



การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์สำรวจที่อยู่ในหม้อน้ำ

นายคณิศ ฤงออก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2556

การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์สำรวจที่อยู่ในหม้อน้ำ

นายคณศ ถุงออก วศ.บ.(วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.สุริยา นัฏสูภักพงศ์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ)

..... กรรมการ
(ดร.ปีติคุณ ธีรศักดิ์กุล)

..... กรรมการ
(ดร.นิรมล เรืองพูนศักดิ์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์สำรวจท่าภายในหม้อน้ำ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายคณศ กุญรอด
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ	สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาและวิเคราะห์เกี่ยวกับวิธีการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับของหุ่นยนต์ตรวจสอบสภาพท่อผนังภายในหม้อน้ำซึ่งเปรียบเทียบวิธีการระบุตำแหน่ง 3 วิธีที่แตกต่างกัน ได้แก่ ICP ICP ร่วมกับ EKF(Extended Kalman Filter) และ ICP ร่วมกับ EKFแบบปรับค่าความแปรปรวนร่วม โดยวิธีการระบุตำแหน่งทั้งสามแบบจะถูกนำมาติดตั้งให้กับหุ่นยนต์ตรวจสอบและทำการทดสอบเพื่อประเมินสมรรถนะของแต่ละวิธีการซึ่งการทดสอบการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 2 กรณี คือ การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบซึ่งมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมบนพื้นราบและการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ซึ่งมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นรูปตัว L บนท่อผนังทดสอบ ในแต่ละการทดสอบเสาจะถูกวางในรูปแบบ uniform และ non uniform จากผลการทดสอบ พบว่า วิธีแบบ ICP นั้นให้ผลตำแหน่งที่ถูกต้องแต่ตำแหน่งมีการแกว่งมาก ในขณะที่วิธีการระบุตำแหน่งแบบ ICP ร่วมกับ EKF ให้ผลตำแหน่งที่พื้นราบได้ดีกว่า ICP ไม่มีการแกว่งของตำแหน่งแต่มีความคลาดเคลื่อนมากเมื่อเคลื่อนที่บนกำแพงท่อ และวิธีการระบุตำแหน่งแบบ ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนร่วมให้ผลการระบุตำแหน่งได้ดีที่สุดจากวิธีการระบุตำแหน่งทั้ง 3 แบบเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนท่อผนัง ดังนั้นจึงเป็นเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบท่อผนัง สำหรับหุ่นยนต์ตรวจสอบท่อผนังเป็นหุ่นยนต์ที่อาศัยแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรในการยึดเกาะและเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวระดับบนท่อผนังซึ่งหุ่นยนต์ได้ถูกออกแบบให้มีกลไกยกสลับซึ่งสามารถเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่บนผนังโดยไม่ต้องทำการเลี้ยวซึ่งจำเป็นสำหรับงานตรวจสอบในลักษณะนี้อีกด้วย โดยหุ่นยนต์จะถูกติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อนำไปใช้แทนการตรวจสอบสภาพท่อผนังแทนการตรวจสอบของผู้ปฏิบัติงานโดยตรง

คำสำคัญ : หุ่นยนต์ตรวจสอบภายในหม้อน้ำ / การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

Thesis Title	Localization method for a boiler inspection robot
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Kaned Thung-od
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Thavida Maneewarn
Program	Master of Engineering
Field of Study	Robotics and Automation
Faculty	Institute of Field Robotics
Academic Year	2013

Abstract

This research focuses on the studying and analyzing of the self-localization method which is appropriate for the water wall tube inspection robot. Three different self-localization methods which are ICP ICP+EKF and ICP+EKF with adaptation of the covariant matrix are tested and evaluated. The test consists of two situations. First, the robot moves along the rectangular path on the ground. Second, the robot moves along the L-shape path on the water wall tube. The artificial pole are set with two different types which are uniform and non-uniform. The experimental results show that the ICP self-localization provides the accurate localization however, the oscillation is appeared in the localization data. The ICP+EKF self-localization is appropriate for the movement of the robot on the ground and performs better relative to the ICP method. The ICP + EKF with adaptation of the covariant matrix provided the accurate localization when the robot move along the desire path on the water wall tube. Therefore, the ICP + EKF with adaptation of the covariant matrix is the most appropriate self-localization method for the water wall tube inspection robot. The water wall tube inspection robot using the magnetic force for adhesion and locomotion are developed so that the robot is able to move in vertical and horizontal direction on the water wall tube. The robot also has the toggle mechanism to change the direction of motion without steering which is necessary for this inspection task. The robot is installed with nondestructive testing device to inspect the water wall tube rather than human inspection.

Keywords: Boiler Inspection robot/Mobile Robot Localization

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของการทำวิจัยครั้งนี้เกิดขึ้นได้จากความร่วมมือของหลายๆ ฝ่าย ทั้งโครงการพัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อใช้ตรวจสอบท่อและผนังภายในหม้อไอน้ำ ซึ่งเป็นความร่วมมือกันระหว่างการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) และสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัย และค่าใช้จ่ายต่างๆ ตลอดช่วงการศึกษา และ ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา และขอขอบคุณ ดร.สุริยา นัฏฐักพงศ์ ดร.ปิติวุฒญ์ ชีรกิตติกุล และดร.นิรมล เรืองพยุงค์ ซึ่งเป็นกรรมการสอบงานวิจัย ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆซึ่งส่งผลให้การทำงานวิจัย นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ ดร.ปรัชญา เปรมประณีรัชต์ และโครงการการพัฒนาเทคโนโลยีสำรวจเพื่อหยังความลึกและความสูงคลังของลำน้ำแบบอัตโนมัติโดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (สสนก.) ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์เรื่อง Mobile robot obstacle avoidance control และ mobile robot sensor fusion using extended Kalman filtering รวมทั้งได้ให้ความอนุเคราะห์ยืมอุปกรณ์เลเซอร์ SICK LMS-511 เลเซอร์สแกนเนอร์เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวางซึ่งมีความสามารถในการสแกนในระยะไกลเกินกว่า 30 เมตร และขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนเสมอและสุดท้ายนี้ขอขอบคุณอีกครั้งทั้งผู้ที่ได้กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึง ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิจัยครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี และหวังว่าการวิจัยนี้จะสามารถก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาไม่ว่าด้านใดก็ตาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ซ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
2. แนวคิดในการออกแบบหุ่นยนต์	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับส่วนการออกแบบหุ่นยนต์	3
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์	6
3. การออกแบบหุ่นยนต์	12
3.1 แนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์	12
3.2 การออกแบบทางกลของหุ่นยนต์	16
3.3 การออกแบบระบบทางไฟฟ้าและระบบควบคุมการเคลื่อนที่	20
4. การทดลองและผลการทดลอง	23
4.1 แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	23
4.2 การออกแบบจุดสำคัญเพื่อช่วยในการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์	25
4.3 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP	28
4.4 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF	32

	หน้า
4.5 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนร่วม	35
5. การทดลองและผลการทดลอง	37
5.1 การทดลองเพื่อวัดแรงยึดเกาะของแม่เหล็ก	37
5.2 การทดลองการระบุตำแหน่งกับจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmarks) ด้วยวิธี ICP บนพื้นระนาบ	41
5.3 การทดลองการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF (Extended Kalman Filter)	42
5.4 การทดลองการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวน ร่วม (Covariant)	47
6. สรุปและข้อเสนอแนะ	52
6.1 ข้อสรุป	52
6.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	56
ก. เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ	57
ประวัติผู้วิจัย	63

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ข้อดีข้อเสียของการวางแม่เหล็กแบบต่างๆ	13
4.1 แจกแจงอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อยการเคลื่อนที่ (g) ของหุ่นยนต์เทียบกับการเคลื่อนที่ (u)	34
5.1 แสดงน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่ง	39
5.2 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณแรงยึดเกาะ	40
5.3 ค่าความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP กับจุดสังเกตเพิ่มเติมแบบ Uniform และ Non-uniform	42
5.4 ทดลองวิ่งด้วยความเร็ว 150 mm/sec เวลา 2 วินาที	44
5.5 สรุปข้อดีข้อเสียของ การระบุตำแหน่งล่วงหน้า (Prediction) และ (ICP) บนท่อผนัง	47
5.6 ค่าความผิดพลาดที่จำนวนจุดสังเกตต่างๆ	48

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 ลักษณะท้องผนังภายในหม้อน้ำ	1
2.1 (ก) การวางอุปกรณ์วัดความหนาต่อ (ข) หุ่นยนต์ไต่ผนัง โดยใช้ล้อแม่เหล็ก [1]	3
2.2 หุ่นยนต์ต้นแบบขณะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ Prototype-I (ก) และหุ่นยนต์ติดตั้งอุปกรณ์ EMAT ขณะทำการทดสอบภาคสนาม Prototype-II(ข)[2]	4
2.3 เซนเซอร์วัดความหนาเหล็ก (EMAT)[2]	4
2.4 (ก) รูปส่วนประกอบของหุ่นยนต์ (ข) รูปหุ่นยนต์ที่ใช้[3]	5
2.5 หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดสอบของ Gao,Xueshan[4]	5
2.6 การวางแผนแม่เหล็กเพื่อทำสายพานแม่เหล็กในงานวิจัยของ Gao [4]	6
2.7 การทำงานของ ICP อัลกอริทึม สีแดงคือตำแหน่งจุดสำคัญในพิกัดจริง สีม่วงคือตำแหน่งจุดสำคัญในพิกัดของหุ่นยนต์ (ก) ขณะเริ่มกระบวนการ(intitial step)หาตำแหน่ง (ข)หลังจากใช้ ICP จนมีค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยสุด	6
2.8 ตัวอย่างการเลือกจุดคู่ของพิกัดจริงและหุ่นยนต์	7
2.9 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP	8
2.10 การทำงานของ Kalman Filter	10
3.1 (ก) รูปตัวอย่างหุ่นยนต์ (ข) รูปได้ห้องหุ่นยนต์	12
3.2 (ก) รูปขณะหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยสายพาน (ข) รูปขณะหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยล้อไต่ห้อง	13
3.3 แสดงแรงยึดเกาะที่แม่เหล็กกระทำต่อกำแพง	14
3.4 แสดงการวางแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (ก) มู่แม่เหล็ก (ข) ล้อแม่เหล็กเสริมยาง (ค) แท่งแม่เหล็กเพิ่มแรงยึดสำหรับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (ง) แท่งแม่เหล็กเสริมแรงยึดสำหรับการเคลื่อนที่สายพาน	14
3.5 การวางแม่เหล็กเพื่อให้มู่แม่เหล็กเป็นล้อแม่เหล็ก	15
3.6 การวางแผนของแท่งแม่เหล็กสามารถปรับระดับขึ้นลงได้เพื่อเพิ่มลดแรงยึดเกาะของสายพาน	15
3.7 การวางแม่เหล็กเพื่อให้เป็นล้อแม่เหล็กสำหรับวิ่งแนวระดับ	16

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
3.8 การวางแผนของแท่งแม่เหล็กสามารถปรับระดับขึ้นลงได้เพื่อเพิ่มลดแรงยึดเกาะของการวิ่งแนวระดับ	16
3.9 หุ่นยนต์สำรวจท่อภายในหม้อไอน้ำ	16
3.10 (ก) มู่เล่สายพานหุ่นยนต์เสริมแม่เหล็ก (ข) การวางขั้วแม่เหล็กเพื่อให้สนามแม่เหล็กพุ่งออกตรงกลาง	17
3.11 (ก) ตำแหน่งติดแม่เหล็กที่ฐานของหุ่นยนต์ (ข) การแบ่งขั้วของแม่เหล็ก	18
3.12 การวางแผนแม่เหล็กในการเคลื่อนที่แนวระดับ	18
3.13 การวางแผนแม่เหล็กสำหรับล้อเคลื่อนที่แนวระดับ	18
3.14 น้ำหนักโดยประมาณของหุ่นยนต์	19
3.15 แรงยึดเกาะและแรงโน้มถ่วงซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวดิ่ง	20
3.16 ระบบการควบคุมส่วนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	20
3.17 Laser Scan URG04-LX	21
3.18 ขั้นตอนการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยวิธี PID	21
3.19 รูปมอเตอร์ที่ใช้ชุดขับสายพาน	22
4.1 แผนภาพตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะที่ความเร็วล้อไม่เท่ากัน	23
4.2 แผนภาพตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะที่ความเร็วล้อเท่ากัน	24
4.3 (ก) การวางแผนเพิ่มภายในหม้อไอน้ำเพื่อเป็นจุดสังเกตของหุ่นยนต์ (ข) ตัวอย่างเสา	25
4.4 ขอบเขตระยะการทำงานของ laser range finder	26
4.5 กราฟแสดงการหาเสาใน Laser Coordinate สีน้าเงินค่าที่ได้จากเลเซอร์สแกน , สีเทาผ่านการ Differential, สีแดงคือตำแหน่งเสา	27
4.6 กราฟแสดงการหาเสาใน Polar Coordinate สีน้าเงินค่าที่ได้จากเลเซอร์สแกน , สีแดงคือตำแหน่งเสา	27
4.7 ขั้นตอนการระตำแหน่งด้วยวิธี ICP	29
4.8 ค่าความผิดพลาดที่รอบต่างๆในการคำนวณด้วยวิธี ICP สีแดงคือก่อนออกจากการวนซ้ำและสีเขียวคือหลังการวนซ้ำ	30

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป	หน้า
4.9 ตัวอย่างการเลือกจุดคู่ของพิกัดจริงและหุ่นยนต์	30
4.10 ตัวอย่างการวางจุดสังเกต (ก) แบบ Uniform (ข) แบบ Non-Uniform	32
4.11 ลำดับการทำงานของกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF	32
4.12 ลำดับการทำงานของกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวน	36
5.1 การวัดแรงยึดเกาะของชุดสายพาน (ก) มู่เล่หุ้มด้วยสายพาน (ข) แผ่นเหล็กหุ้มด้วยสายพาน	37
5.2 การวัดแรงยึดเกาะของชุดเคลื่อนที่แนวขวาง (ก) ล้อแม่เหล็ก (ข) แผ่นเหล็กถูกขึ้นด้วยพลาสติกขนาด 6 มม. เพื่อให้ได้แรงดึงเสมือนติดบนหุ่นยนต์	38
5.3 แรงที่มีผลต่อการทดลอง	38
5.4 หุ่นยนต์สำรวจห่อไอน้ำขณะติดอยู่กับฐานทดสอบต่อผนัง	39
5.5 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP กับจุดสังเกตเพิ่มเติมลักษณะ Uniform และ Non-uniform	41
5.6 พื้นที่ในการวิ่งทดสอบการระบุตำแหน่งบนพื้นราบ	43
5.7 พื้นที่ในการวิ่งทดสอบการระบุตำแหน่งบนท่อผนัง	43
5.8 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนพื้นราบ	44
5.9 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนพื้นราบ 3 ครั้ง	45
5.10 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนท่อผนัง	45
5.11 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนท่อผนัง 3 ครั้ง	46
5.12 แสดงจำนวนจุดสังเกตที่หุ่นยนต์เจอในแต่ละตำแหน่งในการเดินด้วยวิธี ICP	47
5.13 ผลการปรับค่า Covariant ของวิธี ICP	49
5.14 ผลการปรับค่า Covariant ของวิธี ICP และการระบุตำแหน่งล่วงหน้าโดยใช้ค่า α_2 เท่ากับ 0.01(ก) 0.015(ข) 0.02(ค) 0.025(ง) 0.03(จ) 0.035(ช) 0.04(ฉ) 0.045(ว)	50
5.15 ทดลองการระบุตำแหน่ง 3 ครั้งด้วยค่า α_2 เท่ากับ 0.03	51

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในโรงไฟฟ้า หม้อน้ำ (Boiler) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการผลิตไฟฟ้า ไอน้ำจากหม้อน้ำถูกนำไปใช้ปั่นกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความเสียหายของหม้อน้ำเป็นสาเหตุหลักของการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า (Shut Down) ซึ่งนำความเสียหายมูลค่ามหาศาล ดังนั้นการบำรุงรักษาหม้อน้ำ จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อป้องกันความเสียหายที่ไม่คาดคิดในการบำรุงรักษาหม้อน้ำ วิธีการที่สำคัญคือ การตรวจสอบสถานะของท่อในหม้อน้ำอย่างสม่ำเสมอโดย พิจารณาจากความหนาของท่อและสภาพด้านนอกของท่อเพื่อป้องกันท่อระเบิด ซึ่งกำแพงท่อกายในหม้อน้ำมีลักษณะดังรูปที่ 1.1

ปัจจุบันการตรวจสอบกระทำโดยผู้ปฏิบัติงานโดยตรงซึ่งอาจมีข้อจำกัดต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบ ทักษะความชำนาญและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน ความล่าช้าของผู้ปฏิบัติงานที่ปฏิบัติงานภายใต้อุณหภูมิและปริมาณฝุ่นละอองสูงและเวลาที่จำกัด การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยอาศัยหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile Robot) จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดข้อจำกัดของการทดสอบกำแพงท่อได้

งานวิจัยนี้ทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการพัฒนาหุ่นยนต์ตรวจสอบซึ่งช่วยในการเข้าถึงตำแหน่งต่างๆภายในกำแพงท่อ (Wall tube) พร้อมทั้ง สร้างแผนที่เบื้องต้นเพื่อระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ระหว่างการเคลื่อนที่เพื่อช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งที่เข้าตรวจสอบได้ โดยมีการควบคุมหุ่นยนต์ผ่านระบบไร้สายจากการมองผ่านกล้องที่ติดอยู่บนตัวหุ่นยนต์ ทำให้กระบวนการตรวจสอบท่อสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดและมีประสิทธิภาพกล่าวคือครอบคลุมบริเวณโดยใช้เวลาน้อยลง อีกทั้งช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานแทนการทำงานบนที่สูงในกระบวนการตรวจสอบแบบเดิม



รูปที่ 1.1 ลักษณะท่อผนังภายในหม้อน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ หุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นกำแพงทอที่เป็นโลหะ
2. เพื่อศึกษา ออกแบบ การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ภายในบริเวณหม้อน้ำโรงไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นกำแพงทอ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นกำแพงทอซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้วและระยะห่าง 2.5 นิ้วได้
2. หุ่นยนต์สามารถวิเคราะห์หาตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์บนกำแพงทอภายในหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

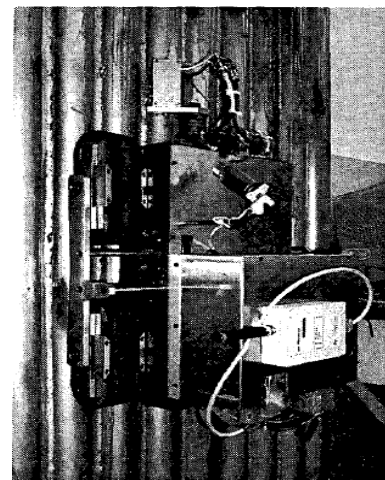
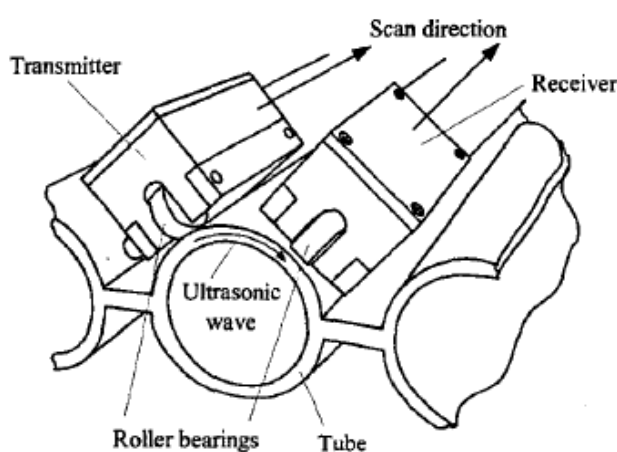
1. พัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบหุ่นยนต์สำหรับการไต่ผนังที่มีลักษณะเป็นกำแพงทอ
2. พัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์และสร้างแผนที่ในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นกำแพงทอ
3. การใช้หุ่นยนต์ตรวจสอบช่วยลดความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงาน มีความรวดเร็วและง่ายในการตรวจสอบในจุดที่ยากต่อการเข้าถึงโดยมนุษย์

บทที่ 2 แนวคิดในการออกแบบหุ่นยนต์

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับส่วนการออกแบบหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ตรวจสอบซึ่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) สำหรับตรวจสอบหม้อน้ำ และส่วนต่างๆของโรงไฟฟ้าถ่านหินได้เป็นที่สนใจและมีผู้ทำการวิจัย สร้าง และ นำไปทดสอบรวมไปถึงการใช้งานในโรงไฟฟ้าถ่านหินอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในงานวิจัยต่อไปนี้

Park S. et al. [1] 2002 ได้ออกแบบหุ่นยนต์ไต่ผนัง โดยใช้ล้อแม่เหล็ก เพื่อใช้ตรวจสอบท่อต่างๆ ในหม้อน้ำ ทั้งท่อ (tube) และ ท่อผนัง (Wall tube) โดยหุ่นยนต์จะติดตั้งอุปกรณ์ EMAT หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่แนวตรงตามความยาวท่อ และเลี้ยวไปสู่ท่อที่ติดกันได้ สามารถเคลื่อนที่ไปตามความโค้ง และเว้าของท่อได้ จากการทดสอบภาคสนาม พบว่าหุ่นยนต์สามารถตรวจพบ การลดลงของความหนาภายนอกท่อมากกว่า 1 mm ดังรูปที่ 2.1

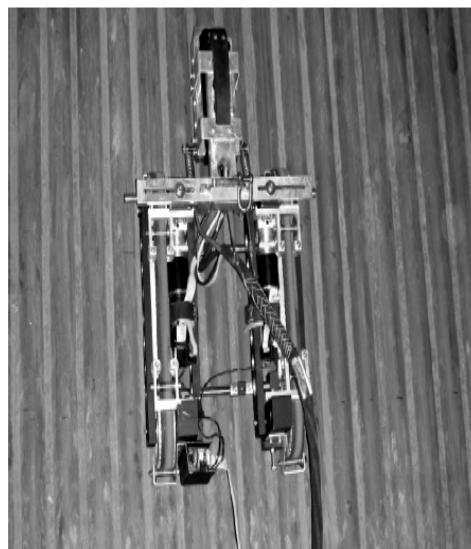


รูปที่ 2.1 (ก) การวางอุปกรณ์วัดความหนาท่อ (ข) หุ่นยนต์ไต่ผนังโดยใช้ล้อแม่เหล็ก[1]

Badodkar,D.N. et.al [2] 2009 ได้พัฒนาหุ่นยนต์ไต่เพื่อตรวจสอบท่อผนัง (Wall tube) และท่อ (tubes) โดยใช้แม่เหล็กติดตัวหุ่นยนต์ และใช้สายพานในการขับเคลื่อน โดยมีหุ่นยนต์แบบ I และ II ดังรูปที่ 2.4 โดยติดตั้งอุปกรณ์ EMAT ดังรูปที่ 2.3 หุ่นยนต์ตัวนี้สามารถรับน้ำหนักบรรทุก 5kg และ 10kg มีความเร็วในการไต่ 70 mm/sec และ 120 mm/sec ตามลำดับ หุ่นยนต์ถูกนำไปใช้โรงไฟฟ้าที่เมือง Dadri ประเทศอินเดียเพื่อวัดความหนาของท่อ



(ก)



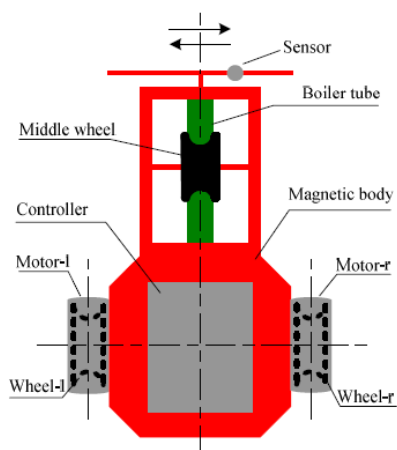
(ข)

รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ดันแบบขณะทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ Prototype-I (ก) และหุ่นยนต์ติดตั้งอุปกรณ์ EMATขณะทำการทดสอบภาคสนาม Prototype-II (ข) [2]



รูปที่ 2.3 เซนเซอร์วัดความหนาเหล็ก (EMAT)[2]

Xueqin , L. et al [3] 2009 ได้ออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ตรวจสอบท่อใน หม้อน้ำดังรูปที่ 2.4 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปตามความยาวท่อและเลี้ยวไปสู่ท่อที่อยู่ด้านข้างได้ โดยออกแบบล้อแม่เหล็กที่มีความเร็วเพื่อเคลื่อนที่ไปตามแนวท่อและฐานที่เป็นแม่เหล็ก หุ่นยนต์สามารถตรวจสอบความไม่ปกติของท่อเช่น ความบางและรอยแตก โดยใช้ตัวตรวจรู้ (sensor) ชนิด magnetic flux leakage ซึ่งจะทำการอ่านข้อมูลต่อเนื่องไปตามความยาวของท่อ



(ก)



