_n = \frac{\pi D_n}{n C_e} \quad (1)$$

โดยที่

C_n คือ แฟคเตอร์ที่ใช้เปลี่ยนจำนวนลูกคลื่นของเอนโคเดอร์ไป
เป็นระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงเส้น

D_n คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของล้อ

C_e คือ ความละเอียดของเอนโคเดอร์ (จำนวนลูกคลื่นต่อรอบ)

n คือ อัตราส่วนการทดรอบระหว่างการหมุนของเอนโคเดอร์
กับการหมุนของล้อ

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ดังนี้

$$\hat{D}_o = C_n N \quad (2)$$

โดยที่

\hat{D}_o คือ ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงเส้น

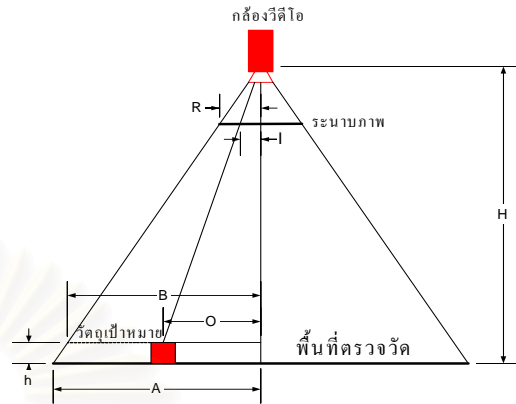
N คือ จำนวนลูกคลื่นที่นับได้จากเอนโคเดอร์

2.3 การวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้กล้องวิดีโอ

การตรวจวัดระยะแบบใช้กล้องตัวเดียว (Vision camera) เป็น
การวัดแบบพาสซีฟ โดยทำการตรวจจับภาพของเป้าหมายลงไปบน
ระนาบภาพที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของตัวกล้องและเป้าหมาย ภาพที่
ได้จากการวัดจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาตำแหน่งและทิศทางจริงของ
เป้าหมายที่อยู่ในพื้นที่ตรวจวัดของกล้อง ความละเอียดที่วัดได้ขึ้นอยู่กับ
คุณภาพของตัวกล้อง ความละเอียดของกล้องมีหน่วยเป็น พิกเซล x พิก
เซล (Pixel x Pixel)

เมื่อภาพของวัตถุเป้าหมายถูกฉายลงบนระนาบภาพ กล้องจะ
ส่งภาพไปให้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายบน
ระนาบภาพโดยอาศัยลักษณะพิเศษที่เป็นเอกลักษณ์ของวัตถุเป้าหมายเช่น
สี เป็นต้น จากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการเปรียบเทียบตำแหน่งภาพของวัตถุ