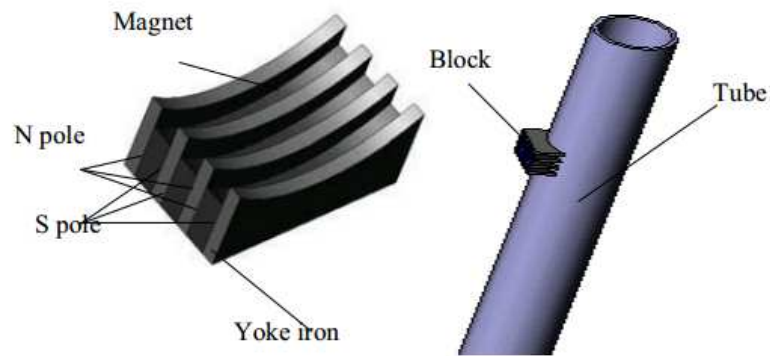
(ข)

รูปที่ 2.4 (ก)รูปส่วนประกอบของหุ่นยนต์(ข)รูปหุ่นยนต์ที่ใช้[3]

Gao,Xueshan et al [4]2009,[5]2008 ได้ออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ดังรูปที่ 2.5 มีความสามารถในการตรวจสอบรอยแตก และความหนาของท่อผนัง (Tube Wall) ในหม้อน้ำ โดยการติดตั้งแม่เหล็กในสายพานที่มีรูปเว้าเท่ากับแนวท่อดังรูปที่ 2.6 ทำการวัดความหนาโดยอาศัย Ultrasonic Transducer (UT) และมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะดวกต่อจาก slag และ ash ทำให้การเตรียมผิวสำหรับการทดสอบแบบ UT สามารถกระทำได้ก่อนวัดความหนา จากการทดสอบพบว่า การทำความสะอาด ash ได้ดี และมีค่าความแม่นยำในการวัดความหนาและระบุตำแหน่งไม่ปกติถูกต้องถึง 82 %



รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดสอบของ Gao,Xueshan[4]

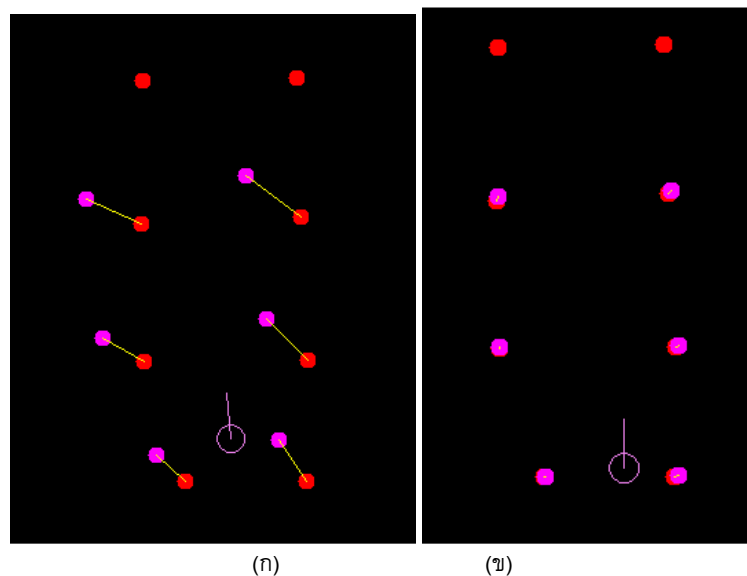


รูปที่ 2.6 การวางแผนแม่เหล็กเพื่อทำสายพานแม่เหล็กในงานวิจัยของ Gao [4]

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์

การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ (Robot Localization) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile Robot) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบอกให้ผู้ใช้งานหรือตัวหุ่นยนต์เองว่าสถานะปัจจุบันของหุ่นยนต์อยู่ตำแหน่งไหนในพื้นที่จริงเพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจสำหรับการทำงานในขั้นตอนต่อไป เช่น การบันทึกตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคยเดินผ่านไปแล้ว หรือต้องการระบุตำแหน่งที่หุ่นยนต์อยู่ปัจจุบันเป็นจุดสำคัญ เทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งนั้นปัจจุบันมีหลายงานวิจัยแนวทางก็แตกต่างกันออกไปตามสภาพแวดล้อมและเซนเซอร์ที่ใช้

2.2.1 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยวิธี ICP



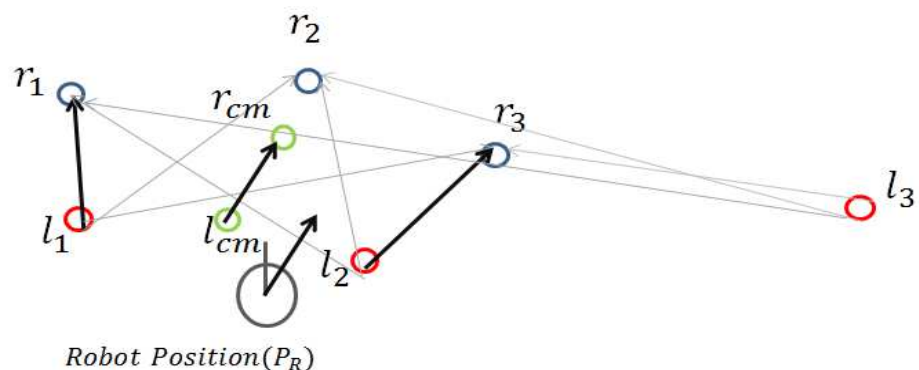
รูปที่ 2.7 การทำงานของ ICP อัลกอริทึม สีแดงคือตำแหน่งจุดสำคัญในพิกัดจริง สีม่วงคือตำแหน่งจุดสำคัญในพิกัดของหุ่นยนต์ (ก) ขณะเริ่มกระบวนการ (initial step) หาตำแหน่ง (ข) หลังจากใช้ ICP จนมีค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยสุด

Iterative Closest Point (ICP) algorithm เป็นวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดในสองกลุ่มข้อมูลซึ่งได้นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Besl และ McKay ในปี 1992 [6] ในภายหลังได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ โดยได้มีการปรับปรุงวิธีการให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้อาจมาจากเซนเซอร์ของหุ่นยนต์และลักษณะเด่นของสิ่งแวดล้อม เช่น [7] [8] [9] การประยุกต์ใช้ ICP กับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ คือการหาค่าของ (x, y, θ) ของหุ่นยนต์ ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดรวมระหว่างจุดสังเกตที่หุ่นยนต์ตรวจจับได้กับจุดสังเกตจริงในสิ่งแวดล้อม (แสดงโดยเส้นสีเหลืองในรูปที่ 2.7) มีค่าน้อยที่สุด โดยแสดงได้ดังสมการที่ 2.1 [10]

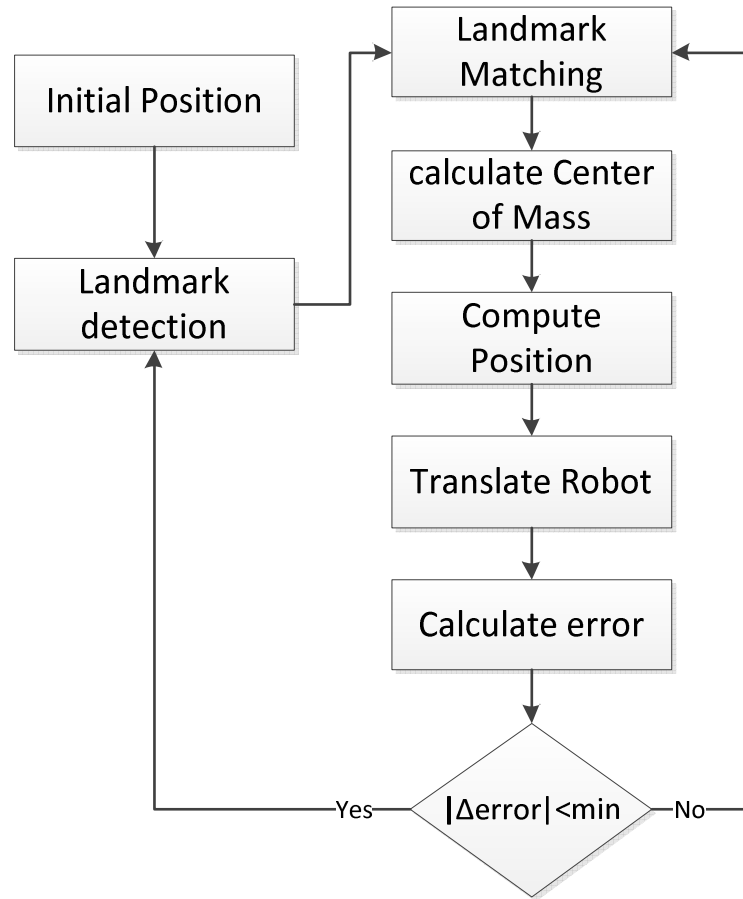
$$\sum_i^n |Rl_i + T - r_i|^2 \quad (2.1)$$

- r_i คือจุดสังเกตในแผนที่ (พิกัดจริง) ได้มาจากการบันทึกโดยผู้ใช้งานเทียบกับแผนที่จริงหรือบันทึกแบบอัตโนมัติโดยหุ่นยนต์,
- l_i คือจุดสังเกตที่ได้มาจากระบบการหาจุดสังเกต (landmark detection) จากเซนเซอร์ของหุ่นยนต์ (พิกัดของหุ่นยนต์),
- n คือจำนวนจุดสังเกต l_i
- R คือ rotation matrix
- T คือ translation Matrix

แนวโน้มในการเข้าสู่จุดที่มีค่าความผิดพลาดน้อยสุดจะได้จากค่า center of mass ของจุดที่เป็นจุดสำคัญของพิกัดจริงและพิกัดของหุ่นยนต์ซึ่งมีขั้นตอนดังรูป 2.9 จะทำการคำนวณจนกว่าค่าความผิดพลาดนั้นคงที่หรือเกินที่กำหนดไว้จึงทำการคำนวณตำแหน่งรอบต่อไป



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการเลือกจุดคู่ของพิกัดจริงและหุ่นยนต์



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP

- Landmark Detection คือการหาจุดสำคัญโดยหุ่นยนต์ได้มาจากเซนเซอร์ (l_i) รูปที่ 2.8 สีแดง
- Landmark matching คือการเลือกจับคู่จุดสังเกตระหว่าง l_i และ r_i โดยเลือกจุดที่มีระยะห่างสั้นที่สุด n ตัวดังเส้นสีแดงในรูปที่ 2.8
- Calculate Center of Mass คือการหาจุดศูนย์กลางของกลุ่มจุดสำคัญที่ได้จับคู่มาจากขั้นตอนที่แล้ว คำนวณได้จากสมการที่ 2.2 ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สีเขียว
- Compute Position คือการหา Rotation Matrix (R) และ Translation Matrix (T) โดยสามารถ คำนวณหา T ได้จากสมการที่ 2.3 ที่เป็นผลต่างของจุด center of mass ของทั้งสองกลุ่มข้อมูลและ คำนวณหา R ได้จากสมการที่ 2.4 ที่ได้จากการแทนค่า T ที่ได้กลับเข้าไปในสมการที่ 2.1
- Translate Robot คือการเปลี่ยนตำแหน่งหุ่นยนต์ให้ไปในจุด (R, T) ที่คำนวณ
- Calculate Error คือการรวมค่าความผิดพลาดของการทำงานรอบนั้นๆ ใช้สมการที่ 2.1 เพื่อนำไป เปรียบเทียบผลในรอบต่อไป ถ้าความผิดพลาดมีค่าคงที่ $|\Delta error| < \min$ ($\min$ คือค่าที่กำหนดขึ้นที่จะ ให้ผลต่างของความผิดพลาดอยู่ในช่วงเท่าไร) แล้วแสดงว่าจุดที่ได้เป็นจุดที่มีความใกล้เคียงที่สุด

$$l_{cm} = \frac{\sum_i^n l_i}{n}, r_{cm} = \frac{\sum_i^n r_i}{n} \quad (2.2)$$

$$x, y = P_{R_{x,y}} - (r_{cm_{x,y}} - l_{cm_{x,y}}) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \hat{r}_i &= r_i - r_{cm} \\ \hat{l}_i &= l_i - l_{cm} \\ M &= \sum_i^n (\hat{r}_{i_x} \hat{l}_{i_x} + \hat{r}_{i_y} \hat{l}_{i_y}) \\ N &= \sum_i^n (-\hat{r}_{i_x} \hat{l}_{i_x} + \hat{r}_{i_y} \hat{l}_{i_y}) \\ \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} &= \frac{1}{\|M \quad N\|} \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.2.2 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยวิธี Kalman Filter

-Kalman filter คือเทคนิคการประมาณสถานะของระบบที่เป็นเชิงเส้น ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย [10] ภายหลังถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการประมาณค่าสถานะต่างๆของระบบ โดยมีการประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์จากหลายงานวิจัยเช่น [11][12][13] ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะใช้เซนเซอร์ที่ต่างกันออกไป หลักการทำงานของ Kalman Filter ประกอบด้วยการประมาณสถานะที่เหมาะสมที่สุดจากสถานะระบบ (System State) สมการที่ 2.5 และกระบวนการวัด (Measurement) สมการที่ 2.6 ซึ่งทั้งสองก็จะมีค่าความคลาดเคลื่อนหรือสิ่งรบกวน (ε_t, δ_t) ในแต่ละสถานะที่แตกต่างกัน โดยใช้ข้อมูลในเวลาก่อนหน้าประมาณสถานะในเวลาถัดไป มีขั้นตอนการทำงานแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆคือ การประมาณล่วงหน้า (Prediction Step) การแก้ไข (Correction Step) โดยมีการทำงานวนซ้ำดังรูปที่ 2.10

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_k + \varepsilon_k \quad (2.5)$$

$$z_k = C_k x_{k-1} + \delta_k \quad (2.6)$$

$$x_k = \begin{pmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \\ \vdots \\ x_{n,k} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$u_k = \begin{pmatrix} u_{1,k} \\ u_{2,k} \\ \vdots \\ u_{m,k} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

x_k, x_{k-1} คือสถานะของระบบ (State Vector) ณ เวลาปัจจุบันและเวลาก่อนหน้าตามลำดับ มีสมาชิก n ตัวดังสมการที่ 2.7

u_k คือ อินพุตของระบบ (Control Vector) มีสมาชิก m ตัวดังสมการที่ 2.8

A_k คือ เมตริกซ์ขนาด $n \times n$ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x_k และ x_{k-1}

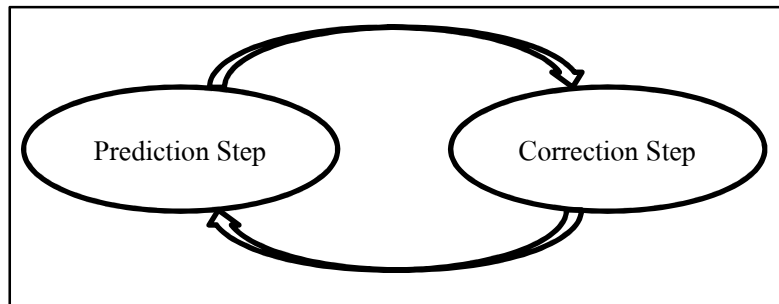
B_k คือ เมตริกซ์ขนาด $n \times m$ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Control Vector (u_t) กับ State Vector (x_t)

ε_k คือ ค่าสัญญาณรบกวนในระบบ (Process Noise) มีลักษณะเป็น Gaussian มีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ มีค่าความแปรปรวนร่วม (Process Noise Covariant) เท่ากับ R_k

z_k คือ สถานะของระบบจากการวัด (Measurement Vector)

C_k คือ เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่าง x_k กับ z_k ขนาด $k \times n$ โดยที่ k คือขนาดของ z_t

δ_k คือ ค่าสัญญาณรบกวนในระบบการวัด (Measurement Noise) มีลักษณะเป็น Gaussian มีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ มีค่าความแปรปรวนร่วม (Measurement Noise Covariant) เท่ากับ Q_k



รูปที่ 2.10 การทำงานของ Kalman Filter

การประมาณล่วงหน้า (Prediction Step) คือ การใช้สถานะของระบบ (State Vector) ในเวลาก่อนหน้าทำนายสถานะปัจจุบัน ซึ่งจากสมการที่ 2.5 ทำการโมเดลค่าสถานะ x_t ให้มีลักษณะเป็น Gaussian มีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ μ_k มีค่าความแปรปรวนร่วม (Process Noise Covariant) เท่ากับ E_k จะได้สมการมาดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 โดยการประมาณล่วงหน้านี้จะทำนายสถานะ ($\bar{\mu}_k$) และความแปรปรวนร่วม ($\bar{E}_k$) จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ และ R_k (Process Noise Covariant) เพื่อช่วยในการคำนวณโดยทั่วไปจะกำหนดเป็นค่าคงที่

$$\bar{\mu}_k = A_k \mu_{k-1} + B_k u_k \quad (2.9)$$

$$\bar{E}_k = A_k E_{k-1} A_k^T + R_k \quad (2.10)$$

การแก้ไข (Correction Step) คือการนำค่าที่ได้จากการวัด(Measurement Vector , z_k) มาช่วยปรับค่าสถานะโดยการคำนวณค่า Kalman Gain (K_k) เป็นการปรับความน่าเชื่อถือระหว่างสถานะที่ประมาณได้จากแบบจำลอง($\bar{\mu}_k$) และจากแบบจำลองของการวัด (z_k) โดยใช้ความแปรปรวนร่วมมาคิด ดังสมการที่ 2.11 เมื่อได้ K_k แล้วสามารถคำนวณสถานะและความแปรปรวนร่วมของระบบใหม่ได้ดังสมการที่ 2.12, 2.13 ซึ่ง Q_k (Measurement Noise Covariant) เพื่อง่ายในการคำนวณโดยทั่วไปจะกำหนดเป็นค่าคงที่

$$K_k = \bar{E}_k C_k^T (C_k \bar{E}_k C_k^T + Q_k)^{-1} \quad (2.11)$$

$$\mu_k = \bar{\mu}_k + K_k (z_k - C_k \bar{\mu}_k) \quad (2.12)$$

$$E_k = (I - K_k C_k) \bar{E}_k \quad (2.13)$$

-Extended Kalman Filter [14] คือเทคนิคการประมาณสถานะของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ 2.14, 2.15 ซึ่ง

$$x_k = g(u_k, x_{k-1}) + \varepsilon_k \quad (2.14)$$

$$z_k = h(x_k) + \delta_k \quad (2.15)$$

การประมาณสถานะแบบ Extended Kalman Filter สามารถใช้การปรับปรุง Kalman filter แบบเชิงเส้น โดยการหาอนุพันธ์ย่อย (Partial Derivative) ของฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (g) และการวัด(h) เพื่อแปลงให้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ได้เป็น G_k และ H_k ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับ A_k, C_k ใน Kalman Filter แบบเส้น โดยมีสมการหลักดังสมการที่ 2.16-2.20

$$\bar{\mu}_k = g(u_k, \mu_{k-1}) \quad (2.16)$$

$$\bar{E}_k = G_k E_{k-1} G_k^T + R_k \quad (2.17)$$

$$K_k = \bar{E}_k H_k^T (H_k \bar{E}_k H_k^T + Q_k)^{-1} \quad (2.18)$$

$$\mu_k = \bar{\mu}_k + K_k (z_k - h_t(\bar{\mu}_t)) \quad (2.19)$$

$$E_k = (I - K_k H_k) \bar{E}_k \quad (2.20)$$

- G_k คือ จาโคเบียนจากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อย (g) เทียบกับ (μ_{k-1})
- H_k คือ จาโคเบียนจากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อย (h) เทียบกับ $(\bar{\mu}_k)$

บทที่ 3 การออกแบบหุ่นยนต์

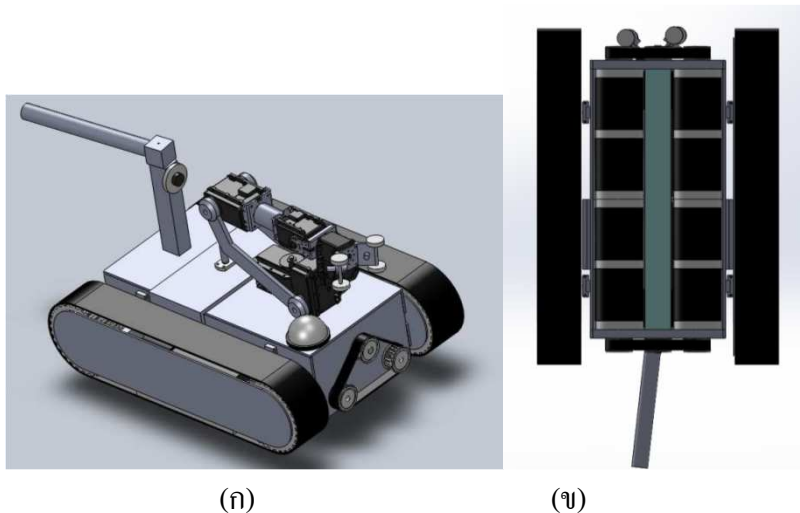
ในบทนี้ได้นำเสนอแนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการตรวจสอบกำแพงท่อหม้อไอน้ำทั้งในส่วนโครงสร้างทางกลและโครงสร้างทางไฟฟ้า

3.1 แนวคิดการออกแบบหุ่นยนต์

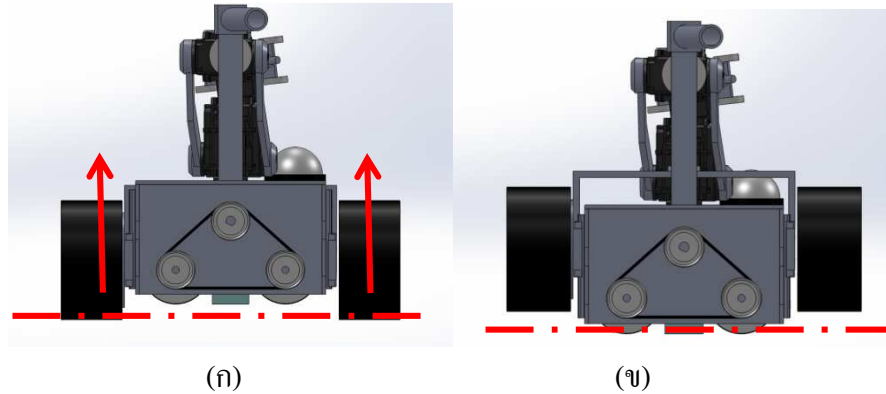
เพื่อตอบสนองการตรวจสอบท่อตามตำแหน่งต่างๆ บนผนังหม้อไอน้ำที่เป็นกำแพงท่อ (wall tube) หุ่นยนต์จึงจะต้องสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวท่อที่เป็นเหล็ก (Steel) ได้ทั้งในแนวดิ่งและในระดับบนท่อผนัง (Water wall tube) ดังนั้น หุ่นยนต์จึงถูกออกแบบสามารถทำการยึดเกาะ และเคลื่อนที่โดยอาศัยแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรซึ่งทำได้ทั้งการติดแม่เหล็กที่ได้ลำตัวหุ่นยนต์และที่ล้อของหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆภายในหม้อน้ำได้ตามภารกิจ

3.1.1 แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์จะต้องสามารถเคลื่อนที่บนท่อผนัง (wall tube) ได้ทั้งแนวดิ่งและแนวระดับ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบหุ่นยนต์ให้มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ 2 แกนเพื่อลดการสิ้นเปลืองและง่ายต่อการควบคุมของหุ่นยนต์เมื่อลักษณะการเลี้ยวแบบ Differential Drive ดังภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 (ก) รูปตัวอย่างหุ่นยนต์ (ข) รูปได้ท้องหุ่นยนต์



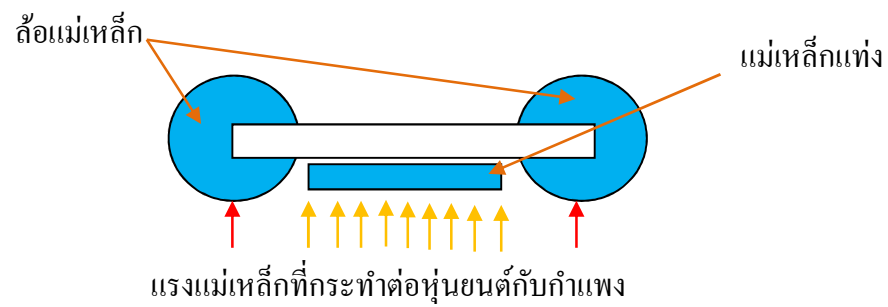
รูปที่ 3.2 (ก) รูปขณะหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยสายพาน (ข) รูปขณะหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยถ้วยดูดที่ต้อง
การเคลื่อนที่ปกติของหุ่นยนต์จะใช้สายพานในการขับเคลื่อนและเมื่อต้องการสไลด์ด้านข้างชุด
สายพานก็จะยกตัวขึ้นและการเคลื่อนที่ในแนวระดับจะถูกขับเคลื่อนโดยล้อแม่เหล็กได้ลำตัวหุ่นยนต์ดังรูปที่
3.2

3.1.2 แนวคิดในการติดแม่เหล็ก

หุ่นยนต์จำเป็นต้องมีแม่เหล็กเพื่อช่วยในการยึดเกาะกับผนังท่อโดยงานวิจัยนี้จะใช้แม่เหล็ก
ทรงกระบอกติดที่ตำแหน่งล้อ มู่เล่ย์ (ล้อขับ) และแม่เหล็กแท่งที่ตัวหุ่นยนต์โดยมีรายละเอียดข้อดี
ข้อเสียดังตารางที่ 3.1

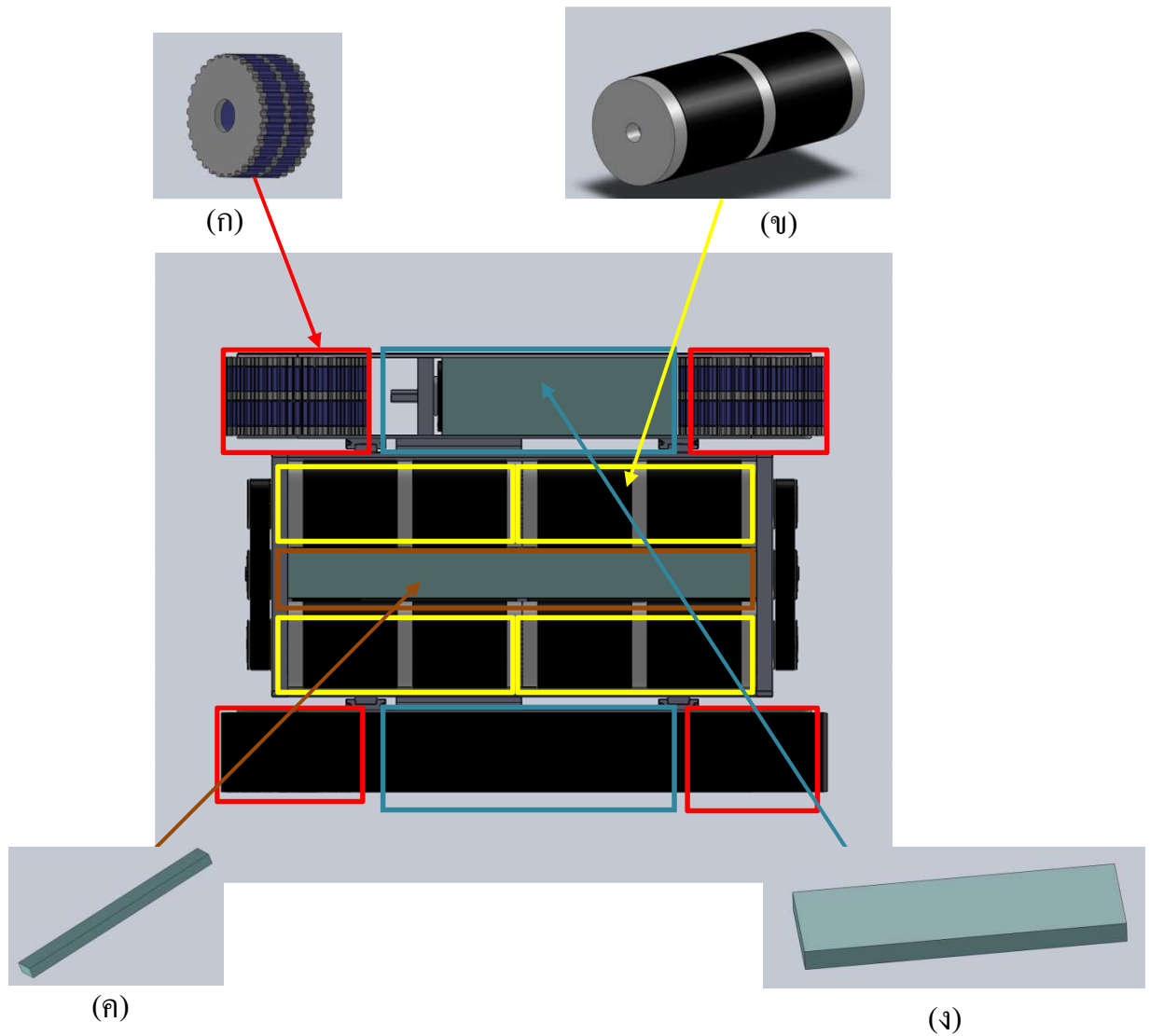
ตารางที่ 3.1 ข้อดีข้อเสียของการวางแม่เหล็กแบบต่างๆ

ลักษณะการติดแม่เหล็ก	ข้อดี	ข้อเสีย
การติดแม่เหล็กที่ล้อ	มีแรงยึดเกาะที่จุดสัมผัสกับผนังมากเพราะระยะ Air gap น้อยทำให้มีแรงเสียดทานที่ล้อมาก ลดการลื่นไถลจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	แรงที่ยึดกำแพงมีลักษณะเป็นจุด มีข้อเสียคือเมื่อจุดนั้นหลุดจะไม่เหลือแรงยึดเกาะกับกำแพงอีก
การติดแม่เหล็กแท่งที่บริเวณตัวหุ่นยนต์	มีแรงยึดเกาะกระจายตามแนวแท่งแม่เหล็กทำให้มีพื้นที่การยึดเกาะมาก	แรงยึดเกาะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับติดที่ล้อเพราะมีระยะ Air gap มากกว่า



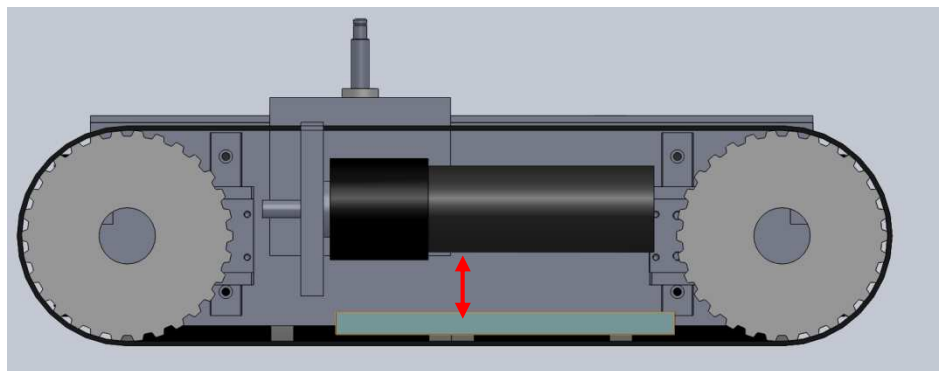
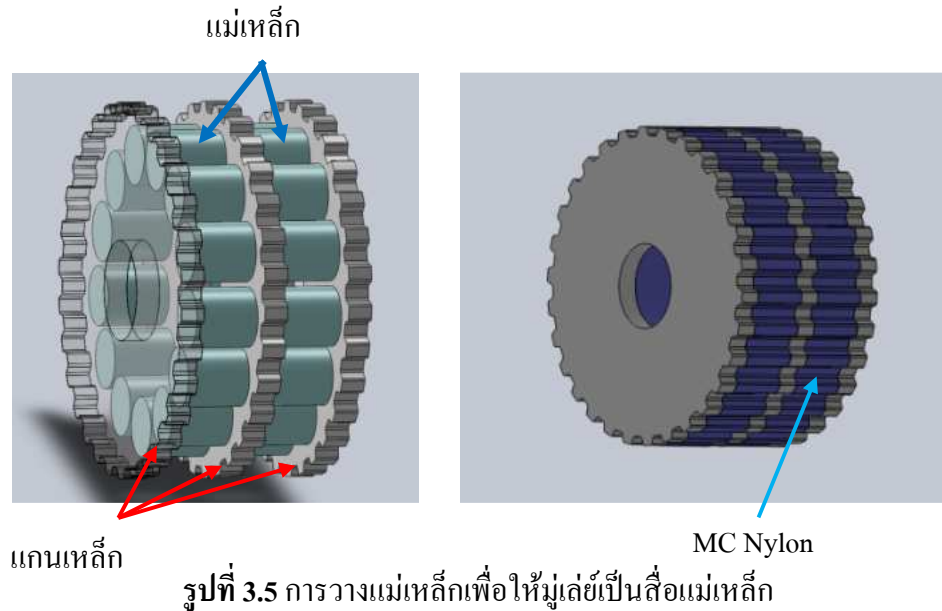
รูปที่ 3.3 แสดงแรงยึดเกาะที่แม่เหล็กกระทำต่อกำแพง

เพื่อให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ได้หลายสภาพแวดล้อมและพื้นที่หลายลักษณะจึงออกแบบให้หุ่นยนต์มีทั้งล้อแม่เหล็กและแม่เหล็กแท่งดังรูปที่ 3.3 และตำแหน่งการวางแม่เหล็กของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 3.4

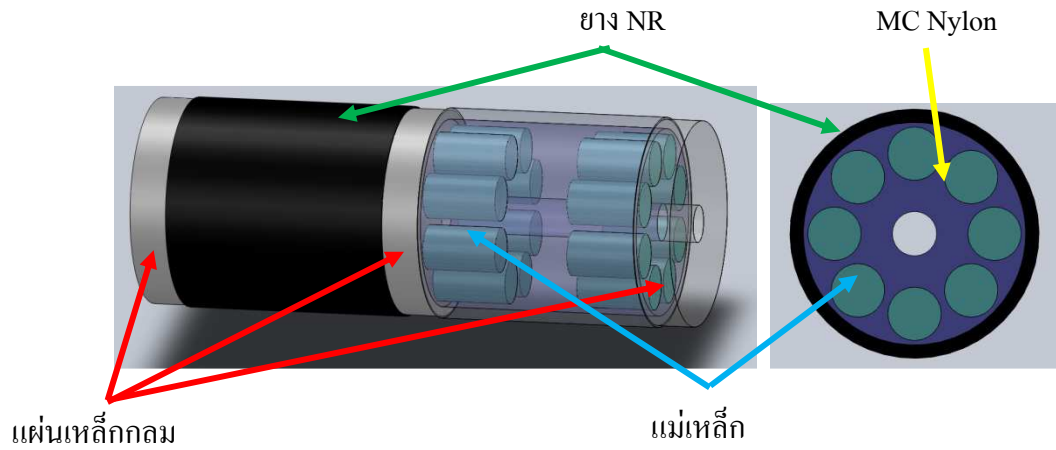


รูปที่ 3.4 แสดงการวางแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ (ก) มู่เลย์แม่เหล็ก (ข) ล้อแม่เหล็กเสริมยาง (ค) แท่งแม่เหล็กเพิ่มแรงยึดสำหรับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (ง) แท่งแม่เหล็กเสริมแรงยึดสำหรับการเคลื่อนที่สายพาน

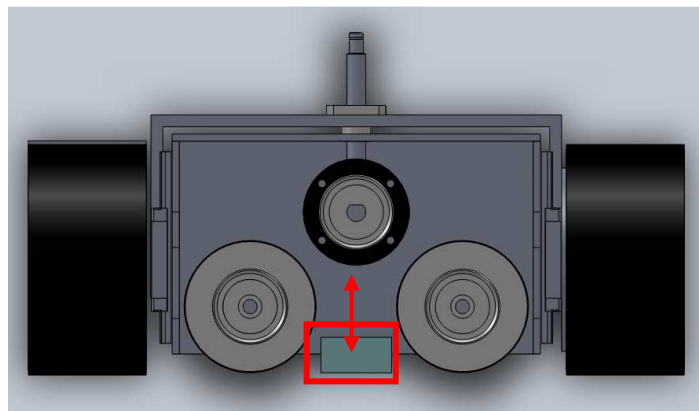
ส่วนของล้อขับสายพานใช้เป็นแม่เหล็กกลมวางและสั่งแรงแม่เหล็กผ่านแผ่นเหล็กที่มีลักษณะเป็นมู่เต๋ยมายังผนังท่อเพื่อไม่ให้แม่เหล็กสัมผัสเหล็กโดยตรง ลดความเสียหายของแม่เหล็กและง่ายต่อการจัดวางดังรูปที่ 3.5 ส่วนของแม่เหล็กแท่งวางไว้ที่ส่วนระหว่างล้อขับสายพาน 2 ข้างสามารถปรับระดับได้เพื่อเพิ่มลดแรงของแม่เหล็กดังรูปที่ 3.6



ล้อสำหรับใช้วิ่งแนวระดับใช้เป็นล้อกลมเสริมยางข้างในมีแม่เหล็กกลมตามแนวรัศมีสั่งแรงยึดเกาะออกมาทางแผ่นเหล็กดังรูปที่ 3.7 และมีแม่เหล็กแท่งปรับระดับได้ช่วยเพิ่มลดแรงยึดเกาะดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การวางแม่เหล็กเพื่อให้เป็นล้อแม่เหล็กสำหรับวิ่งแนวระดับ

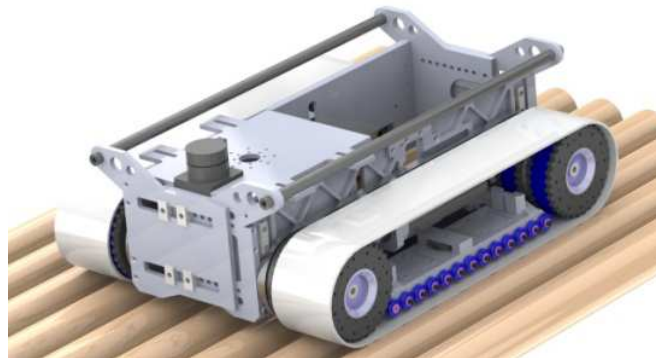


รูปที่ 3.8 การวางแนวของแท่งแม่เหล็กสามารถปรับระดับขึ้นลงได้เพื่อเพิ่มลดแรงยึดเกาะของการวิ่งแนวระดับ

3.2 การออกแบบทางกลของหุ่นยนต์

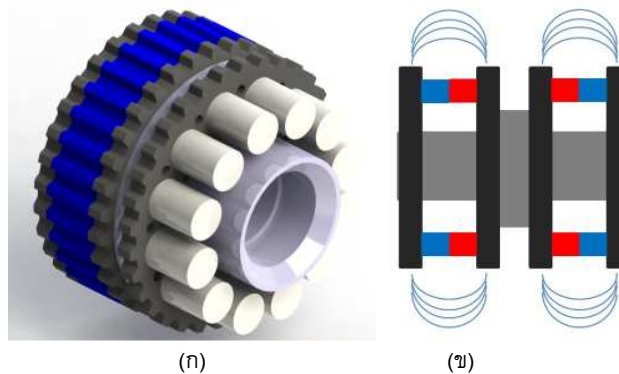
3.2.1 โครงสร้างทางกลหุ่นยนต์

จากแนวคิดการออกแบบทางกลหุ่นยนต์ในหัวข้อที่ 3.1 สามารถออกแบบหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่บนกำแพงท่อได้ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เน้นเกี่ยวกับออกแบบเฉพาะส่วนการเคลื่อนที่เท่านั้น ไม่ได้รวมถึงการออกแบบในส่วนของอุปกรณ์จับยึดอุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบผนังท่อ



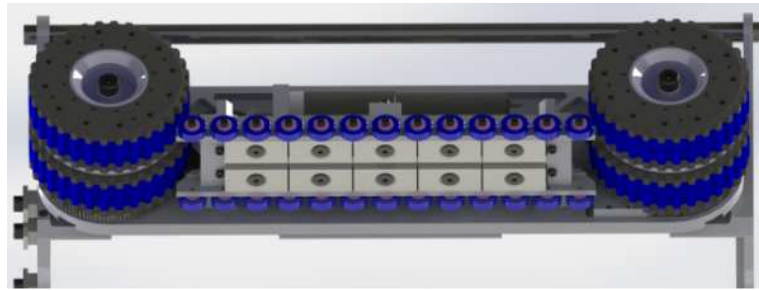
รูปที่ 3.9 หุ่นยนต์สำรวจท่อภายในหม้อไอน้ำ

การออกแบบส่วนของแม่เหล็กในการยึดเกาะได้แสดงดังรูปที่ 3.10 แม่เหล็กรูปทรงกระบอกแท่งกลมขนาดเล็กจำนวนมากจะถูกฝังไว้ในมู่เลย์ซึ่งคั่นด้วยแผ่นเหล็กเพื่อทำให้แรงจากแท่งแม่เหล็กทรงกระบอกส่งผ่านมายังแผ่นเหล็กที่ประกบข้างเพื่อทำให้เกิดมู่เลย์ที่มีลักษณะเป็นแม่เหล็ก การเรียงตัวของแม่เหล็กทั้งสองชุดจะถูกวางให้มีขั้วในลักษณะที่ผลักกันตามงานวิจัย [14] เพื่อให้สนามแม่เหล็กพุ่งออกจากตรงกลางของมู่เลย์

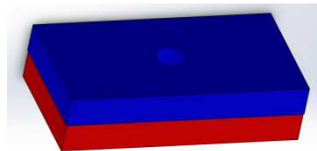


รูปที่ 3.10 (ก) มู่เลย์สายพานหุ่นยนต์เสริมแม่เหล็ก (ข) การวางขั้วแม่เหล็กเพื่อให้สนามแม่เหล็กพุ่งออกตรงกลาง

ในรูปที่ 3.11 แสดงการนำแม่เหล็กถาวรซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลาง โดยมีการแบ่งขั้วแม่เหล็กตามรูปที่ 3.10 (ข) แผ่นแม่เหล็กนี้นำมาวางเรียงต่อกันภายใต้ฐานหุ่นยนต์ทำให้เกิดเป็นแผ่นแม่เหล็กช่วยในการยึดเกาะ อย่างไรก็ตามแรงยึดเกาะที่ได้จะลดลงตามระยะห่างระหว่างฐานของหุ่นยนต์กับพื้นกำแพงท่อที่เพิ่มขึ้น และจะเป็นการเหนี่ยวนำผ่านอากาศและสายพานยาง ทำให้ต้องมีการติดตั้งแผ่นแม่เหล็กเป็นจำนวนมากจึงจะได้แรงยึดเกาะมากพอสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวดิ่ง ส่วนการวางแม่เหล็กในการเคลื่อนที่แนวระดับลักษณะจะเหมือนกับแนวสายพานดังรูปที่ 3.12 และ 3.13

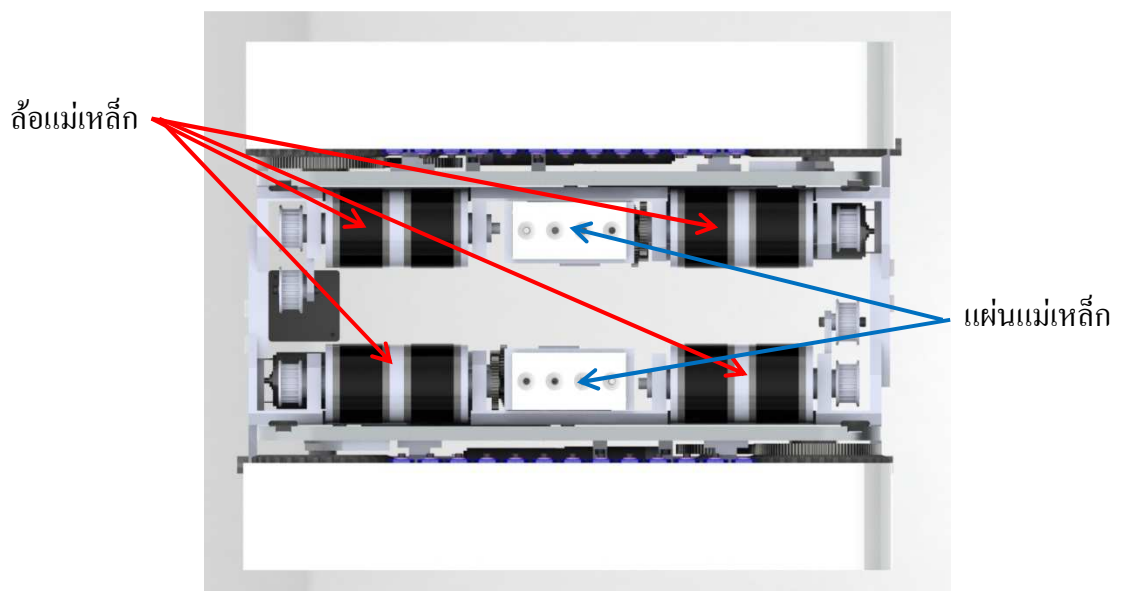


(ก)

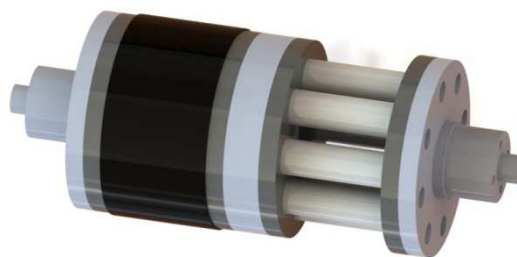


(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) ตำแหน่งติดตั้งแม่เหล็กที่ฐานของหุ่นยนต์ (ข) การแบ่งชั้นของแม่เหล็ก



รูปที่ 3.12 การวางแม่เหล็กในการเคลื่อนที่แนวระดับ



รูปที่ 3.13 การวางแม่เหล็กสำหรับล้อเคลื่อนที่แนวระดับ

3.2.2 แรงที่มีผลต่อการเคลื่อนที่

จากการออกแบบหุ่นยนต์ตามหัวข้อที่ 3.2.1 ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงต่างๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่หรือการยึดเกาะของหุ่นยนต์ได้ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนการเคลื่อนที่ด้วยสายพานและส่วนการเคลื่อนที่แนวขวางโดยคำนวณจากสมการที่ 3.1 โดยแรงรวมของแม่เหล็กจะต้องมากกว่าน้ำหนักหุ่นยนต์เพื่อหุ่นยนต์จะสามารถเกาะบนกำแพงท่อโดยไม่ลื่นไถลลงมา

$$\sum_i^n (\mu F_{Magnet}) > mg \quad (3.1)$$

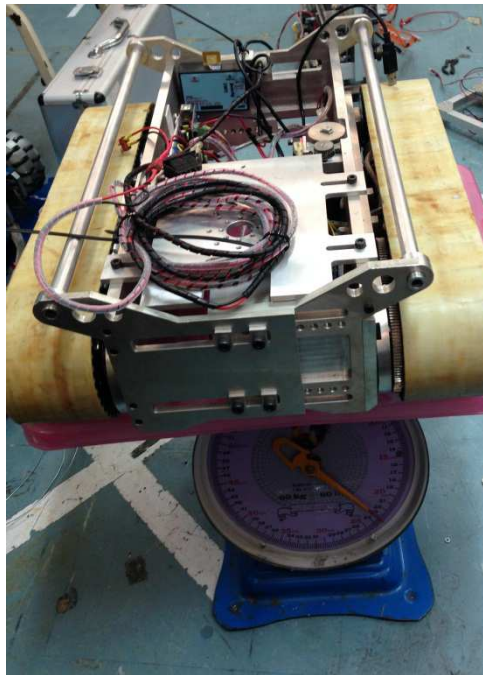
m คือ น้ำหนักหุ่นยนต์กิโกรัมมีค่าเท่ากับ 27 กิโลกรัมดังรูปที่ 3.15

g คือ ความเร่งโน้มถ่วงกำหนดให้เท่ากับ 9.8 m/s^2

F_{Magnet} คือแรงของแม่เหล็ก

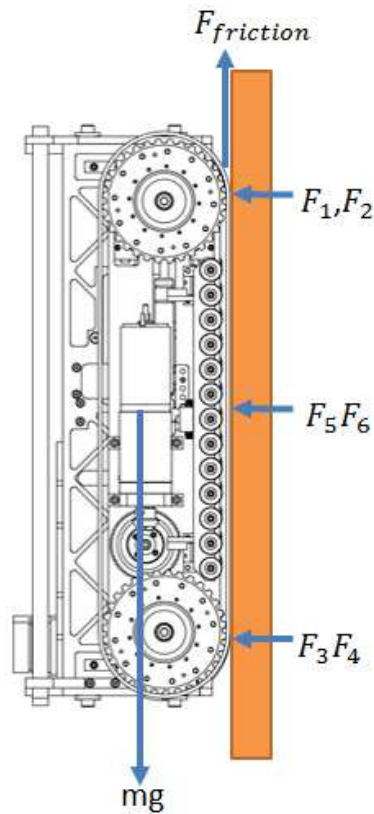
μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

n คือ จำนวนของแรงยึดเกาะจากแม่เหล็ก



รูปที่ 3.14 น้ำหนักโดยประมาณของหุ่นยนต์

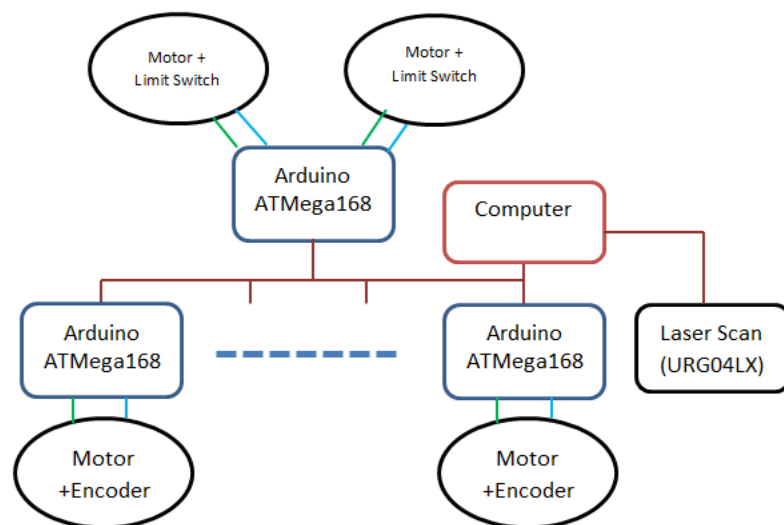
ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ด้วยสายพาน แรงที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ส่วนนี้คือ แรงยึดเกาะจากแม่เหล็กแม่เหล็กจำนวน 4 ชิ้น (F_1, F_2, F_3, F_4) และแรงที่ได้จากชุดแม่เหล็กแผ่นจำนวน 2 ชิ้น (F_5, F_6) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง Polyurethane กับ Steel เท่ากับ 0.7