เป้าหมายและคำนวณหาตำแหน่งจริงของวัตถุเป้าหมายที่อยู่ในพื้นที่
ตรวจวัดของกล้อง



รูปที่ 4 การวัดตำแหน่งโดยกล้องวิดีโอ
ตำแหน่งของหุ่นยนต์คำนวณได้ดังนี้

$$B = \frac{A(H-h)}{H} \quad (9)$$

ระยะวัตถุสามารถคำนวณได้จาก

$$O = \frac{B \times I}{R} \quad (10)$$

โดยที่

A คือ ครึ่งความกว้างของพื้นที่ใช้งาน

B คือ ระยะอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณ

R คือ ครึ่งความกว้างของระนาบภาพ

O คือ ระยะวัตถุจริงบนพื้นที่ใช้งาน

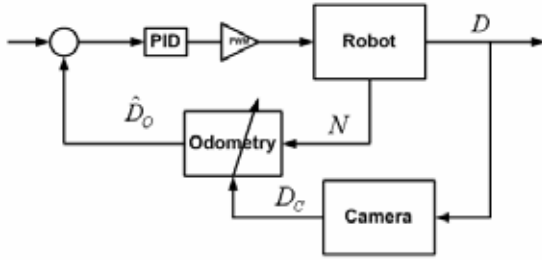
I คือ ระยะภาพบนระนาบภาพ

H คือ ความสูงของกล้องวิดีโอจากพื้น

h คือ ความสูงของวัตถุ

3. ระบบควบคุมหุ่นยนต์

การควบคุมมอเตอร์จะเป็นแบบ PID Control โดยควบคุม
ความเร็วของมอเตอร์ผ่านวงจรไฟฟ้าที่จ่ายกำลังให้กับมอเตอร์แบบ PWM
(Pulse Width Modulation) Odometry จะเป็นตัวคำนวณค่าตำแหน่งของ
มอเตอร์ที่หมุนไป และ Camera จะเป็นตัววัดตำแหน่งสัมบูรณ์ของตัว
หุ่นยนต์เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงพื้นที่บริเวณที่กล้องวิดีโอสามารถวัดได้
Camera จะส่งค่าข้อมูลที่ได้อีกกลับไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดโดย Odometry
จากนั้นก็ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ใช้คำนวณของ
Odometry ซึ่งจะเป็นผลทำให้ความแม่นยำของ Odometry มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 แผนภาพการควบคุม

4. การปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของออดโตมิทรีโดยใช้กล้องวีดีโอ

ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณตำแหน่งแบบออดโตมิทรีโดยใช้กล้องวีดีโอนั้นทำได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง

กล้องวีดีโอทำการวัดตำแหน่งคำนวณได้จาก

$$D_c = D \pm er \quad (11)$$

โดยที่

D_c คือ ค่าตำแหน่งที่วัดได้จากกล้องวีดีโอ

D คือ ค่าตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์

er คือ ค่าความผิดพลาดในการวัดของกล้อง

ค่าความผิดพลาดในการวัดของกล้องมีสาเหตุจากความละเอียดของกล้องและพื้นที่ตรวจวัด

ขั้นตอนที่สอง

นำค่าตำแหน่งที่วัดได้จากกล้องไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ปรับแก้ จากสมการที่ (2)

$$C_c = \frac{D}{N}$$

โดยที่

C_c คือ พารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากกล้อง

ขั้นตอนที่สาม

ค่าพารามิเตอร์ที่นำไปใช้คำนวณในออดโตมิทรีจะมีการนำค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งในครั้งก่อนมารวมปรับแก้ด้วยพร้อมกันกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกล้องวีดีโอ ข้อดีของวิธีนี้ก็คือสามารถที่จะลดค่าความผิดพลาดในการวัดตำแหน่งได้ดีกว่าเนื่องจากค่าความผิดพลาดมีการเฉลี่ยในทุกช่วงการวัด

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งแบบออดโตมิทรีหาได้จาก

$$\hat{C}_n = \frac{\alpha \hat{C}_{n-1} + C_c}{1 + \alpha} \quad (12)$$

โดยที่

\hat{C}_n คือ พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งปัจจุบัน

\hat{C}_{n-1} คือ พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณครั้งก่อน

α คือ Forgetting Factor

ขั้นตอนที่สี่

เมื่อทำการปรับแก้พารามิเตอร์ที่จะใช้ในการคำนวณแล้ว ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นคำนวณได้จาก

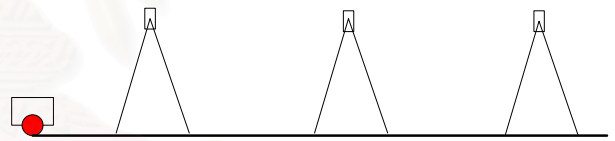
$$\hat{D} = \hat{C}_n N \quad (13)$$

โดยที่

\hat{D} คือ ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นที่คำนวณได้หลังจากมีการปรับแก้พารามิเตอร์

5. การทดลองเบื้องต้น

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการ Simulation ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยจะทำการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่ในพื้นที่ใช้งานด้วยออดโตมิทรีและจะปรับแก้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยกล้อง ในขั้นต้นนั้น การทดลองจะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยระยะ 20 เมตร กล้องวีดีโอจะถูกติดตั้งเหนือเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ เมื่อหุ่นยนต์อยู่ภายในบริเวณตรวจวัดได้ด้วยกล้อง การวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์จะใช้กล้องเป็นตัววัดพร้อมทั้งปรับแก้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการวัดด้วยออดโตมิทรีก่อนหน้าและค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่จะใช้คำนวณด้วยออดโตมิทรีในช่วงต่อไป



รูปที่ 6 การวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

ขั้นตอนของการทดลอง

1. เริ่มต้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปเป็นแนวตรงและวัดตำแหน่งด้วยออดโตมิทรีจนกระทั่งถึงพื้นที่ที่สามารถวัดตำแหน่งด้วยกล้อง ที่ระยะ 4 เมตรถึง 6 เมตร และปรับค่าพารามิเตอร์ (\hat{C}_n)
2. คำนวณตำแหน่งแบบออดโตมิทรี ในช่วงระยะ 6 เมตรถึง 10 เมตร
3. ปรับค่าพารามิเตอร์อีกด้วยกล้องเป็นครั้งที่สอง ในช่วงระยะ 10 เมตรถึง 12 เมตร
4. วัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรีหลังจากปรับแก้พารามิเตอร์ครั้งที่สอง ในช่วงระยะ 12 เมตรถึง 16 เมตร
5. ปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ครั้งที่สามด้วยกล้อง ในช่วงระยะ 16 เมตรถึง 18 เมตร
6. วัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรีหลังจากปรับแก้พารามิเตอร์ครั้งที่สาม ในช่วงระยะ 18 เมตรถึง 20 เมตร จนกระทั่งหุ่นยนต์หยุด

สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

$$\lambda = \frac{\omega_w r - V}{\omega_w r} \quad \text{เมื่อ } \omega_w \geq V \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{\omega_w r - V}{V} \quad \text{เมื่อ } V \geq \omega_w r \quad (15)$$

$$\mu = k \lambda \quad (16)$$

$$F = ma = \mu N = \mu mg = k \lambda mg \quad (17)$$

โดยที่

λ คือ อัตราการลื่นไถลของล้อหุ่นยนต์

ω_w คือ ความเร็วเชิงมุมของล้อหุ่นยนต์

V คือ ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์

r คือ รัศมีของล้อหุ่นยนต์

μ คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อกับพื้น

k คือ ความชันระหว่าง μ กับ β

F คือ แรงเสียดทานระหว่างล้อหุ่นยนต์กับพื้น

สมการพลศาสตร์ของมอเตอร์

$$J_0 n^2 \alpha_w + b_0 n^2 \omega_w = Tn - Fr \quad (18)$$

$$L_a \frac{di}{dt} + R_a i + K_2 n \omega_w = E_v \quad (19)$$

$$T = K_1 i \quad (20)$$

โดยที่

J_0 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ เกียร์ และล้อ

n คือ อัตราทดเกียร์

b_0 คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด

α_w คือ ความเร่งเชิงมุมของล้อ

T คือ แรงบิดของมอเตอร์

L_a คือ ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดโรเตอร์

R_a คือ ค่าความต้านทานของมอเตอร์

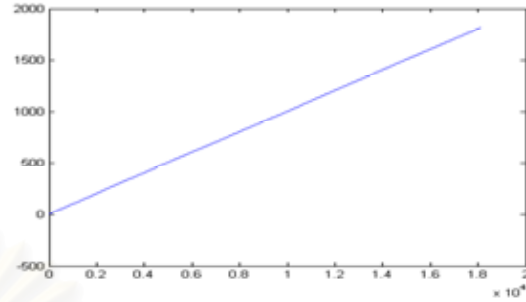
i คือ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