รูปที่ 3.15 แรงยึดเกาะและแรงโน้มถ่วงซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวดิ่ง

ส่วนการเคลื่อนที่แนวระดับแรงที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ส่วนนี้จะเหมือนกับแรงในส่วนสายพานคือแรงยึดเกาะจากล้อแม่เหล็กจำนวน 4 ชิ้น (F_1, F_2, F_3, F_4) และแรงที่ได้จากชุดแม่เหล็กแผ่นจำนวน 2 ชิ้น (F_5, F_6) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง Natural Rubber กับ Steel เท่ากับ 0.8

3.3 การออกแบบระบบทางไฟฟ้าและระบบควบคุมการเคลื่อนที่



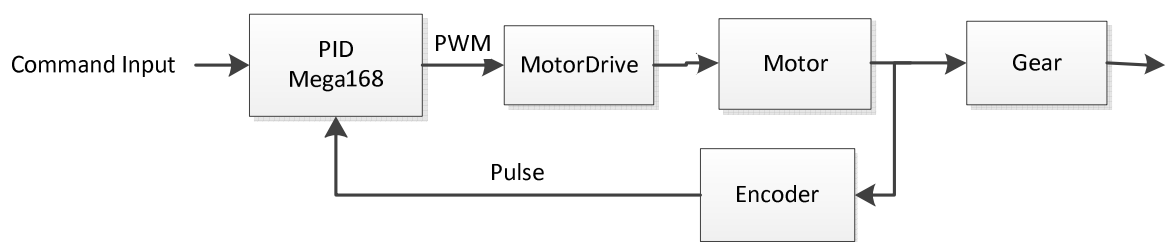
รูปที่ 3.16 ระบบการควบคุมส่วนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ระบบควบคุมหลักในงานวิจัยนี้เป็นดังรูปที่ 3.16 ใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลหลักทำหน้าที่รับค่าเซนเซอร์ เพื่อนำมาคำนวณการระบุตำแหน่ง โดยเซนเซอร์ที่ใช้เพื่อการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เป็นเซนเซอร์วัดระยะทางประเภทเลเซอร์เรนจ์ไฟน์เดอร์ (laser rangefinder) รุ่น Hokuyo URG04LX ดังรูปที่ 3.17 สามารถวัดระยะได้ 20 mm-4000mm โดยยิง Laser ออกไปเป็นมุม 0 – 240 องศา ความแม่นยำในการวัด ± 30 mm ซึ่งจะส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ผ่านทางช่อง USB



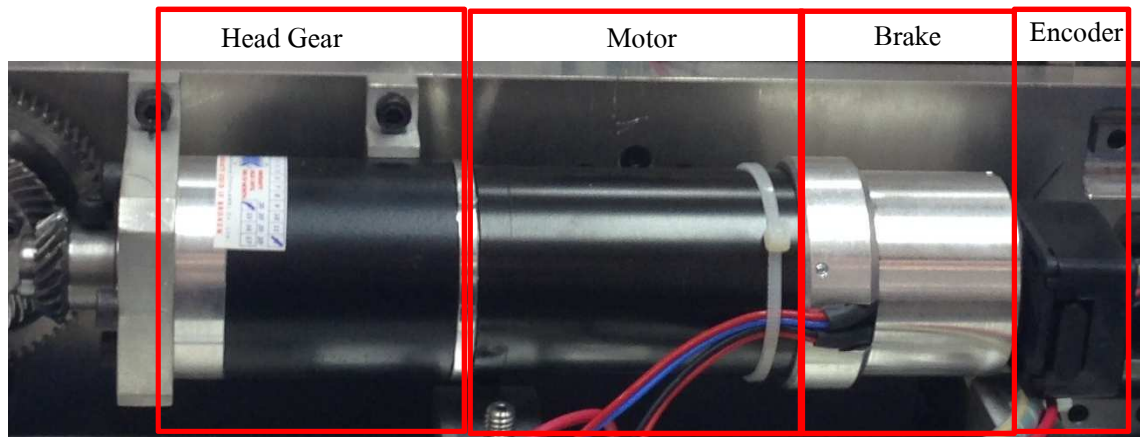
รูปที่ 3.17 Laser Scan URG04-LX

ในส่วน of ระบบควบคุมมอเตอร์นั้นจะอาศัยการส่งคำสั่งต่างๆจากคอมพิวเตอร์ผ่านทางระบบบัส RS485 เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่และการยกสลับชุดการเคลื่อนที่ โดยชุดควบคุมมอเตอร์นั้นเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega168 ซึ่งจะคอยควบคุมความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวโดยแยกอิสระต่อกัน ระบบควบคุมมอเตอร์นั้นจะรับสัญญาณจาก encoder ของมอเตอร์ (ที่ความละเอียด 256 pulse ต่อรอบ) เพื่อนำมาคำนวณเพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยใช้การควบคุมด้วยวิธี PID มีขั้นตอนดังภาพที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยวิธี PID

ในขณะที่หุ่นยนต์หยุดนิ่งและทำการตัดไฟชุดมอเตอร์จะทำให้หุ่นยนต์นั้นไหลลงตามน้ำหนัก mg เพราะมอเตอร์ไม่ได้ทำการรักษาตำแหน่ง จึงได้มีการออกแบบส่วนการขับเคลื่อนของการเคลื่อนที่ชุดสายพานให้มี Brake ดังรูปที่ 3.19 เพื่อใช้ในกรณีที่หุ่นยนต์หยุดนิ่งหุ่นยนต์จะได้ไม่ไหลลงตามน้ำหนักของหุ่นยนต์และจะได้ไม่ต้องทำการควบคุมความเร็วตลอดเวลาเพื่อประหยัดพลังงาน



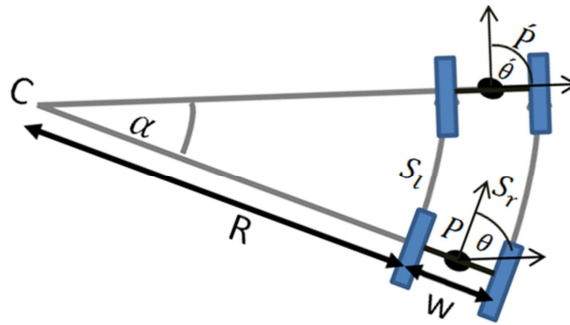
รูปที่ 3.19 รูปมอเตอร์ที่ใช้ชุดขับเคลื่อนสายพาน

บทที่ 4 ระบบการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์สำรวจภายในหม้อไอน้ำตั้งแต่แบบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เทคนิคการหาจุดสังเกตภายในหม้อไอน้ำและเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง

4.1 แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์จะต้องมีการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยอาศัยความเข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ Differential drive ซึ่งมีค่าตัวแปรต่างๆ ในการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.1 และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะที่ความเร็วล้อไม่เท่ากัน
จากรูปที่ 4.1 สามารถเขียนเป็นสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่างๆ ได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$S_r = \alpha * (R + w) \quad (4.1)$$

$$S_l = \alpha * R \quad (4.2)$$

และจากสมการที่ 4.1 และ 4.2 สามารถเขียนสมการหาความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$\alpha = \frac{S_r - S_l}{w} \quad (4.3)$$

$$R = \frac{S_l}{\alpha}; \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 ค่า α จะต้องมามีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เพราะจะทำให้สมการนั้นหาค่าไม่ได้ ซึ่งส่งผลให้ค่า S_l จะต้องไม่เท่ากับ S_r ในสมการที่ 4.3 และหาความสัมพันธ์ของตัวแปร $C, \dot{P}, P$ จากรูปที่ 4.1 ได้ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6 และ 4.7

$$C = P - \left(R + \frac{w}{2}\right) * \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\dot{P} = C + \left(R + \frac{w}{2}\right) * \begin{bmatrix} \sin(\theta + \alpha) \\ -\cos(\theta + \alpha) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\dot{\theta} = (\theta + \alpha) \quad (4.7)$$

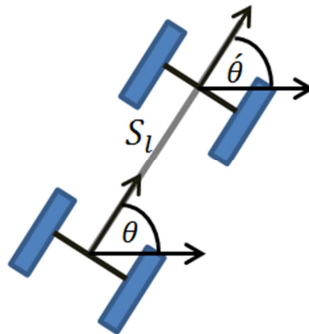
จากสมการที่ 4.5 ,4.6 ,4.7 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่เป็นสมการสุดท้ายได้เป็นดังสมการที่ 4.8 โดยมีข้อจำกัดคือ $S_l \neq S_r$ เพื่อที่จะทำให้สมการหาค่าได้

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R + \frac{w}{2})(\sin(\theta + \alpha) - \sin \theta) \\ (R + \frac{w}{2})(-\cos(\theta + \alpha) + \cos \theta) \\ \alpha \end{bmatrix} ; S_r \neq S_l \quad (4.8)$$

โดยที่

$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$ คือตำแหน่งหุ่นยนต์
 $\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$ คือตำแหน่งหุ่นยนต์ใหม่หลังการคำนวณ
 S_r, S_l คือระยะการเคลื่อนที่

ในกรณีที่ $S_l = S_r$ สามารถหาความสัมพันธ์ได้จากรูปที่ 4.2 โดยเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต่างๆได้เป็นดังสมการที่ 4.9



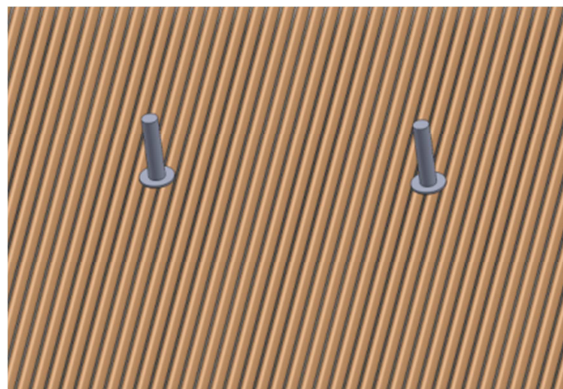
รูปที่ 4.2 แผนภาพตัวแปรที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขณะที่ความเร็วล้อเท่ากัน

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_l \cos \theta \\ S_l \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} ; S_r = S_l \quad (4.9)$$

จากแผนภาพรูปที่ 4.1 และ 4.2 ที่เป็นภาพขณะที่ความเร็วล้อซ้ายและขวาที่เท่ากันและไม่เท่ากันนั้น สามารถหาสมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้เป็น 2 สมการคือสมการที่ 4.8 และ 4.9 เพื่อที่จะนำไปใช้ในการคำนวณการระบุตำแหน่งในหัวข้อต่อไป

4.2 การออกแบบจุดสังเกตเพื่อช่วยในการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์

สภาพแวดล้อมภายในหม้อน้ำของโรงไฟฟ้านั้นมีลักษณะพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่โล่งกว้าง ทำให้มีจำนวนของจุดที่จะสามารถนำมาใช้เป็นจุดสังเกตโดยธรรมชาติ (natural landmarks) ภายในระยะที่เซนเซอร์วัดได้เพื่อการระบุตำแหน่งตัวเองค่อนข้างจำกัดหรืออาจไม่มีเลย งานวิจัยนี้จึงอาศัยการเพิ่มจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmarks) ขึ้นมา โดยการนำเสารูปทรงกระบอกไปติดไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งตัวเองได้ ซึ่งเสาเหล่านี้จะถูกออกแบบให้มีฐานเป็นแม่เหล็กเพื่อให้ง่ายในการติดตั้ง โดยตำแหน่งการวางเสาเพื่อเพิ่มจุดสังเกตในงานวิจัยนี้จะเป็นการกำหนดเองโดยผู้ใช้งานดังรูปที่ 4.3

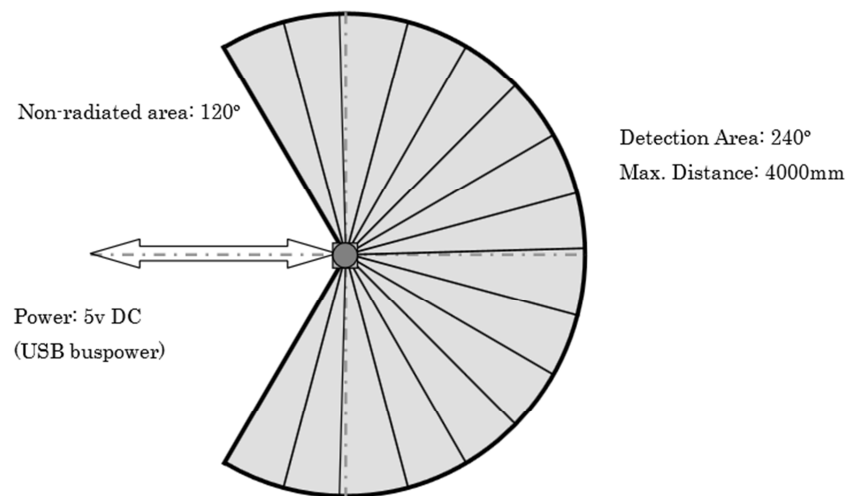


(ก)



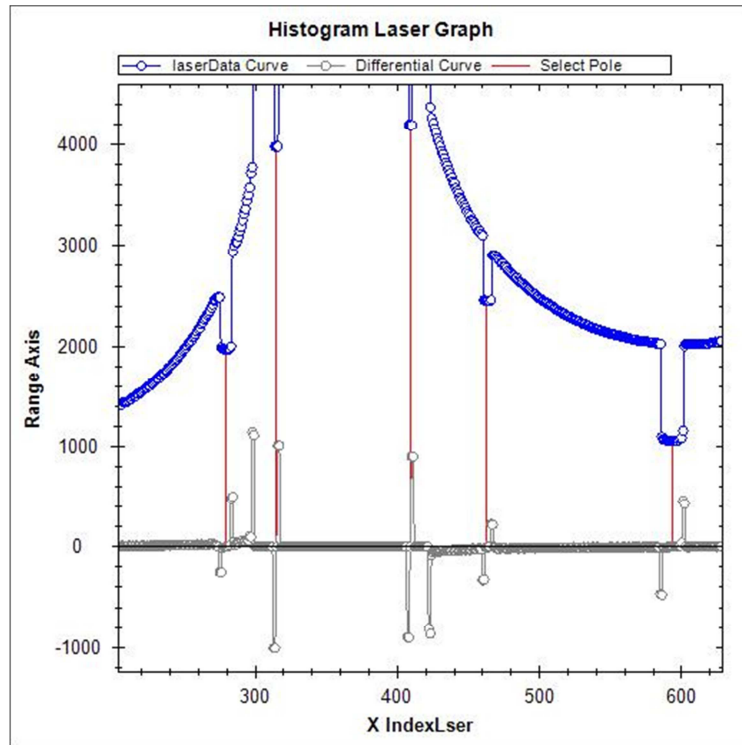
(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) การวางเสาเพิ่มภายในหม้อน้ำเพื่อเป็นจุดสังเกตของหุ่นยนต์ (ข) ตัวอย่างเสา

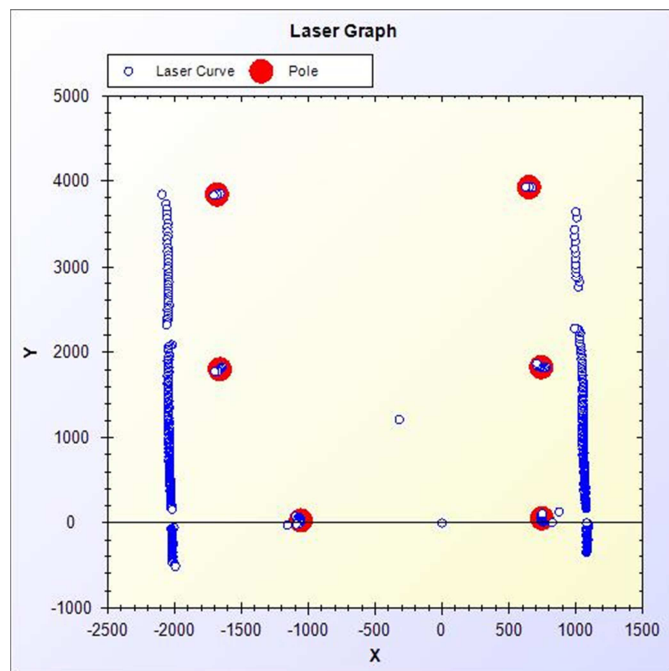


รูปที่ 4.4 ขอบเขตระยะการทำงานของ laser range finder

การจำแนกจุดสังเกต (pole) ในงานวิจัยนี้ใช้ laser range finder ในการระบุตำแหน่ง ข้อมูลที่อ่านได้ในแต่ละช่วงเวลาของการสแกนนั้นคือค่าระยะห่างระหว่างวัตถุกับเซนเซอร์ ณ มุมต่างๆที่เลเซอร์กวาดไปที่มุม 0-240 องศา ดังรูปที่ 4.4 เมื่อนำค่าระยะที่อ่านได้เหล่านั้นมาพล็อตกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงโดยวงกลมสีน้ำเงิน จากข้อมูลที่แสดงในกราฟนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อมีเสาอยู่ภายในระยะสแกนของเลเซอร์นั้น จะทำให้เกิดลักษณะเด่นในสัญญาณที่ได้จากข้อมูลของเลเซอร์ในหนึ่งคาบการสแกน กล่าวคือสัญญาณที่ได้จะมีค่าที่ลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการหาลักษณะเด่นของจุดสังเกตจากเสาที่สร้างขึ้นนี้ สามารถทำได้โดยการผ่านฟังก์ชัน differential (ดังแสดงด้วยกราฟเส้นสีเทา รูปที่ 4.5) เมื่อมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่า threshold ที่ตั้งไว้ในด้านลบและด้านบวกซึ่งมีระยะห่างกันไม่เกิน W_p ตามแสดงในอัลกอริทึม 1 ก็จะสามารถแยกแยะหาตำแหน่งของเสา (จุดสังเกตที่สร้างขึ้น) ได้ดังรูปที่ 4.6 โดยกำหนดค่า $\text{threshold} = 90$ $W_p = 60$



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการหาเสาใน Laser Coordinate สีน้าเงินค่าที่ได้จากเลเซอร์สแกน สีเทาผ่านการ Differential สีแดงคือตำแหน่งเสา



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการหาเสาใน Polar Coordinate สีน้าเงินค่าที่ได้จากเลเซอร์สแกน สีแดงคือตำแหน่งเสา

อัลกอริทึม 1: การหาเสาดำแหน่งเสาจากเลเซอร์สแกน

```

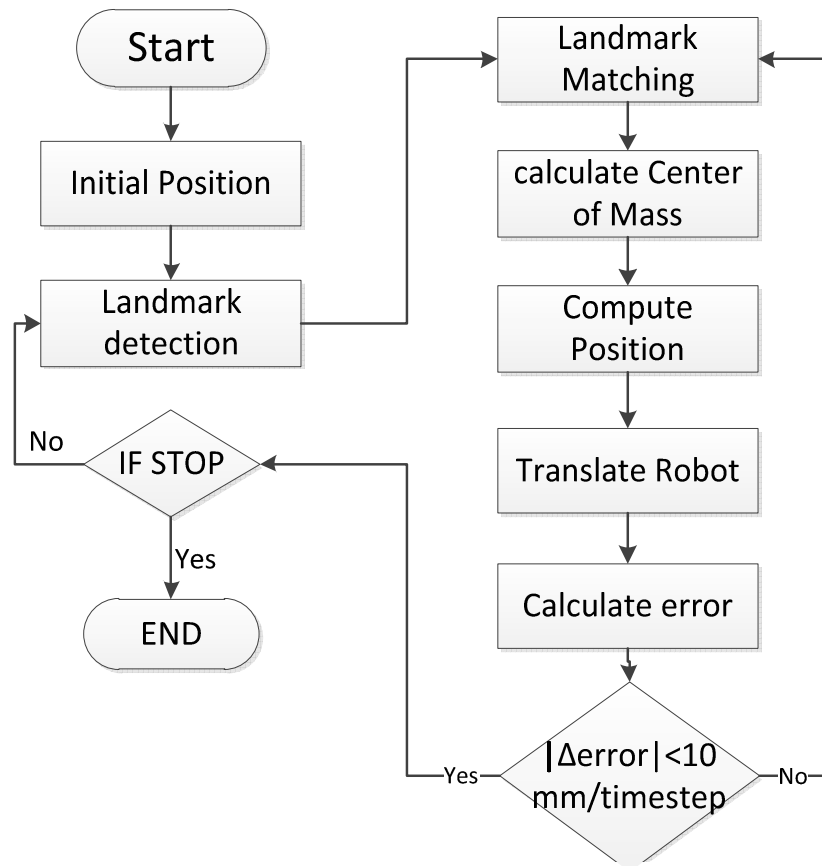
for l = 0 to Num laserData
    if( lenght laserData < -threshold)
        stateMem = true
    if(stateMem)
        mem length ,index Laser
        count++
    if(count>Wp)
        Clear memLaser,count
        stateMem = false
    if (length laserData > threshold)&&( stateMem=true)
        mempole
end for

```

4.3 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP

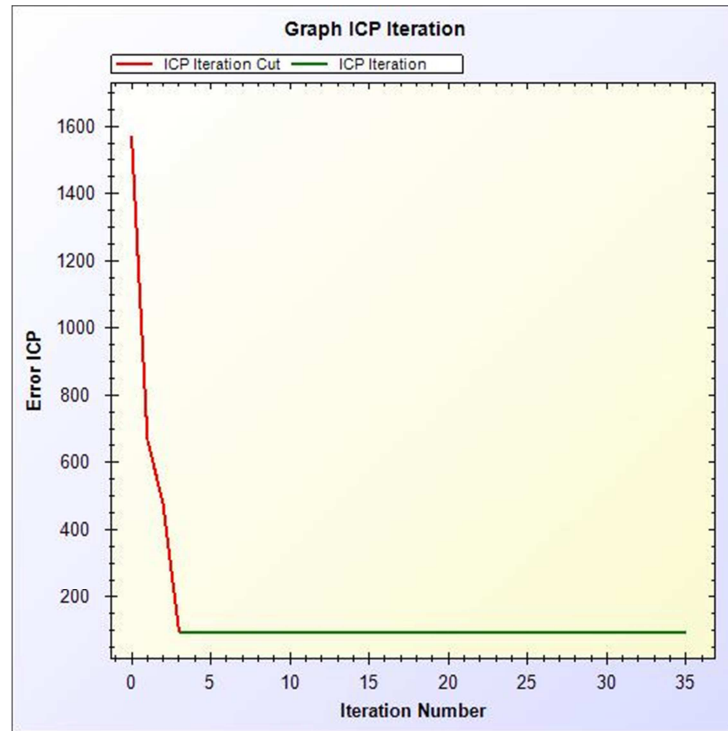
การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP (Iterative Closest Point) คือการหาตำแหน่งที่มีความผิดพลาดรวมน้อยที่สุดของกลุ่มข้อมูลสองกลุ่มที่มีสมการหลักดังสมการที่ 4.10 โดยการเขียนโปรแกรมในการระบุตำแหน่งในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบลำดับในการทำงาน 6 ขั้นตอนดังรูปที่ 4.7 ซึ่งโดยแบ่งเป็น การแยกจุดสังเกต (Landmark Detection) การจับคู่จุดสังเกต (Landmark matching) คำนวณค่าความผิดพลาด (Calculate Error) การหาจุดศูนย์กลาง (Calculate Center of Mass) คำนวณตำแหน่ง (Compute Position) เคลื่อนจุดของหุ่นยนต์ (Translate Robot) โดยจะทำงานวนไปเรื่อยๆจนกว่าจะมีค่าสั่งหยุดการทำงาน

$$\sum_i^n |Rl_i + T - r_i|^2 \quad (4.10)$$



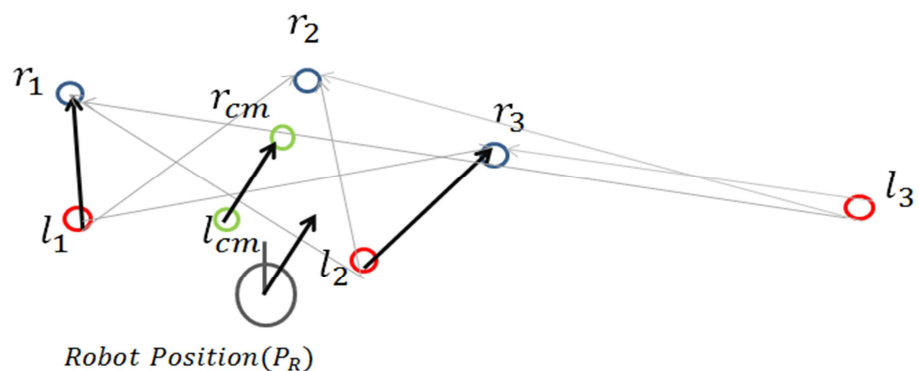
รูปที่ 4.7 ขั้นตอนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP

จากรูปที่ 4.7 โปรแกรมจะวนการทำงานไปเรื่อยๆจนกว่าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด $|\Delta error|$ น้อยกว่า 10 มิลลิเมตรต่อการคิดหนึ่งครั้ง โดยกำหนดขึ้นจากการวิเคราะห์จากกราฟดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความผิดพลาดของการทำงานแต่ละรอบเส้นสีแดงคือค่าความผิดพลาดก่อนออกจาก การวนการทำงานของ ICP และเส้นสีเขียวคือหลังจากการวน โดยรูปนี้ทำการเก็บค่าหลังจากสิ้นสุด การวนซ้ำด้วยเพื่อให้เห็นค่าความผิดพลาดหลังจากนั้นว่ามีลักษณะคงที่หรือไม่



รูปที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดที่รอบต่างๆในการคำนวณด้วยวิธี ICP สีแดงคือก่อนออกจากการวนซ้ำและสีเขียวคือหลังการวนซ้ำ

การจับคู่จุดสังเกต (Landmark matching) ทำการคำนวณหาเส้นทางระหว่างจุดสังเกตในพิกัดของหุ่นยนต์ (l) กับจุดสังเกตในพิกัดจริง (r) ทุกจุดแล้วทำการเลือกจุดที่สั้นที่สุดมาคู่กันดังรูปที่ 4.9 สีดำคือจุดที่สั้นที่สุด ทำให้ได้จุดที่คู่กันสองจุดคือ (l_1, r_1) , (l_2, r_3) ส่วน l_3 ไม่มีคู่เนื่องจากอยู่ห่างมากเกินไป โดยที่ตัวแปล l และ r เป็นตัวแปรที่ประกอบไปด้วยพิกัด x, y



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการเลือกจุดคู่ของพิกัดจริงและหุ่นยนต์

การหาจุดศูนย์กลาง (center of mass calculate) นำจุดที่เป็นคู่กันจากการทำงานขั้นตอนที่แล้วมาทำการหาจุดศูนย์กลางมวล (center of mass) ของทั้งสองพิกัดดังสมการที่ 4.11 จะได้จุด (l_{cm}, r_{cm}) ดังรูปที่ 4.9 จุดสีเขียว

$$l_{cm} = \frac{\sum_i^n l_i}{n}, r_{cm} = \frac{\sum_i^n r_i}{n} \quad (4.11)$$

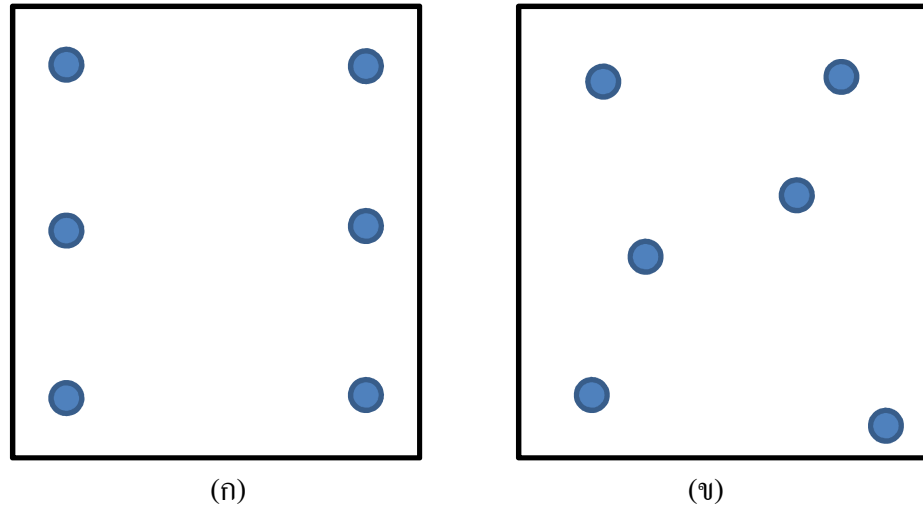
การคำนวณตำแหน่ง (compute position) ในส่วนของตำแหน่ง x, y ที่จะต้องเคลื่อนที่ไปตามรูปที่ 4.9 เส้นประ สามารถใช้ตำแหน่งจากผลต่างของจุด center of mass ของพิกัดทั้งสองได้ดังสมการที่ 4.5 และ มุมองศาของหุ่นยนต์ (θ) หาได้จากสมการที่ 4.13 ที่ได้จากการแทนค่า x, y ในสมการที่ 4.12 ไปในสมการที่ 4.10 จากนั้นก็ทำการเคลื่อนหุ่นยนต์ (translate & rotate robot) ไปยังจุด x, y, θ ดังกล่าว

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Rx} \\ P_{Ry} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{cm_x} \\ r_{cm_y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_{cm_x} \\ l_{cm_y} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \dot{r}_i &= r_i - r_{cm} \\ \dot{l}_i &= l_i - l_{cm} \\ M &= \sum_i^n (\dot{r}_{ix} \dot{l}_{ix} + \dot{r}_{iy} \dot{l}_{iy}) \\ N &= \sum_i^n (-\dot{r}_{ix} \dot{l}_{iy} + \dot{r}_{iy} \dot{l}_{ix}) \\ \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} &= \frac{1}{\|M \quad N\|} \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.13)$$

จากนั้นทำการรวมค่าความผิดพลาด (Calculate error) โดยใช้สมการที่ 4.10 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทำงานรอบต่อไป ถ้าค่าความผิดพลาดมีค่าคงที่หรือรอบการคำนวณเกินค่าที่กำหนดไว้ก็ให้จุดนั้นเป็นตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์

การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ในงานวิจัยนี้คือการใช้ข้อมูลจากปัจจุบันมาคิดอาจจะทำให้ผลการระบุตำแหน่งที่ได้หรือค่าความผิดพลาดไม่คงที่ โดยในงานวิจัยส่วนนี้จะวิเคราะห์ว่า จำนวนจุดสังเกตและลักษณะการวางจุดสังเกตดังรูปที่ 4.10 จะมีผลต่อระบบของการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP หรือไม่

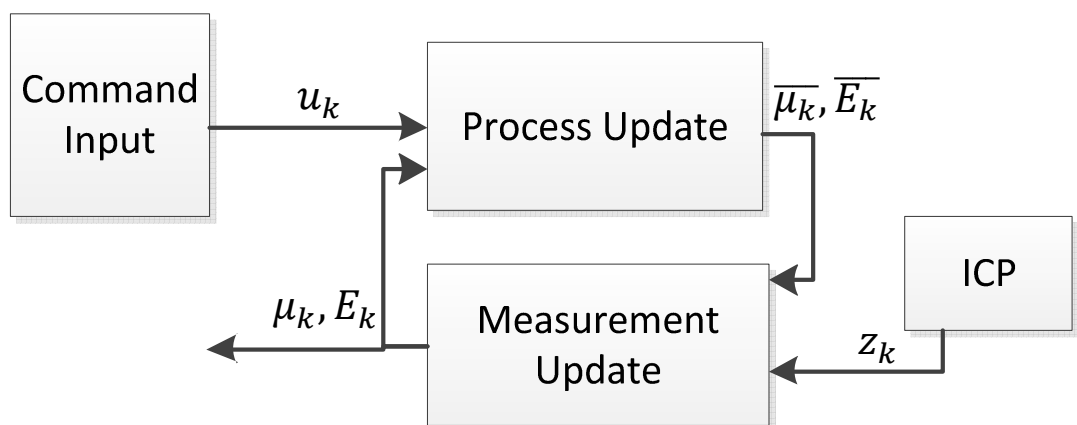


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างการวางจุดสังเกต (ก) แบบ Uniform (ข) แบบ Non-Uniform

การวางจุดสังเกตแบบ Uniform ดังรูปที่ 4.10 (ก) วางในลักษณะที่มีการกระจายตัวเท่าๆกันและรูปที่ 4.10(ข)การวางแบบ Non-Uniform วางในลักษณะที่สุ่มวางเองโดยผู้ใช้งานโดยจะทำการวิเคราะห์ถึงผลการระบุตำแหน่งของทั้ง 2 แบบ

4.4 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF

การประมาณตำแหน่งหุ่นยนต์ด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ ICP เป็น Measurement Update ของระบบทำงานโดยกำหนดให้ค่าความแปรปรวนเป็นค่าคงที่โดยการทำงานจะแบ่งเป็นสองขั้นตอนใหญ่ๆคือ Prediction Step และ Correction Step ดังรูปที่ 4.11 มีสมการหลักทั้งหมด 5 สมการ สมการที่ 4.7,4.8,4.13,4.14,4.15



รูปที่ 4.11 ลำดับการทำงานของกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF

Predictions Step คือการปรับค่าตำแหน่งล่วงหน้าจากสมการโมเดลของหุ่นยนต์ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การเคลื่อนแบบ Differential Drive มีสมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 4.14 S_l, S_r คือระยะการ

เคลื่อนที่ล้อซ้ายและขวา, $\mu_{k-1} = (x_{k-1}, y_{k-1}, \theta_{k-1})$ คือตำแหน่งของหุ่นยนต์ ณ เวลาก่อนหน้า, $u_t = (s_l, s_r)$, จากการคำนวณสมการที่ 4.14 จะทำให้ได้ *Position Prediction* $(\bar{\mu}_t) = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{\theta})$

$$\bar{\mu}_k = g(u_k, \mu_{k-1}) = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_{k-1} + s_l \cos \theta \\ y_{k-1} + s_r \sin \theta \\ \theta_{k-1} \end{bmatrix}; s_r = s_l \\ \begin{bmatrix} x_{k-1} + (R + \frac{w}{2})(\sin(\theta + \alpha) - \sin \theta) \\ y_{k-1} + (R + \frac{w}{2})(-\cos(\theta + \alpha) + \cos \theta) \\ \theta_{k-1} + \alpha \end{bmatrix}; s_r \neq s_l \end{cases} \quad (4.14)$$

$$R = \frac{s_l}{\alpha}; \alpha = \frac{s_r - s_l}{w}$$

การคำนวณค่าความแปรปรวนร่วม Covariant Predictions (E_t) ของตำแหน่งที่ประมาณล่วงหน้า
คำนวณได้จากสมการที่ 4.15

$$\bar{E}_k = G_k E_{k-1} G_k^T + V_t M_t V_t^T \quad (4.15)$$

$$M_t = \begin{bmatrix} \sigma_l & 0 \\ 0 & \sigma_r \end{bmatrix}$$

โดยกำหนดให้

E_{k-1} คือค่าความแปรปรวนร่วมของระบบ ณ เวลาก่อนหน้า

M_k คือค่าความแปรปรวนร่วมของการเคลื่อนที่ล้อซ้ายและขวาของหุ่นยนต์ มีสมาชิกเป็น

(σ_l, σ_r) โดยกำหนดให้ทั้งสองเป็นค่าคงที่เพื่อ่ง่ายในการคำนวณ

V_k คือ Jacobian จากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อการเคลื่อนที่ (g) ของหุ่นยนต์เทียบกับ
การเคลื่อนที่ (u) ดังแสดงในสมการที่ 4.16,

G_k คือ Jacobian จากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (g) เทียบกับ
ตำแหน่งก่อนหน้าหุ่นยนต์ (μ_{k-1}) ดังแสดงในสมการที่ 4.17

V_k ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 รูปแบบตามสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สมการที่ 4.16 คือกรณีที่
 $s_l = s_r$ และ $s_l \neq s_r$ ดังตารางที่ 4.1

$$V_k = \frac{\partial g(u_k, \mu_{k-1})}{\partial u_k} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial s_l} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial s_r} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial s_l} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial s_r} \\ \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial s_l} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial s_r} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.1 แจกแจงอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อการเคลื่อนที่ (g) ของหุ่นยนต์เทียบกับการเคลื่อนที่ (u)

	$s_l = s_r$	$s_l \neq s_r$
$\frac{\partial \dot{x}}{\partial s_l}$	$\frac{1}{2}(\cos \theta + \frac{s_l}{w} \sin \theta)$	$\frac{ws_r}{(s_r - s_l)^2}(\sin(\theta + \alpha) - \sin \theta) - \frac{s_r + s_l}{2(s_r - s_l)}\cos(\theta + \alpha)$
$\frac{\partial \dot{y}}{\partial s_l}$	$\frac{1}{2}(\sin \theta - \frac{s_l}{w} \cos \theta)$	$\frac{ws_r}{(s_r - s_l)^2}(-\cos(\theta + \alpha) + \cos \theta) - \frac{r + l}{2(s_r - s_l)}\sin(\theta + \alpha)$
$\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial s_l}$	0	$\frac{-1}{w}$
$\frac{\partial \dot{x}}{\partial s_r}$	$\frac{1}{2}(\cos \theta - \frac{s_l}{w} \sin \theta)$	$\frac{-ws_l}{(s_r - s_l)^2}(\sin(\theta + \alpha) - \sin \theta) + \frac{s_r + s_l}{2(s_r - s_l)}\cos(\theta + \alpha)$
$\frac{\partial \dot{y}}{\partial s_r}$	$\frac{1}{2}(\sin \theta + \frac{s_l}{w} \cos \theta)$	$\frac{-ws_l}{(s_r - s_l)^2}(-\cos(\theta + \alpha) + \cos \theta) + \frac{s_r + s_l}{2(s_r - s_l)}\sin(\theta + \alpha)$
$\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial s_r}$	0	$\frac{1}{w}$

$$G_k = \frac{\partial g(u_k, \mu_{k-1})}{\partial state} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial \mu_{k-1, x}} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial \mu_{k-1, y}} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial \mu_{k-1, \theta}} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial \mu_{k-1, x}} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial \mu_{k-1, y}} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial \mu_{k-1, \theta}} \\ \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \mu_{k-1, x}} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \mu_{k-1, y}} & \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial \mu_{k-1, \theta}} \end{pmatrix}$$

$$G_k = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 & -s_l \sin \theta \\ 0 & 1 & s_l \cos \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ; s_l = s_r \right. \\ \left. \begin{pmatrix} 1 & 0 & (R + \frac{w}{2})(\cos(\theta + \alpha) - \cos \theta) \\ 0 & 1 & (R + \frac{w}{2})(\sin(\theta + \alpha) - \sin \theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ; s_l \neq s_r \right\} \quad (4.17)$$

Correction Step คือ การปรับตำแหน่งอีกครั้งโดยมีค่าของ ICP มาร่วมในการคิดโดยมีสมการหลักคือ สมการที่ 4.19 การทำงานคือการเลือกปรับตำแหน่งโดยที่มีแนวโน้มไปทางตำแหน่งที่มีค่าความแปรปรวนน้อย (Covariance) โดยการคำนวณตัวคูณ Calculate Kalman Gain (K_k) ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าความแปรปรวนร่วมของตำแหน่งที่ได้จากการประมาณล่วงหน้า Prediction ($\bar{E}_k$) และ ICP (Q_k) ดังสมการที่ 4.18 เมื่อได้ค่า K_k ก็สามารถคำนวณหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ Calculate new position จาก

สมการที่ 4.17 และเมื่อได้ตำแหน่ง μ_t แล้วก็คำนวณค่า Covariance (E_t) ของตำแหน่งที่ได้ดังสมการที่ 4.20

$$K_k = \bar{E}_k H_k^T (H_k \bar{E}_k H_k^T + Q_k)^{-1} \quad (4.18)$$

$$\mu_k = \bar{\mu}_k + K_k (z_k - h(\bar{\mu}_k)) \quad (4.19)$$

$$E_k = (I - K_k H_k) \bar{E}_k \quad (4.20)$$

K_k คือ คาลมานเกน (Kalman Gain)

$h(\bar{\mu}_k)$ คือค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมาณล่วงหน้าในฟังก์ชันของการวัด (Measurement)

H_k คือ Jacobian จากการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันย่อย (h) เทียบกับตำแหน่งหุ่นยนต์ ($\bar{\mu}_t$) ดังสมการที่ 4.21

Q_k คือค่าความแปรปรวนร่วมของการประมาณตำแหน่งด้วยระบบ ICP

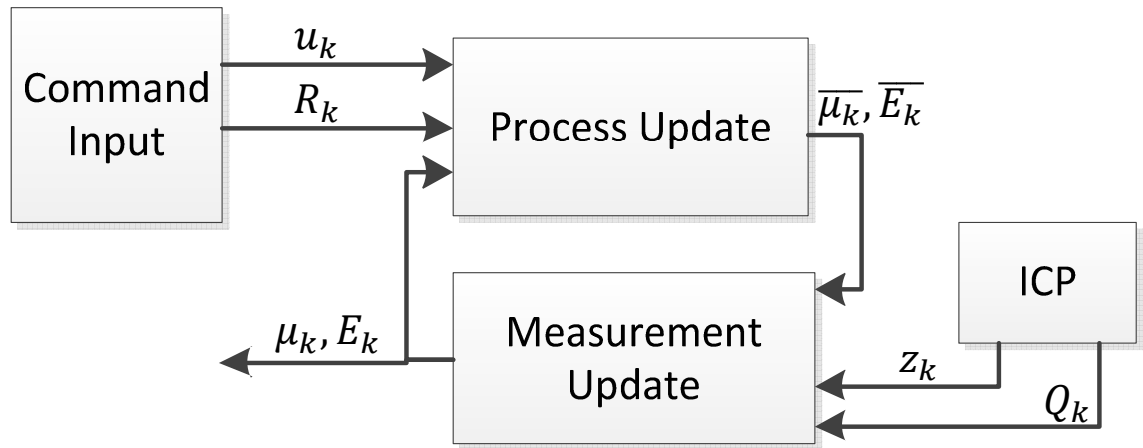
$$H_k = \frac{\partial h(u_k, \bar{\mu}_k)}{\partial state} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \bar{\mu}_{k,x}} & \frac{\partial x}{\partial \bar{\mu}_{k,y}} & \frac{\partial x}{\partial \bar{\mu}_{k,\theta}} \\ \frac{\partial y}{\partial \bar{\mu}_{k,x}} & \frac{\partial y}{\partial \bar{\mu}_{k,y}} & \frac{\partial y}{\partial \bar{\mu}_{k,\theta}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{\mu}_{k,x}} & \frac{\partial \theta}{\partial \bar{\mu}_{k,y}} & \frac{\partial \theta}{\partial \bar{\mu}_{k,\theta}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I \quad (4.21)$$

ผลสุดท้ายจากการคำนวณโดยวิธี ICP ร่วมกับ EKF จะทำให้ได้ตำแหน่งของหุ่นยนต์ ($\bar{\mu}_k$) และค่าความแปรปรวน ($\bar{E}_k$)

4.5 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนร่วม

การประมาณตำแหน่งหุ่นยนต์ตามหัวข้อที่ 4.4 ค่าความแปรปรวนถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ อาจทำให้การระบุตำแหน่งนั้นไม่แม่นยำพอเพราะค่าความแปรปรวนร่วมของการระบุตำแหน่งด้วย ICP (Q_k) นั้นอาจมีตัวแปรบางอย่างที่มีผลต่อการระบุตำแหน่งเช่นจำนวนจุดสังเกตที่พบ (n) ณ เวลานั้น และค่าความแปรปรวนจากการระบุตำแหน่งล่วงหน้า (R_k) จากสมการของระบบเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกำแพงท่อาจมีบางกรณีที่ทำได้ดีหรือบางกรณีที่ทำไม่ได้ดีเช่นการวิ่งตรงหรือการเลี้ยว

การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนจึงเป็นอีกวิธีที่น่าสนใจเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งโดยออกแบบให้มีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.12 ลำดับการทำงานของกระบวนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวน

การทำงานจะเหมือนในหัวข้อที่ 4.4 แต่เพิ่มการคำนวณค่าความแปรปรวนร่วมของระบบ (R_k) และ ICP (Q_k) ดังในรูปที่ 4.12

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้ได้นำเสนอถึงการทดลองและผลการทดลองโดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลองตามที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

5.1 การทดลองเพื่อวัดแรงยึดเกาะของแม่เหล็ก

5.1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบแรงแม่เหล็กที่เพียงพอของหุ่นยนต์สำหรับการยึดเกาะกับท่อผนัง (Water wall tube) ภายในหม้อน้ำโดยไม่เกิดการลื่นไถลและความสามารถในการเคลื่อนที่

5.1.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการทดสอบวัดแรงแม่เหล็กของ อุปกรณ์สร้างการยึดเกาะของหุ่นยนต์ซึ่งสัมผัสกับตัวอย่างของท่อผนังหม้อน้ำของชุดการเคลื่อนที่ด้วยสายพาน ได้แก่ แม่เหล็กแม่เหล็ก ชุดแม่เหล็กแผ่น และการเคลื่อนที่แนวขวาง ได้แก่ ล้อแม่เหล็ก ชุดแม่เหล็กแผ่น โดยอุปกรณ์ยึดเกาะทั้ง 4 จะถูกวางในระดับหรือลักษณะเดียวกับหุ่นยนต์ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 การหาค่าแรงยึดเกาะแม่เหล็กกระทำโดยวัดแรงดึงด้วยตราชั่งอิเล็กทรอนิกส์หน่วยเป็น กิโลกรัม จากนั้นทำการบันทึกค่ามากที่สุดที่อ่านได้จากตาชั่ง



(ก)

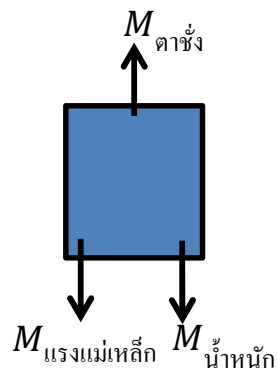


(ข)

รูปที่ 5.1 การวัดแรงยึดเกาะของชุดสายพาน (ก) แม่เหล็กหุ้มด้วยสายพาน (ข) แผ่นเหล็กหุ้มด้วยสายพาน



รูปที่ 5.2 การวัดแรงยึดเกาะของชุดเคลื่อนที่แนวขวาง (ก) ล้อแม่เหล็ก (ข) แผ่นเหล็กถูกขึ้นด้วยพลาสติกขนาด 6 มม. เพื่อให้ได้แรงดึงเสมือนติดบนหุ่นยนต์



รูปที่ 5.3 แรงที่มีผลต่อการทดลอง

การดึงในลักษณะแนวตั้งตามการทดลองที่กล่าวมาจะทำให้ได้แรงที่มีน้ำหนักของชุดแม่เหล็กมาเกี่ยวข้องกับรูปที่ 5.3 ซึ่งเมื่อได้ค่าน้ำหนักจากตาชั่งจะต้องลบค่าน้ำหนักของชุดแม่เหล็กออกด้วยถึงจะได้ค่าแรงยึดเกาะของแม่เหล็กที่แท้จริงมา

5.1.3 ผลการทดลอง

ค่าน้ำหนักยึดเกาะของอุปกรณ์ต่างๆเมื่อสัมผัสกับผิวที่ถูกแสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งเทียบเป็นหน่วยของมวลคือ กิโลกรัม ค่าเฉลี่ยของแรงจากการทดลองวัดซ้ำ 5 ครั้ง ในแต่ละอุปกรณ์ คือ มู่เลย์เท่ากับ 9.44 กิโลกรัม แม่เหล็กแผ่นชุดสายพานเท่ากับ 5.68 กิโลกรัม ล้อแม่เหล็กเท่ากับ 7.5 กิโลกรัม แม่เหล็กแผ่นการเคลื่อนที่แนวขวางเท่ากับ 3.12 กิโลกรัม

ตารางที่ 5.1 แสดงน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่ง

		$M_{\text{ตั่ง}}$ (กิโลกรัม)					
		1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ชุดสายพาน	มู่เลย์	9.8	10.5	9.9	10.1	9.2	9.90
	แม่เหล็ก	5.7	5.6	5.8	5.4	5.9	5.68
ชุดการเคลื่อนที่ แนวขวาง	ล้อแม่เหล็ก	8.2	8.0	7.8	7.9	8.5	8.08
	แม่เหล็ก	3.0	2.8	3.1	3.2	3.55	3.12



รูปที่ 5.4 หุ่นยนต์สำรวจหม้อไอน้ำขณะติดอยู่กับฐานทดสอบท่อผนัง

5.1.4 สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าที่ใช้ในการคำนวณแรงยึดเกาะ

		$M_{\text{น้ำหนัก}}$ (กิโลกรัม)	$M_{\text{ตาชั่ง}}$ (กิโลกรัม)	$M_{\text{แม่เหล็ก}}$ (กิโลกรัม)	F_{Magnet} (นิวตัน)
ชุดสายพาน	มู่เลย์	2.00	9.9	7.90	77.49
	แม่เหล็ก	0.8	5.68	4.88	47.87
ชุดการเคลื่อนที่	ล้อแม่เหล็ก	0.8	8.08	7.28	71.42
แนวขวาง	แม่เหล็ก	0.4	3.12	2.72	26.68

$$\sum_i^n (\mu F_{\text{Magnet}}) > mg \quad (4.1)$$

จากค่าน้ำหนักของหุ่นยนต์ (m) ที่ได้ 27 กิโลกรัมมีค่า mg เท่ากับ 264 นิวตันและการคำนวณแรงที่ชุดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

แรงรวมชุดการเคลื่อนที่ด้วยสายพาน $\sum_i^n (\mu F_{\text{Magnet}})$ จากตารางที่ 5.2 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ระหว่าง Polyurethane กับ Steel เท่ากับ 0.7 มีค่าเท่ากับ $(0.7 \times 77.49) + (0.7 \times 77.49) + (0.7 \times 77.49) + (0.7 \times 77.49) + (0.7 \times 47.87) + (0.7 \times 47.87) = 284$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของหุ่นยนต์(mg)จะได้ผลต่างของแรงยึดเกาะของแม่เหล็กมีค่ามากกว่าเท่ากับ 20 นิวตัน ดังนั้นแรงเสียดทานจึงมีค่ามากพอซึ่งทำให้หุ่นยนต์ไม่ไถลลงดังรูปที่ 5.4 และการทดลองวิ่งแนวสายพาน หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีในแนวไปหน้าถอยหลังไม่หลุดจากกำแพง แต่มีความลำบากในการเลี้ยวที่ต้องใช้วงเลี้ยวแล้วค่อนข้างมากเนื่องจากการไถลของสายพาน

แรงรวมชุดการเคลื่อนที่แนวขวาง $\sum_i^n (\mu F_{\text{Magnet}})$ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ระหว่าง Natural Rubber กับ Steel เท่ากับ 0.8 มีค่าเท่ากับ $(0.8 \times 71.42) + (0.8 \times 71.42) + (0.8 \times 71.42) + (0.8 \times 71.42) + (0.8 \times 26.68) + (0.8 \times 26.68) = 271$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำหนักของหุ่นยนต์(mg)จะได้ผลต่างของแรงยึดเกาะของแม่เหล็กมีค่ามากกว่าเท่ากับ 7 นิวตัน ดังนั้นแรงเสียดทานจึงมีค่ามากพอซึ่งทำให้หุ่นยนต์ไม่ไถลลง และการทดลองวิ่ง หุ่นยนต์สามารถเกาะกำแพงได้เมื่ออยู่นิ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ในบางสถานการณ์หุ่นยนต์หลุดออกจากท้องผนัง เนื่องจากลักษณะที่เป็นลูกคลื่นของกำแพงและล้อที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำให้มีบางลักษณะที่ล้อลอยมีผลให้แรงแม่เหล็กลดลง

5.2 การทดลองการระบุตำแหน่งกับจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmarks) ด้วยวิธี ICP บนพื้นระนาบ

5.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

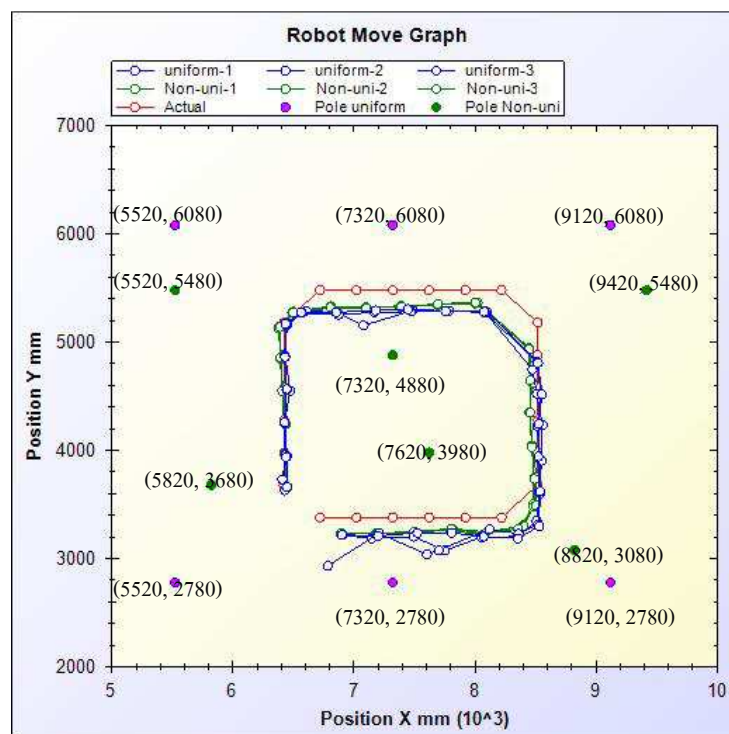
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการระบุตำแหน่งกับจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmarks) ด้วยวิธี ICP ตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 และวิเคราะห์ผลกระทบของลักษณะการวางจุดสังเกตเพิ่มเติมว่ามีผลต่อการระบุตำแหน่งอย่างไร

5.2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองขั้นตอนแรกเพื่อทดสอบความสามารถของวิธีการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์จึงเป็นการทดลองบนพื้นราบเนื่องจากฐานทดสอบท้องฟ้าที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีขนาดจำกัด ในการทดลองใช้เสาจำนวน 6 เสา วางในลักษณะ Uniform และ Non-uniform ตามหัวข้อที่ 4.3 เพื่อทดสอบสมมติฐานว่ารูปแบบการวางเสานั้นมีผลต่อการระบุตำแหน่งหรือไม่ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละรูปแบบของการวางเสา พื้นที่ใช้ในการทดลองประมาณ 3.4×3.7 เมตร ตำแหน่งการวางเสาดังรูปที่ 5.5 หน่วยมิลลิเมตร

5.2.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองตำแหน่งที่เก็บได้ของการวางเสาทั้งสองรูปแบบถูกแสดงดังรูปที่ 5.4 และคำนวณค่า error ของทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.5 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP กับจุดสังเกตเพิ่มเติมลักษณะ Uniform และ Non-uniform

ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP กับจุดสังเกตเพิ่มเติมแบบ Uniform และ Non-uniform

error	ครั้งที่ 1 (mm)	ครั้งที่ 2 (mm)	ครั้งที่ 3 (mm)	เฉลี่ย (mm)
Uniform	227	241	241	236.3
Non- Uniform	187	191	191	189.6

5.2.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองตารางที่ 5.3 พบว่าลักษณะการวางจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmarks) นั้นมีผลต่อการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ซึ่งการวาง Non-uniform มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าโดยการวางเสาแบบ Uniform มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 236.3 mm และ Non-Uniform เท่ากับ 189.6 mm ซึ่งความแตกต่างกัน 47 mm มีสาเหตุจากการวางเสาแบบ Uniform มีลักษณะการกระจายตัวเท่าๆกันหมดทำให้มีเอกลักษณ์ในแต่ละตำแหน่งบนพื้นที่จริงเท่ากัน ส่วนการวางเสาแบบ Non-Uniform จะมีเอกลักษณ์ในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันออกไปทำให้การระบุตำแหน่งแม่นยำมากขึ้น

5.3 การทดลองการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF (Extended Kalman Filter)

5.3.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF และวิเคราะห์ผลของการระบุตำแหน่งที่ได้

5.3.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนแรกทดลองหาค่าความแปรปรวน σ_L , σ_r จากการวิ่งของหุ่นยนต์โดยวัดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 mm/sec เป็นเวลา 2 วินาทีแล้วทำการวัดระยะทาง

ขั้นตอนที่สองทำการทดสอบการระบุตำแหน่งบนพื้นราบ โดยผู้ทดสอบได้ทำการวางเสาจำนวน 8 เสาในลักษณะ Uniform ทำการเคลื่อนที่บนพื้นราบเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีพื้นที่การทดลองประมาณ 6 x 3 เมตร โดยมีระยะห่างเสาประมาณ 2 เมตรวางที่พิกัดต่างๆดังรูปที่ 5.8 และหุ่นยนต์ดังรูปที่ 5.6 โดยการกำหนดค่าความแปรปรวนของการระบุตำแหน่งด้วย ICP เป็นค่าคงที่ $Q_t =$

$$\begin{bmatrix} 236 & 0 & 0 \\ 0 & 236 & 0 \\ 0 & 0 & 0.174 \end{bmatrix}$$

ซึ่งได้จากผลการทดลองที่ 5.2

ขั้นตอนที่สามทำการทดสอบการระบุตำแหน่งบนพื้นดังรูปที่ 5.7 โดยหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในลักษณะเป็นตัว L เนื่องจากมีพื้นที่จำกัดโดยใช้ค่าตัวแปรต่างๆเช่นเดียวกับในขั้นตอนสอง มีระยะการวางเสาดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.6 พื้นที่ในการวิ่งทดสอบการระบุตำแหน่งบนพื้นราบ



รูปที่ 5.7 พื้นที่ในการวิ่งทดสอบการระบุตำแหน่งบนท่อผนัง

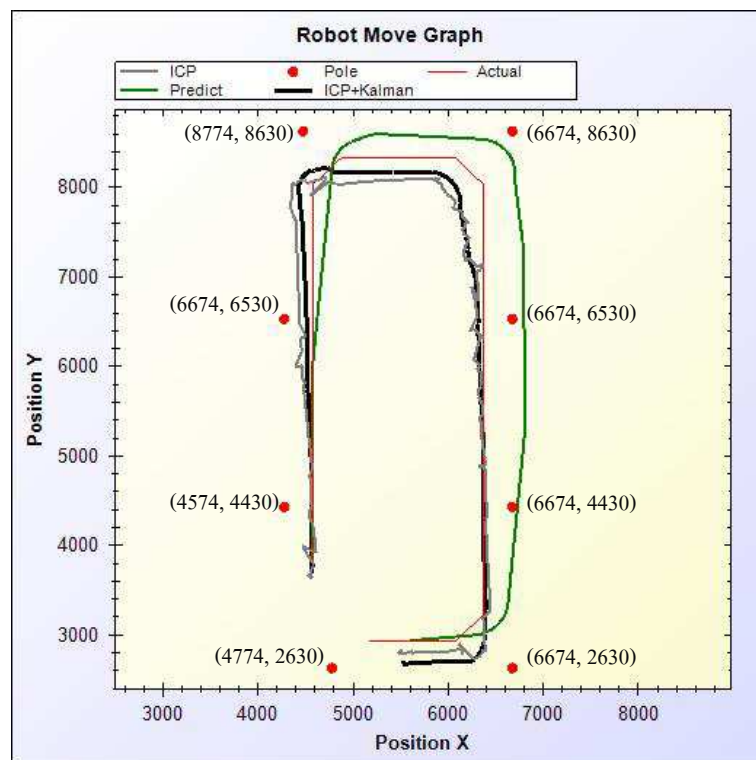
5.3.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อหาความผิดพลาดจากการสั่งความเร็วทางล้อซ้ายและล้อขวาที่ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 mm/sec เป็นเวลา 2 วินาที เพื่อหาค่าความผิดพลาดไปแทนค่า σ_l , σ_r ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.4 โดยเลือกใช้ค่าที่มีค่า error มากที่สุดคือ 5 mm

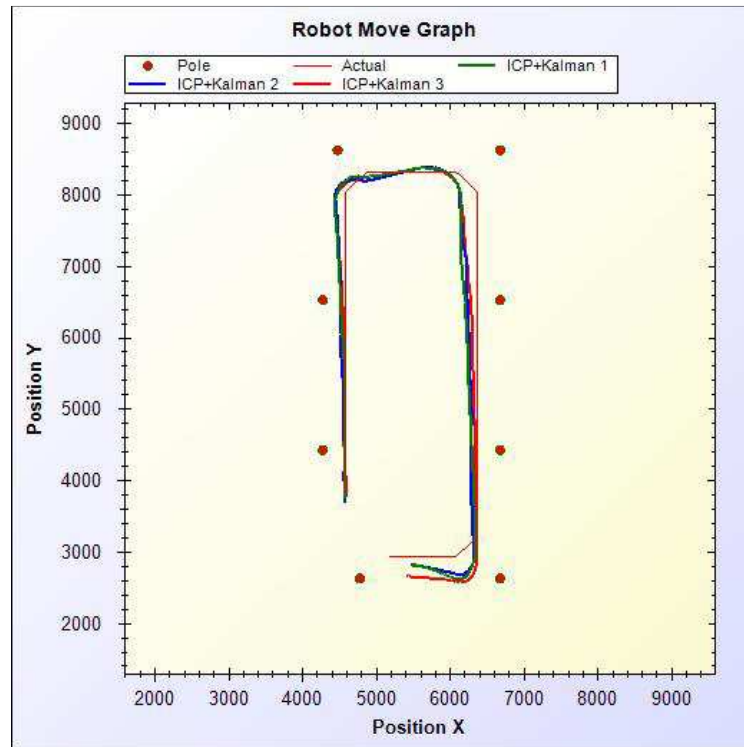
ตารางที่ 5.4 ทดลองวิ่งด้วยความเร็ว 150 mm/sec เวลา 2 วินาที

	ระยะทางครั้งที่ (mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ระยะทาง	296	303	300	299	305	30	304	303	305	302
ความผิดพลาด	-4	3	0	-1	5	0	4	3	5	2

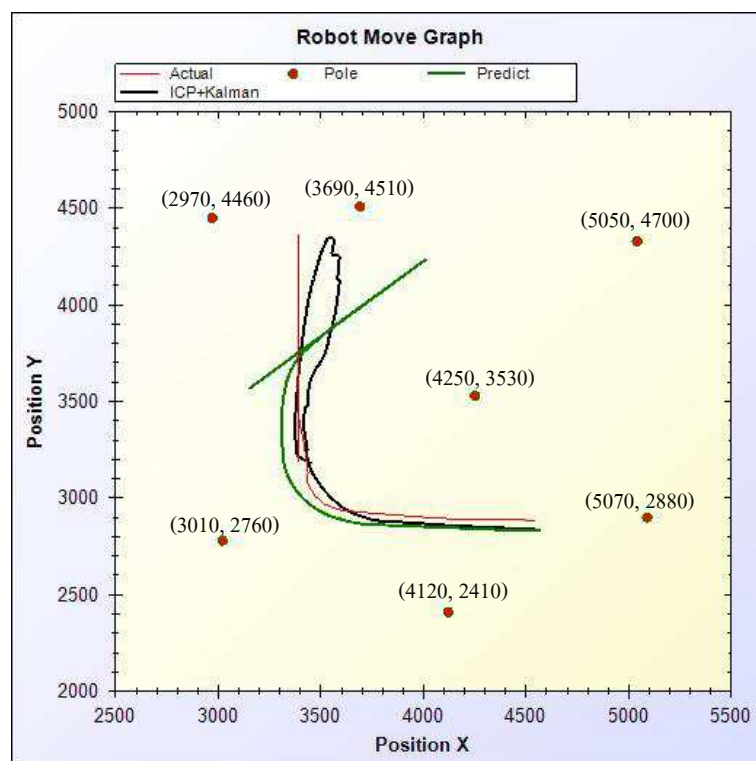
จากการทดลองระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.8 สำหรับการทดสอบบนพื้นราบและทดลองซ้ำอีก 3 ครั้งดังรูปที่ 5.9 สำหรับการทดสอบบนท่อผนังดังรูปที่ 5.10 และทดลองซ้ำ 3 ครั้งดังรูปที่ 5.11 โดยจุดสีแดงคือเสา ส่วนเส้นสีแดงคือเส้นทางจริงที่หุ่นยนต์วิ่ง (Actual) เส้นสีเทาคือตำแหน่งที่ได้จากระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP เส้นสีเขียวคือเส้นที่ได้จากการระบุตำแหน่งล่วงหน้าอย่างเดียว (Predict) เส้นสีดำคือเส้นทางที่ได้จาก ICP ร่วมกับ EKF



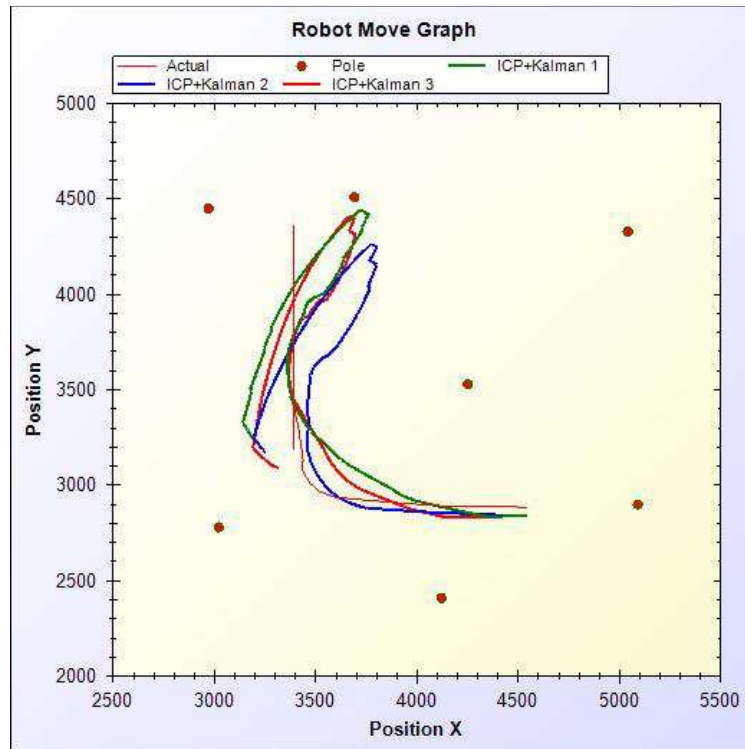
รูปที่ 5.8 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนพื้นราบ



รูปที่ 5.9 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนพื้นราบ 3 ครั้ง



รูปที่ 5.10 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนท่อผนัง



รูปที่ 5.11 ผลการทดลองระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ EKF บนท่อผนัง 3 ครั้ง

5.3.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบหม้อไอน้ำบนพื้นราบด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของตัวเองได้และมีความราบเรียบมากขึ้น เมื่อนำวิธี EKF มาใช้ โดยมีค่าความผิดพลาดประมาณ 200 mm ซึ่งเกิดขึ้นจากการระบุตำแหน่งโดยวิธี ICP บางตำแหน่งนั้นมีความคลาดเคลื่อนมากอันเนื่องมาจากจุดที่เป็นจุดสำคัญน้อย (Pole) ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบหม้อไอน้ำบนพื้นท่อผนังด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF มีค่าความผิดพลาดมากเนื่องจากขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนเกิดการไถลที่ล้อสายพานมาก และค่าความแปรปรวน (Covariant) ในขั้นตอน Prediction ขณะเคลื่อนนั้นมีค่าคงเดิมทำให้ผิดพลาดมาก และเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าวิธี Predict กับ ICP มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน คือ ICP สามารถทำงานได้ดีในขณะที่วิ่งเป็นเส้นตรงแต่ขณะเคลื่อนมีความผิดพลาดมากดังสรุปตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 สรุปข้อดีข้อเสียของ การระบุตำแหน่งล่วงหน้า (Prediction) และ (ICP) บนท่อผนัง

	ICP	Prediction
ขณะเลี้ยว	สามารถทำงานได้ดี	มีความผิดพลาดมาก
ขณะวิ่งตรง	ตำแหน่งมีการแกว่ง	สามารถทำงานได้ดี

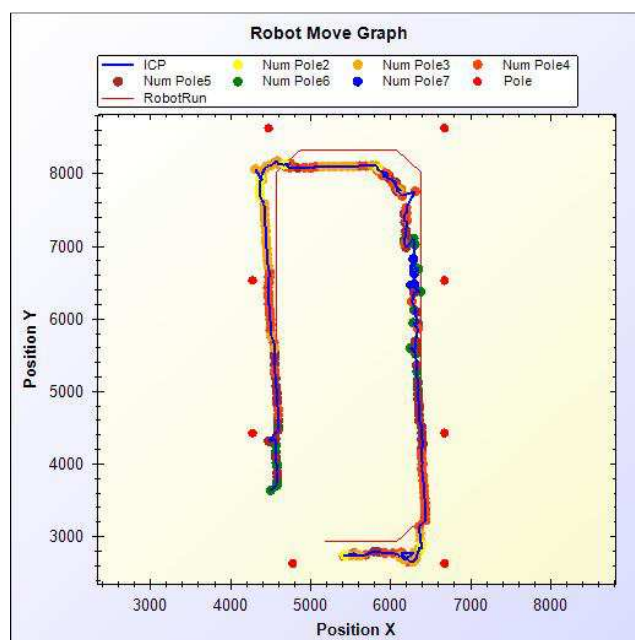
5.4 การทดลองการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนร่วม (Covariant)

5.4.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมมุติฐานตามหัวข้อที่ 4.5 การระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนร่วม (Covariant) ของการระบุตำแหน่งล่วงหน้า (R_k) และ ICP (Q_k) ตามลักษณะการเดิน และศึกษาวิเคราะห์ผลของการระบุตำแหน่งซึ่งได้จากวิธีการนี้

5.4.2 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 5.3 และเพิ่มเติมการปรับค่าความแปรปรวนร่วม (Covariant) ตามลักษณะการเดิน โดยค่า Q_k ถูกกำหนดให้มีค่าแปรผกผันตามจำนวนจุดสังเกตดังสมการที่ 5.1 ซึ่งได้จากการ Trial Error ค่าความผิดพลาดจากรูปที่ 5.12 ถูกแสดงดังตารางที่ 5.6 ส่วนค่า $Q_{k\theta}$ กำหนดให้เท่ากับ 5 องศา การทดลองในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็นสองขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกทดลองปรับค่าความแปรปรวนของวิธี ICP (Q_k) อย่างเดียว และขั้นตอนที่สองทดลองปรับค่าความแปรปรวนทั้งสองแบบ



รูปที่ 5.12 แสดงจำนวนจุดสังเกตที่หุ่นยนต์เจอในแต่ละตำแหน่งในการเดินด้วยวิธี ICP

$$Q_{k_x}, Q_{k_y} = \left\{ \begin{array}{c} \max \\ 0.4(9-p)^2 \\ \min \end{array} \middle| \begin{array}{c} p \leq 2 \\ 2 < P < 7 \\ P \geq 7 \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

P คือจำนวนจุดสังเกต (Pole)

ตารางที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดที่จำนวนจุดสังเกตต่างๆ

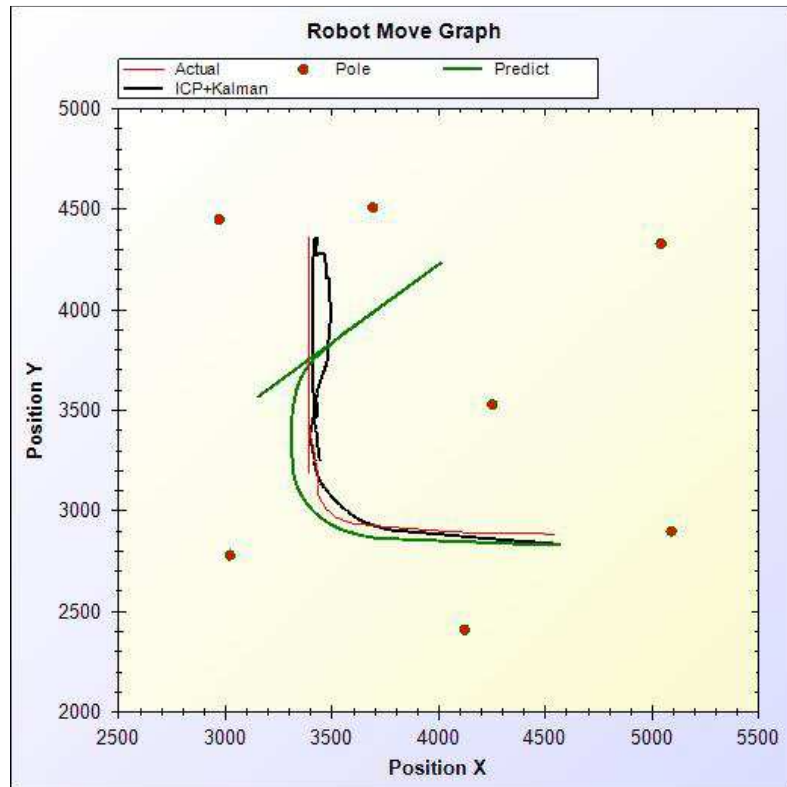
	จำนวนจุดสังเกตที่พบ(mm)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
ค่าความผิดพลาดที่ได้จากกราฟ	-	-	211	156	89	50	น้อย	น้อย	น้อย
ค่าความผิดพลาดที่ได้จากสมการ 4.1	มาก	มาก	มาก	144	100	64	36	น้อย	น้อย

ค่า σ_l , σ_r ถูกกำหนดดังสมการที่ 5.2 โดยมีค่า α_1 , α_2 ในการปรับว่าจะให้สถานะ การเคลื่อนที่ใดมีผลต่อระบบโดย α_1 จะมีผลต่อหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงโดยกำหนดเท่ากับ 0.05 เมื่อคำนวณแล้วจะเท่ากับในการทดลองที่ 5.3, α_2 จะมีผลต่อหุ่นยนต์ขณะทำการเลี้ยวซึ่งต้องหาค่าที่เหมาะสมจากการทดลองโดยการปรับที่ค่า α_2 แตกต่างกันไปนี้ 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.035, 0.04, และ 0.045 เพื่อดูแนวโน้มและหาค่าเหมาะสมที่สุด

$$\sigma_l = (\alpha_1 s_l)^2 + (\alpha_2 (s_l - s_r))^2, \sigma_r = (\alpha_1 s_r)^2 + (\alpha_2 (s_l - s_r))^2 \quad (5.2)$$

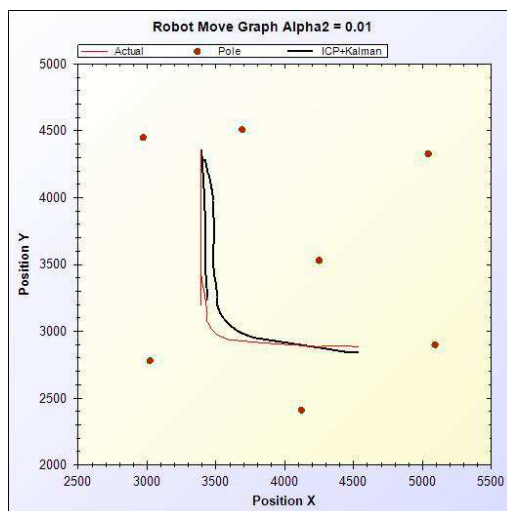
5.4.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากขั้นตอนแรกซึ่งมีการปรับค่าความแปรปรวนร่วม (Covariant) ของวิธี ICP ตามจำนวนจุดสังเกตโดยใช้ค่าจากสมการที่ 5.1 สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 5.13

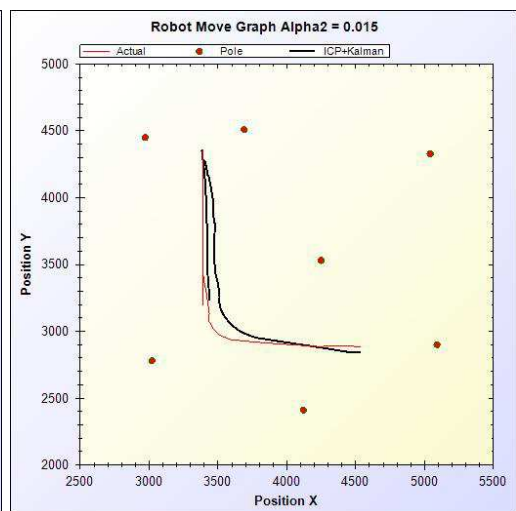


รูปที่ 5.13 ผลการปรับค่า Covariant ของวิธี ICP

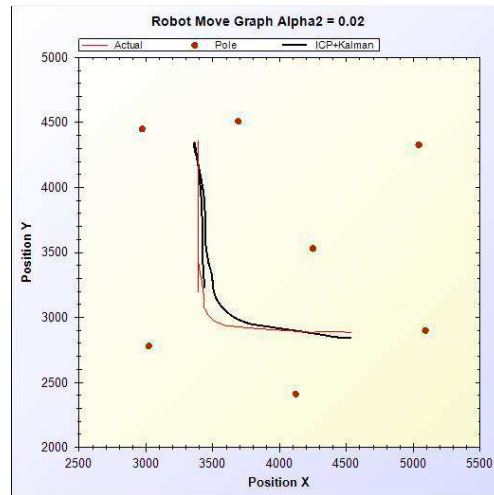
ผลการทดลองขั้นตอนที่สองปรับค่าความแปรปรวน (Covariant) ในการระบุตำแหน่งโดยปรับค่า α_2 เท่ากับ 0.01 0.015 0.02 0.025 0.03 0.035 0.04 0.045 ดังแสดงในรูปที่ 5.14 (ก) (ข) (ค) (ง) (จ) (ช) (ฉ) (ว)ตามลำดับ



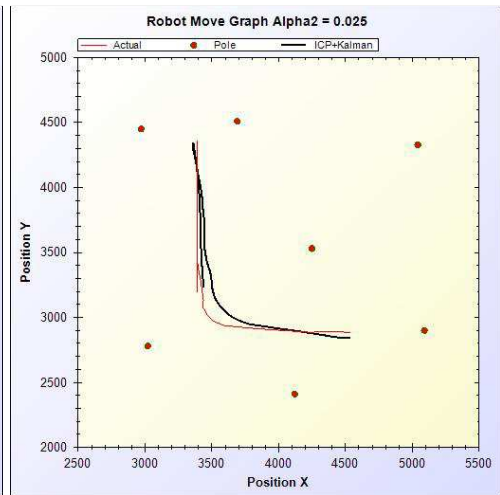
(ก)



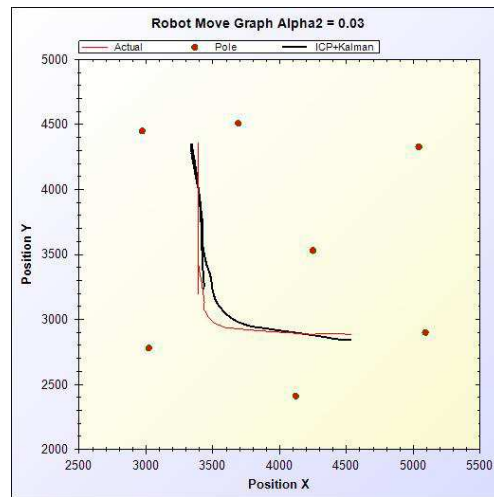
(ข)



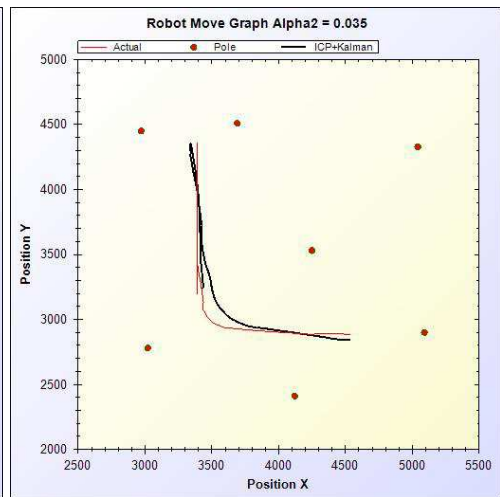
(ก)



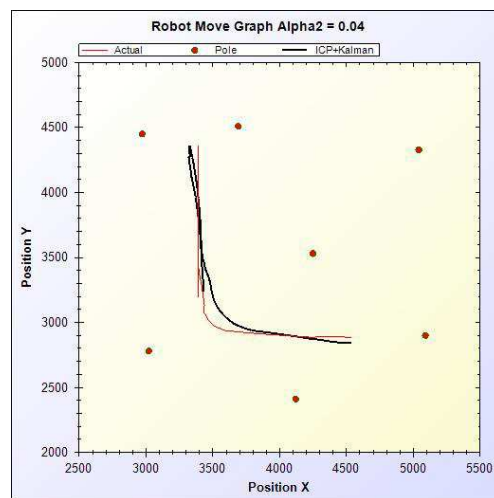
(ง)



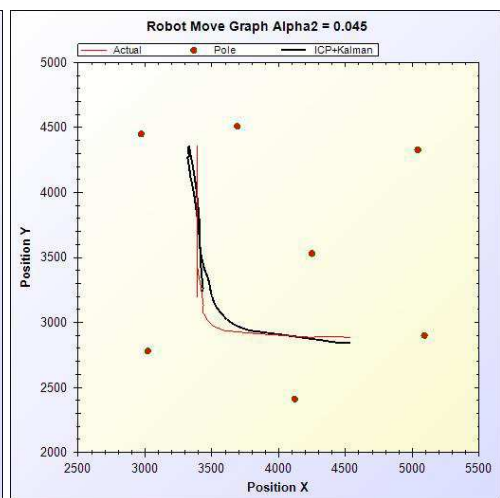
(จ)



(ช)

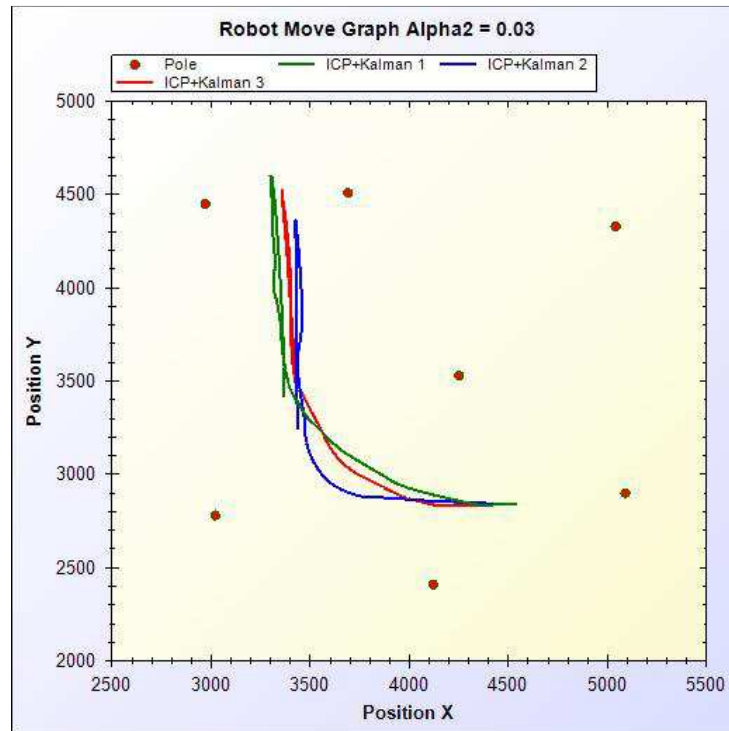


(ฉ)



(ค)

รูปที่ 5.14 ผลการปรับค่า Covariant ของวิธี ICP และการระบุตำแหน่งล่วงหน้าโดยใช้ค่า α_2 เท่ากับ 0.01(ก) 0.015(ข) 0.02(ค) 0.025(ง) 0.03(จ) 0.035(ช) 0.04(ฉ) 0.045(ค)



รูปที่ 5.15 ทดลองการระบุตำแหน่ง 3 ครั้งด้วยค่า α_2 เท่ากับ 0.03

5.4.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในขั้นตอนแรก กรณีมีการปรับค่าความแปรปรวนของวิธี ICP (Q_k) แสดงในรูปที่ 5.13 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าการระบุตำแหน่งโดยการปรับค่าความแปรปรวนร่วมให้ผลที่แม่นยำกว่า แสดงให้เห็นว่าการปรับค่า Q_k ขณะเคลื่อนที่นั้นมีผลต่อการระบุตำแหน่ง

ผลการทดลองในขั้นตอนที่สอง กรณีปรับค่าความแปรปรวนของวิธี ICP (Q_k) ร่วมกับการระบุตำแหน่งล่วงหน้า α_2 ในสมการที่ 5.2 ผลการระบุตำแหน่งถูกแสดงดังรูปที่ 5.13 ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปที่ 5.12 จะเห็นว่าค่าการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ ค่า α_2 จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.03 ถ้า $\alpha_2 < 0.03$ แนวโน้มของการระบุตำแหน่งจะเป็นเช่นเดียวกับผลการระบุตำแหน่งในรูปที่ 5.13 ซึ่งมีความสมเหตุสมผลเพราะความน่าเชื่อถือจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับ ค่าที่ได้จากการ Prediction มากขึ้น และถ้า $\alpha_2 > 0.03$ ความน่าเชื่อถือจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลของการระบุตำแหน่งด้วย ICP

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างและการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์สำรวจหมอน้ำโรงผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบการเคลื่อนของหุ่นยนต์ในแนวดิ่งบนพื้นผิวซึ่งที่ลักษณะเป็นกำแพงทอภายในหมอน้ำพร้อมทั้งทำการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เพื่อแสดงตำแหน่งจุดที่ทำการตรวจสอบแล้วเป็นจุดที่มีปัญหาต้องแก้ไข

งานวิจัยนี้ได้สร้างหุ่นยนต์ซึ่งมีโครงสร้างการเคลื่อนที่โดยอาศัยแรงยึดเกาะของแม่เหล็กถาวร (Neodymium Magnet) มีชุดการขับเคลื่อน 2 ชุดคือชุดเคลื่อนที่ปกติด้วยสายพานและชุดการเคลื่อนที่แนวขวาง โดยอาศัยแรงมอเตอร์ยกขึ้นสลับการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แบบ จากการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ชุดการเคลื่อนที่ด้วยสายพานสามารถเกาะกำแพงทอและเคลื่อนที่ได้ แต่การเลี้ยวยังต้องอาศัยวงเลี้ยวค่อนข้างมากเพราะเกิดจากลักษณะการเลี้ยวด้วยความเร็วล้อที่ต่างกันทำให้เกิดการไถลของสายพาน ส่วนการเคลื่อนที่แนวขวางด้วยล้อแม่เหล็กนั้นก็มีบางลักษณะของหุ่นยนต์ที่ทำให้หุ่นยนต์หลุดจากกำแพงเนื่องจากลักษณะที่เป็นล้อทรงกระบอกกับกำแพงที่เป็นลูกคลื่นทำให้มีบางกรณีที่ล้อบางล้อลอยหรือสัมผัสไม่เต็มทำให้แรงยึดเกาะน้อยลงและหลุดจากกำแพงซึ่งจะต้องปรับปรุงโดยการเพิ่มแรงและจุดสัมผัสแม่เหล็ก

ส่วนของการระบุตำแหน่งกับจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmark) ด้วยวิธี ICP หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งได้แต่จุดที่ได้มีการแกว่งและความผิดพลาดจะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดสังเกตที่เจอซึ่งถ้าเจอน้อยก็就会有ความผิดพลาดมาก และลักษณะการวางจุดสังเกตแบบ uniform และ Non-uniform ซึ่ง Non-uniform ให้ผลที่ดีกว่า ส่วนการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP ร่วมกับ EKF (Extended Kalman Filter) สามารถทำได้ดีบนพื้นระนาบมีความราบเรียบโดยให้ผลใกล้เคียงเส้นทางจริงมากขึ้นแต่มีความคลาดเคลื่อนมากเมื่อทดสอบบนผิวกำแพงทอ และ ICP ร่วมกับ EKF แบบปรับค่าความแปรปรวนร่วม ให้ผลการระบุตำแหน่งได้ดีที่สุดจากวิธีการระบุตำแหน่งทั้ง 3 แบบเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนกำแพงทอ ดังนั้นจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบกำแพงทอ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการระบุตำแหน่งวิธีนี้คือค่า ความแปรปรวน (Covariant) ของการระบุตำแหน่งล่วงหน้า ($\sigma_{r,t}$) และ ICP (Q_t)

6.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนกำแพงท่ออาจจะต้องคำนึงถึงฝุ่นละอองกราบ slag บนผิวท่อ และการเพิ่มแรงยึดเกาะของแม่เหล็กก็จะช่วยให้การเคลื่อนที่บนกำแพงท่อนั้นมั่นคงยิ่งขึ้นและการระบุตำแหน่งในงานวิจัยนี้ยังอาศัยจุดสังเกตที่วางโดยผู้ใช้งานซึ่งมีความลำบากเมื่อนำไปใช้จริง การวางจุดสังเกตของหุ่นยนต์โดยหุ่นยนต์ยังเป็นอีกประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจและควรทำการศึกษาและวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. S.Park, H.D.Jeong , and Z.S.Lim, “Development of Mobile Robot Systems for Automatic Diagnosis of Boiler Tubes Fossil Power Plants and Large size Pipelines” **,Proc. of Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference** , Vol. 2, pp. 1880-1885.
2. Badodkar D.N., Singh N.K., Dadal N.S, and Singh M. “EMAT Integrated with Vertical Climbing robot for Boiler Tube Inspection” **Proc. of national Seminar a exhibition on Non – Destructive Evaluation, NDE.**
3. L.Xuegin,Q.Rongfu, C.Gang, and H.Fuzhen, “ The design of an inspection robot for boiler tubes inspection ” **Proc. Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI '09. International Conference**, pp.313-317.
4. X.Gao, D.Xu, Y.Wang, H.pan, and W.Shen, “Multifunctional Robot to Maintain boiler Water-Cooling Tubes” **Robotica (2009) volume 27**, pp. 941-948, 2009.
5. X.Ga, Z.Jiang, J.Gao, D.Xu, Y.Wang, and H.Pan, “ Boiler Maintenance Robot With Multi –operational Schema” **Proc. Mechatronics and Automation, 2008. ICMA 2008. IEEE International Conference**, pp. 610-615.
6. P. Besl and N. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” **IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 14, no. 2, pp.239-256, 1992.
7. Censi, Andrea, “An ICP variant using a point-to-line metric” **Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference**, pp.19-25, 2008.
8. S. Hong, H. Ko and J. Kim, “VICP: velocity updating iterative closest point algorithm”, **Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 1893-1898, 2010.
9. S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm", in **Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)**, pp.145-152 2001.
10. Claus Brenner, 2014, **iterative closest point algorithm** [Online], Available: <http://http://www.clausbrenner.de/slam.html>, [2014, February 12].
11. Kalman, R.E. March 1960. **A new approach to linear filtering and prediction problems**, Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering, pp.167-179.

12. L.Teslic, G.Klancar, and I.Skrjanc, "Kalman-Filtering-based localization of a mobile robot with a LRF in a simulated 2D environment" **Proc. Electrotechnical Conference, 2008. MELECON 2008. The 14th IEEE Mediterranean**, pp.316-322
13. Seong-Jin Kim, Byung-Kook Kim, "Dynamic localization based on EKF for indoor mobile robots using discontinuous ultrasonic distance measurements," **Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference**, pp.1912-1917.
14. S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, Eds., **Probabilistic Robotics**. MIT Press, pp.33-65, 2008.
15. A.Boonyaprapasorn,K.Thungod,R.Silapunt,T.Maneewarn "Studies of total adhesive force of multiple magnet wheel for a climbing robot " **Proceeding of the Sixteenth International Conference on Climbing and Walking Robot**,pp.578-584,2013.

ภาคผนวก ก

เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

2014 TRS Conference on Robotics and Industrial Technology (CRIT 2014)

ในวันที่ 12-13 มิถุนายน 2557 ณ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบหม้อไอน้ำด้วยวิธี ICP และ Kalman filter

คณศ ถุงออด และ ธวิดา มณีวรรณ

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หุ่่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9339 โทรสาร 0-2470-9703

Kaned thung-od¹ and Thavida Maneewarn²

Institute of Field Robotics , King Mongkut's University of Technology Thonburi,

Thungkru, Bangkok, 10140, Thailand

Tel: 0-2470-9339, Fax: 0-2470-9703

¹skyline_aof@hotmail.com, ²praw@fibo.kumtt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบระบบขับเคลื่อนและการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบกำแพงท่อ(wall tube)ภายในหม้อไอน้ำโรงผลิตไฟฟ้า หุ่นยนต์ตรวจสอบนี้เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งโดยอาศัยการขับเคลื่อนของล้อสายพานซึ่งใช้แม่เหล็กถาวรในการยึดเกาะกำแพงท่อและเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆที่ต้องการตรวจสอบความผิดปกติของท่อ ระหว่างการเคลื่อนที่จึงจำเป็นต้องทำการระบุตำแหน่งตัวเองเพื่อใช้ในการบันทึกตำแหน่งของการตรวจสอบและระบุถึงจุดที่มีปัญหาความผิดปกติของท่อที่จะต้องมีการซ่อมแซมต่อไป

1.บทนำ

ในโรงไฟฟ้าพลังความร้อนนั้น หม้อน้ำถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ไอน้ำจากหม้อน้ำถูกนำไปใช้ปั่นกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ความเสียหายของหม้อน้ำเป็นสาเหตุหลักของการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดความเสียหายมูลค่ามหาศาล ดังนั้นการบำรุงรักษาหม้อน้ำ จึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อป้องกันความเสียหายที่ไม่คาดคิด ในการบำรุงรักษาหม้อน้ำ วิธีการที่สำคัญคือ การตรวจสอบสภาพทางกายภาพของท่อภายในหม้อน้ำอย่างสม่ำเสมอ โดยพิจารณาจากความหนาของท่อและสภาพด้านนอกของท่อ ทั้งจากการ

ใช้ภาพและอุปกรณ์การตรวจสอบแบบไม่ทำลายเช่น ultrasonic testing (UT)

ปัจจุบันการตรวจสอบกระทำโดยผู้ปฏิบัติงาน โดยตรงอาจมีข้อจำกัดต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตรวจสอบ เช่น การเข้าถึงตำแหน่งที่ค่อนข้างสูงจากพื้นมาก, ความล้าของผู้ปฏิบัติงานภายใต้อุณหภูมิและปริมาณฝุ่นละอองสูง การตรวจสอบโดยใช้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ลดเวลาในการทำงานรวมทั้งข้อจำกัดบางอย่างของการตรวจสอบกำแพงท่อได้

งานวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างหุ่นยนต์ตรวจสอบกำแพงท่อโดยใช้การตรวจสอบด้วยภาพและอุปกรณ์ตรวจสอบแบบไม่ทำลายเพื่อวัดความหนาของท่อ หุ่นยนต์ตรวจสอบท่อนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆภายในหม้อน้ำทั้งในแนวดิ่งและแนวระนาบ โดยระหว่างการเคลื่อนที่นั้นสามารถระบุตำแหน่งของตัวเองได้ เพื่อนำไปใช้ประกอบกับการบันทึกตำแหน่งความผิดปกติของท่อระหว่างการตรวจสอบโดยอุปกรณ์ตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งติดตั้งอยู่บนตัวหุ่นยนต์ ทำให้กระบวนการตรวจสอบนี้สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ กล่าวคือจำนวนตำแหน่งที่ได้รับการตรวจสอบที่ครอบคลุมมากขึ้นภายในระยะเวลาการทำงานที่สั้นลง อีกทั้งช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานสามารถควบคุมหุ่นยนต์จากทางไกลในจุดปฏิบัติงานที่ปลอดภัย และไม่ต้องมีการติดตั้งนั่งร้านภายในหม้อน้ำ

2. BOILER INSPECTION ROBOT

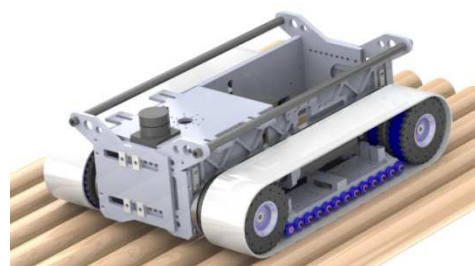
งานวิจัยที่เกี่ยวกับหุ่นยนต์สำรวจกำแพงท่อภายในหม้อไอน้ำส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ที่ใช้ในการตรวจสอบการสึกกร่อนของกำแพงท่อที่ตำแหน่งต่างๆภายในหม้อไอน้ำ โดยจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบเพื่อวัดความหนาเช่น UT บนตัวหุ่นยนต์ ระบบการขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ในงานวิจัยส่วนใหญ่อาศัยการสร้างแรงยึดเกาะจากแม่เหล็กถาวรเพื่อช่วยในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งบนพื้นผิวที่เป็นโลหะ ในงานวิจัยต่างๆจะมีการออกแบบลักษณะการวางแม่เหล็กที่แตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างเช่น Park S. et al. [1] 2002 ได้ออกแบบหุ่นยนต์ไต่กำแพงท่อโดยใช้หุ่นยนต์ที่มีลักษณะล้อกลมเป็นแม่เหล็ก ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ตรงตามแนวท่อและเลี้ยวไปยังท่อที่ติดกันได้ โดยการใช้ล้อหุ่นยนต์ที่เป็นแม่เหล็กจะได้แรงยึดเกาะมากเพราะมีระยะห่างระหว่างเหล็กกับแม่เหล็กลittle แต่แรงยึดเกาะจะมีลักษณะเป็นจุดทำให้เมื่อจุดลื่นนั้นหลุดจะไม่มีความยึดเกาะเหลืออีก งานวิจัยBadodkar, D. N. et.al [2] 2009 ใช้แม่เหล็กติดใต้ตัวหุ่นยนต์และใช้สายพานในการขับเคลื่อน การติดแม่เหล็กที่ตัวฐานของหุ่นยนต์จะได้แรงแม่เหล็กลittleกว่าแบบล้อ เพราะจะเกิดระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเหล็ก (air gap) แรงยึดเกาะของแม่เหล็กนั้นจะลดลงตามระยะห่างที่มากขึ้น แต่วิธีนี้จะมีข้อดีคือแรงแม่เหล็กที่ได้จากพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น (pole area) จะเพิ่มขึ้นกว่าการสัมผัสแบบจุด Xueqin, L. et al [3] 2009 ออกแบบล้อกลมที่มีความเว้าเข้ารูปตามแนวท่อและติดแม่เหล็กเพิ่มแรงยึดเกาะอีกชุดที่ฐานหุ่นยนต์ การเคลื่อนที่ที่เน้นการเคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นลงเป็นหลัก และ Gao, Xueshan et al [4] 2009, [5] 2008 ใช้สายพานเว้าเข้ารูปตามแนวท่อที่ระหว่างข้อต่อสายพานวางชั้นด้วยแม่เหล็กเพื่อทำให้สายพานมีแรงยึดเกาะกับกำแพง การออกแบบในลักษณะนี้จะทำให้การยึดเกาะมีเสถียรภาพมากขึ้น แต่ไม่สามารถเลี้ยวไต่บนกำแพงท่อ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นการติดตั้งแม่เหล็กถาวรจะสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือการทำล้อขับให้เป็นแม่เหล็ก และการติดแม่เหล็กที่ฐานหุ่นยนต์ ซึ่งการติดตั้งแต่ละแบบก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบให้หุ่นยนต์ซึ่งมีการขับเคลื่อนแบบสายพานนั้น มีการติดตั้งแม่เหล็กทั้งสองประเภท คือมีการฝังแม่เหล็กในมู่เล่ย์ของชุดสายพานและที่ฐานหุ่นยนต์ ระหว่างการเคลื่อนที่ก็จะมีแรงยึดเกาะจากทั้งแม่เหล็กที่มู่เล่ย์และฐานของหุ่นยนต์ประกอบกัน ดังแสดงในรูปที่ 1

2.1 Robot Design

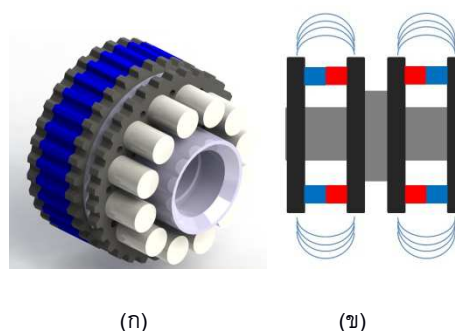
โครงสร้างของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ออกแบบให้การเคลื่อนที่เป็นรูปแบบสายพานเพื่อให้การเคลื่อนบนกำแพงท่อที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นนั้นราบเรียบ การวางแม่เหล็กจะวางใน 2 ลักษณะคือวางที่ใต้

ฐานของหุ่นยนต์และภายในตัวมู่เล่ย์ของสายพาน โดยจะใช้แม่เหล็กถาวรแบบ Neodymium



รูปที่ 1 หุ่นยนต์สำรวจกำแพงท่อภายในหม้อไอน้ำ

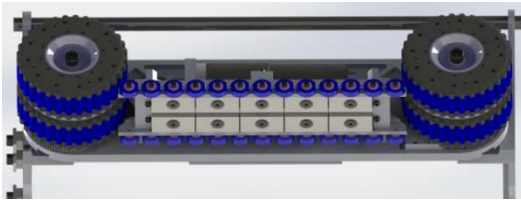
จากรูปที่ 2 แม่เหล็กรูปทรงกระบอกทรงกลมขนาดเล็กจำนวนมากจะถูกฝังไว้ในมู่เล่ย์ซึ่งขึ้นด้วยแผ่นเหล็กเพื่อทำให้แรงจากแม่เหล็กทรงกลมส่งผ่านมายังแผ่นเหล็กที่ประกบข้างเพื่อทำให้เกิดมู่เล่ย์ที่มีลักษณะเป็นแม่เหล็ก การเรียงตัวของแม่เหล็กทั้งสองชุดจะถูกวางให้มีขั้วในลักษณะที่ผลักกันตามงานวิจัย [6] เพื่อให้สนามแม่เหล็กพุ่งออกจากตรงกลางของมู่เล่ย์ ในรูปที่ 3 แสดงการนำแม่เหล็กถาวรซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีรูตรงกลาง โดยมีการแบ่งขั้วแม่เหล็กตามรูปที่ 3(ข) แผ่นแม่เหล็กนี้นำมาวางเรียงต่อกันภายใต้ฐานหุ่นยนต์ทำให้เกิดเป็นแผ่นแม่เหล็กช่วยในการยึดเกาะ อย่างไรก็ตามแรงยึดเกาะที่ได้จะลดลงตามระยะห่างระหว่างฐานของหุ่นยนต์กับพื้นกำแพงท่อที่เพิ่มขึ้น และจะเป็นการเหนี่ยวนำผ่านอากาศและสายพานยาง ทำให้ต้องมีการติดตั้งแผ่นแม่เหล็กเป็นจำนวนมากจึงจะได้แรงยึดเกาะมากพอสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวตั้ง



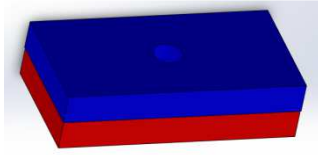
(ก)

(ข)

รูปที่ 2 (ก) มู่เล่สายพานหุ่นยนต์เสริมแม่เหล็ก (ข) การวางขั้วแม่เหล็กเพื่อให้สนามแม่เหล็กพุ่งออกตรงกลาง



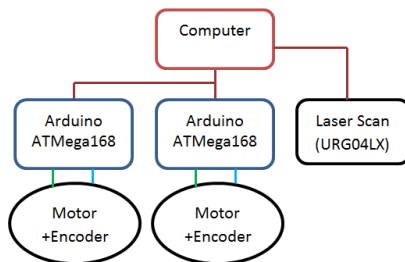
(ก)



(ข)

รูปที่ 3 (ก) ตำแหน่งติดตั้งแม่เหล็กที่ฐานของหุ่นยนต์ (ข) การแบ่งช่วงของแม่เหล็ก

2.1 Control system



รูปที่ 4 ระบบการควบคุมหุ่นยนต์

ระบบการควบคุมของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือระบบการควบคุมมอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนกับ ระบบการประมวลผลสำหรับเซนเซอร์ เซนเซอร์ที่ติดตั้งบนฐานหุ่นยนต์นี้ใช้เพื่อการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ เป็นเซนเซอร์วัดระยะทางประเภทเลเซอร์เรนจ์ไฟน์เดอร์ (laser rangefinder) รุ่น Hokuyo URG04LX ซึ่งจะส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ผ่านทางช่อง USB ส่วนของเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดความผิดปกติของท่อซึ่งประกอบด้วยกล้องและ Electromagnetic acoustic transducer (EMAT) จะยังไม่กล่าวถึงในบทความนี้

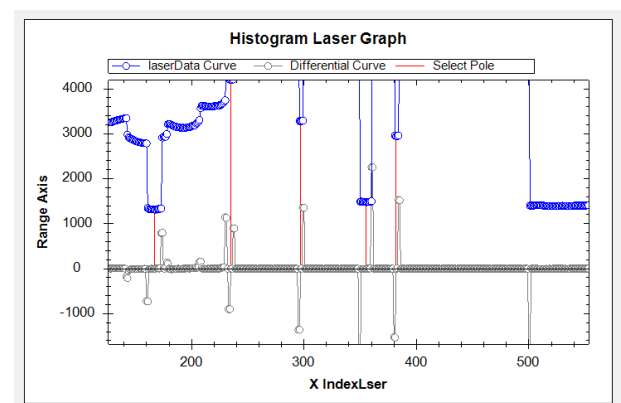
ในส่วนของระบบควบคุมมอเตอร์นั้นจะอาศัยการส่งค่าความเร็วที่ต้องการจากคอมพิวเตอร์ให้กับชุดควบคุมมอเตอร์ผ่านทางระบบบัส RS485 ชุดควบคุมมอเตอร์นั้นเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega168 ซึ่งจะควบคุมความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวโดยแยกอิสระต่อกัน ระบบควบคุมมอเตอร์นั้นจะรับสัญญาณจาก encoder ของมอเตอร์ (ที่ความละเอียด 256 pulse ต่อรอบ) เพื่อนำมาคำนวณเพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์

3. LOCALIZATION

สภาพแวดล้อมภายในหมอน้ำของโรงไฟฟ้านั้นมีลักษณะพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่โล่งกว้าง ทำให้มีจำนวนของจุดที่สามารถนำมาใช้เป็นจุดสังเกตโดยธรรมชาติ (natural landmarks) ภายในระยะที่เซนเซอร์วัดได้เพื่อการระบุตำแหน่งตัวเองค่อนข้างจำกัดหรืออาจไม่มีเลย งานวิจัยนี้จึงอาศัยการเพิ่มจุดสังเกตเพิ่มเติม (artificial landmarks) ขึ้นมา โดยการนำเสารูปทรงกระบอกไปติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งตัวเองได้ ซึ่งเสาเหล่านี้จะถูกออกแบบให้มีฐานเป็นแม่เหล็กเพื่อให้ง่ายในการติดตั้ง โดยตำแหน่งการวางเสาเพื่อเพิ่มจุดสังเกตในงานวิจัยนี้จะเป็นการกำหนดเองโดยผู้ใช้งาน

3.1 Landmark Detection

ข้อมูลที่อ่านได้จาก laser rangefinder ในแต่ละช่วงเวลาของการสแกนนั้นคือค่าระยะห่างระหว่างวัตถุกับเซนเซอร์ ณ มุมต่างๆที่เลเซอร์กวาดไป เมื่อนำค่าระยะที่อ่านได้เหล่านั้นมาพลอตกราฟจะได้กราฟดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงโดยวงกลมสีน้ำเงิน จากข้อมูลที่แสดงในกราฟนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อมีเสาอยู่ภายในระยะสแกนของเลเซอร์นั้น จะทำให้เกิดลักษณะเด่นในสัญญาณที่ได้จากข้อมูลของเลเซอร์ในหนึ่งคาบการสแกน กล่าวคือสัญญาณที่ได้จะมีค่าที่ลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการหาลักษณะเด่นของจุดสังเกตจากเสาที่สร้างขึ้นนี้ สามารถทำได้โดยการผ่านฟังก์ชัน differential (ดังแสดงด้วยกราฟเส้นสีเทา) เมื่อมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่า threshold ที่ตั้งไว้ในด้านลบและด้านบวกซึ่งมีระยะห่างกันไม่เกิน W_p ตามแสดงในอัลกอริทึม 1 ก็จะสามารถแยกแยะหาตำแหน่งของเสา (จุดสังเกตที่สร้างขึ้น) ได้



รูปที่ 5 กราฟแสดงการหาเสา สีน้ำเงินค่าที่ได้จากเลเซอร์สแกน, สีเทาผ่านการ Differential, สีแดงคือตำแหน่งเสา

อัลกอริทึม 1: การหาเสาตำแหน่งเสาจากเลเซอร์สแกน

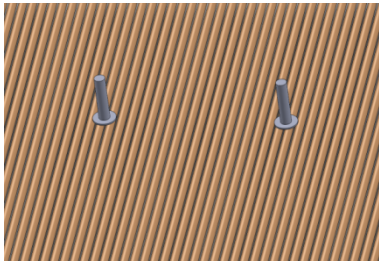
```

for l = 0 to Num laserData
    if (length laserData < -threshold)
        stateMem = true
    if(stateMem)
        mem length ,index Laser
        count++
    if(count>Wp)
        Clear memLaser,count
        stateMem = false
    if (length laserData > threshold)&&( stateMem=true)
        mempole
end for

```

3.2 Localization

เมื่อได้มีการเพิ่มจุดสังเกตในสิ่งแวดล้อมโดยการนำเสาไปติดตั้งภายในกำแพงท่อน้ำเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 6 ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณตำแหน่งที่เป็นไปได้ของหุ่นยนต์โดยอ้างอิงจากจุดสังเกตต่างๆ

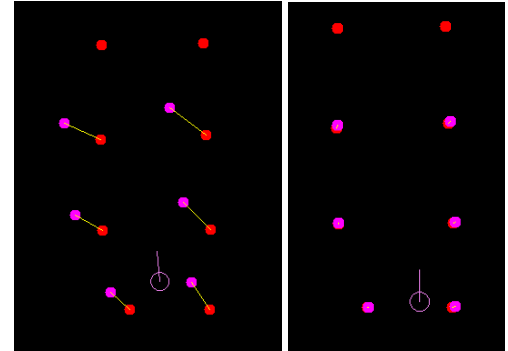


รูปที่ 6 การวางเสาเพิ่มภายในท่อน้ำเพื่อเป็นจุดสังเกตของหุ่นยนต์

Iterative Closest Point (ICP) algorithm เป็นวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดในสองกลุ่มข้อมูลซึ่งได้นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Besl และ Mckay ในปี 1992 [7] ในภายหลังได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ โดยได้มีการปรับปรุงวิธีการให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มาจากเซนเซอร์ของหุ่นยนต์และลักษณะเด่นของสิ่งแวดล้อม เช่น [8] [9] [10] วิธีการระบุตำแหน่งในงานวิจัยนี้ใช้ ICP อัลกอริทึมสำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างชุดของข้อมูลที่เป็นจุดในสองมิติในการระบุตำแหน่งเป็นหลัก เพราะลักษณะของข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์นั้นเป็นชุดข้อมูลสองมิติซึ่งมีจุดสังเกตเป็นเสาที่มีขนาดเท่ากันและวางในตำแหน่งที่ผู้ใช้งานเป็นผู้กำหนดหลักการของ ICP อัลกอริทึมคือการหาค่าผิดพลาดที่น้อยที่สุดระหว่างจากแผนที่ในสิ่งแวดล้อมจริงกับข้อมูลที่ได้มาจากเซนเซอร์ของหุ่นยนต์ ดังภาพที่ 7 แสดงคือจุดบนระนาบจริง สีม่วงคือจุดที่หุ่นยนต์คิดว่าตัวเองอยู่ การทำงานของ ICP คือการหาค่าของ (x, y, θ) ของหุ่นยนต์ ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดรวม (แสดงโดยเส้นสีเหลืองในรูปที่ 7) มีค่าน้อยที่สุด โดยแสดงได้ดังสมการที่ 1 ซึ่ง r_i คือจุดสำคัญในแผนที่ (พิกัดจริง), l_i คือจุดสังเกตที่ได้มาจากระบบการหาจุดสังเกต (landmark detection) จากเซนเซอร์ของหุ่นยนต์ (พิกัดของ

หุ่นยนต์), R คือ rotation matrix , T คือ translation Matrix , γ คือค่าสเกลในการหมุนของหุ่นยนต์ , แนวโน้มในการลู่เข้าจุดที่มีค่าความผิดพลาดน้อยสุดจะได้จากค่า center of mass ของจุดที่เป็นจุดสำคัญของพิกัดจริงและพิกัดของหุ่นยนต์

$$\sum_i^n |\gamma R l_i + T - r_i|^2 \quad (1)$$



(ก)

(ข)

รูปที่ 7 การทำงานของ ICP อัลกอริทึม สีแดงคือตำแหน่งจุดสำคัญในพิกัดจริง สีม่วงคือตำแหน่งจุดสำคัญในพิกัดของหุ่นยนต์ (ก) ขณะเริ่มกระบวนการ(initial step)หาตำแหน่ง (ข) หลังจากใช้ ICP จะมีค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยสุด

การใช้วิธี ICP ในการระบุตำแหน่งคือการคำนวณโดยใช้ข้อมูลปัจจุบันไม่ได้นำข้อมูลจากในอดีตหรือสมการความเร็วของหุ่นยนต์มาใช้ในการคำนวณ ตำแหน่งที่ได้อาจจะไม่แม่นยำพอ งานวิจัยนี้จึงเพิ่มอัลกอริทึม kalman filter มาทำงานร่วมกับ ICP เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง โดยหลักการของ kalman filter ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย [11] ภายหลังถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการประมาณค่าต่างๆ โดยมีการประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์จากหลายงานวิจัยเช่น [12][13] ซึ่งแต่ละงานวิจัยก็จะใช้เซนเซอร์ที่ต่างกันออกไป

การประมาณตำแหน่งของของหุ่นยนต์จากวิธี kalman filter สามารถหาได้จากสมการที่ (3) โดยกำหนดให้ $\bar{\mu}_t$ คือตำแหน่งที่ได้จากการประมาณตำแหน่งล่วงหน้า(prediction step)คำนวณได้จากโมเดลของหุ่นยนต์ , Z_t คือตำแหน่งที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์โดยงานวิจัยนี้ใช้เป็นตำแหน่งที่ได้จากวิธี ICP , K_t คือค่า Kalman Gain คำนวณได้จากสมการที่ (2), $\bar{\Sigma}_t$ คือค่า Variance ที่ได้จากการประมาณตำแหน่งล่วงหน้า, Q_t คือค่า Variance ของตำแหน่งจากวิธีของ ICP โดยอิงจากค่าความผิดพลาดในการทดลองการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP

$$K_t = \bar{\Sigma}_t H_t^T (H_t \bar{\Sigma}_t H_t^T + Q_t)^{-1} \quad (2)$$

$$\mu_t = \bar{\mu}_t + K_t(Z_t - h(\bar{\mu}_t)) \quad (3)$$

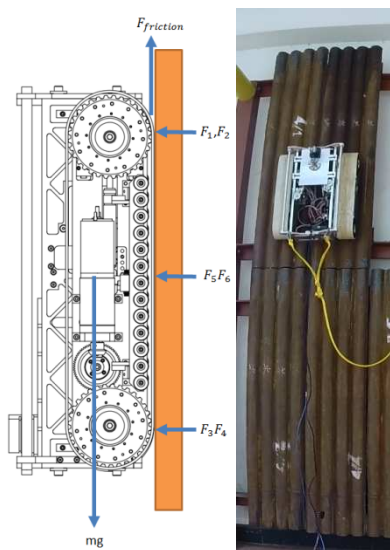
4. ผลการทดลอง

4.1 การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวดิ่งในงานวิจัยนี้อาศัยแรงยึดเกาะของแม่เหล็กถาวร ซึ่งแรงที่ยึดเกาะต้องมีแรงมากพอที่จะทำให้หุ่นยนต์ไม่หลุดออกจากกำแพงห้องดังภาพที่ 8(ก) จากการทดลองเพื่อหาแรงยึดเกาะของมู่เลย์และแรงยึดเกาะของฐานแม่เหล็กสามารถแสดงผลได้ค่าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงแรงยึดเกาะของแม่เหล็กของหุ่นยนต์

	แรงยึดเกาะ (กก)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
มู่เลย์แม่เหล็ก	9.8	9.3	9.5	9.4	9.2	9.44
แม่เหล็กแผ่น	5.7	5.6	5.8	5.4	5.9	5.68

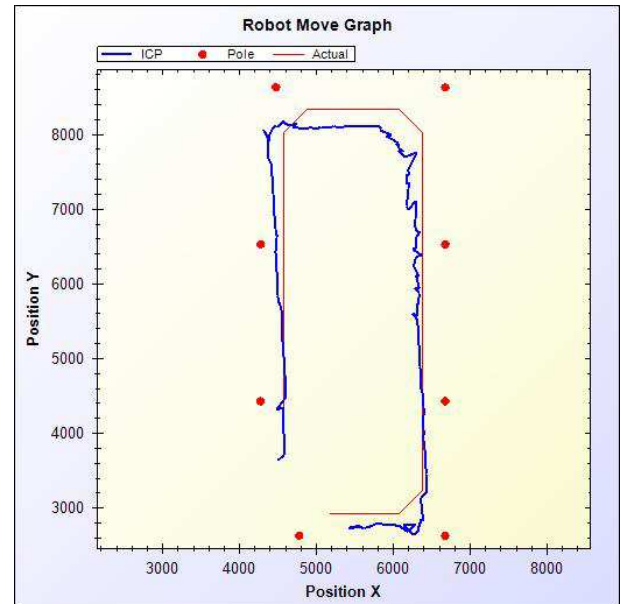


รูปที่ 8 (ก) แรงยึดเกาะและแรงโน้มถ่วงซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวดิ่ง (ข) หุ่นยนต์สำรวจห่อไอ้หน้าขณะติดอยู่กับฐานทดสอบกำแพงท่อ

จากค่าแรงยึดเกาะที่ได้เมื่อนำมาคำนวณโดยใช้เส้นแรงตามภาพที่ 8(ก) และสมการที่ 4 โดยน้ำหนักของหุ่นยนต์(m) = 23 kg มีค่า mg เท่ากับ 255.4 นิวตัน และค่ารวมของแรงยึดเกาะแม่เหล็ก $\sum_i^n (\mu F_{Magnet}) = 336.9$ นิวตัน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ระหว่าง Polyurethane กับ Steel เท่ากับ 0.7 และทำให้ได้ผลต่าง

ของแรงมีค่าเท่ากับ 111.56 นิวตันซึ่งมีค่ามากพอสำหรับทำให้หุ่นยนต์ไม่ไถลลง

$$\sum_i^n (\mu F_{Magnet}) - mg = F_r \quad (4)$$



รูปที่ 9 ผลการทดลองระบุตำแหน่งตัวเองของหุ่นยนต์โดยใช้ ICP อัลกอริทึม, สีแดงตำแหน่งเสาและเส้นทางการเดินจริง, สีน้ำเงินคือตำแหน่งที่ได้จากการระบุตำแหน่งโดยใช้ ICP

4.2 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์

เนื่องจากฐานทดสอบกำแพงท่อที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีขนาดจำกัดในการทดลองขั้นตอนแรกเพื่อทดสอบความสามารถของวิธีการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์จึงเป็นการทดลองบนพื้นราบ ในการทดลองนี้ผู้ทดสอบได้ทำการวางเสาจำนวน 8 เสาเป็นระยะห่างกันประมาณ 2 เมตร และทำการสั่งให้วิ่งบนพื้นราบเป็นรูป 4 สีเหลี่ยมโดยมีพื้นที่การทดลองประมาณ 6 x 3 เมตรได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่ามีค่าความผิดพลาดมากที่สุดในการระบุตำแหน่งในแกน x , y , θ โดยประมาณเท่ากับ 207 มม., 288 มม., 3 องศา ตามลำดับ ซึ่งค่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นค่า Covariance ในการทดลองการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP+ Kalman Filter ต่อไป

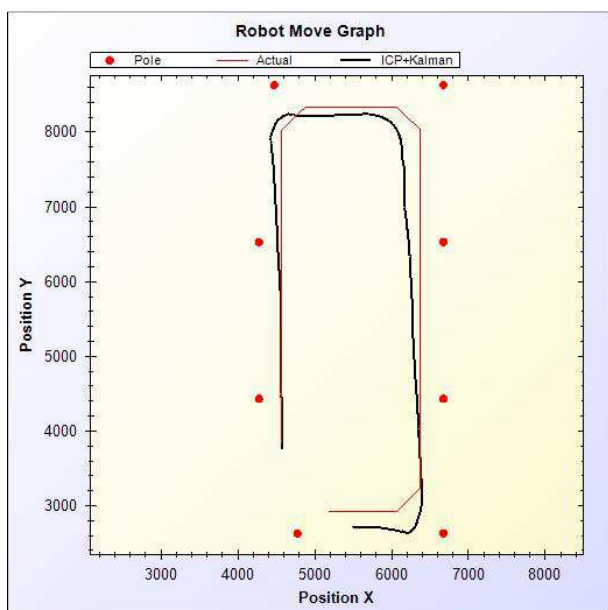
จากผลการทดลองในรูปที่ 10 ทดลองโดยใช้วิธี ICP ร่วมกับ Kalman Filter พบว่าตำแหน่งที่ได้มีความราบเรียบและใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น

5. สรุป

จากการออกแบบการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตรวจสอบห่อไอ้หน้าด้วยวิธี ICP ร่วมกับ Kalman Filter หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของตัวเองได้ โดยค่าผิดพลาดประมาณ 200 มม. ซึ่งเกิดขึ้น

จากการระบุตำแหน่งโดยวิธี ICP นั้นคลาดเคลื่อนมากอันเนื่องมาจากบางตำแหน่งในการเดินมีจุดที่เป็นจุดสำคัญน้อย(Pole)ทำให้คลาดเคลื่อนมากขึ้น และข้อเสียของการระบุตำแหน่งด้วยวิธี ICP+Kalman filter นี้ต้องอาศัยความต่อเนื่องของจุดในอดีตและจุดปัจจุบัน ถ้ามีการไถลลงหรือย้ายที่หุ่นยนต์อย่างรวดเร็ว อาจทำให้การระบุตำแหน่งผิดไปซึ่งจะต้องปรับปรุงต่อไป

การวางตำแหน่งเสาในงานวิจัยนี้ยังใช้การวางโดยผู้ใช้งานซึ่งการใช้งานในพื้นที่จริงนั้นมีความลำบาก จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบการวางเสาเพื่อความสะดวกต่อไป



รูปที่ 10 ผลการทดลองระบุตำแหน่งตัวเองของหุ่นยนต์โดยใช้ ICP+EKF อัลกอริทึมเส้นสีดำ ,สีแดงตำแหน่งเสาและเส้นทางการเดินจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ) ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Park,S., Jeong , H.D., and Lim,S.T. "Development of Mobile Robot Systems for Automatic Diagnosis of Boiler Tubes Fossil Power Plants and Large size Pipelines " ,Proceeding of 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robot and System EPFL, Lausanne, Switzerland October 2002
- [2] Badodkar,D.N.,Singh,N.K.,Dadal,N.S,and Singh,M. "EMAT Integrated with Vertical Climbing, robot for Boiler Tube Inspection " Proceeding of national Seminar a exhibition on Non – Destructive Evaluation. NDE 2009, December 10-12,2009.
- [3] Xuegin, L.,Rongfu Q.,Gang,C., and Fuzhen , H. " The design of an inspection robot for boiler tubes inspection" 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. IEE Computer Society. DOI 10.1109/AICI.2009.333.
- [4] Gao , X., Xu, D.,Wang,y., pan, H .,and Shen,W. "Multifunctional Robot to Maintain boiler Water-Cooling Tubes " Robotica (2009) volume 27,pp. 941-948 Cambridge University Press
- [5] Gao,X.,Jiang,Z., Gao, J.,Xu, D.Wang,Y., and Pan, H. " Boiler Maintenance Robot With Multi –operational Schema " Proceeding of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- [6] A.Boonyaprapasorn,K.Thungod,R.Silapunt,T.Maneewarn "Studies of total adhesive force of multiple magnet wheel for a climbing robot " Proceeding of the Sixteenth International Conference on Climbing and Walking Robot.
- [7] P. Besl and N. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp.239-256, 1992.
- [8] Censi, Andrea, "An ICP variant using a point-to-line metric," *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.19,25, 19-23 May 2008
- [9] S. Hong, H. Ko and J. Kim, "VICP: velocity updating iterative closest point algorithm", in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1893-1898, 2010.
- [10] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, "Efficient variants of the ICP algorithm", in Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM), June 2001.
- [11] Kalman, R.E. March 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems, Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering.
- [12] L.Teslic,G.Klancar,and I.Skrjanc, "Kalman-Filtering-based localization of a mobile robot with a LRF in a simulated 2D environment" Electrotechnical Conference, 2008. MELECON 2008. The 14th IEEE Mediterranean
- [13] Seong-Jin Kim, Byung-Kook Kim, "Dynamic localization based on EKF for indoor mobile robots using discontinuous ultrasonic distance measurements," Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นายคณศ อุงออด
วัน เดือน ปีเกิด	26 ตุลาคม 2530
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนวชิรวิทย์ พ.ศ.2548
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2553
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2556
ทุนการศึกษาหรือทุนวิจัย	โครงการวิจัย เรื่องการพัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อใช้ตรวจสอบท่อ และผนังภายในหม้อไอน้ำ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	ถวิดา มณีวรรณ และ คณศ อุงออด, 2557, “การระบุตำแหน่งของ หุ่นยนต์ตรวจสอบหม้อไอน้ำด้วยวิธี ICP และ Kalman”, การ ประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ ครั้งที่ 7 ,12-13 มิถุนายน 2557,กรุงเทพฯ