K_1 คือ สัมประสิทธิ์ของแรงบิดของมอเตอร์

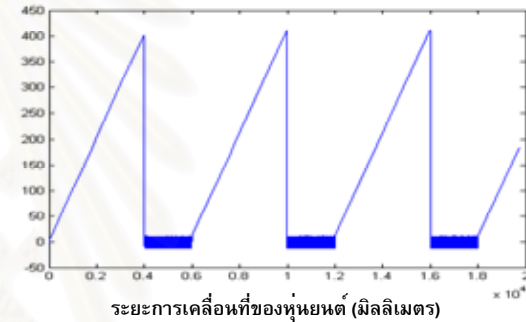
K_2 คือ สัมประสิทธิ์ของแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์

E_v คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

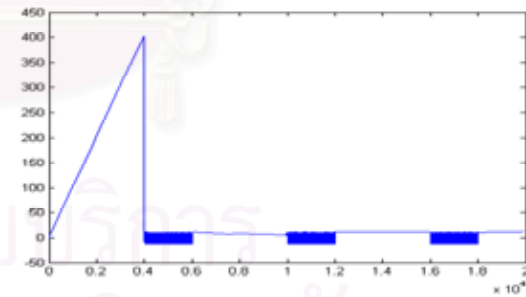
6. ผลการทดลอง



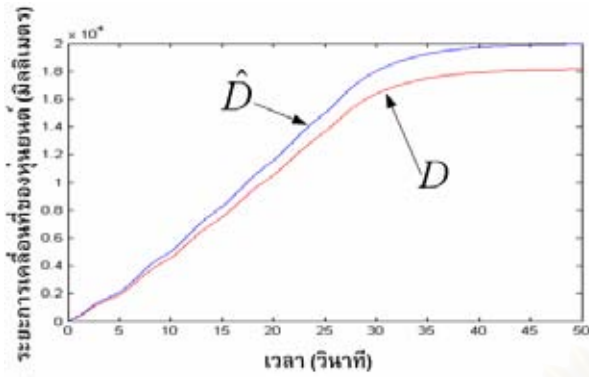
รูปที่ 7 กราฟความผิดพลาดของการวัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรีโดยไม่มีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ด้วยกล่องวีดีโอ



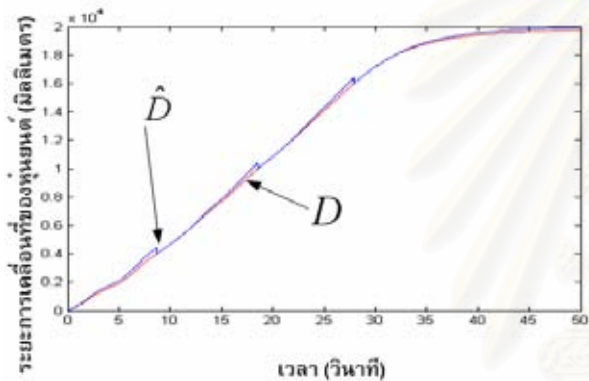
รูปที่ 8 กราฟความผิดพลาดของการวัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรีโดยจำกัดค่าผิดพลาดด้วยกล่องวีดีโอ



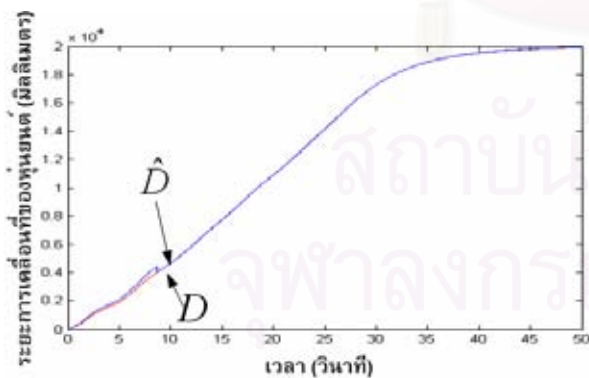
รูปที่ 9 กราฟความผิดพลาดของการวัดตำแหน่งแบบออดโตมิทรีโดยจำกัดค่าผิดพลาดด้วยกล่องวีดีโอและมีการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 10 กราฟตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จริง (D) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่คำนวณได้ด้วยออดโตเมทรีแบบไม่มีการปรับแก้พารามิเตอร์ (\hat{D}) เทียบกับเวลา



รูปที่ 10 กราฟตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จริง (D) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่คำนวณได้ด้วยออดโตเมทรีแบบไม่มีการปรับแก้พารามิเตอร์ (\hat{D}) เทียบกับเวลา



รูปที่ 11 กราฟตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จริง (D) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่คำนวณได้ด้วยออดโตเมทรีแบบมีการปรับแก้พารามิเตอร์ด้วยกล้องวีดีโอ (\hat{D}) เทียบกับเวลา

7.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดส่วนใหญ่มาจากขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของล้อที่เปลี่ยนไปเมื่อรับภาระน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์และการสั่นไถลของล้อเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว เนื่องจากความเร่งส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการเลื่อนไถลมีค่าสูง

จากรูปที่ 7 การวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่จะมีค่าผิดพลาดสะสมเพิ่มขึ้นถ้าเป็นการวัดแบบออดโตเมทรีเพียงอย่างเดียว เมื่อมีการติดตั้งกล้องเพื่อวัดตำแหน่งเพิ่มเข้าไปจะสามารถจำกัดค่าความผิดพลาดได้ตามรูปที่ 8 แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความผิดพลาดยังมีค่าสูงไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงของการเคลื่อนที่ภายนอกพื้นที่ที่สามารถตรวจวัดตำแหน่งได้ด้วยกล้อง และสุดท้ายได้มีการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณตำแหน่งใหม่จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดถูกจำกัดลงไปมากดังรูปที่ 9 ค่าความผิดพลาดที่เหลือหลังจากการปรับพารามิเตอร์มีสาเหตุมาจากความละเอียดที่วัดได้จากกล้องวีดีโอ สังเกตได้จากระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในช่วง 4 ถึง 6 เมตร 10 ถึง 12 เมตรและช่วง 16 ถึง 18 เมตร ที่เห็นเป็นแถบสีดำนารูปที่ 9 เนื่องจากบริเวณดังกล่าวใช้กล้องวีดีโอตรวจวัดตำแหน่งโดยตลอดซึ่งค่าผิดพลาดของกล้องจะอยู่ที่ประมาณ ± 25 มิลลิเมตร

รายการอ้างอิง

- [1] Borenstein, J., Everett, H.R., and Feng, L., 1996, "Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning", Report for the Oak Ridge National Lab (ORNL) D&D Program, University of Michigan
- [2] Everett, H.R., "Sensors for Mobile Robots", A k Peters, Ltd., Natick, Massachusetts, 1995
- [3] Borenstein, J., "Experimental Results from Internal Odometry Error Correction with the Omnimate Mobile Robot", IEEE Transaction on Robotic and Automation, Vol. 14, No. 6, December 1998
- [4] Akihisa, O., Yukio, M., and Shin, Y., "Autonomous Navigation of Mobile Robot base on Teaching and Playback Using Trinocular Vision", 2001 The 27th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.398-430.
- [5] Maurizio, P., Antonio, S., and Renato, Z., "Autonomous Navigation and Localization in Service Mobile Robotics" 2001 IEEE International Conference on Intelligent and Systems, pp.2024-2029.
- [6] Asensio, J.R., Montiel, J.M.M., and Montano, L., "Goal Directed Reactive Robot Navigation with Relocation Using Laser and Vision", 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.2905-2910.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวุฒินันท์ สูงนารถ เกิดเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ.2522 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียน ชุมแพศึกษา จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปลายจาก สถาบันการศึกษานอกโรงเรียน อำเภอชุมแพ จังหวัดขอนแก่น ในปีการศึกษา 2539 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2543 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย