

การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์กลางแจ้งโดยใช้การตรวจจับและวัดระยะ
ด้วยแสง และเทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปรผันกับเวลาของระบบ
นำทางดาวเทียมโลกที่มีระบบนำทางเฉื่อย

LOCALIZATION FOR OUTDOOR MOBILE ROBOT USING LIDAR AND
RTK-GNSS/INS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัจฉริยะเชิงคำนวณ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2567
KMITL-2024-EN-M-407-245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOCALIZATION FOR OUTDOOR MOBILE ROBOT USING LIDAR AND
RTK-GNSS/INS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ROBOTICS AND COMPUTATIONAL
INTELLIGENCE SYSTEMS
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024

KMITL-2024-EN-M-407-245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์กลางแจ้งโดยใช้การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง และเทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปลนเวลาของระบบนำทางดาวเทียมโลกที่มีระบบนำทางเฉื่อย
นักศึกษา	นาย ฐิติพงษ์ เทพสิทธิ์
รหัสประจำตัว	64601041
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัจฉริยะเชิงคำนวณ
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ

บทคัดย่อ

อุปกรณ์รับรู้ 2 ประเภท ได้แก่ การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง(LiDAR) และเทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปลนตามเวลาของระบบนำทางดาวเทียมโลกที่มีระบบนำทางเฉื่อย(RTK-GNSS/INS) ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการหาตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง อย่างไรก็ตามการใช้ไลดาร์และอาร์ทีเคจีเอ็นเอสเอสไอเอ็นเอสอย่างแบบอิสระจากกันพบว่าไม่เพียงพอที่จะทำให้ได้ตำแหน่งของหุ่นยนต์กลางแจ้งได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นวิธีการผสานอุปกรณ์รับรู้โดยอาศัยระบบอนุมานที่พัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ(ANFIS) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล ในงานวิจัยนี้ข้อมูลจากทั้งสองอุปกรณ์รับรู้ถูกเก็บรวบรวมเพื่อสร้างชุดข้อมูลสำหรับการฝึกอบรมด้วย ANFIS ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่ได้จากการผสานข้อมูลของอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองนี้ ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจริงเมื่อทำการเทียบกับค่าของอุปกรณ์รับรู้แบบอิสระ ผลลัพธ์แสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการผสานของข้อมูลโดยใช้ ANFIS ในการปรับปรุงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของระบบตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

Thesis	LOCALIZATION FOR OUTDOOR MOBILE ROBOT USING LIDAR AND RTK-GNSS/INS
Student	Mr. Thitipong Thepsit
Student ID.	64601041
Degree	Master of Engineering
Program	Robotics and Computational Intelligence Systems
Year	2024
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Poom Konghuayrob

ABSTRACT

Two types of sensors, light detection and ranging (LiDAR) and real-time kinematic of global navigation satellite system with inertial navigation system (RTK-GNSS/INS), are used for the localization of outdoor mobile robots. However, using LiDAR and RTK-GNSS/INS independently was found to be insufficient for achieving precise positioning. Therefore, a sensor fusion approach based on an adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) was implemented to enhance reliability. In this research, data from both sensors were collected to create a dataset for training with ANFIS. The findings indicated that the model derived from the fusion of these two sensors provided results that were much closer to the actual values obtained using each sensor independently. The result demonstrated the effectiveness of the ANFIS-based fusion method in terms of improving the accuracy and reliability of the positioning system for outdoor mobile robots.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้บรรลุเป้าหมายและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการได้รับการสนับสนุนจากหลาย ๆ และขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ ที่คอยให้คำปรึกษา ทางวิจัยและให้การแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยนี้อย่างมาก และให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างดี ให้การตรวจสอบและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้

ขอขอบคุณสถานที่และผู้วิจัยในห้องวิจัย AIMS Lab ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการออกแบบของหุ่นยนต์ รวมถึงบอร์ดสำหรับการใช้งานในหุ่นยนต์ รวมถึงคอยแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการจัดการโครงสร้างโดยเฉพาะ ดร.ศรชชา ยรรยง นายปริญญา ไสยโยธา และนายจิรเมธ ศรีอ่อน ที่มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาตรีของภาควิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์ กลุ่มโครงการของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ คงห้วยรอบ ประกอบด้วย นายธนภัทร ศิริรัตน์ชโยกุล นายณฤบดี คำแสนยศ นายปริตร พรหมรักษ์ นางสาวพงศ์ภรณ์ เมธีธรรมสกุล และ นางสาวพิชชาพร เวียงธีรวัฒน์ ที่มีส่วนช่วยในการประกอบสร้างและช่วยเหลือเรื่องการบันทึก เก็บผลข้อมูลสำหรับงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้จัดทำ ที่คอยให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการศึกษาระดับชั้นปริญญาโทและให้การสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ฐิติพงศ์ เทพสิทธิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	5
2.1 การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง.....	5
2.2 ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย.....	6
2.2.1 ระบบนำทางดาวเทียมโลก.....	6
2.2.2 ระบบนำทางเฉื่อย.....	8
2.2.3 เทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปลผันกับเวลา.....	9
2.3 ระบบอนุมาณที่พัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ.....	11
2.4 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์.....	12
2.5 จลศาสตร์ผกผันสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	13
2.6 ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์.....	14
2.6.1 การเตรียมพร้อมสำหรับการทำงาน.....	14
2.6.2 การทำแผนที่.....	15
2.6.3 การนำทาง.....	16
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบการทำงาน.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1 ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	17
3.2 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	18
3.2.1 หน่วยประมวลผลหลัก.....	19
3.2.2 หน่วยประมวลผลย่อย.....	19
3.2.3 เซ็นเซอร์การระบุตำแหน่ง.....	20
3.2.4 ชุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์.....	20
3.3 ชุดวงจรของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	21
3.3.1 บอร์ดแปลงสัญญาณมอเตอร์.....	21
3.3.2 วงจรป้องกันมอเตอร์.....	25
3.4 ระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	25
3.4.1 การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์.....	25
3.4.2 การเก็บบันทึกข้อมูลสำหรับการเรียนรู้.....	26
3.5 การใช้ประยุกต์ใช้ ANFIS.....	27
3.6 ผังการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	27
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	31
4.1 ผลจากการบันทึกค่าจากระบบการตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง.....	31
4.2 ผลจากการบันทึกค่าจากระบบการนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย.....	33
4.3 ผลจากการเรียนรู้ข้อมูลสำหรับการใช้งาน ANFIS.....	37
4.4 ผลการเปรียบเทียบการระบุตำแหน่งที่ระยะทางต่างๆ.....	39
4.5 ผลการเปรียบเทียบการทำงานกับวิธีการอื่นๆ.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง	18
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการผสมผสานระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ความเร็ว 1 km/h	45
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบการผสมผสานระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ความเร็ว 5 km/h	46
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการผสมผสานระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ความเร็ว 10 km/h	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 การมองเห็นของไลดาร์สามมิติ.....	5
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม GPS รอบโลก [15].....	7
รูปที่ 2.3 การคำนวณระยะห่างของดาวเทียมแต่ละดวง [17].....	8
รูปที่ 2.4 ทิศทางการวัดค่าของ IMU [18]	9
รูปที่ 2.5 การติดตั้งสถานีรับส่งสัญญาณในประเทศไทย [21].....	10
รูปที่ 2.6 การเทียบตำแหน่งระหว่างเสารับสัญญาณกับเสาส่งสัญญาณ [22].....	11
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ ANFIS	11
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	13
รูปที่ 2.9 การสื่อสารกันระหว่างโหนด	15
รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบการทำงานของหุ่นเมื่อมีแผนที่กับไม่มีแผนที่ [29].....	15
รูปที่ 3.1 รถกอล์ฟที่ทำการดัดแปลงเป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง.....	17
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง	18
รูปที่ 3.3 บอร์ดแปลงสัญญาณสำหรับควบคุมการทำงานมอเตอร์.....	21
รูปที่ 3.4 วงจรลดสัญญาณแรงดัน	22
รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณแรงดัน	23
รูปที่ 3.6 วงจรลดแรงดัน	24
รูปที่ 3.7 โหนดการทำงานของการควบคุมความเร็ว.....	25
รูปที่ 3.8 การรับข้อมูลและบันทึกค่าจากไลดาร์.....	26
รูปที่ 3.9 การรับข้อมูลและบันทึกค่าจาก Pixhawk.....	26
รูปที่ 3.10 การใช้งาน ANFIS จากค่าของเซ็นเซอร์ที่ใช้ระบุตำแหน่ง.....	27
รูปที่ 3.11 แผนผังการเชื่อมต่อของแต่ละอุปกรณ์.....	27
รูปที่ 3.12 แผนผังการทำงานของการควบคุมความเร็ว	28
รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานสำหรับการเก็บบันทึกค่าสำหรับการอบรม	29
รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานสำหรับการประมวลผล ANFIS	30
รูปที่ 4.1 การบันทึกค่าการระบุตำแหน่งจากไลดาร์.....	31
รูปที่ 4.2 การเก็บบันทึกค่าการระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆ ของไลดาร์.....	33
รูปที่ 4.3 การตรวจสอบตำแหน่งของเซ็นเซอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป.....	34
รูปที่ 4.4 การตรวจสอบตำแหน่งของเสาเปรียบเทียบตำแหน่งจากดาวเทียม.....	34
รูปที่ 4.5 การระบุตำแหน่งของเซ็นเซอร์ผ่านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6 การเก็บบันทึกค่าการระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆ ของระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย	36
รูปที่ 4.7 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกอบรมของ ANFIS.....	37
รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่ได้จากการอบรมของ.....	38
รูปที่ 4.9 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 1 km/h ตัวอย่างที่ 1.....	39
รูปที่ 4.10 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 1 km/h ตัวอย่างที่ 2	40
รูปที่ 4.11 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 5 km/h ตัวอย่างที่ 1	40
รูปที่ 4.12 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 5 km/h ตัวอย่างที่ 2	41
รูปที่ 4.13 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 10 km/h ตัวอย่างที่ 1	41
รูปที่ 4.14 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 10 km/h ตัวอย่างที่ 2.....	42
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการผสมผสานเซ็นเซอร์ระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ 1 km/h.....	43
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบการผสมผสานเซ็นเซอร์ระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ 5 km/h.....	44
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบการผสมผสานเซ็นเซอร์ระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ 10 km/h.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

ANFIS	ระบบอนุมานที่พัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ
LiDAR	อุปกรณ์การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง
RTK	เทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปลผันกับเวลาต้น
GNSS	ระบบนำทางดาวเทียมโลก
GPS	ระบบบอกพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์
INS	ระบบนำทางเฉื่อย
IMU	เซ็นเซอร์วัดค่าแรงเฉื่อย
m	เมตร
km	กิโลเมตร
s	วินาที
h	ชั่วโมง
V	โวลต์
A	แอมป์
RMSE	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่ต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในยุคสมัยที่เทคโนโลยีมีความก้าวหน้าไปอย่างต่อเนื่องนั้น ได้มีการพัฒนาในหลาย ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ ด้านการทหาร ด้านการเกษตร หรือแม้แต่ทางด้านอุตสาหกรรม ความก้าวหน้าที่มีความโดดเด่นอย่างหนึ่งคือวิทยาการหุ่นยนต์ ซึ่งได้เห็นการพัฒนาที่หลากหลาย ตั้งแต่หุ่นยนต์แขนกลไปจนถึงหุ่นยนต์สุนัขสำรวจ อากาศยานไร้คนขับ เรืออัตโนมัติ และแม้แต่หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในปัจจุบันได้พัฒนาเป็นเครื่องมืออเนกประสงค์ที่มีหน้าที่ตั้งแต่เป็นผู้ที่ช่วยเหลืองานบ้าน ให้ความช่วยเหลือทางการแพทย์ ตลอดจนให้บริการในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม

ในยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติกลายเป็นส่วนสำคัญของการเปลี่ยนแปลงในภาคอุตสาหกรรม ด้วยความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความยืดหยุ่นของการใช้งาน หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติจึงถูกนำมาใช้งานในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต ตั้งแต่การขนส่งวัตถุดิบไปจนถึงการประกอบผลิตภัณฑ์ หุ่นยนต์ในภาคอุตสาหกรรม เช่น หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้น(automated guided vehicles) หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ(autonomous mobile robots) และหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกับมนุษย์(collaborative robots) ได้มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานในโรงงานซึ่งเป็นสิ่งที่เคยพึ่งพาแรงงานของมนุษย์อย่างมาก ได้เปลี่ยนไปสู่การดำเนินการที่สามารถทำได้โดยอัตโนมัติ และมีประสิทธิภาพที่สูงมากยิ่งขึ้น [1,2] ตัวอย่างเช่น ในประเทศจีน บริษัทที่จดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 เป็นต้นไป ได้เพิ่มการใช้หุ่นยนต์ในการผลิตในภาคอุตสาหกรรม [3] การใช้หุ่นยนต์เหล่านี้ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญในหลาย ๆ ด้านเพื่อให้ได้รับผลผลิตที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการระบุตำแหน่งขณะที่หุ่นยนต์กำลังเคลื่อนที่แบบอิสระ และหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งเป็นหุ่นยนต์ที่ทางผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเพื่อใช้เป็นต้นแบบของยานพาหนะที่ขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเอง วิธีการตั้งตำแหน่งแบบสมบูร์ณ ซึ่งมีข้อดีเช่นความแม่นยำสูง อีกระยะจากเวลาและสถานที่ และมีจุดอ้างอิงภายนอก ถูกนำมาใช้สำหรับการตำแหน่ง [4] อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้ยังมีข้อเสีย เช่น การพึ่งพาอาศัยจากปัจจัยภายนอก ต้นทุนที่มีความสูงชัน และการเพิ่มความซับซ้อนสำหรับการรวบรวมข้อมูลและการประมวลผลของข้อมูล อุปกรณ์สำหรับการหาตำแหน่ง ได้แก่ อุปกรณ์รับรู้(sensor) การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง(light detection and ranging; LiDAR) และระบบนำทางเฉื่อย(inertial navigation system; INS) ที่ใช้ร่วมกับระบบนำทางดาวเทียมโลก(global navigation satellite system; GNSS) โดยใช้เทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปรผันกับเวลา(real-time

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

kinematic; RTK) การใช้งานอาร์ทีเคจีเอ็นเอสเอสไอเอ็นเอส(RTK-GNSS/INS; ต่อไปนี้จะเรียกว่าระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย) สำหรับการระบุตำแหน่งซึ่งได้รับการวิจัยในหลายสาขาว่าเป็นการระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำ [5-8]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เซ็นเซอร์ของไลดาร์สามมิติและระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยสำหรับการประมวลผลการกำหนดตำแหน่งที่ความเร็วต่างๆ ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าการใช้งานไลดาร์สามมิติที่สามารถสร้างจุดในพื้นที่สามมิติได้ในจำนวนมาก มีความละเอียดที่สูง และอาจเหมาะสมสำหรับการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ [9] อย่างไรก็ตามการใช้งานไลดาร์สามมิติถูกจำกัดเฉพาะการรับค่าในช่วง 90 – 270 องศาเท่านั้น เนื่องมาจากการรับข้อมูลเฉพาะด้านหน้าของหุ่นยนต์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำจึงได้นำระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยมาใช้งานร่วมกัน การรวมกันนี้มุ่งเป้าไปที่การบรรลุการระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผู้จัดทำจึงได้ใช้ระบบอนุมานที่พัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ(adaptive-network-based fuzzy inference system; ANFIS) เพื่อประมวลผลและรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์เหล่านี้เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

ในงานวิจัยใช้งาน ANFIS เป็นการผสมผสานกันระหว่างตรรกะที่คลุมเครือ(fuzzy logic) และเทคนิคของโครงข่ายประสาทเทียม(neural network) การผสมผสานนี้ทำให้ระบบเชิงฟัซซีที่มีการตัดสินใจคล้ายกับมนุษย์สามารถทำงานร่วมกับโครงสร้างที่มีการเรียนรู้และมีการเชื่อมต่อกันของโครงข่ายประสาทเทียม สิ่งนี้ทำให้ ANFIS สามารถเรียนรู้จากข้อมูลที่ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้อย่างต่อเนื่อง [10] ดังนั้นการศึกษานี้จึงได้มีการเก็บข้อมูลจากการทดสอบที่ความเร็วต่างๆ เพื่อสร้างการเปรียบเทียบที่ความแม่นยำเมื่อเทียบเคียงกับระยะเวลาเคลื่อนที่จริง การเพิ่มความแม่นยำในการประมวลผลของการระบุตำแหน่งให้มากยิ่งขึ้นทำได้โดยการฝึกอบรมของ ANFIS ด้วยการใช้ข้อมูลที่เก็บรวบรวมตำแหน่งมาจากแต่ละความเร็ว ความสามารถในการปรับตัวของ ANFIS ทำให้สามารถปรับปรุงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือในสถานการณ์การดำเนินงานต่างๆ ทำให้เป็นเครื่องมือที่ทรงพลังสำหรับการระบุตำแหน่งที่แม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

จากที่กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอถึงวิธีการรวบรวมและการใช้งานของการผสมผสานข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยเพื่อให้มีความแม่นยำที่มากยิ่งขึ้น โดยทำการทดสอบกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและทำการดัดแปลงมาจากรถกอล์ฟ เพื่อใช้สำหรับการเป็นต้นแบบของการใช้งานรถขับเคลื่อนอัตโนมัติในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งต้นแบบสำหรับการวิจัยและพัฒนาารถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. เพื่อศึกษาข้อมูลที่ได้มาจากจุดในพื้นที่สามมิติจากไลดาร์
3. เพื่อศึกษาข้อมูลที่ได้มาจากระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย
4. เพื่อศึกษาการผสมผสานกันของข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยโดยใช้ ANFIS
5. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์(robot operating system; ROS)
6. เพื่อศึกษาการควบคุมมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านสำหรับการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์สำหรับการเก็บบันทึกข้อมูล
7. เพื่อศึกษาการควบคุมของมอเตอร์แบบกระแสตรงสำหรับการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของงานวิจัย

โครงการงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษ ออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ต้นแบบสำหรับการทำรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยมีขอบเขตของงานวิจัยนี้สำหรับการระบุตำแหน่งให้เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และทำการเก็บบันทึกข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยที่วัดตามระยะต่างๆที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่แบบอิสระมาทำการอบรมกับชุดข้อมูลนั้น เพื่อให้มีโมเดลสำหรับการใช้งานกับ ANFIS ที่ต้องอาศัยการเรียนรู้เพื่อให้เกิดการพัฒนาของโครงข่ายข้อมูลและนำมาปรับใช้ให้เกิดความแม่นยำ โดยการประมวลผลและการอบรมจะใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่าย และเพื่อวิเคราะห์ ปรับปรุงข้อมูล และพัฒนาเพื่อนำไปใช้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไปในอนาคต

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้มีการดำเนินการสร้างที่ห้องวิจัย AIMS LAB ภายใต้ภาควิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์ โดยการเริ่มงานวิจัยจากการศึกษาปัญหาของหุ่นยนต์เรื่องการระบุตำแหน่งที่แม่นยำเนื่องจากเมื่อใช้ภายนอกอาคาร การใช้งานของการระบุตำแหน่งจากไลดาร์สองมิติ และการถอดรหัสจากมอเตอร์จึงไม่เพียงพอสำหรับการระบุตำแหน่ง ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาหาอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการใช้ระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง รวมถึงหลักการสำหรับการทำงานร่วมกันของเซ็นเซอร์เพื่อให้ได้การระบุตำแหน่งที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งนี้เป็นหุ่นยนต์ต้นแบบ ทางผู้จัดทำจึงได้ทำการดัดแปลงและทำการออกแบบหุ่นยนต์ขึ้นใหม่จากโครงสร้างของรถกอล์ฟขนาดเล็ก 1 ที่นั่งขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถพัฒนาและต่อยอดหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งให้มีประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้น และเพื่อนำไปใช้สำหรับการทำรถขับเคลื่อนอัตโนมัติในอนาคต
2. เข้าใจในระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่น ๆ ได้
3. เข้าใจในระบบการทำงานของส่วนล่างไม่ว่าจะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ หรือแม่แต่วงจรป้องกันมอเตอร์
4. สามารถพัฒนาและออกแบบวงจรสำหรับการทำวงจรแปลงสัญญาณ
5. สามารถพัฒนาการออกแบบและการวางแผนการทำงานให้กับการทำหุ่นยนต์ต่อไปได้ในอนาคต

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ ในส่วนของบทนำจะเล่าถึงที่มาของการทำวิจัย และทำการอธิบายถึงจุดประสงค์ที่ทำการวิจัย ขอบเขตสำหรับงานวิจัยและประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ส่วนของบททฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการที่ได้ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่ว่าจะเป็นการอธิบายการทำงานของวงจรจับและวัดระยะด้วยแสง ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย ระบบอนุมานที่พัฒนาด้วยตัวเอง การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ จลศาสตร์พื้นสำหรับหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ และระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์

บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบการทำงาน ได้เล่าถึงลักษณะโครงสร้างและการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง ระบบการทำงานของหุ่นยนต์ ชุดวงจรที่ใช้ในหุ่นยนต์ ระบบการทำงานในหุ่นยนต์ การออกแบบและผังการทำงานของหุ่นยนต์

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการเก็บบันทึกค่าการระบุตำแหน่งจากไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย อีกทั้งผลจากการเรียนรู้ของระบบ ANFIS และผลการใช้งานจริง รวมถึงผลการเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองจะกล่าวถึงค่าและผลของการวิจัยทั้งหมดว่าเป็นไปตามการทดลองหรือไม่

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง

การตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง หรือ Light Detection and Ranging(LiDAR) เป็นอุปกรณ์รับรู้ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ที่ปลอดภัยต่อดวงตาเพื่อสร้างภาพแทนที่สภาพแวดล้อมที่สำรวจในรูปแบบสองหรือสามมิติซึ่งจะแล้วแต่คุณสมบัติของไลดาร์ ซึ่งไลดาร์ได้ถูกนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมหลายแห่ง รวมถึงอุตสาหกรรมยานยนต์ การตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐาน หุ่นยนต์ภายในอาคารและภายนอกอาคาร การขนส่ง ยานพาหนะไร้คนขับ โดรนสำรวจ การสำรวจและทำแผนที่ ยานพาหนะไร้คนขับ โดรนสำรวจ การสำรวจและทำแผนที่ ฯลฯ เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดแสงของตัวเองได้ เทคโนโลยีไลดาร์นี้จึงให้ประสิทธิภาพที่ดีในสภาพแสงหรือแม้แต่สภาพอากาศที่หลากหลาย ซึ่งการใช้งานไลดาร์จะทำให้เครื่องจักร คอมพิวเตอร์ หรือแม้แต่หุ่นยนต์จะสามารถมองเห็นสภาพแวดล้อมได้โดยรอบ และสามารถแทนที่สภาพแวดล้อมที่ได้ทำการสำรวจได้อย่างแม่นยำผ่านทางกลุ่มก้อนของจุดในอากาศ(point cloud) [11]

หลักการการทำงานของไลดาร์โดยทั่วไปจะทำการปล่อยลูกคลื่นแสงออกไปจากเลเซอร์สู่สภาพแวดล้อม ลูกคลื่นเหล่านี้สะท้อนจากวัตถุรอบข้างกลับไปยังเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์จะได้เวลาในการคำนวณการไปกลับของคลื่นแสงไปกลับของแต่ละคลื่นเพื่อนำมาคำนวณระยะทางที่แสดงเดินทาง การทำกระบวนการนี้จะทำซ้ำหลายล้านครั้งต่อวินาทีเพื่อที่จำทำการสร้างแผนที่สองและสามมิติของสภาพแวดล้อมแบบเทียบกับเวลาจริง และแผนที่ที่ได้ทำการสร้างไว้ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลเพื่อทำการระบุตำแหน่งและสามารถใช้สำหรับการนำทางได้ [11]



รูปที่ 2.1 การมองเห็นของไลดาร์สามมิติ

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการใช้งานไลดาร์ประเภทสามมิติ เนื่องจากจำเป็นต้องเห็นสภาพแวดล้อมโดยรอบสำหรับการประมวลผลเพื่อใช้สำหรับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

เอกสารนี้ถูกแจ้งไว้ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไลดาร์สามมิติมาใช้สำหรับงานหุ่นยนต์จะช่วยปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการทำงานที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นช่วยในเรื่องของการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติแล้วอีกทั้งยังช่วยในเรื่องของการตรวจสอบและตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ในสถานที่ในร่มและกลางแจ้ง จึงสามารถนำหุ่นยนต์ที่มีการติดตั้งไลดาร์สามมิติมาใช้ในการตรวจจับและจำแนกวัตถุในระยะเวลาที่สามารถทำให้ไลดาร์มองเห็นได้เพื่อเพิ่มการตัดสินใจและนำทางได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ หุ่นยนต์การทำงานขั้นสูงยังต้องการความสามารถในการระบุตำแหน่งและแผนที่ที่แม่นยำสำหรับใช้ในการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้งานไลดาร์สามมิติที่มีข้อมูลจุดในแผนที่สามมิติจำนวนมาก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำการระบุตำแหน่งและทำแผนที่สำหรับหุ่นยนต์ [12]

สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้ไลดาร์สามมิติ จะนำค่าจากจุดในแผนที่สามมิติมาคำนวณเพื่อหาการระบุตำแหน่ง ซึ่งการกระทำนี้จะทำบนระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์และใช้งานการระบุตำแหน่งโดยการนำไลดาร์สามมิติแบบแปลผันกับเวลา [13]

2.2 ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย

ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยในงานวิจัยนี้จะหมายถึงระบบนำทางดาวเทียมโลกที่ใช้ร่วมกับระบบนำทางเฉื่อยโดยใช้เทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปลผันกับเวลา(real-time kinematic of global navigation satellite system with inertial navigation system; RTK-GNSS/INS) โดยระบบนี้จะประกอบไปด้วยกันทั้งหมด 3 ส่วนคือ ระบบนำทางดาวเทียมโลก ระบบนำทางเฉื่อย และเทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปลผันกับเวลา โดยจะอธิบายในส่วนต่อไป

2.2.1 ระบบนำทางดาวเทียมโลก

ระบบนำทางดาวเทียมโลก หรือ Global Navigation Satellite System(GNSS) หมายถึงระบบนำทางดาวเทียมที่มีความครอบคลุมไปทั่วโลก ซึ่งจะมีด้วยกันหลายระบบได้แก่ Global Positioning System(GPS) เป็นระบบที่มีความแพร่หลายมากที่สุด ซึ่งดำเนินการเดินสหรัฐอเมริกา และเป็นระบบดาวเทียมแรกของโลกมีดาวเทียมทั้งหมด 31 ดวง อีกทั้งมีการใช้งานที่แพร่หลายมากที่สุดทั่วโลก Global Navigation Satellite System(GLONASS) มีลักษณะคล้ายกับ GPS แต่ใช้งานที่คลื่นความถี่ที่แตกต่างกันมีดาวเทียมทั้งหมด 24 ดวงดำเนินการโดยรัสเซีย Galileo เป็นระบบดาวเทียมที่ถูกรจัดการโดยสหภาพยุโรป ออกแบบมาสำหรับใช้งานในทางพลเรือน และมีความแม่นยำที่สูง มีดาวเทียมทั้งหมด 22 ดวง และสุดท้ายคือ BeiDou เป็นระบบที่ถูกพัฒนาโดยประเทศจีน และเริ่มให้บริการในทวีปเอเชีย ปัจจุบันมีดาวเทียมทั้งหมด 33 ดวง [14]

งานวิจัยนี้ ทางผู้จัดทำได้ทำการเลือกใช้งานในระบบของ GPS เนื่องจากสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์ และมีต้นทุนที่ราคาไม่สูงจนเกินไป

GPS หรือ Global Positioning System เป็นระบบที่ทำการบอกตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่พื้นผิวโลกจากอุปกรณ์รับสัญญาณที่จะทำการรับสัญญาณวิทยุจากดาวเทียมที่ถูกปล่อยไปในอวกาศ โดยปัจจุบันมีทั้งหมด 31 ดวง ซึ่งสหรัฐอเมริกาที่มีความมุ่งมั่นที่จะเตรียมพร้อมสำหรับการใช้งานและรักษาให้กับดาวเทียมที่ทำงานได้อย่างน้อย 24 ดวง หรือคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 95 ของช่วงเวลาทำงานและหน้าที่นี้ถูกจัดการโดยกองทัพอวกาศของสหรัฐอเมริกา ดาวเทียมของ GPS บินอยู่ในระดับความสูงประมาณ 20,200 กิโลเมตร(12,550 ไมล์) คือระดับการบินในวงโคจรระดับกลางของโลก โดยแต่ละวันดาวเทียมจะโคจรรอบโลกสองครั้งต่อวัน ดาวเทียม GPS ถูกจัดเรียงในหกเส้นวงโคจรที่ระยะห่างเท่า ๆ กันรอบโลก ซึ่งแต่ละเส้นวงโคจรจะมี 4 ช่องสำหรับดาวเทียมประจำอยู่ช่องนั้นๆ การจัดเรียงดาวเทียมในลักษณะนี้จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับค่าจากสัญญาณดาวเทียมได้อย่างน้อย 4 จุด ณ จุดใดๆ บนโลกได้ และนั่นคือเหตุผลที่กองทัพอวกาศมักบินดาวเทียมใหม่มีจำนวนที่มากกว่า 24 ดวง เพื่อให้รักษาการครอบคลุมเมื่อดาวเทียมหลักได้รับการซ่อมบำรุงหรือให้บริการ หรือแม้แต่ถูกยุติการใช้งาน การเพิ่มดาวเทียมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ GPS ให้ดีมากยิ่งขึ้น [15]



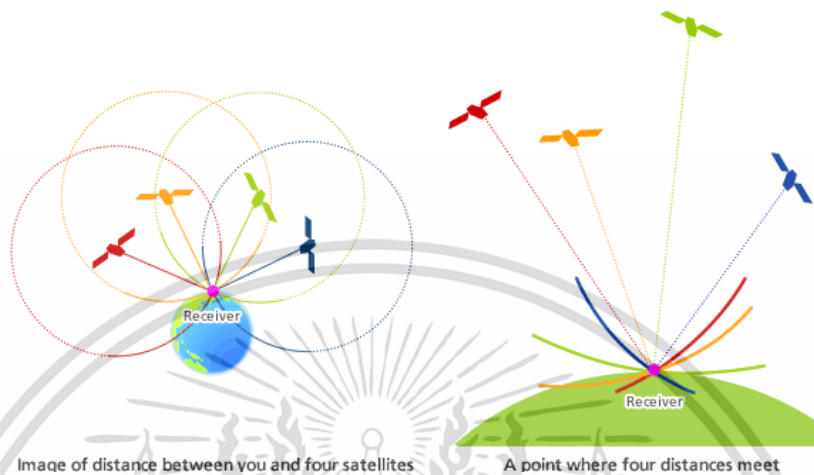
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม GPS รอบโลก [15]

การระบุตำแหน่งโดยการใช้ดาวเทียม จะต้องมีอุปกรณ์สำหรับรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อคำนวณระยะห่างจากดาวเทียมถึงเครื่องรับสัญญาณ โดยการจับสัญญาณคลื่นวิทยุที่ปล่อยออกมา จากนั้นจึงนำไปประมวลผลเพื่อบอกพิกัดตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด และความสูงจากระดับน้ำทะเล ดังนั้นเมื่อดาวเทียมหลายดวงในการคำนวณ จะทำให้เกิดความแม่นยำที่มากยิ่งขึ้น ในการใช้งานเพื่อการระบุตำแหน่งนั้นมีการใช้งานที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการคมนาคม ระบบนำร่องของเครื่องบิน การทหาร การเดินเรือ และเพื่อเพิ่มความแม่นยำของจรวดนำวิถีให้สูงยิ่งขึ้น [16]

การคำนวณระยะห่าง(distance)ระหว่างอุปกรณ์รับสัญญาณ GPS ทำได้มีขั้นตอนคือ เครื่องรับสัญญาณ GPS จะรับสัญญาณจากดาวเทียมเพื่อนำมาคำนวณเวลาที่สัญญาณคลื่นวิทยุใช้ในการเดินทางจากดาวเทียมถึงเสาของเครื่องรับสัญญาณ จากนั้นจะนำข้อมูลของความแตกต่างระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลกับเวลาที่ใช้ในการรับสัญญาณหรือเรียกว่าเวลาการเผยแพร่(propagation time) มาทำการคูณกับความเร็วของคลื่นสัญญาณวิทยุ(radio wave speed)โดยจะเป็นไปตามสมการที่ 2.1 [17]

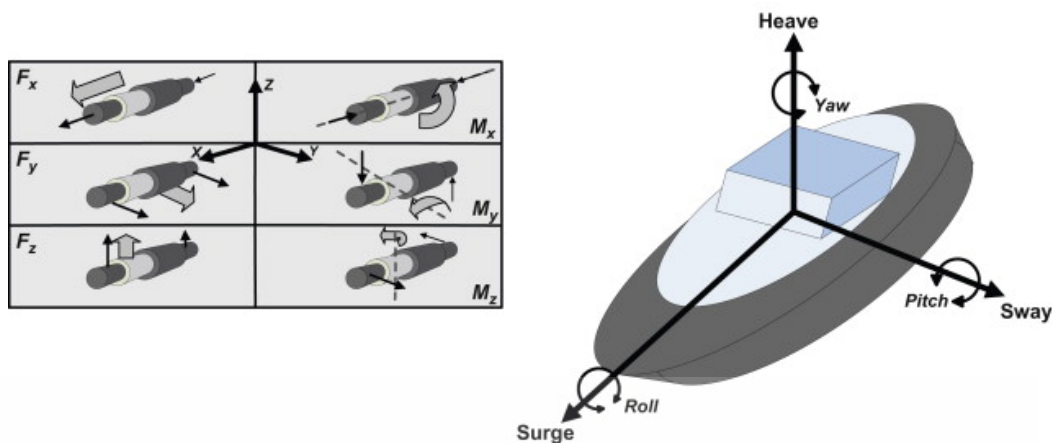
$$Distance = \text{propagation time} \times \text{radio wave speed} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.3 การคำนวณระยะทางของดาวเทียมแต่ละดวง [17]

2.2.2 ระบบนำทางเฉื่อย

ระบบนำทางเฉื่อย หรือ Inertial Navigation Systems (INS) เป็นระบบนำทางที่มีความสามารถในการคำนวณตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ได้ โดยไม่สนว่าจะเป็นตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับระบบหรือจุดอ้างอิงใดๆ หรือแม้แต่จะเป็นระบบพิกัดแบบสมบูรณ์ ระบบ INS จะประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์การเคลื่อนที่(accelerometers) อย่างน้อย 3 แกน และเซ็นเซอร์การหมุน(gyroscopes) อย่างน้อย 3 แกนเช่นกัน และบางประเภทอาจจะติดตั้งเซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก(magnetometer) การใช้เซ็นเซอร์การหมุนและเซ็นเซอร์การเคลื่อนที่ทำให้ระบบสามารถอนุมาน และการคำนวณแก้ปัญหาเกี่ยวกับการนำทางได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วการประมวลผลการนำทางจะประกอบไปด้วยตำแหน่ง(โดยทั่วไปคือตำแหน่งแบบละติจูดและลองจิจูด) ระบบ INS ในปัจจุบันจะให้ค่าที่เกี่ยวข้องทิศทาง มุมการเอียง และการหมุน ซึ่งบางระบบยังให้การแกว่ง การหัน การพุ่งอีกด้วย [18] โดยหัวใจของระบบ INS คือการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆของการเคลื่อนที่และการหมุนซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดคือ เซ็นเซอร์การวัดค่าแรงเฉื่อยหรือที่เรียกว่า Inertial Measurement Unit(IMU)



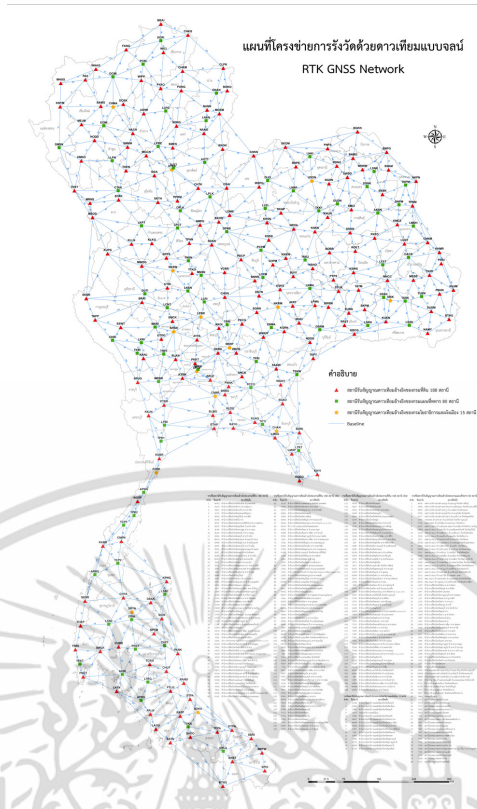
รูปที่ 2.4 ทิศทางการวัดค่าของ IMU [18]

จากรูปที่ 2.4 แสดงการวัดค่าของ IMU ในแต่ละแกน โดยที่จะเป็นระบบของแกน 3 มิติคือ แกน x แกน y และแกน z จะเห็นได้ว่าแรง F ที่เคลื่อนที่ตามแกนจะเกิดจากวัดเซ็นเซอร์การเคลื่อนที่ และแรง M ที่หมุนรอบแกนจะเกิดจากเซ็นเซอร์การหมุน

2.2.3 เทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปรผันกับเวลา

เทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปรผันกับเวลาหรือที่เรียกว่า Real-Time Kinematic เป็นเทคนิคการสำรวจและปรับค่าตำแหน่งโดยใช้ร่วมกับเครื่องรับสัญญาณ GPS ให้มีตำแหน่งที่แม่นยำขึ้น มีการใช้งานของ RTK ผสมกับการทำงานของ GPS ทำให้เกิดความแม่นยำมากขึ้นในโดรนสำรวจ แต่จะต้องมีการผสมข้อมูลกันของ GPS และ RTK-GPS เพื่อเพิ่มความแม่นยำ เนื่องจากหากใช้งานอุปกรณ์เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง อาจมีช่วงที่การเชื่อมต่อของสัญญาณที่ขาดหายไป จึงต้องผสมการทำงานของหลาย ๆ อุปกรณ์ [19]

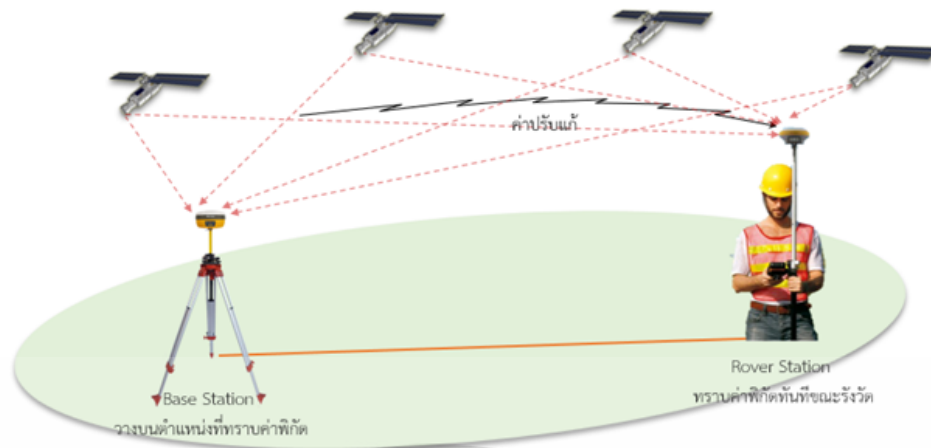
การใช้งานเทคนิคการวัดตำแหน่งแบบแปรผันกับเวลาในประเทศไทยเอง มีการประยุกต์ใช้ในงานที่มีความหลากหลาย เนื่องจากมีความละเอียดและแม่นยำ ซึ่งมีโครงการสำหรับติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงสัญญาณระบบบอกตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์แบบต่อเนื่อง โดยมีการติดตั้งที่หลายหน่วยงาน ไม่ว่าจะเป็น กรมที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง กรมแผนที่ทหาร และสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ [20] ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การติดตั้งสถานีรับส่งสัญญาณในประเทศไทย [21]

การประยุกต์ใช้กับการทำแผนที่ที่มีความแม่นยำสูง โดยการวัดตำแหน่งจากสถานีส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณและคำนวณออกมาเป็นพิกัดจุด ซึ่งจะเพิ่มความแม่นยำมากกว่าการใช้งานดาวเทียมเพียงอย่างเดียว และมีความคลาดเคลื่อนในระดับเซนติเมตร ตามที่แสดงในรูป 2.6 จะเห็นได้ว่าในการเปรียบเทียบตำแหน่งจะต้องอาศัยการตั้งเสารับสัญญาณที่ต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง จากนั้นจะมีเครื่องรับสัญญาณที่สื่อสารกับเสาส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ หรือการใช้อินเทอร์เน็ต ทำให้รับสัญญาณดาวเทียมจากเสาส่งสัญญาณ เพื่อทำการเทียบตำแหน่งที่ถูกต้องใช้งานได้ทันที

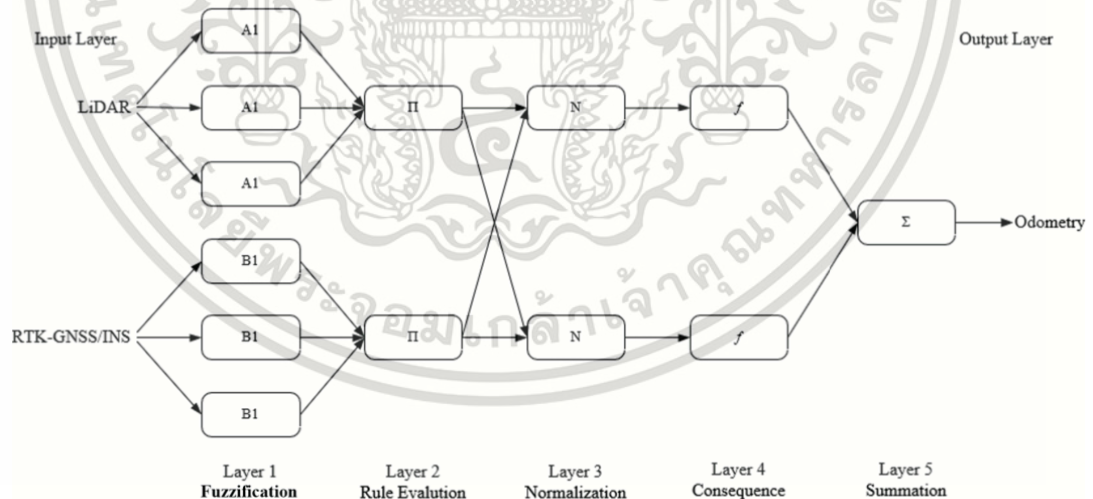
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การเทียบตำแหน่งระหว่างเสารับสัญญาณกับเสาส่งสัญญาณ [22]

2.3 ระบบอนุมานที่พัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ

ระบบอนุมานพัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ หรือที่เรียกว่า Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) เป็นการใช้งานระบบอนุมานฟัซซีที่มีความสามารถในการปรับค่าของฟังก์ชันสมาชิกผ่านการอบรมข้อมูลของข้อมูลต้นแบบ การใช้งานระบบ ANFIS ถูกใช้เพื่อสร้างฟังก์ชันการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้เกิดการใช้งานได้อย่างหลากหลาย [23]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ ANFIS

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้งานระบบ ANFIS สำหรับการผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ไลดาร์และเซ็นเซอร์ระบบการนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยเพื่อใช้สำหรับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลางแจ้ง โดยมีค่าป้อนเข้าของข้อมูลคือค่าการระบุตำแหน่งของแต่ละเซ็นเซอร์ ที่แต่ละความเร็วที่ทำการทดสอบ และค่าส่งออกที่ได้มาจะเป็นค่าการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ผ่านการผลานการทำงาน ของเซ็นเซอร์แล้วตามที่แสดงในรูปที่ 2.7

การสร้างโมเดลสำหรับการใช้งานระบบ ANFIS ทำได้โดยการใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการอบรมข้อมูลที่มีการเก็บบันทึกและเมื่อทำการอบรมข้อมูลแล้ว จะส่งโมเดลที่พร้อมใช้งานไปทดสอบกับระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ต่อไป

2.4 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์

การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์หรือที่เรียกว่า Sensors fusion ซึ่งเป็นการรวมกันของค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์เพื่อให้บรรลุถึงจุดประสงค์ของการทำงานนั้นๆ โดยการทำการผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์มีด้วยกันหลากหลายวิธี โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีของ ANFIS ตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้า และนำมาเปรียบเทียบกับการทำงานของ ตัวกรองคาลมานแบบขยายหรือที่เรียกว่า Extended Kalman Filter(EKF) เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงผลการทำงานของเซ็นเซอร์

การที่นำมาเปรียบเทียบกับ EKF เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการพัฒนามาจากตัวกรองคาลมานแบบปกติเนื่องจากการใช้งานในระบบเชิงเส้น แต่การใช้งานของ EKF เป็นการใช้งานที่ดีกว่าแบบธรรมดาเนื่องจากเหมาะสำหรับระบบที่มีความเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องและไม่เป็นเชิงเส้น [24] โดยมีกระบวนการต่างๆ สำหรับการทำนายข้อมูลเพื่อให้เกิดการใช้งานได้จะมีสมการดังต่อไปนี้

การทำนายสถานะโดยที่ t คือเวลาและ s_t ถูกทำโดยการใช้ฟังก์ชัน f ที่มีตัวแปรจากสถานะก่อนหน้า s_{t-1} และข้อมูลที่ควบคุมการทำงาน u_t ตามที่แสดงในสมการที่ 2.2

$$s_t = f(s_{t-1}, u_t) \quad (2.2)$$

การทำนายความแปรปรวนความแปรปรวนของการทำนาย P_t จะเปลี่ยนแปลงโดยใช้เมทริกซ์จาคอบีเยน F_t ของฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงสถานะตามสถานะ ความแปรปรวนก่อนหน้า P_{t-1} และความแปรปรวนของเสียงรบกวนของกระบวนการ Q ตามที่แสดงในสมการที่ 2.3

$$P_t = F_t P_{t-1} F_t^T + Q \quad (2.3)$$

การคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของคาลมาน K จะถูกคำนวณซึ่งกำหนดว่าควรแก้ไขการทำนายตามข้อมูลการวัด H_t คือเมทริกซ์จาคอบีเยนของฟังก์ชันการวัด h และ C แสดงถึงความแปรปรวนของการรบกวนในการวัด ตามที่แสดงในสมการที่ 2.4

$$K = P_t H_t^T (H_t P_t H_t^T + C)^{-1} \quad (2.4)$$

การคำนวณความคลาดเคลื่อน Z การวัดระหว่างค่าจริง z_t กับค่าที่ทำนาย s_t จะถูกคำนวณความ ความคลาดเคลื่อนนี้แสดงถึงความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับค่าทำนายตามที่แสดงในสมการที่ 2.5

$$Z = (z_t - h(s_t)) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอัปเดตสถานะจะถูกปรับปรุงโดยการปรับสถานการณ์ทำนายของ s_t ด้วยความคลาดเคลื่อนและค่าการเพิ่มขึ้นของคาลมานตามที่แสดงในสมการที่ 2.6

$$\hat{s}_t = s_t + K\hat{Z} \quad (2.6)$$

และสุดท้ายคือการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเป็นปัจจุบันเพื่อสะท้อนถึงความแม่นยำที่ลดลงหลังจากการรวบรวมข้อมูลการวัด

$$\hat{P}_t = (1 - K_t H_t) P_t \quad (2.6)$$

สมการการทำงานของ EKF นี้จะช่วยในการปรับปรุงการทำนายของสถานะของระบบที่มีความไม่แน่นอนตามที่แสดงมาข้างต้น [25]

2.5 จลศาสตร์ผกผันสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

จลศาสตร์ผกผันหรือ Inverse Kinematics ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาจากรูปแบบของรถกอล์ฟ ซึ่งมีจุดหมุนที่ส่วนของแกนกลางล้อหน้า และด้านหลังเป็นส่วนขับเคลื่อนตามที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

สมการสำหรับการใช้จลศาสตร์ผกผันสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งเขียนได้เป็นสมการที่ 2.7 [26]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \frac{1}{L} \tan \phi \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_2 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

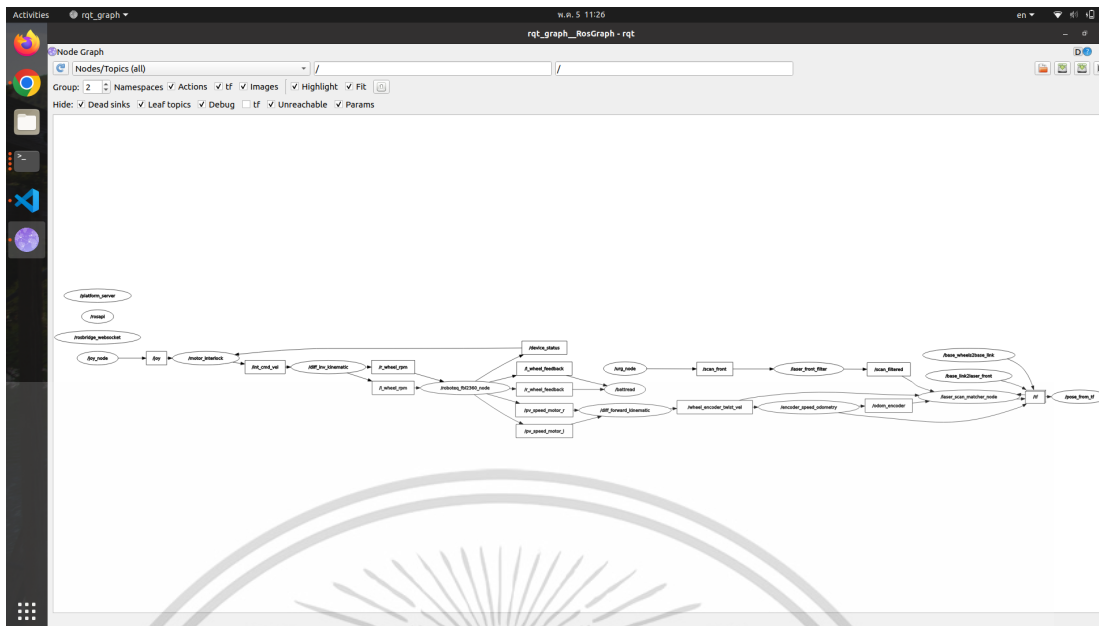
\dot{x}	ความเร็วหุ่นยนต์ในแนวแกน X
\dot{y}	ความเร็วหุ่นยนต์ในแนวแกน Y
$\dot{\theta}$	ความเร็วในการหมุนของหุ่นยนต์ตามแนวแกน Z
$\ddot{\theta}$	ความเร็วในการหมุนของพวงมาลัย
θ	มุมของหุ่นเมื่อเทียบกับแนวแกน X
L	ระยะห่างระหว่างล้อหลังถึงพวงมาลัย
u_1	ความเร็วเชิงเส้นของหุ่นยนต์
u_2	ความเร็วในการหมุนของล้อหน้า

2.6 ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์

ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์หรือที่เรียกว่า Robot Operating System(ROS) เป็นระบบชุดการพัฒนาแอปพลิเคชันหุ่นยนต์แบบเปิดที่มีการทำงานร่วมกันในหลายภาคส่วน ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์นำเสนอแพลตฟอร์มซอฟต์แวร์มาตรฐานแก่นักพัฒนาในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งจะดำเนินการตั้งแต่การวิจัยและการสร้างต้นแบบไปจนถึงการนำไปใช้และการผลิต โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ในรุ่น ROS Noetic ซึ่งทำงานบนระบบปฏิบัติการ Linux [27] การทำงานของระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ สำหรับการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์คือการเชื่อมต่อกันระหว่างโหนดเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทำงาน การทำแผนที่ และการนำทาง

2.6.1 การเตรียมพร้อมสำหรับการทำงาน

การเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานในระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์คือการให้หุ่นยนต์มีความพร้อมสำหรับที่จะทำงานในกระบวนการต่างๆ หรือก็คือการทำกระบวนการนี้ต้องเป็นอันดับแรกของการทำงานในระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเริ่มการทำงานของโหนดที่จำเป็นสำหรับการทำหุ่นยนต์ตัวอย่างเช่นการควบคุมการทำงานมอเตอร์ การรับค่าจากอุปกรณ์ระบุตำแหน่งไม่ว่าจะเป็นไลดาร์ หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเฉื่อย โดยการเริ่มการทำงานของโหนดจะใช้การสื่อสารกันระหว่างโหนดหรือที่เรียกว่า ROS Topic โดยในส่วนนี้จะต้องมีชุดข้อความที่จำเป็นสำหรับการใช้งานของหัวข้อที่ทำการส่ง เพื่อให้ทั้งผู้ส่งและผู้รับสามารถสื่อสารการทำงานกันได้ [28] โดยรูปที่ 2.9 จะแสดงถึงการสื่อสารกันระหว่างโหนด



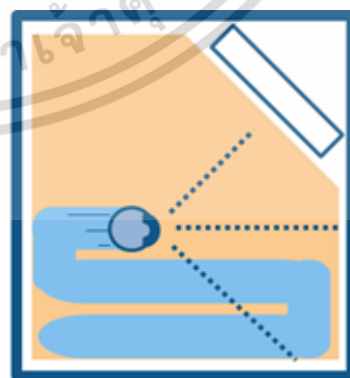
รูปที่ 2.9 การสื่อสารกันระหว่างโหนด

2.6.2 การทำแผนที่

การทำแผนที่หรือ Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับหุ่นยนต์อัตโนมัติ ที่สามารถระบุตำแหน่งและสร้างแผนที่ให้กับหุ่นยนต์ในเวลาเดียวกัน ซึ่งวิธีการนี้ใช้สำหรับสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จักได้ และสามารถใช้อุปกรณ์แผนที่เพื่อดำเนินการเช่น การวางแผนเส้นทางและการหลีกเลี่ยงอุปสรรค [29] โดยที่รูปที่ 2.10 จะเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์แบบมีแผนที่กับไม่มีแผนที่ จะเห็นได้ว่าการที่หุ่นไม่มีแผนที่จะทำให้การเคลื่อนที่เป็นแบบไม่มีรูปแบบและไม่รู้สภาพแวดล้อมโดยรอบของสถานที่ที่ใช้งาน



Without SLAM:
Cleaning a room randomly.



With SLAM:
Cleaning while understanding the room's layout.

รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบการทำงานของหุ่นเมื่อมีแผนที่กับไม่มีแผนที่ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งและการทำแผนที่ในเวลาเดียวกันมีการวิจัยมายาวนาน แต่ด้วยการปรับปรุงความเร็วในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์อย่างมากและความพร้อมใช้งานของเซ็นเซอร์ราคาต่ำ จึงทำให้การระบุตำแหน่งและการทำแผนที่ในเวลาเดียวกันใช้งานได้จริงจำนวนมากขึ้น

2.6.3 การนำทาง

ระบบการนำทางของหุ่นยนต์(Navigation) ใช้การดึงข้อมูลจากค่าโอดอมมิสทรี(Odometry) ซึ่งมีการรวมกันของข้อมูลหลาย ๆ ส่วน เช่น ค่าจากการวัดตำแหน่งของมอเตอร์(Encoder) ค่าจากการวัดตำแหน่งของเซ็นเซอร์วัดมุมหมุน(IMU) และค่าคำสั่งจากความเร็วเพื่อส่งค่าให้กับฐานของหุ่นยนต์ อย่างไรก็ตามระบบการนำทางของหุ่นยนต์มีความซับซ้อนที่เล็กน้อย โดยในการใช้งานของระบบการนำทางหุ่นยนต์ต้องมีการใช้งานในระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ มีการเชื่อมต่อแกนแต่ละแกนของหุ่นยนต์ และข้อมูลเซ็นเซอร์ต้องมีการเก็บข้อความแบบระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์(ROS Message) นอกจากนี้การกำหนดค่าของระบบการนำทางหุ่นยนต์ต้องมีการกำหนด รูปร่าง หรือพลวัตของหุ่นยนต์ เพื่อดำเนินการในระดับสูง [30]

โดยอุปกรณ์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบการนำทางหุ่นยนต์ ได้รับการออกแบบให้มีวัตถุประสงค์ทั่วไปมากที่สุด แต่มีข้อกำหนดทางด้านฮาร์ดแวร์ด้วยกัน 3 ข้อ คือ

- 1) มีไว้สำหรับการส่งการเคลื่อนที่แบบความเร็วล้อต่างกัน และการเคลื่อนที่แบบทุกทิศทาง โดยจะมีการสันนิษฐานว่าฐานของการเคลื่อนที่ถูกรักษาด้วยการส่งข้อมูลความเร็วโดยจะเป็นค่าในรูปแบบ ความเร็วแกน X ความเร็วแกน Y และความเร็วมุมตามแกน Z
- 2) ต้องการใช้เลเซอร์ระยะที่ติดตั้งอยู่บนฐานของการเคลื่อนที่ และเลเซอร์นี้ใช้สำหรับการสร้างแผนที่และการระบุตำแหน่ง
- 3) ระบบการนำทางหุ่นยนต์ได้มีการพัฒนาบนหุ่นยนต์ที่ทรงสี่เหลี่ยม ดังนั้นจะมีประสิทธิภาพที่ดีในหุ่นยนต์ที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมหรือวงกลม โดยการทำงานของหุ่นยนต์ที่มีรูปร่างต่างๆ อาจเจอปัญหาเกี่ยวกับที่แคบ เช่น ช่องแคบระหว่างประตู

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างระบบการทำงาน

3.1 ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

การออกแบบและการประกอบสร้างสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง ซึ่งจะทำเป็นรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติในอนาคต จะทำการดัดแปลงมาจากรถกอล์ฟที่มีขนาดที่นั่งสำหรับ 1 คน มีขนาดความกว้าง 0.7 เมตร ความยาว 1.4 เมตร และมีความสูงอยู่ที่ 1.2 เมตร



รูปที่ 3.1 รถกอล์ฟที่ทำการดัดแปลงเป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

จากรูปที่ 3.1 ทางผู้จัดทำได้ทำการติดตั้งไลดาร์สามมิติที่ด้านหน้าของรถ และเซ็นเซอร์ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยติดตั้งที่จุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง และอุปกรณ์ควบคุมของมอเตอร์ทั้งหมด รวมถึงอุปกรณ์ประมวลผลติดตั้งที่ฐานของหุ่นยนต์ และแบตเตอรี่ของหุ่นยนต์อยู่ที่ส่วนด้านหลังใต้เบาะนั่ง

ข้อมูลจำเพาะของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งจะแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งจะอธิบายถึงลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ประเภทของยานพาหนะ เซ็นเซอร์การทำงานที่ติดตั้งในตัวหุ่น คุณลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์ และคุณสมบัติอื่นๆ ของอุปกรณ์ที่กำหนดความสามารถและประสิทธิภาพของหุ่นยนต์

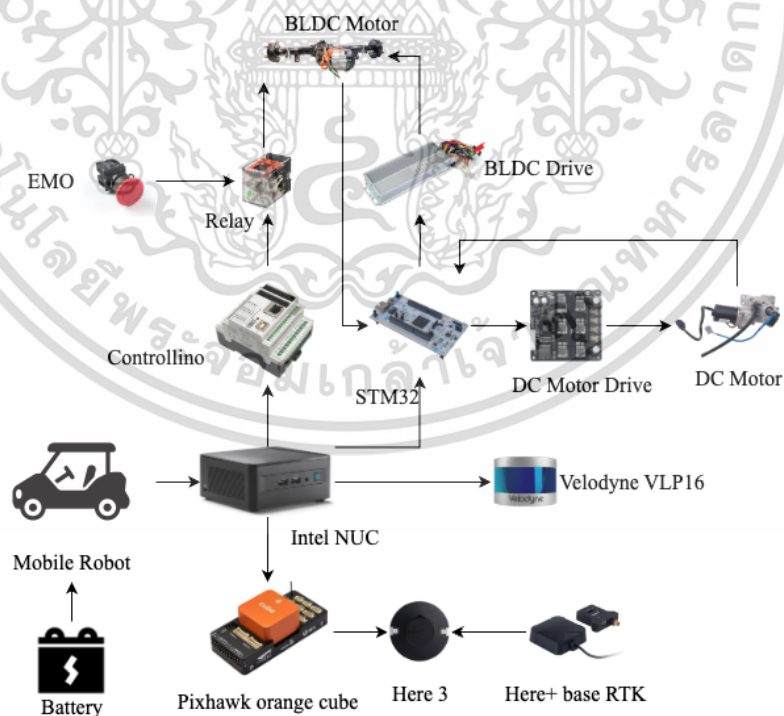
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเฉพาะของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

รายชื่ออุปกรณ์	คุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์
หุ่นยนต์	รถอ็ลฟ์ขนาดเล็ก 1 ที่นั่ง
ความเร็วสูงสุด	10 km/h
ขนาด	1.4 × 0.7 × 1.2 m ³
ระบบการตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง	Velodyne VLP-16
ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย	Pixhawk 2 cube orange with Here 3+ and Here+ RTK Base
ระบบประมวลผลกลาง	Intel NUC Core-i7 8559U
ความจุแบตเตอรี่	48 V 100 Ah

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นคุณสมบัติของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง ที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาโดยห้องวิจัย AIMs LAB KMITL

3.2 ระบบการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ทำการเชื่อมต่อ และประมวลผลของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งสำหรับงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ หน่วยประมวลผลหลัก หน่วยประมวลผลย่อย เซ็นเซอร์การระบุตำแหน่ง และชุดขับเคลื่อนหุ่นยนต์

3.2.1 หน่วยประมวลผลหลัก

หน่วยประมวลผลหลักของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้ใช้เป็นคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีความกระชับและเหมาะสำหรับการใช้งานกับพื้นที่การวางอุปกรณ์ที่มีจำกัด โดยคอมพิวเตอร์ที่เลือกใช้คือ Intel NUC และระบบปฏิบัติการสำหรับคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานใช้เป็นระบบปฏิบัติการ Ubuntu เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ซึ่งจำเป็นต้องทำงานบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu และการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์จะสื่อสารกันผ่านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ทั้งหมด โดยหน่วยประมวลผลหลักนี้ได้มีการเชื่อมต่อกับ 4 อุปกรณ์คือ ไลดาร์(Velodyne VLP-16) ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย(Pixhawk) และ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก (microcontroller) 2 อุปกรณ์ หน่วยประมวลผลหลักนี้ใช้แรงดันไฟอยู่ที่ 19.5 V สำหรับการทำงาน

3.2.2 หน่วยประมวลผลย่อย

หน่วยประมวลผลย่อยของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 อุปกรณ์คือ STM32 Nucleo-F746ZG และ Controllino Maxi โดยทั้ง 2 อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ที่แตกต่างกัน โดรนจะแสดงดังต่อไปนี้

3.2.2.1 STM32 Nucleo-F745ZG

STM32 Nucleo-F746ZG มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจะทำการส่งคำสั่งสัญญาณความกว้างของพัลส์หรือที่เรียกว่า Pulse Width Modulation (PWM) ไปยังบอร์ดควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงเพื่อปรับแรงดันสำหรับการควบคุมมอเตอร์ให้ได้ตามความเร็วที่ต้องการ จากนั้นมอเตอร์จะมีตัวอ่านค่าความเร็วรอบ และส่งกลับไปยังบอร์ดประมวลผล เพื่อทำหน้าที่ควบคุมความเร็วการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง ส่วนการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะทำงานใกล้เคียงกันกับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงปกติ แต่บอร์ดที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์นี้จะรับสัญญาณเป็นค่าแอนะล็อก จากนั้นบอร์ดควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะจ่ายแรงดันไฟให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วตามที่ต้องการ จากนั้นเซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กที่ทำการติดตั้งไว้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจะส่งสัญญาณกลับไปยังบอร์ดประมวลผล เพื่อทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่อไป โดยบอร์ดประมวลผลนี้จะใช้แรงดันไฟที่ 5.0 V โดยการจ่ายแรงดันไฟจากหน่วยประมวลผลกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 Controllino Maxi

Controllino Maxi มีหน้าที่ควบคุมการทำงานประสานกันของระบบป้องกันการทั้งหมดของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้ โดยลำดับแรกจะเป็นการควบคุมการเดินหน้าและถอยหลังของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยการส่งสัญญาณแบบ 1 และ 0 ไปยังบอร์ดควบคุม และอีกหน้าที่หนึ่งของบอร์ดประมวลผลนี้คือการหยุดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งจะทำการรับสัญญาณจากหลาย ๆ ส่วนไม่ว่าจะเป็นจากหน่วยประมวลผลหลัก หรือแม่แต่ปุ่มหยุดการทำงานฉุกเฉิน เมื่อมีการรับสัญญาณมาแล้ว บอร์ดควบคุมการทำงานนี้จะส่งสัญญาณไปให้กับรีเลย์ที่ทำหน้าที่ตัดไฟเลี้ยงให้กับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และบอร์ดประมวลผลนี้ทำงานเมื่อมีแรงดันไฟที่ 12-24 V

3.2.3 เซ็นเซอร์การระบุตำแหน่ง

เซ็นเซอร์ระบุตำแหน่งสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ 2 ชนิดคือ ไลดาร์ และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย โดรนไลดาร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ Velodyne VLP-16 เนื่องจากเป็นไลดาร์สามมิติที่มีข้อมูลจุดในแผนที่สามมิติมากมาย และค่าที่ได้จากไลดาร์นั้นจะทำการประมวลผลที่หน่วยประมวลผลหลักผ่านการสื่อสารของระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ และอีกเซ็นเซอร์คือระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Pixhawk 2 เนื่องจากมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการใช้งาน GPS และเสากำหนดสัญญาณสำหรับการเทียบตำแหน่งได้ง่าย โดยการสื่อสารกันระหว่าง Pixhawk กับ GPS จะทำการสื่อสารโดยใช้ Can bus และ GPS ทำการสื่อสารกับเสาเปรียบเทียบตำแหน่งผ่านสัญญาณวิทยุ ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยทำการสื่อสารกับหน่วยประมวลผลหลักโดยผ่านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ ไลดาร์ใช้แรงดันไฟสำหรับการประมวลผลที่ 12 V และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยใช้แรงดันไฟที่ 5 V ซึ่งได้รับมาจากหน่วยประมวลผลหลัก

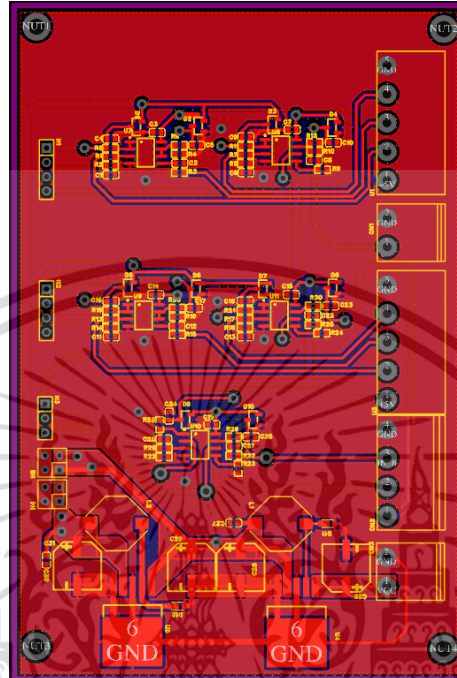
3.2.4 ชุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์

ชุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์กลางแจ้งในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ชุดขับเคลื่อนด้วยกัน คือชุดขับเคลื่อนพวงมาลัย และชุดขับเคลื่อนหุ่นยนต์ โดยชุดขับเคลื่อนพวงมาลัยจะใช้มอเตอร์กระแสตรงสำหรับการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ทำการสั่งการทำงานโดยหน่วยประมวลผลย่อย และชุดขับเคลื่อนหุ่นยนต์จะใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านสำหรับการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ โดยความเร็วของหุ่นยนต์จะถูกควบคุมโดยหน่วยประมวลผลย่อย ทั้งสองชุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์นี้จะทำงานที่สัมพันธ์กันเนื่องจากหุ่นยนต์เวลาเคลื่อนที่นั้น จะต้องอาศัยทั้งทิศทางการเคลื่อนที่และความเร็วในการเคลื่อนที่ ชุดขับเคลื่อนพวงมาลัยใช้แรงดันไฟสำหรับการทำงานอยู่ที่ 12 V และชุดขับเคลื่อนหุ่นยนต์ใช้แรงดันไฟสำหรับการทำงานอยู่ที่ 48 V

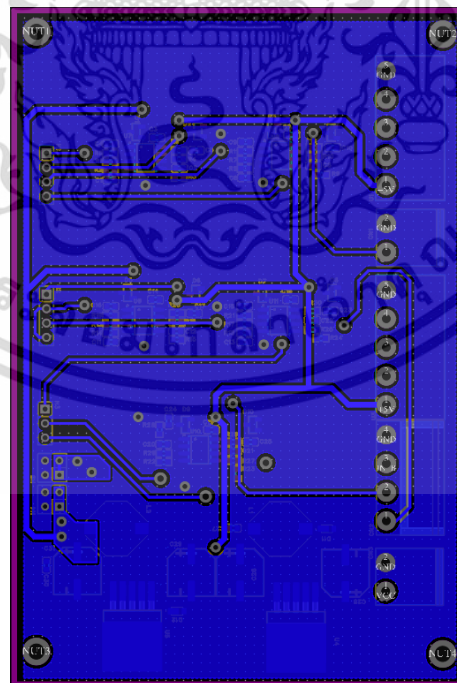
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ชุดวงจรของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

3.3.1 บอร์ดแปลงสัญญาณมอเตอร์



(ก)



(ข)

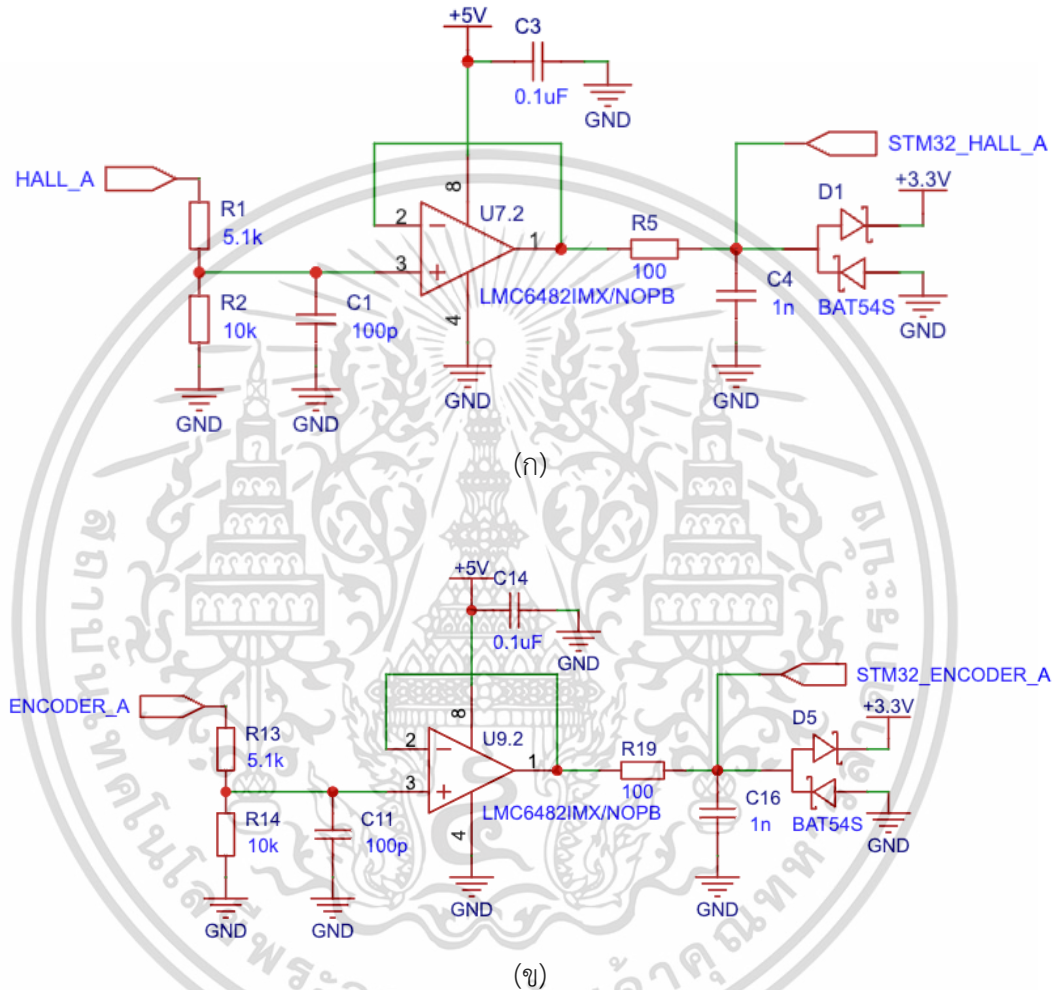
รูปที่ 3.3 บอร์ดแปลงสัญญาณสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์

(ก) ชั้นบน (ข) ชั้นล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 คือบอร์ดสำหรับการแปลงสัญญาณสำหรับการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยมีทั้งหมด 3 วงจรย่อยประกอบไปด้วย วงจรลดสัญญาณแรงดัน วงจรขยายสัญญาณแรงดัน และ วงจรลดแรงดัน

3.3.1.1 วงจรลดสัญญาณแรงดัน



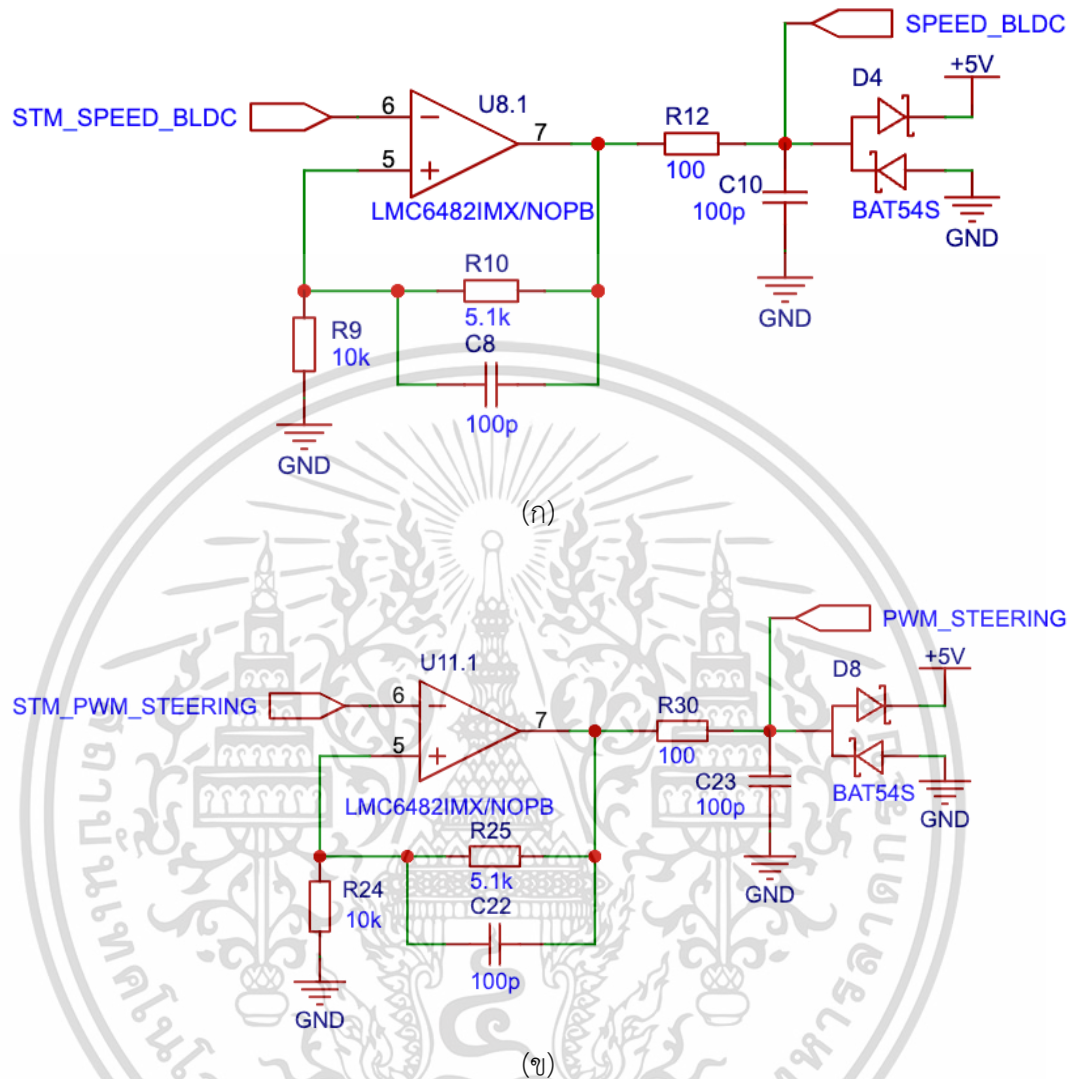
รูปที่ 3.4 วงจรลดสัญญาณแรงดัน

(ก) เซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (ข) เซ็นเซอร์ถอตรหัสมอเตอร์

วงจรที่เลือกใช้สำหรับการลดขนาดสัญญาณแรงดันในงานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดัน(voltage follower) เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กและเซ็นเซอร์ถอตรหัสมอเตอร์มีสัญญาณที่ออกมาคือ 5 V แต่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถประมวลผลแรงดันที่ 3.3 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดขนาดแรงดันลงผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบตามแรงดันตามที่แสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 วงจรขยายสัญญาณแรงดัน

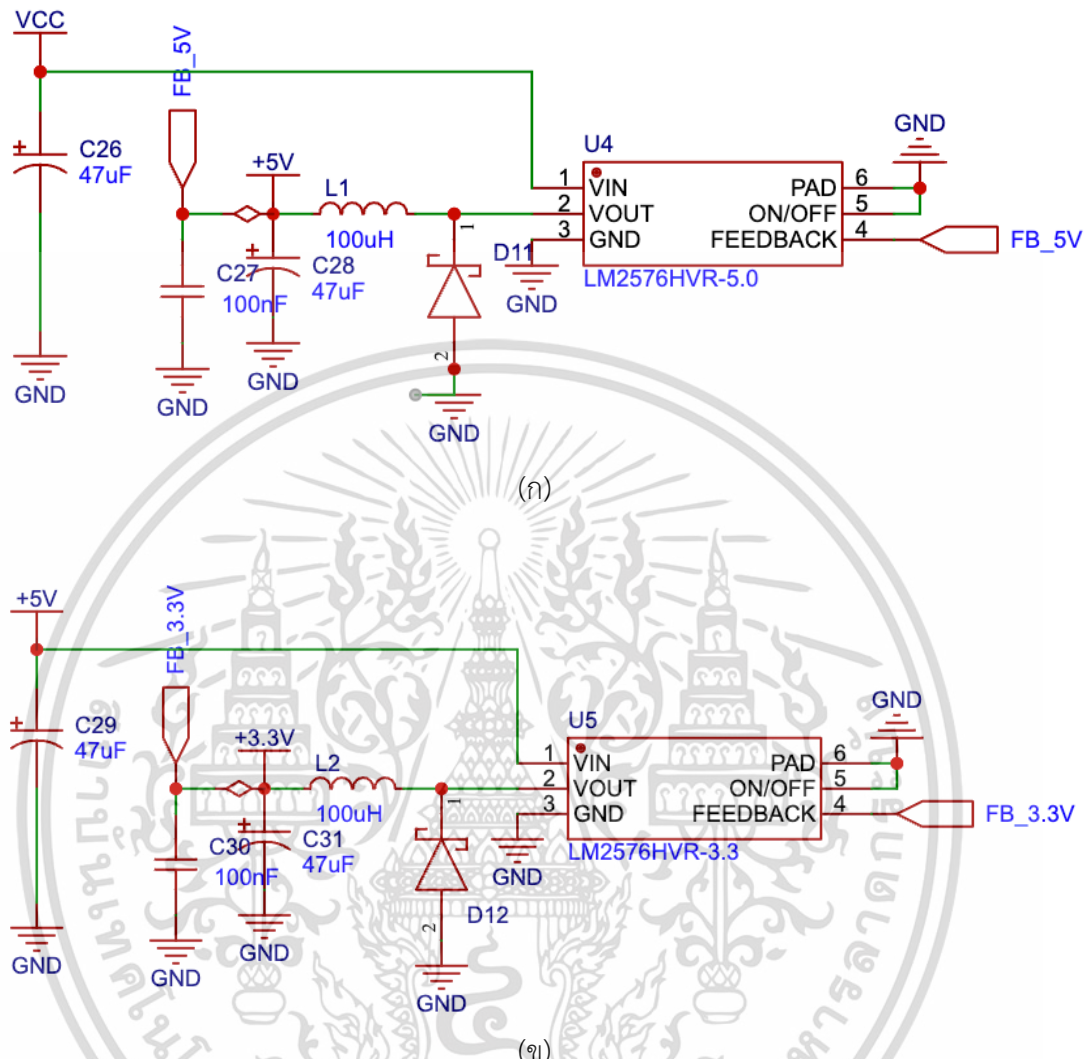


รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณแรงดัน

(ก) มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (ข) มอเตอร์กระแสตรง

ในงานวิจัยนี้ใช้วงจรขยายสัญญาณแรงดันเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายแรงดันไฟออกมาคือ 3.3 V แต่การทำงานของบอร์ดควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟที่ 5 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงสัญญาณแรงดันไฟตามวงจรในรูปที่ 3.5

3.3.1.3 วงจรลดแรงดัน



รูปที่ 3.6 วงจรลดแรงดัน

(ก) 5 V (ข) 3.3 V

วงจรสำหรับการลดแรงดัน(Step-down converter) สำหรับบอร์ดแปลงสัญญาณมอเตอร์นี้ มีด้วยกัน 2 ระดับแรงดันคือ 5 V และ 3.3 V เนื่องจากการทำงานของแต่ละวงจรที่ใช้โอปแอมป์จะ ต้องการแรงดันไฟที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังจำเป็นสำหรับการจัดแรงดันไฟให้อยู่ในย่านที่ใช้งาน และชิป ประมวลผลที่เลือกใช้สำหรับการลดแรงดันคือ LM2576 ในระดับ 5 V และ 3.3 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

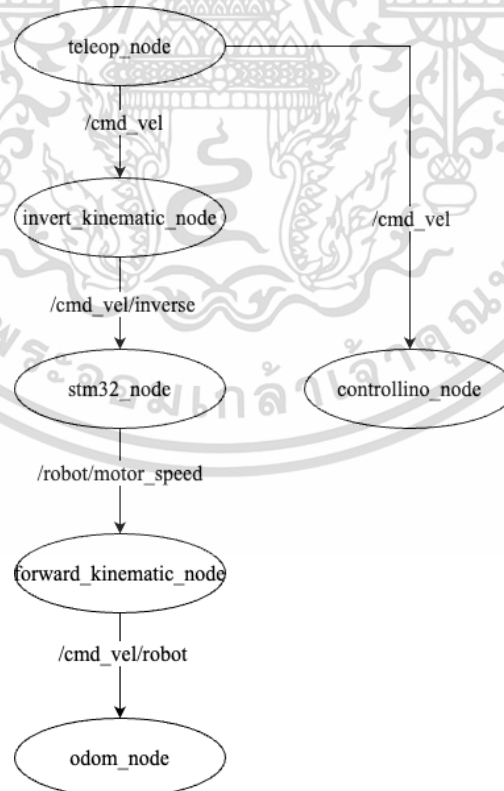
3.3.2 วงจรป้องกันมอเตอร์

วงจรป้องกันมอเตอร์สำหรับหุ่นเคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้ ทำหน้าที่เป็นวงจรตัดการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนด้านหลังที่เป็นส่วนของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยมีอุปกรณ์สำหรับการตัดการทำงานโดยใช้รีเลย์เป็นตัวตัดกระแสไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์ มีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตัดไฟคือปุ่มหยุดฉุกเฉินจะใช้ก็ต่อเมื่อต้องการหยุดการทำงานแบบทันทีทันใด อีกทั้งมีการสั่งการทำงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถส่งสัญญาณสำหรับการหยุดการทำงานของมอเตอร์ได้อีกด้วย

3.4 ระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์นี้จะอ้างอิงจากระบบการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งสำหรับงานวิจัยนี้ โดยผู้จัดทำจะแยกออกเป็นแต่ละหัวข้อสำหรับโหนดที่ใช้สื่อสารกันแต่ละโหนดเพื่อนำไปประมวลผลต่อไป ซึ่งจะแบ่งออกเป็นการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ การรับข้อมูลการระบุตำแหน่งจากไลดาร์ การรับข้อมูลการระบุตำแหน่งจากระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย และระบบการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์

3.4.1 การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.7 โหนดการทำงานของ การควบคุมความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์จะเป็นการสื่อสารกันระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมการเดินทางและถอยหลัง โดยจะมีการส่งข้อมูลความเร็วมาจากคอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลหลัก จากนั้นจะทำการแปลงความเร็วของหุ่นยนต์ที่ต้องการเคลื่อนที่ด้วยการใช้จลศาสตร์ผกผัน จากนั้นจะทำค่าที่ได้จากการใช้จลศาสตร์ผกผันหรือก็คือองศาสำหรับมอเตอร์ควบคุมทิศทาง และความเร็วของมอเตอร์ควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์โดยรูปที่ 3.7 แสดงถึงโหนดการเชื่อมต่อกันระหว่างแต่ละอุปกรณ์ และแต่ละการทำงานของ การควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์

3.4.2 การเก็บบันทึกข้อมูลสำหรับการเรียนรู้



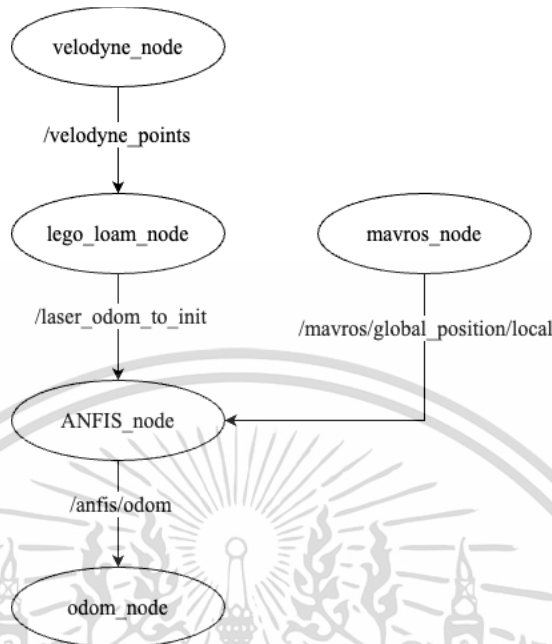
รูปที่ 3.8 การรับข้อมูลและบันทึกค่าจากไลดาร์

รูปที่ 3.9 การรับข้อมูลและบันทึกค่าจาก Pixhawk

จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 เป็นการบันทึกค่าจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบการนำทางดาวเทียม และแรงเฉื่อยของ Pixhawk โดยจะมีการสื่อสารกันระหว่างแต่ละอุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ที่ทำการประมวลผล ซึ่งจะมีการบันทึกข้อมูลเมื่อมีการตรวจจับ QR Code จากจุดที่กำหนดเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

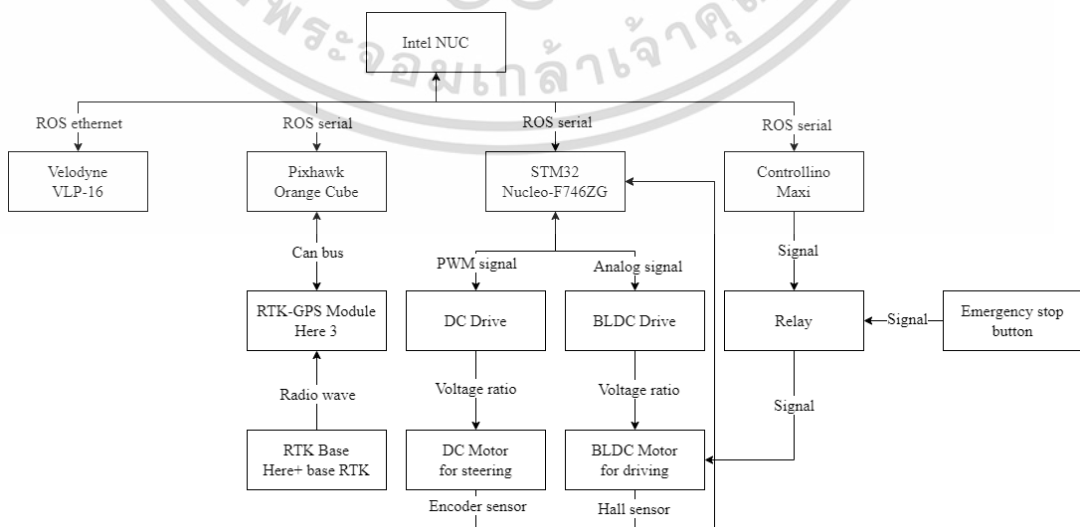
3.5 การใช้ประยุกต์ใช้ ANFIS



รูปที่ 3.10 การใช้งาน ANFIS จากค่าของเซ็นเซอร์ที่ใช้ระบุตำแหน่ง

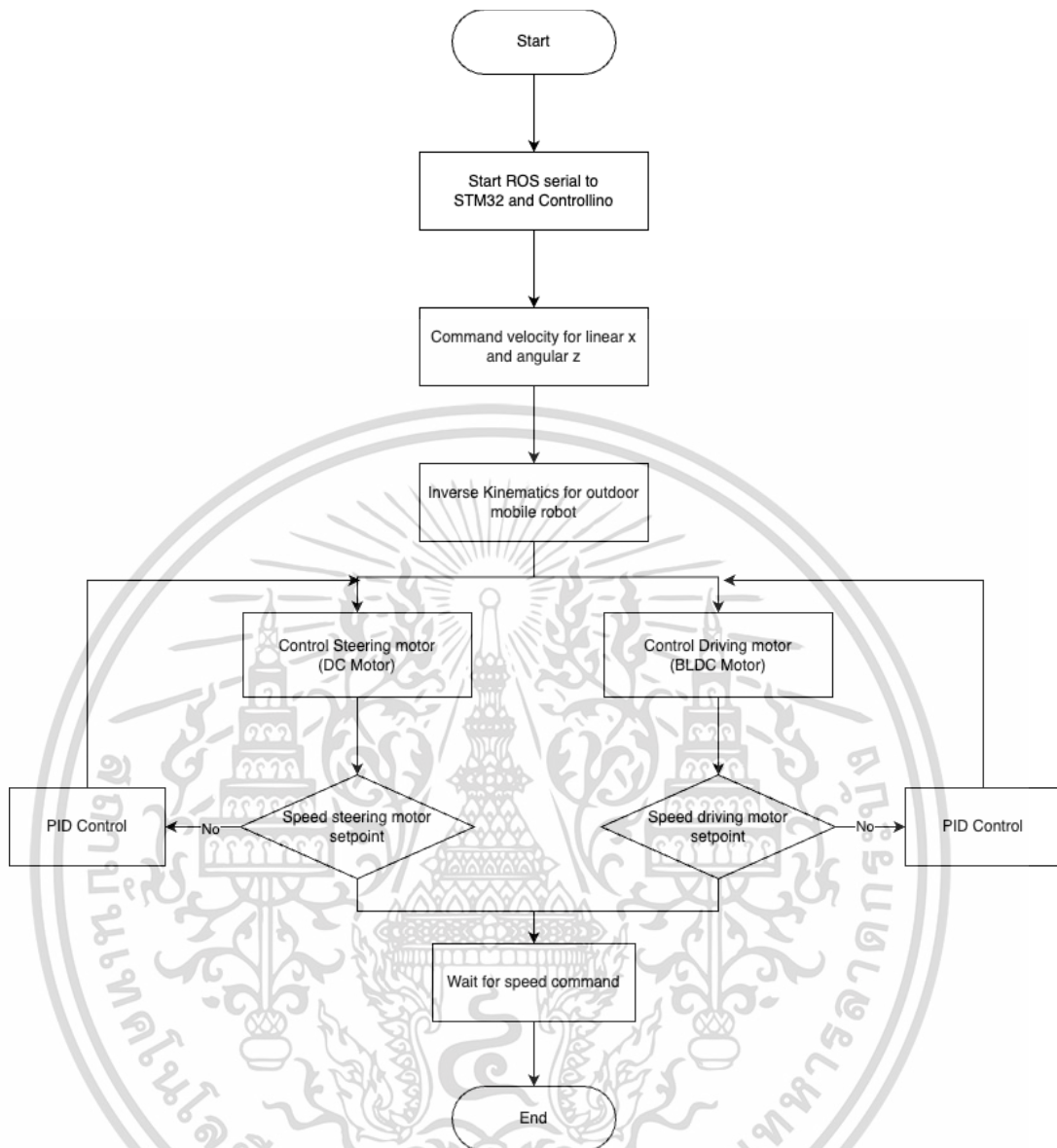
การใช้ประยุกต์ใช้ ANFIS ทำได้โดยการนำโมเดลที่เรียนรู้แล้วมาใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษา Python จากนั้นทำการรับค่าจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และเซ็นเซอร์การระบุตำแหน่งมาคำนวณโดยใช้โมเดลของ ANFIS เพื่อให้ได้ค่าจากการระบุตำแหน่ง

3.6 ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง



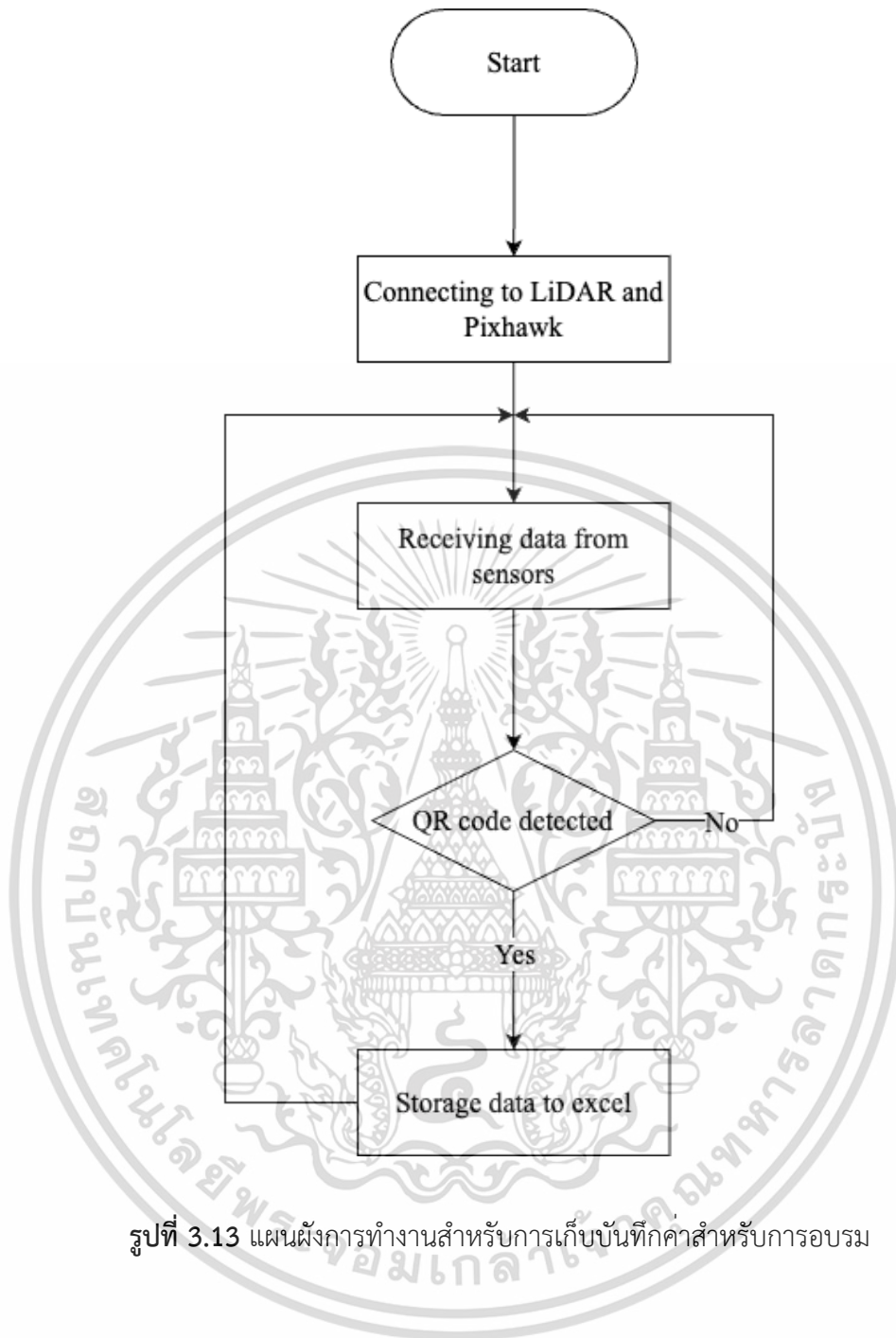
รูปที่ 3.11 แผนผังการเชื่อมต่อของแต่ละอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



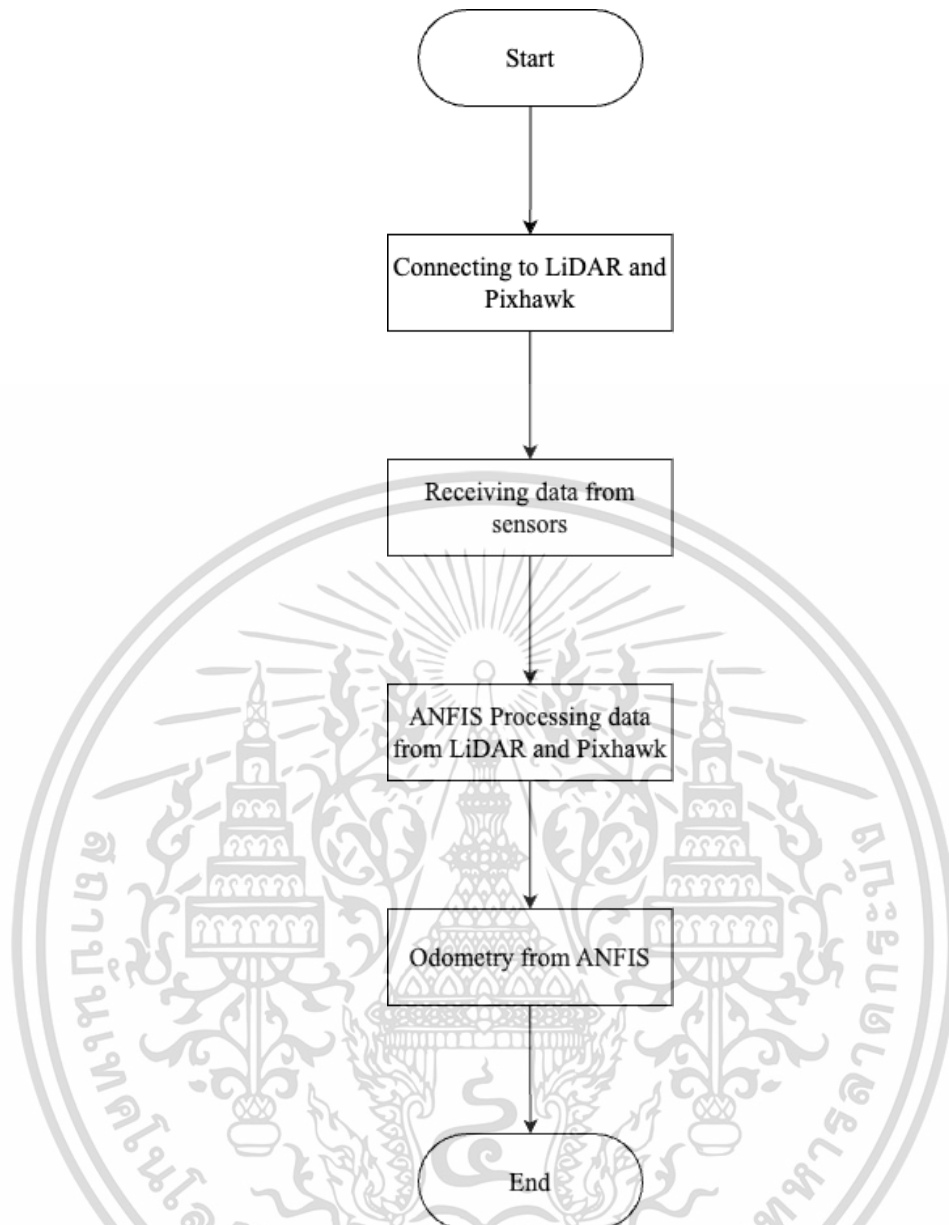
รูปที่ 3.12 แผนผังการทำงานของ การควบคุมความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานสำหรับการเก็บบันทึกค่าสำหรับการอบรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานสำหรับการประมวลผล ANFIS

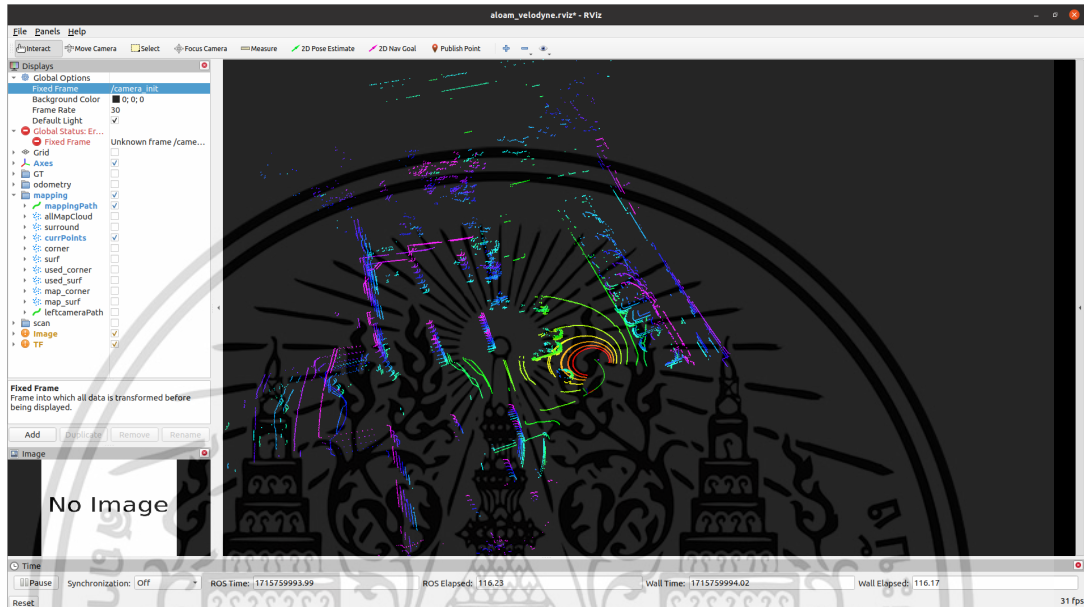
จากรูปที่ 3.11 ได้แสดงถึงแผนผังการทำงานและรูปแบบการเชื่อมต่อของแต่ละอุปกรณ์โดยมีคอมพิวเตอร์ประมวลผลกลางที่คอยรับค่าและประมวลผลให้กับอุปกรณ์ต่างๆ รูปที่ 3.12 แสดงการทำงานของการทำงานของคอมพิวเตอร์ทิศทางและการขับเคลื่อนที่จะส่งความเร็วการเคลื่อนที่ตามความเร็วที่ส่งออกไป รูปที่ 3.13 แสดงการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการนำไปประมวลผลอบรมต่อสำหรับการใช้งานกับ ANFIS และรูปที่ 3.14 แสดงถึงการประมวลผลจากโมเดลที่ทำการฝึกอบรมแล้วของ ANFIS มาประมวลผลสำหรับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้งในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

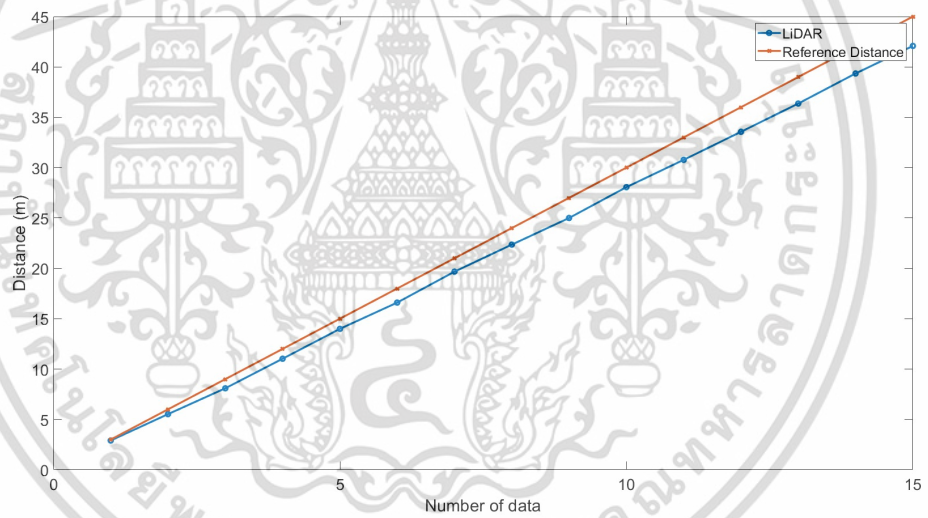
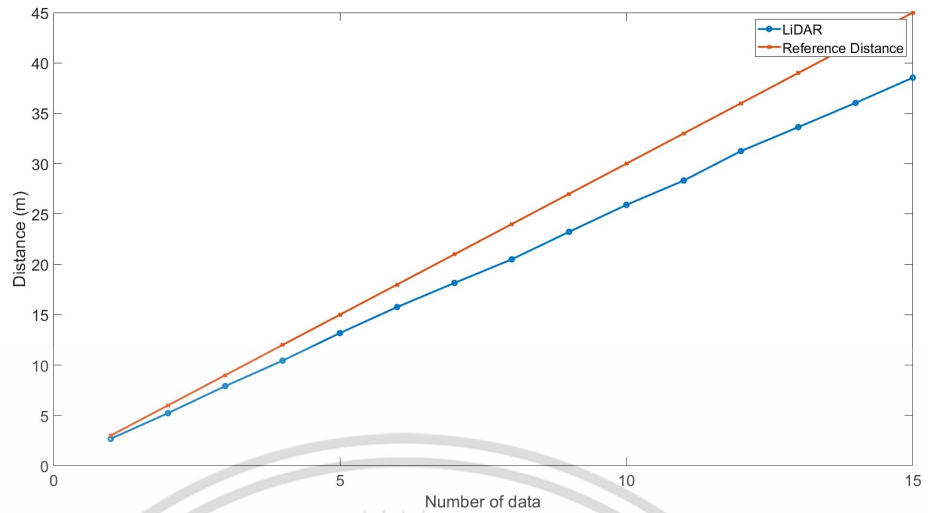
4.1 ผลจากการบันทึกค่าจากระบบการตรวจจับและวัดระยะด้วยแสง



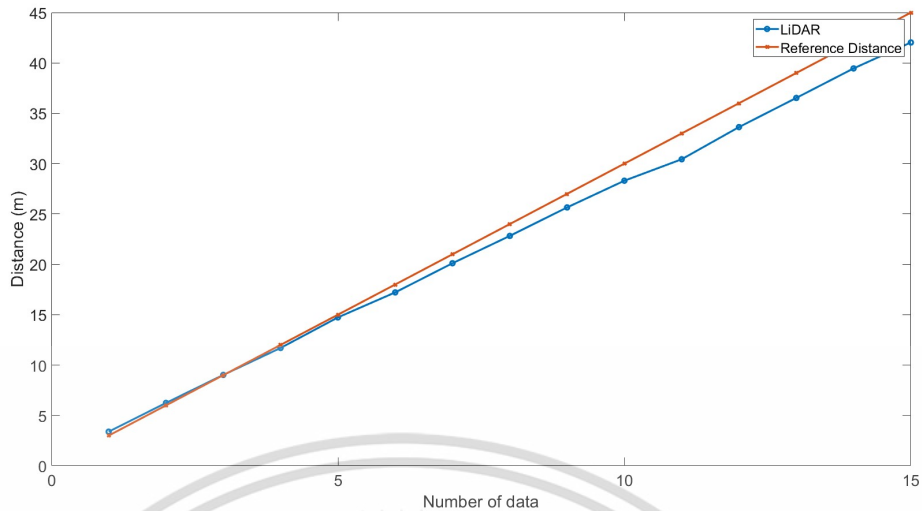
รูปที่ 4.1 การบันทึกค่าการระบุตำแหน่งจากไลดาร์

รูปที่ 4.1 แสดงการเก็บบันทึกค่าการระบุตำแหน่งจากไลดาร์ระหว่างการเคลื่อนที่ โดยจะแปลงค่าการระบุตำแหน่งจากไลดาร์เป็นระบบแกนแบบสามมิติเพื่อให้ง่ายต่อการระบุตำแหน่งของตัวหุ่นยนต์ในแผนที่ โดยการคำนวณการระบุตำแหน่งจะคำนวณจากจุดในแผนที่สามมิติที่ได้จากการสะท้อนจากวัตถุไลดาร์หลาย ๆ จุดมาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาตำแหน่ง ซึ่งการคำนวณการระบุตำแหน่งโดยการใช้ไลดาร์สามมิติจะใช้คำสั่งจากการทำแผนที่และการระบุตำแหน่งแบบแปลผันกับเวลา [13] หลังจากที่ได้ตำแหน่งแต่ละจุดที่ต้องการแล้ว จะบันทึกค่าสำหรับการนำไปเรียนรู้ในอีกขั้นตอนการเรียนรู้ของระบบ ANFIS ซึ่งการเก็บบันทึกค่าของไลดาร์สามมิติจะเก็บบันทึกทั้งหมด 3 ความเร็วคือ 1 km/h, 5 km/h ละ 10 km/h โดยทำการเก็บบันทึกในระยะทางทั้งหมด 45 เมตร เพื่อให้แน่ใจในระยะการเคลื่อนที่ที่จะเลือกใช้งาน โดยตัวอย่างของข้อมูลการเก็บบันทึกค่าจากไลดาร์จะแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



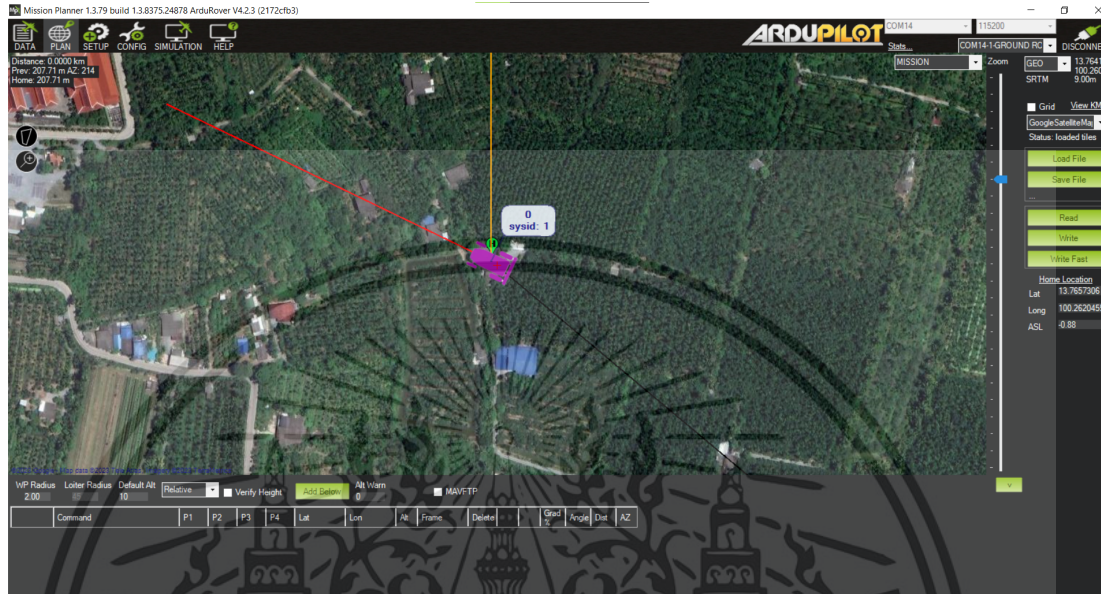
รูปที่ 4.2 การเก็บบันทึกค่าการระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆ ของไลดาร์
(ก) 1 km/h (ข) 5 km/h (ค) 10 km/h

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าที่ทำการเก็บบันทึกโดยใช้ไลดาร์สามมิติ โดยทำการเก็บบันทึกค่าสำหรับการอบรมที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แกน X แสดงถึงจำนวนที่ทำการเก็บบันทึกในแต่ละรอบ และแกน Y แสดงถึงระยะทางที่ทำการเคลื่อนที่ โดยจะเห็นว่าค่าการระบุตำแหน่งโดนการใช้งานของไลดาร์จะมีใกล้เคียงกับค่าที่ทำการเปรียบเทียบกับระยะทางจริงในช่วงระยะที่ต่ำกว่า 9 เมตร และจะเริ่มมีค่าห่างจากค่าจริงในระยะทางที่มากกว่า 12 เมตร

4.2 ผลจากการบันทึกค่าจากระบบการนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย

การบันทึกค่าจากระบบการนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยในงานวิจัยนี้ทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ โดยการทำที่สามารถนำค่ามาใช้ได้ จำเป็นจะต้องตรวจสอบตำแหน่งของเซ็นเซอร์สำหรับการระบุตำแหน่งระบบการนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยก่อน ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการใช้โปรแกรม Mission Planner ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถสื่อสารกันได้ทั้งเซ็นเซอร์สำหรับการรับค่าการระบุตำแหน่ง และเซ็นเซอร์สำหรับการตั้งเสาสัญญาณสำหรับปรับเทียบ โดยรูปที่ 4.3 แสดงการตรวจสอบตำแหน่งจาก GPS และการรับค่าจากเสาเปรียบเทียบตำแหน่ง และรูปที่ 4.4 แสดงการสื่อสารกับดาวเทียมสำหรับการเปรียบเทียบตำแหน่งให้กับเซ็นเซอร์รับค่าระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย แต่เนื่องจากเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปจึงทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องทำการสื่อสารกันระหว่างเซ็นเซอร์ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยผ่านการสื่อสารกันระหว่างโหนดของระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ซึ่งเรียกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษานานาชาติ เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารแบบอนุกรมผ่านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์(ROS serial communication) และทำการแสดงค่าของข้อมูลที่ได้รับมาในระบบแกนสามมิติ เพื่อให้ง่ายต่อการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์และการทำงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 การตรวจสอบตำแหน่งของเซ็นเซอร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบตำแหน่งของเสาเปรียบเทียบกับตำแหน่งจากดาวเทียม

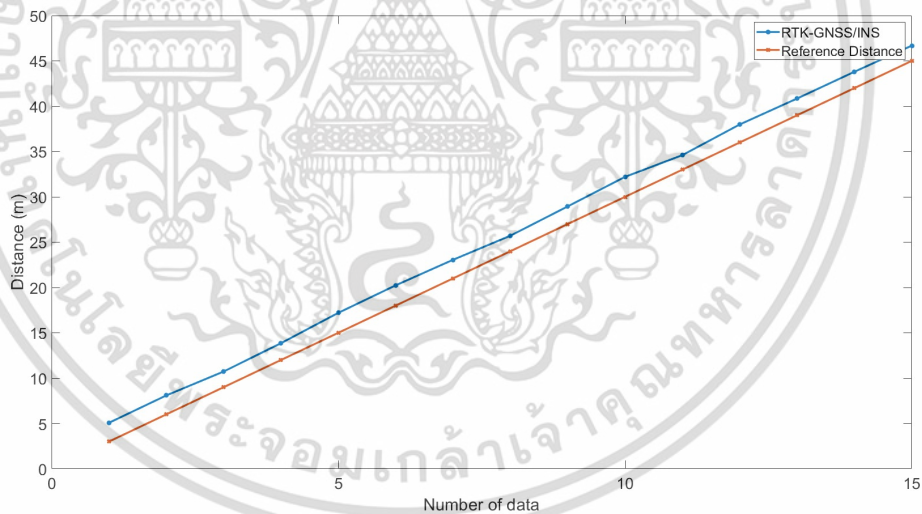
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

thitipongth@james: ~
thitipongth@james:~$ rostopic echo /mavros/local_position/pose -n 1
header:
  seq: 51
  stamp:
    secs: 1677155915
    nsecs: 119394240
  frame_id: "map"
pose:
  position:
    x: 2.610621929168701
    y: -5.823850631713867
    z: 0.013364243321120739
  orientation:
    x: 0.002680684126671502
    y: 0.016627872969935942
    z: -0.561560945392681
    w: -0.8272639436013074
---
```

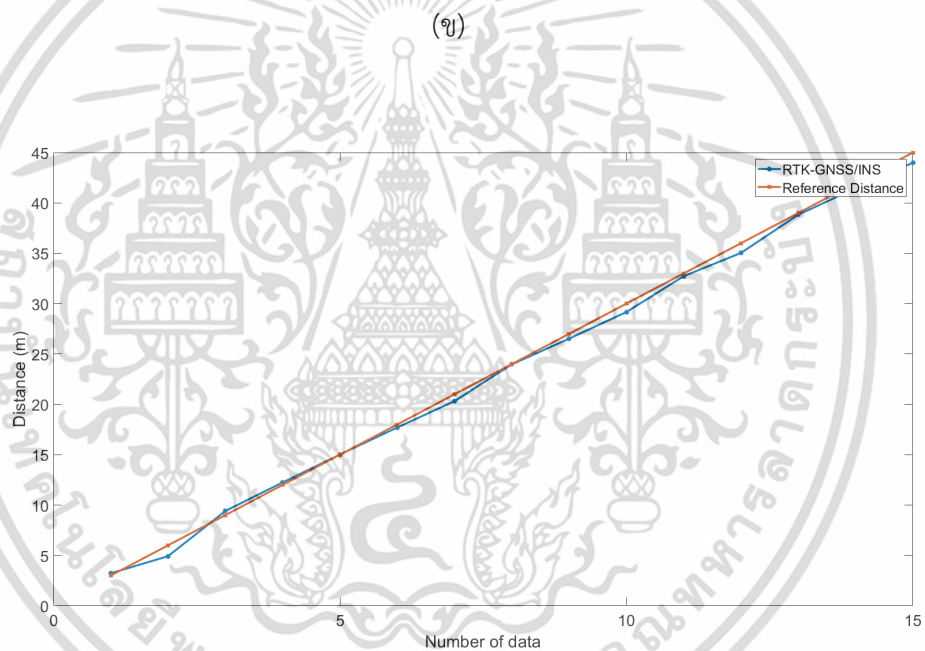
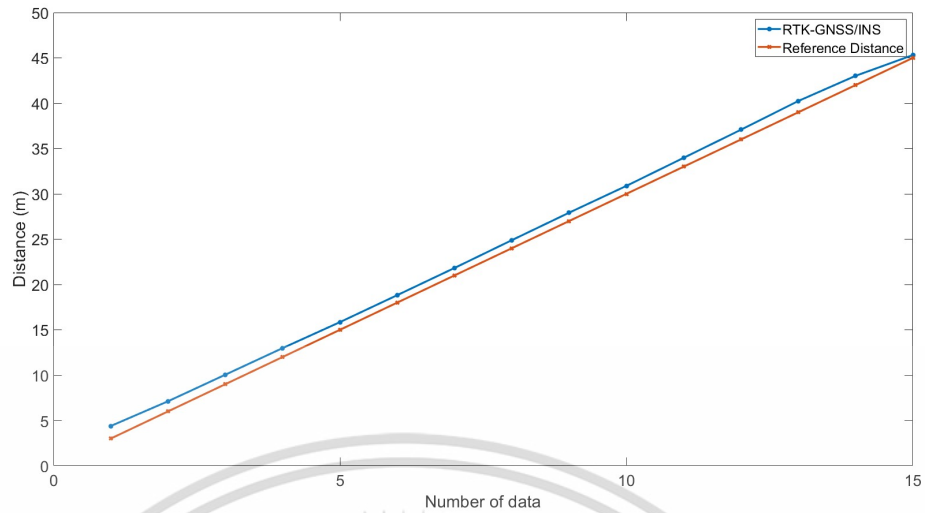
รูปที่ 4.5 การระบุตำแหน่งของเซ็นเซอร์ผ่านระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์

หลังจากที่ทำการสื่อสารกันระหว่างเซ็นเซอร์สำหรับการระบุตำแหน่งจากระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยแล้ว จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการอบรม ANFIS เพื่อผสมการทำงานของเซ็นเซอร์



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การเก็บบันทึกค่าการระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างๆ ของระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย

(ก) 1 km/h (ข) 5 km/h (ค) 10 km/h

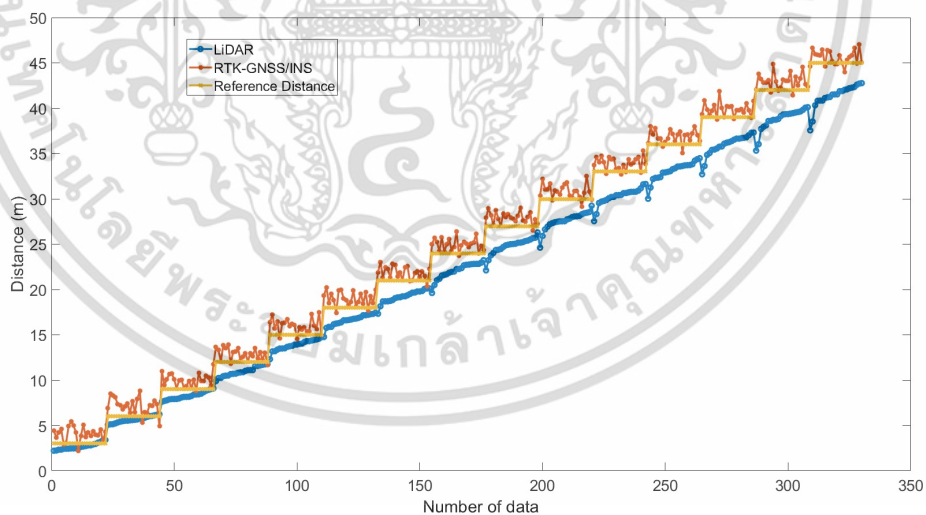
จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าที่ทำการเก็บบันทึกโดยใช้ไลดาร์ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย โดยทำการเก็บบันทึกค่าสำหรับการอมรมที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แกน X แสดงถึงจำนวนที่ทำการเก็บบันทึกในแต่ละรอบ และแกน Y แสดงถึงระยะทางที่ทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ โดยจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วต่ำหรือรูป 4.x (ก) ค่าที่ทำการวัดได้จากระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยมีค่าที่ค่อนข้างห่างออกจากค่าที่ทำการวัดเปรียบเทียบกับระยะจริง แต่เมื่อมีความเร็วที่เริ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการใช้งานระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยจะมีค่าที่เข้าใกล้กับค่าที่ทำการวัดเปรียบเทียบกับระยะจริง ดังนั้นการเชื่อค่าจากข้อมูลของระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยจะมีความน่าเชื่อถือเมื่อมีความเร็วค่อนข้างสูง

4.3 ผลจากการเรียนรู้ข้อมูลสำหรับการใช้งาน ANFIS

ในกระบวนการเก็บข้อมูล การวัดค่าด้วยเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยจะดำเนินการที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ในระหว่างกระบวนการนี้ได้มีการบันทึกค่าการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งข้อมูลจะถูกเก็บรวบรวมอย่างต่อเนื่องสำหรับทั้งสองแกน วิธีการนี้ช่วยให้แน่ใจว่าชุดข้อมูลรวมถึงความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวและตำแหน่งของยานพาหนะในทั้งสองมิติแนวในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการกำหนดตำแหน่งและนำทางของยานพาหนะอัตโนมัติอย่างแม่นยำ.

ในการวิจัยนี้ ANFIS ถูกใช้สำหรับการผสานข้อมูลเซ็นเซอร์ คำนวณค่าสำหรับกระบวนการผสานข้อมูลเหล่านี้คือค่าการระบุตำแหน่งจากทั้งสองเซ็นเซอร์เพื่อเป็นการบันทึกค่าของชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการฝึกอบรมตามที่แสดงในรูปที่ 4.7

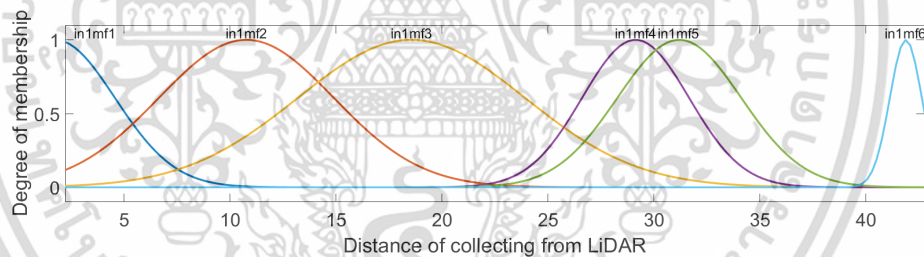


รูปที่ 4.7 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกอบรมของ ANFIS

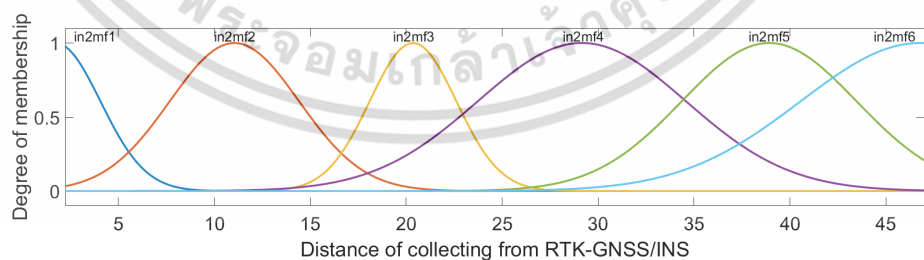
จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงชุดข้อมูลที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ทั้งสองโดเมนที่แกน X แสดงถึงจำนวนค่าที่บันทึกไว้และแกน Y แสดงระยะทางที่เคลื่อนที่แสดงเป็นหน่วยเมตร พบว่าในระยะทางสั้นๆ จากจุดเริ่มต้น ค่าจากไลดาร์มีความใกล้เคียงกับระยะทางจริง อย่างไรก็ตามเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่าจากไลดาร์มีแนวโน้มที่จะเบี่ยงเบนไปจากค่าจริงมากขึ้น ในขณะที่ค่าจาก RTK-GNSS/INS มีความแม่นยำสูงกว่าไลดาร์ในกรณีที่ระยะทางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าจาก RTK-GNSS/INS มีความแปรปรวนสูงและอาจมีข้อผิดพลาดได้หากสัญญาณ GPS ไม่ดีพอ

จากไลดาร์เริ่มมีการเบี่ยงเบนจากค่าจริง ในทางตรงกันข้าม ค่าจากเซ็นเซอร์ระบบนำทางดาวเทียม และแรงเฉื่อย แสดงการเบี่ยงเบนอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลไลดาร์การสังเกตนี้ชี้ให้เห็นว่าแม้ว่าไลดาร์จะให้ความแม่นยำสูงในระยะทางสั้น แต่ความแม่นยำก็ลดลงเมื่อระยะทางยาวขึ้น ในขณะที่เซ็นเซอร์ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยรักษาความแม่นยำได้คงที่ แม้ว่าจะมีการเบี่ยงเบนคงที่จากการอ่านค่าไลดาร์การวิเคราะห์ประเภทนี้มีความสำคัญในการเข้าใจพฤติกรรมของเซ็นเซอร์เหล่านี้ในระยะทางต่างๆ และช่วยในการปรับใช้การผสมผสานกันเพื่อกำหนดตำแหน่งและนำทางที่แม่นยำ.

การการอบรมชุดข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไว้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian) ให้เป็นรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกสำหรับ ANFIS ตามที่แสดงในรูปที่ 4.8 แกน X แสดงถึงระยะทางที่ทำการบันทึกค่า และแกน Y แสดงถึงระดับการเป็นสมาชิก การเลือกฟังก์ชันเกาส์เซียนมีความเหมาะสมสำหรับการจัดการกับค่าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ลักษณะนี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงที่ค่อยเป็นค่อยไปในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง โดยความเร็วเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าที่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ในบริบทของ ANFIS ฟังก์ชันเกาส์เซียนสามารถปรับตัวได้ดีระหว่างการเรียนรู้ ให้วิธีการผสมผสานข้อมูลที่เข้มแข็งจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และเซ็นเซอร์ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกที่ได้จากการอบรมของ

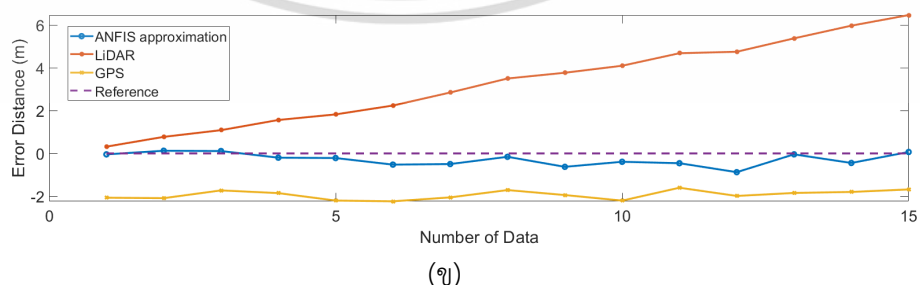
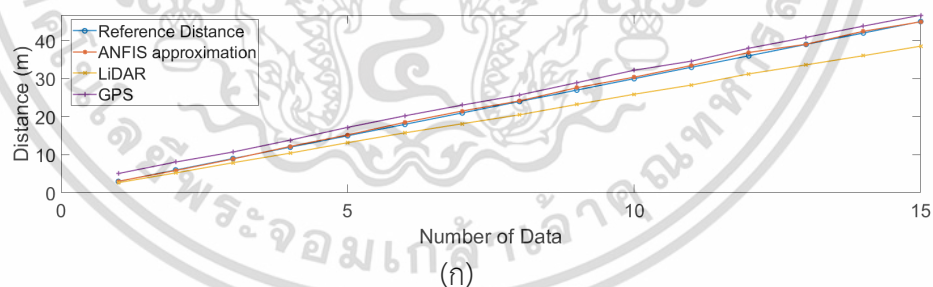
(ก) ไลดาร์ (ข) ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับการฝึกอบรมในการวิจัยนี้ พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่ต่ำที่สุดหรือที่เรียกว่า Root Mean Square Error (RMSE) ที่ได้คือ 0.398562 ค่า RMSE ที่ 0.398562 บ่งชี้ว่าแบบจำลอง ANFIS ที่ได้รับการฝึกอบรมด้วยชุดข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย ได้บรรลุระดับความแม่นยำที่ดีในการทำนายค่าที่ถูกต้องอย่างสมเหตุสมผล ค่า RMSE ที่ค่อนข้างต่ำนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการผสมผสานข้อมูลเซ็นเซอร์โดยใช้ ANFIS ซึ่งบ่งบอกว่าการรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยผ่านแบบจำลอง ANFIS ให้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้และแม่นยำ โดยรวมแล้ว การบรรลุค่า RMSE สำหรับการฝึกอบรมที่ต่ำสุดที่ 0.398562 เป็นผลลัพธ์ที่น่าพอใจสำหรับการวิจัยนี้และแนะนำว่าวิธีการผสมผสานเซ็นเซอร์โดยใช้ ANFIS สามารถบันทึกและรวมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่วัดได้จากเซ็นเซอร์.

4.4 ผลการเปรียบเทียบการระบุตำแหน่งที่ระยะทางต่างๆ

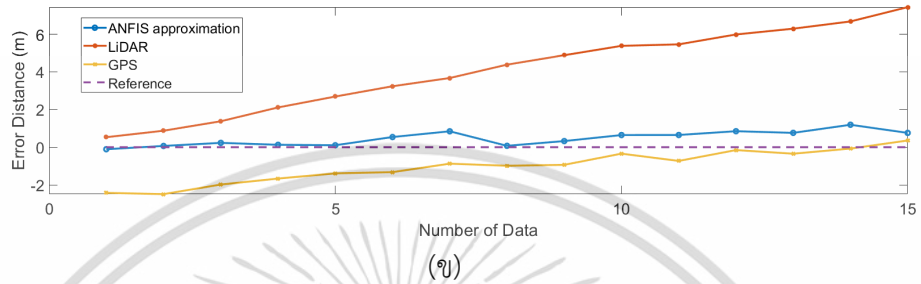
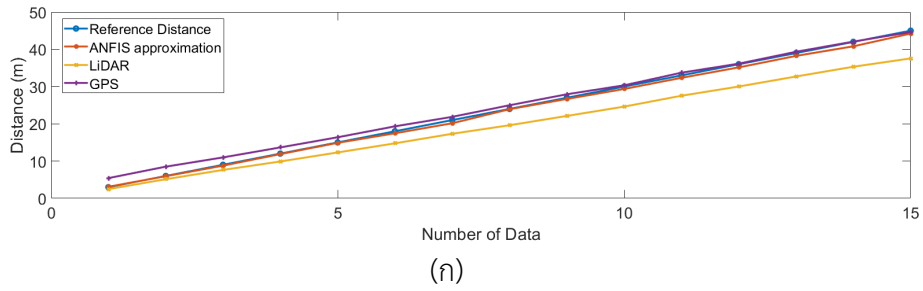
การเก็บบันทึกและฝึกค่าจากชุดข้อมูลสำหรับการผสมผสานการทำงานของข้อมูลจากเซ็นเซอร์ดำเนินการเป็นเวลา 500 รอบ โดยใช้ชุดข้อมูล 330 ชุด ส่งผลให้ได้ค่า RMSE การฝึกฝนต่ำสุดประมาณ 0.398562 จากนั้น แบบจำลองที่ผ่านการฝึกฝนถูกทดสอบกับการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการหลอมรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความสามารถของระบบ ผลลัพธ์ของการทดสอบเหล่านี้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.9 - 4.11



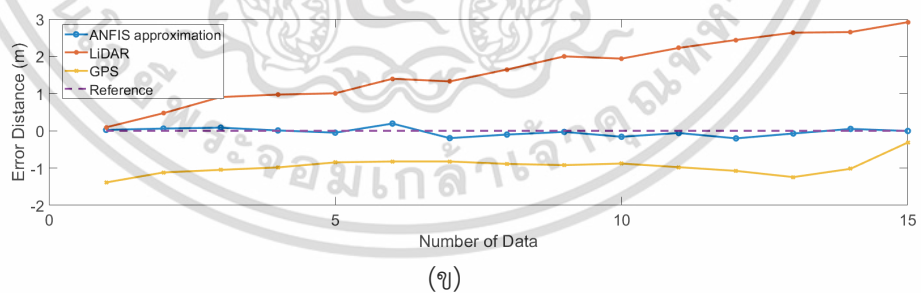
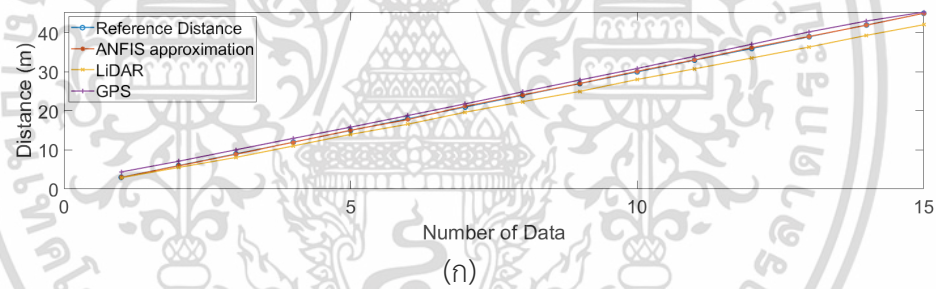
รูปที่ 4.9 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 1 km/h ตัวอย่างที่ 1

(ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

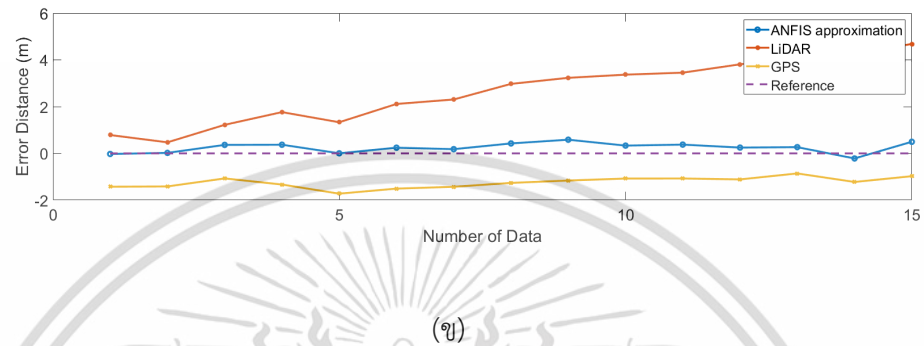
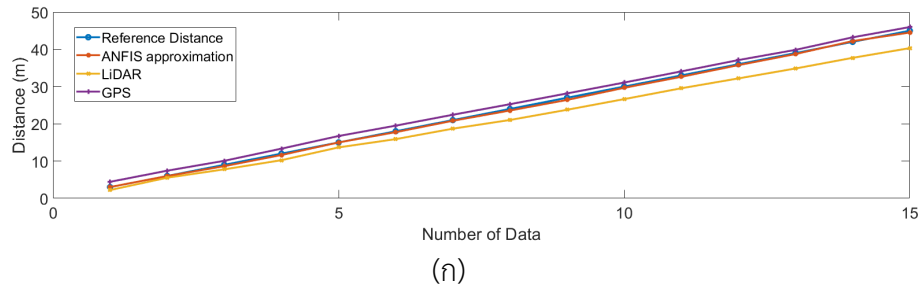


รูปที่ 4.10 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 1 km/h ตัวอย่างที่ 2
 (ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง

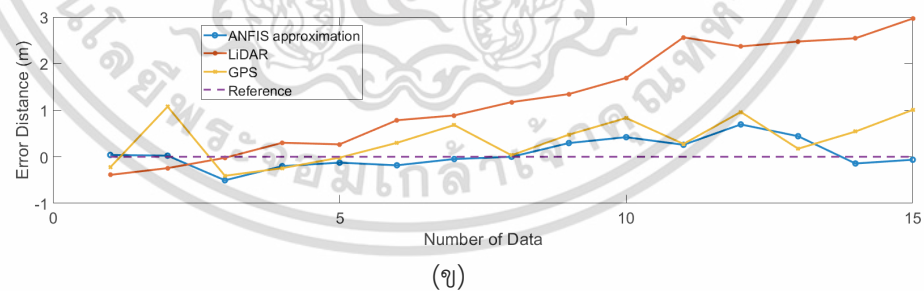
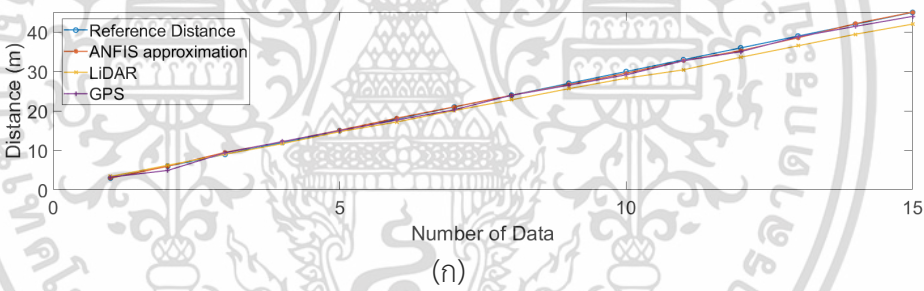


รูปที่ 4.11 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 5 km/h ตัวอย่างที่ 1
 (ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

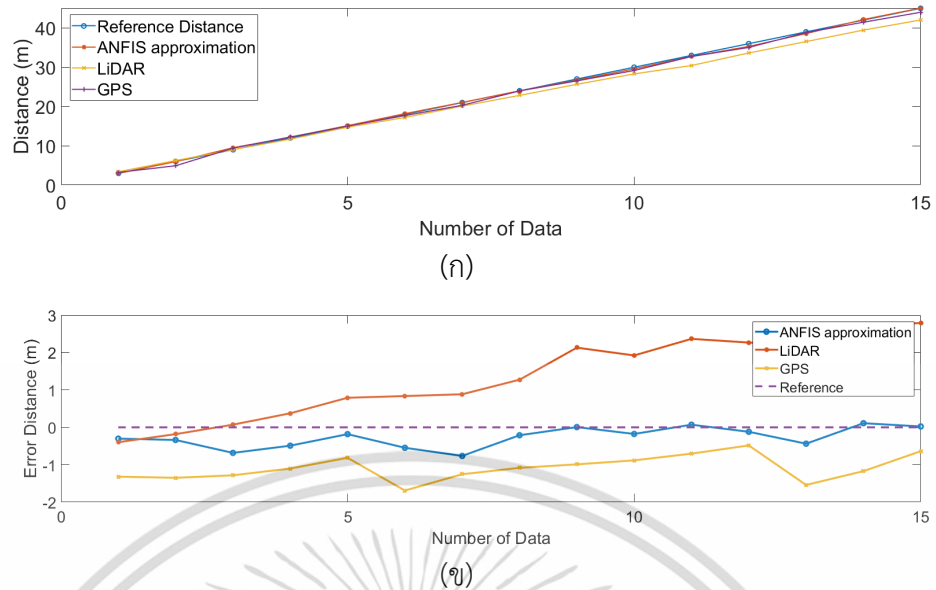


รูปที่ 4.12 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 5 km/h ตัวอย่างที่ 2
 (ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง



รูปที่ 4.13 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 10 km/h ตัวอย่างที่ 1
 (ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

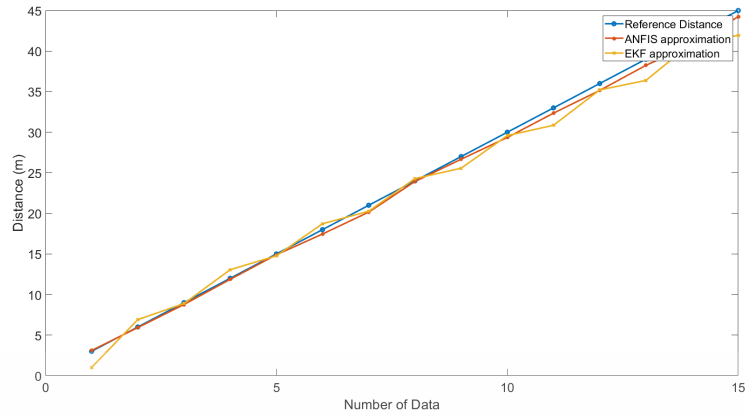


รูปที่ 4.14 การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ความเร็ว 10 km/h ตัวอย่างที่ 2
(ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง

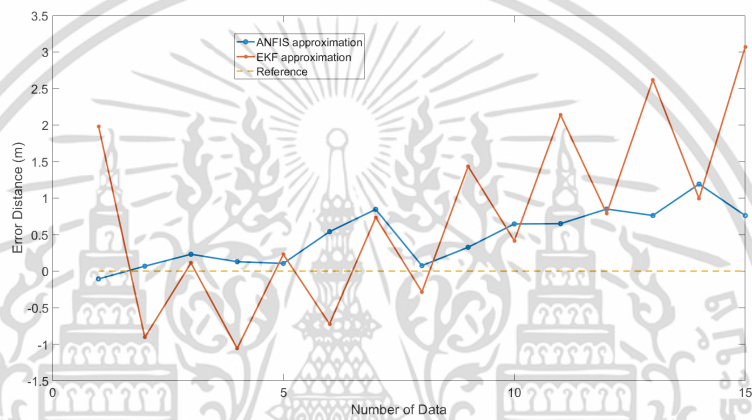
รูปที่ 4.9 – 4.14 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของการผสมผสานข้อมูลจากเซ็นเซอร์โดยใช้ ANFIS เปรียบเทียบกับระยะทางจริง โดยแกน X แสดงถึงจำนวนค่าที่บันทึกไว้และแกน Y ค่าจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยที่ความเร็วต่างๆ มีแนวโน้มที่จะแตกต่างกัน ค่าการคำนวณระยะทางจากไลดาร์จะค่อยๆ เบี่ยงเบนจากค่าจริง โดยมีความแม่นยำเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ค่าการคำนวณระยะทางจากเซ็นเซอร์ระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อย มีการเบี่ยงเบนจากค่าจริงอย่างสม่ำเสมอพร้อมกับความไม่แม่นยำ เมื่อใช้การผสมผสานข้อมูลจากเซ็นเซอร์โดยใช้ ANFIS จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการหลอมรวมใกล้เคียงกับค่าระยะทางเคลื่อนที่อ้างอิง และข้อผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางเคลื่อนที่อ้างอิงของไลดาร์และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยนั้นมีขนาดเล็กลงอย่างมาก ดังนั้น ค่าจากการผสมผสานข้อมูลจากเซ็นเซอร์โดยใช้ ANFIS จึงสามารถนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5 ผลการเปรียบเทียบการทำงานกับวิธีการอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบกันระหว่าง ANFIS และตัวกรองคาลมานแบบขยายหรือที่เรียกว่า Extended Kalman Filter(EKF) เพื่อวิเคราะห์การปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ การวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างของความเร็วต่างๆ นี้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 - 4.17 และตารางที่ 4.1 – 4.3

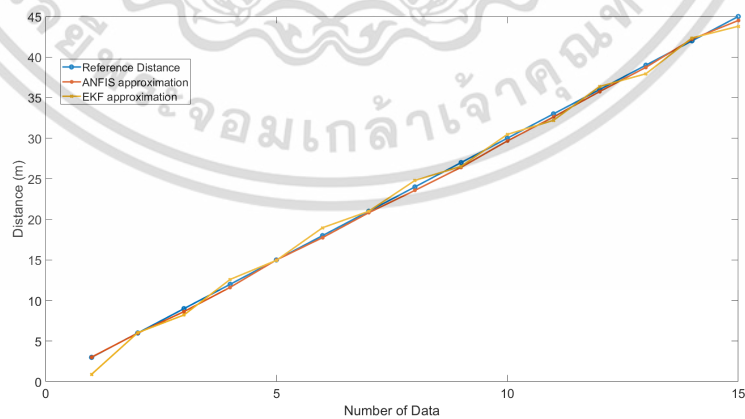


(ก)



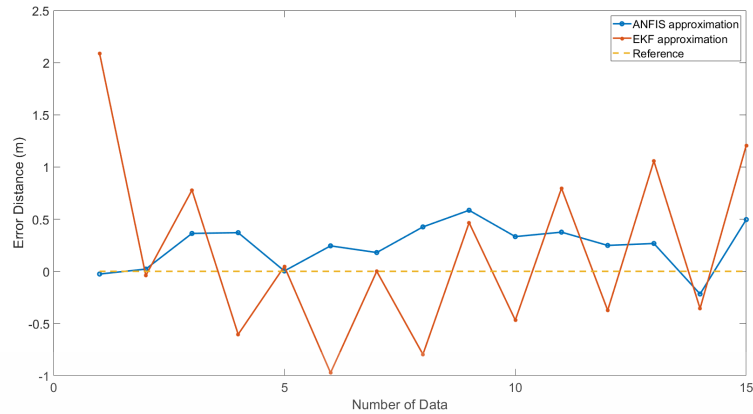
(ข)

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบการผสมผสานเซ็นเซอร์ระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ 1 km/h
 (ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง



(ค)

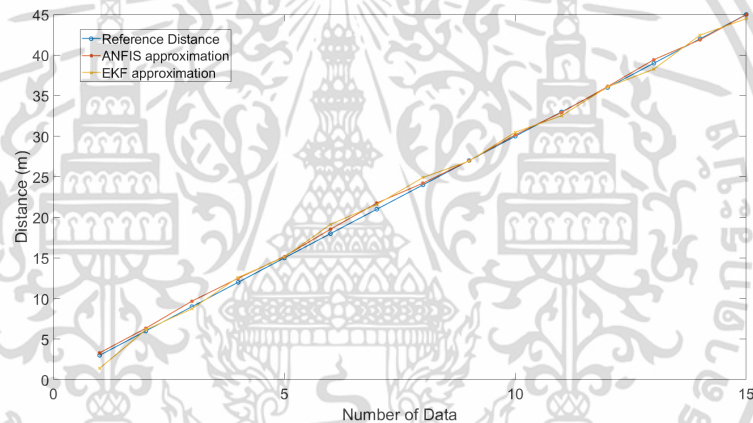
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



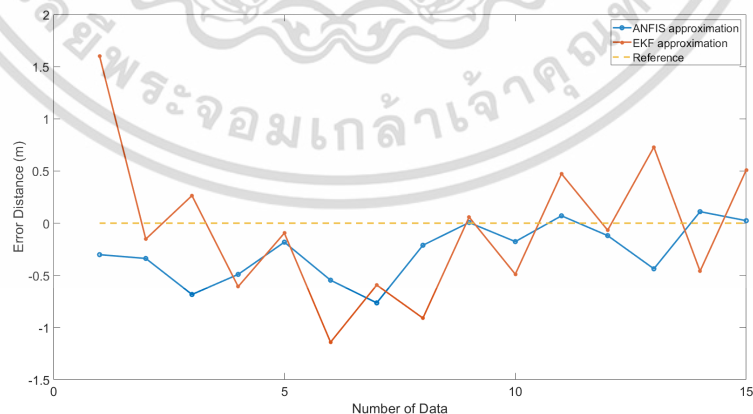
(ข)

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบการผสมผสานเซ็นเซอร์ระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ 5 km/h

(ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบการผสมผสานเซ็นเซอร์ระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ 10 km/h

(ก) ประสิทธิภาพการทำงาน (ข) ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการผสมผสานระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ความเร็ว 1 km/h

ระยะอ้างอิง (m)	ANFIS (m)	EKF (m)	ANFIS (%error)	EKF (%error)
3	3.106665	1.016108	3.55549308	66.12972
6	5.932181	6.907043	1.130312299	15.11739
9	8.769135	8.888189	2.565166998	1.242343
12	11.87099	13.05938	1.075122811	8.828196
15	14.8946	14.77031	0.702688606	1.53126
18	17.4595	18.72331	3.002799516	4.018387
21	20.15436	20.26464	4.026857752	3.501731
24	23.92515	24.28346	0.31187423	1.181102
27	26.67357	25.56485	1.209015317	5.315383
30	29.35391	29.58356	2.153624526	1.388146
33	32.35047	30.85892	1.968258411	6.488117
36	35.14987	35.21127	2.361468561	2.190904
39	38.23807	36.38128	1.953667686	6.714671
42	40.80816	41.00704	2.837715146	2.364184
45	44.23964	41.92829	1.689688633	6.826017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบการผสมผสานระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ความเร็ว 5 km/h

ระยะอ้างอิง (m)	ANFIS (m)	EKF (m)	ANFIS (%error)	EKF (%error)
3	3.025878	0.912029	0.862586691	69.59902185
6	5.978427	6.040036	0.359545906	0.66726787
9	8.636578	8.221827	4.038024022	8.64637139
12	11.62931	12.60406	3.089062376	5.033800785
15	14.99644	14.95244	0.023743407	0.317043699
18	17.7557	18.9722	1.357203408	5.401105138
21	20.81974	20.99957	0.858357685	0.002024758
24	23.57408	24.79571	1.774675223	3.315470774
27	26.41466	26.53369	2.167926909	1.727079093
30	29.66711	30.46801	1.109629101	1.56003128
33	32.62435	32.20378	1.138334018	2.412789893
36	35.75159	36.37379	0.690039319	1.038319438
39	38.73287	37.94279	0.684951756	2.710793664
42	42.21711	42.35631	0.516939532	0.848366526
45	44.50377	43.79333	1.102742618	2.681483578

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการผสมผสานระหว่าง ANFIS และ EKF ที่ความเร็ว 10 km/h

ระยะอ้างอิง (m)	ANFIS (m)	EKF (m)	ANFIS (%error)	EKF (%error)
3	3.301841434	1.398909494	10.0613811	53.36968
6	6.338048882	6.152553211	5.63414804	2.542554
9	9.683320755	8.735862053	7.59245284	2.934866
12	12.49093677	12.60793217	4.09113977	5.066101
15	15.18193696	15.09518036	1.21291306	0.634536
18	18.54640556	19.14086377	3.03558642	6.338132
21	21.76389549	21.59279341	3.63759755	2.822826
24	24.21155327	24.90996676	0.88147197	3.791528
27	26.99368361	26.94181607	0.02339404	0.215496
30	30.17662315	30.48922456	0.58874382	1.630749
33	32.92936388	32.52696684	0.21404885	1.433434
36	36.11931053	36.06725431	0.33141814	0.186818
39	39.43728269	38.27143649	1.12123767	1.868112
42	41.88955522	42.45995099	0.26296376	1.095121
45	44.97604013	44.49019338	0.05324415	1.132904

รูปที่ 4.15 - 4.17 และตารางที่ 4.1 - 4.3 แสดงค่าของ ANFIS และ EKF ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์สำหรับ ANFIS ที่ความเร็ว 1 km/h ,5 km/h และ 10 km/h อยู่ที่ 2.03426%, 1.31825% และ 2.58278% ตามลำดับโดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 1.05420%, 1.07034% และ 3.09173% ตามลำดับ ในทางกลับกัน EKF มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ความเร็ว 1 km/h ,5 km/h และ 10 km/h อยู่ที่ 8.85584%, 7.06406% และ 5.67086% ตามลำดับ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 16.2816%, 17.45175% และ 13.31051% ตามลำดับ

จากที่สังเกตเห็น ANFIS แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์ที่แต่ละความเร็วที่ทำการทดสอบมีค่าต่ำกว่า EKF ในทุกช่วงความเร็วซึ่งบ่งชี้ถึงการเบี่ยงเบนจากค่าที่วัดได้น้อยกว่า นอกจากนี้ ANFIS ยังแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า ซึ่งหมายถึงความเสถียรของการวัดที่สูงกว่า EKF

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง พบว่าการผสมผสานการทำงานของข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไลดาร์และเซ็นเซอร์การระบุตำแหน่งดาวเทียมและแรงเฉื่อยเข้าด้วยกัน มีความสามารถในการปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นโดยการใช้ระบบอนุमानพัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือ การเรียนรู้ของระบบอนุमानพัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือที่ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของระยะการเคลื่อนที่หุ่นยนต์พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่ต่ำที่สุดประมาณ 0.398562 และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้ผลลัพธ์ของการระบุตำแหน่งที่สอดคล้องกับระยะทางอ้างอิงมากกว่าข้อมูลจากการใช้เซ็นเซอร์ไลดาร์ และระบบนำทางดาวเทียมและแรงเฉื่อยแบบตัวใดตัวหนึ่ง

ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงการใช้งานระบบอนุमानพัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือที่ผู้จัดทำได้นำเสนอมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าวิธีการใช้งานตัวกรองคาลมานแบบขยาย ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์โดยวิธีการใช้ระบบอนุमानพัฒนาด้วยเครือข่ายปรับตัวที่คลุมเครือมีความเหมาะสมและเสถียรภาพที่มากกว่าการใช้งานตัวกรองคาลมานแบบขยายสำหรับการใช้งานในระบบการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลางแจ้ง

ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ต้นแบบ ซึ่งที่ทำการเก็บบันทึกไว้คือในระยะ 45 เมตรซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และในอนาคตจะมีการออกแบบระบบสลับการทำงานเมื่อมีระยะที่มากกว่า 45 จะใช้ระบบการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียมและเมื่อใกล้ถึงจุดหมายที่กำหนดไว้จะสลับกลับมาใช้การผสมผสานการทำงานของเซ็นเซอร์เพื่อให้เข้าถึงจุดได้อย่างแม่นยำ และใช้ระบบนี้ในการออกแบบและพัฒนาให้เข้าสู่รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติไร้คนขับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. R.-Gómez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. G.-Sarabia, C. T.-Ferrero and J. P.-Oria. "Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments" **IEEE Access**. 2017, vol. 5. November 2017. Pp. 26754-26773.
- [2] A. S. Rajawat, P. Bedi, S. B. Goyal, P. K. Shukla, A. Zaguia, A. Jain, and M. M. Khan. "Reformist Framework for Improving Human Security for Mobile Robots in Industry 4.0" **Mobile Inf. Syst.**, 2021, vol. 2021. October 2021. Pp. 1-10.
- [3] D. Duan, S. Chen, Z. Feng, and J. Li. "Industrial robots and firm productivity" **Struct. Chang. Econ. Dyn.**, 2023, vol. 67. August 2023, Pp. 388-406.
- [4] M. B. Alatise and G. P. Hancke. "A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods" **IEEE Access**. 2020, vol. 8. Pp. 39830 – 39846.
- [5] T. Ando, W. Kugimiya, T. Hashimoto, F. Momiyama, K. Aoki and K. Nakano. "Lateral Control in Precision Docking Using RTK-GNSS/INS and LiDAR for Localization" **IEEE Trans. Intell. Veh.** 2021, vol. 6. March 2021. Pp. 78-87.
- [6] Z. Niu, X. Zhao, J. Sun, L. Tao and B. Zhu. "A Continuous Positioning Algorithm Based on RTK and VI-SLAM With Smartphones" **IEEE Access**. 2020, vol. 8. October 2020. Pp. 185638-185650.
- [7] I. Um, S. Park, H. T. Kim and H. Kim. "Configuring RTK-GPS Architecture for System Redundancy in Multi-Drone Operations" **IEEE Access**. 2020, vol. 8. April 2020. Pp. 76228-76242.
- [8] A. Thakur, B. Anand, H. Verma and P. Rajalakshmi. "Real Time Lidar Odometry and Mapping and Creation of Vector Map" **Proc. ICARA, Prague, Czech Republic**. February, 2022. Pp. 181-185
- [9] N. Csanyi and C. K. Toth. "Improvement of Lidar Data Accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets" **Photogramm. Eng. Remote Sens.** 2007, vol.73. April 2007. Pp. 385-396.
- [10] J.-S. R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system" **IEEE Trans. Syst. Man Cybern.** 1993, vol. 23. May-June 1993. Pp. 665-685.
- [11] Velodyne Lidar. "What is lidar." [Online]. Available : <https://velodynelidar.com/what-is-lidar>. 2024.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [12] M. Gradu. “The Benefits of Advanced 3D Lidar for Autonomous Mobile Robots” **SAE Technical Paper**. 2021, April 2021. Pp. 1-3
- [13] Z. Ji and S. Sanjiv. “LOAM : Lidar Odometry and Mapping in real-time” **Robotics: Science and Systems Conference (RSS)**. 2014. Pp. 109-111.
- [14] N. Shen, L. Chen, J. Liu, L. Wang, T. Tao, D. Wu, R. Chen. “A Review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-Based Dynamic Monitoring Technologies for Structural Health Monitoring” **Remote Sens**. 2019, Vol. 9. April 2019. Pp. 1001-1045.
- [15] Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. “**Space Segment**.” [Online]. Available : <https://www.gps.gov/systems/gps/space>. 2024
- [16] เจษฎา กীরติภรณ์. “ทฤษฎีสัมพันธภาพระบบ GPS.” [Online]. Available : <https://www.narit.or.th/index.php/astronomy-article/222-relating-gps-systems>. 2024.
- [17] Japan Aerospace Exploration Agency. “**Positioning to know your location and time**.” [Online]. Available : https://global.jaxa.jp/countdown/f18/overview/gps_e.html. 2024.
- [18] R. D. Christ and R. L. Wernli. “Chapter 17 - Navigational Sensors” **The ROV Manual (Second Edition)**. 2014, Pp. 453-475.
- [19] I. Um, S. Park, H. T. Kim and H. Kim. “Configuring RTK-GPS Architecture for System Redundancy in Multi-Drone Operations” **IEEE Access**. 2020, vol. 8. April 2020. Pp. 76228-76242.
- [20] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ. “ระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์.” [Online]. Available : <https://www.hii.or.th/งานของเรา/งานวิจัยและพัฒนา/2019/11/12/ระบบโครงข่าย-การรังวัด>. 2024.
- [21] กรมที่ดิน. “ภาพรวมพื้นที่ประกาศทำการรังวัดโดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งโดยกรมที่ดิน ณ ปัจจุบัน.” [Online]. Available : <https://dol-rtknetwork.com/index.php/npage/view/3#>. 2024.
- [22] Hi-Target. “RTK และ RTK GNSS Network ต่างกันอย่างไร.” [Online]. Available : <https://www.universalcorp.co.th/all-blogs/item/16-rtk-และ-rtk-gnss-network-ต่างกันอย่างไร>. 2024.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [23] Jang, J.-S. R. “ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems” **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics** 23. 1993, May 1993. Pp. 665–685.
- [24] P. S. Madhukar and L. B. Prasad. “State Estimation using Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter” **2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), Lakshmanagarh, India.** 2020, February 2020. Pp. 1-4.
- [25] A. Jarrah, A.-K. A.-Tamimi, and T. Albashir. “Optimized Parallel Implementation of Extended Kalman Filter Using FPGA” **Journal of Circuits, Systems and Computers.** 2017, vol.27. June 2017. Pp. 1850009.
- [26] F. Dellaert and S. Hutchinson. “Kinematics for Driving.” [Online]. Available : https://www.roboticsbook.org/S62_driving_actions.html. 2024.
- [27] AmandaDattalo. “ROS/Introduction.” [Online]. Available : <http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>. 2024.
- [28] AkkharaphongEKSIRI. “Understanding ROS Topic.” [Online]. Available : <http://wiki.ros.org/th/ROS/Tutorials/UnderstandingTopics>. 2024.
- [29] The MathWorks, Inc. “SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/discovery/slam.html>. 2024.
- [30] FabriceLaribe. “Navigation.” [Online]. Available : <http://wiki.ros.org/navigation>. 2024.



ภาคผนวก ก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Localization for Outdoor Mobile Robot Using LiDAR and RTK-GNSS/INS

Thitipong Thepsit, Poom Konghuayrob, Anakkapon Saenthon, and Sarucha Yanyong*

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
1 Chongkrung, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(Received January 15, 2024; accepted March 25, 2024)

Keywords: localization, fusion sensor, neural fuzzy interface, odometry, autonomous mobile robot

Two types of sensors, light detection and ranging (LiDAR) and real-time kinematic of global navigation satellite system with inertial navigation system (RTK-GNSS/INS), are used for the localization of outdoor mobile robots. However, using LiDAR and RTK-GNSS/INS independently was found to be insufficient for achieving precise positioning. Therefore, a sensor fusion approach based on an adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) was implemented to enhance reliability. In this research, data from both sensors were collected to create a dataset for training with ANFIS. The findings indicated that the model derived from the fusion of these two sensors provided results that were much closer to the actual values obtained using each sensor independently. The result demonstrated the effectiveness of the ANFIS-based fusion method in terms of improving the accuracy and reliability of the positioning system for outdoor mobile robots.

1. Introduction

In an era where technology is continuously advancing, there is development in various fields including medicine, military, and agriculture and even in industry. One notable advancement is in robotics, which has seen diverse developments, from robotic arms to robot dogs, unmanned aerial vehicles, autonomous boats, and even mobile robots. Today's mobile robots have evolved into versatile tools that range from those assisting in household chores to those providing medical aid, as well as those serving in business and industrial sectors.

In the era of the Industry 4.0 revolution, mobile robots have become a crucial part of the transformation in the industrial sector. With their ability to enhance efficiency, precision, and flexibility, mobile robots are being utilized in various stages of the production process, from transporting raw materials to assembling products. Mobile robots in the industrial sector, such as automated guided vehicles, autonomous mobile robots, and collaborative robots, have transformed the way work is done in factories. What used to be heavily reliant on human labor has shifted to operations that can be automated and performed with high efficiency.^(1,2) For instance, in China, companies listed in the stock exchange since 2007 have increased the

*Corresponding author: e-mail: sarucha.ya@kmitl.ac.th
<https://doi.org/10.18494/SAM4841>

presence of robots in industrial production.⁽³⁾ The use of these robots requires efficiency in various aspects to achieve optimal productivity.

In this research, we studied the positioning of outdoor mobile robots using the data obtained from positioning for an autonomous movement in the development of a prototype self-driving vehicle. Absolute localization techniques, which offer advantages such as higher accuracy, time and location independence, and external reference points, were used for positioning.⁽⁴⁾ However, they also have drawbacks such as dependence on external factors, higher costs, and complex integration and processing. The equipment used for localization includes light detection and ranging (LiDAR) and an inertial navigation system (INS) with a global navigation satellite system (GNSS), employing real-time kinematic (RTK) GNSS/INS for localization (hereinafter, referred to as GNSS/INS), which researched in various fields to specify the precise position.^(12–15)

In this study, both GNSS/INS and 3D LiDAR sensors were used for positioning at various speeds. It is projected that the use of 3D LiDAR, with its ability to generate many point clouds, offers high resolution and may be suitable for precise positioning.⁽⁵⁾ However, the use of 3D LiDAR was limited to only capturing signals within a 90–270° range. Therefore, to increase accuracy, GNSS/INS was also employed. This combination is aimed at achieving more precise positioning. We utilized an adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) to process and integrate data from these sensors for improved localization accuracy.

In this study, ANFIS combines fuzzy logic and neural network techniques. This fusion integrates the human-like decision-making of fuzzy systems with the learning and connection structures of neural networks. This enables ANFIS to learn from data and improve its performance over time.⁽⁶⁾ Therefore, the study involved collecting data from various speed trials to create accurate real-world comparisons. By training ANFIS with the collected data, positions could be more accurately determined, increasing the precision of the localization process. The adaptive capabilities of ANFIS allow it to refine its accuracy and reliability in various operational scenarios, making it a powerful tool for precise positioning in mobile robotics.

The paper is organized as follows: the autonomous driving vehicle used for collecting data from sensors is described, followed by the fusion of LiDAR and GNSS/INS for localization, and the experimental results from the sensor. Lastly, the conclusions of this study are presented.

2. Autonomous Driving Vehicle

In this study, the automated driving vehicle utilized is a compact golf cart designed for one person, measuring 1.4 m in length, 0.7 m in width, and 1.2 m in height. LiDAR and GNSS/INS systems are connected to a minicomputer (Intel NUC in this case) for localization purposes. LiDAR is mounted at the front of the golf cart, while GNSS/INS is installed at the position of the vehicle's center of gravity, as depicted in Fig. 1.

The specifications of the vehicle are detailed in Table 1, which outlines both the equipment used and the characteristics of the vehicle. This table includes information such as the type and model of the vehicle, the sensors and technologies equipped (e.g., GNSS/INS and 3D LiDAR), their specifications, and other relevant features that define the vehicle's capabilities and performance.



Fig. 1. (Color online) Small golf cart equipped with automated driving system.

Table 1
Specifications of vehicle.

Vehicle	compact golf cart designed for one person
Maximum speed	10 km/h
Size	$1.4 \times 0.7 \times 1.2 \text{ m}^3$
3D LiDAR	Velodyne VLP-16
GNSS/INS	Pixhawk 2 cube orange with Here 3+ and Here+ RTK Base
Computer	Inter Core-i7 8559U

Figure 2 illustrates the connection between the vehicle's low-level and high-level systems. The low-level system includes a connection to an ARM microcontroller, which controls the steering motor's angle and speed, as well as the brushless DC (BLDC) motor. This part of the system is essential for the fundamental driving mechanics of the vehicle. On the high-level side, connections are established with 3D LiDAR and GNSS/INS systems. These components are crucial for calculating and processing the data necessary for accurate positioning.

3. Fusion Sensors

In this study, the principle of sensor fusion employed is ANFIS, in which human-like decision-making capabilities of fuzzy logic are integrated with the learning and connection structures of neural networks. This combination allows the system to learn from data and improve its performance over time. To enable this learning process, data must be collected for training the ANFIS model. The collected data help the system to accurately identify and adapt to various positioning scenarios. By training ANFIS with the collected data, the system becomes more adept at accurately determining positions, leveraging both the precise, rule-based logic of fuzzy systems and the adaptive, learning capabilities of neural networks. This results in a more robust and reliable system for localization and navigation tasks in mobile robotics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

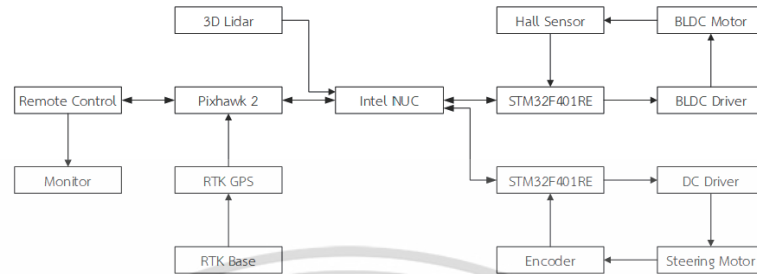


Fig. 2. Block diagram of vehicle.

3.1 Collecting data from sensors

In this experiment, data collection from sensors is performed through the Robot Operating System (ROS), an open-source framework widely used in robotics for various developmental purposes.⁽⁷⁾ In this research, both GNSS/INS and LiDAR are integrated into the ROS framework. This integration enables the extraction of data from these sensors for two primary purposes. First is training; the data collected from GNSS/INS and LiDAR through ROS is used to train the ANFIS model. This training process allows the model to learn from real-world sensor readings, improving its ability to accurately predict and adjust to different environmental conditions and scenarios. Second is real-time positioning. Apart from training, the ROS framework also facilitates real-time data processing to carry out positioning during actual operation. This means that as the vehicle operates, ROS processes the incoming data from GNSS/INS and LiDAR, allowing the vehicle to understand its position and navigate accurately. The use of ROS in this context provides a flexible and powerful platform for developing and testing advanced robotics systems, especially those requiring complex sensor integration and data processing for autonomous operations.

In the process of collecting data from GNSS/INS for use in ROS, the primary focus is on the latitude and longitude values provided by the GNSS component. These geographical coordinates are then used to calculate precise position data,^(8,9) which is essential for localization within the ROS framework.

The collection of data from the LiDAR sensor is crucial for determining odometry, which is essential for localization in the ROS environment. Mounted at the front of the vehicle, the LiDAR sensor scans the environment and collects point cloud data. The collected point cloud data comprise numerous points that represent the distances measured from the sensor to various objects in its vicinity. However, since the LiDAR sensor is front-mounted, it may inadvertently capture data from the rear. To mitigate this, the LiDAR's field of view is restricted to the 90–270° range, as illustrated in Fig. 3.

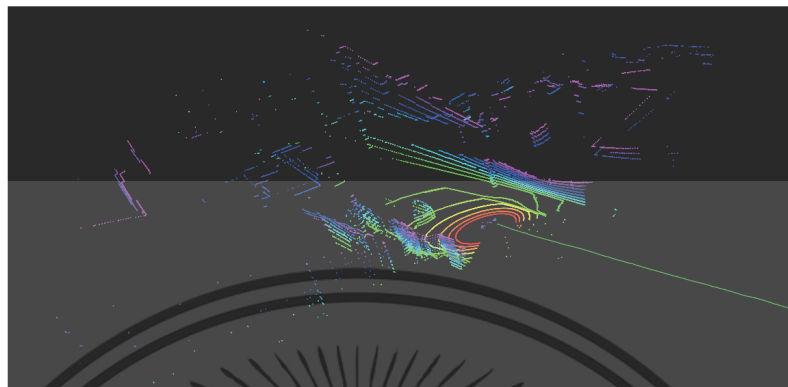


Fig. 3. (Color online) Filtering point cloud data within the 90–270° range.

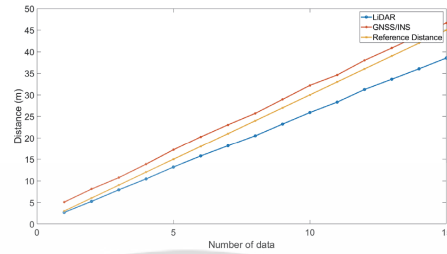
The point cloud data from LiDAR is then employed for odometry.^(10,11) In this context, odometry refers to the process of determining the vehicle's position and orientation based on movement data. This is accomplished by analyzing the variations, which correspond to the vehicle's movements, in the point cloud over time. LiDAR-based odometry is a pivotal component of the vehicle's localization system and augments other data sources such as GNSS/INS. Integrating these data streams in ROS facilitates the development of a more accurate and reliable autonomous navigation system.

3.2 Training process

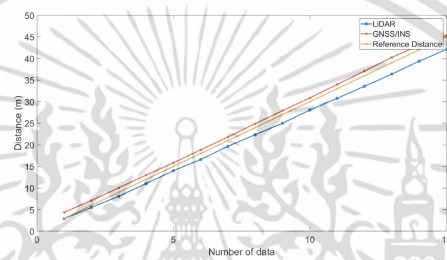
In this section, we will show the collection of values obtained from sensors, namely, LiDAR and GNSS/INS, to bring the dataset obtained from the collection of values into the training process. The values obtained from the distance measurement are shown in Fig. 4 along with the raw data from LiDAR and GNSS/INS. When compared with the actual distance, it is evident that the values from LiDAR are closer to the actual values in the initial distance range up to just before 9 m, whereas the values from GNSS/INS are farther from the real values. However, upon reaching 12 m, all values start to approach the true values. Therefore, we will integrate the LiDAR and GNSS/INS sensors through ANFIS to attain the required reliability of both sensors for further use in the next process.

Figure 4 shows the raw values of LiDAR and GNSS/INS obtained at the speeds of about (a) 1, (b) 5, and (c) 10 km/h, which is the maximum speed of the vehicle; the *x*-axis represents the number of recorded values and the *y*-axis shows the distance measured in meters.

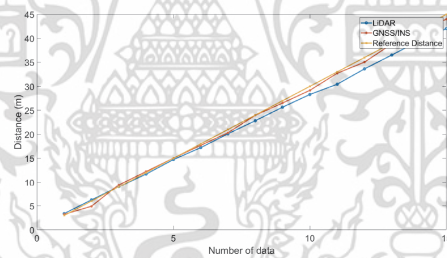
The values to be input to the ANFIS training process will be collected from the initial range to 45 m for comparison with the actual distance. The collection will be performed once every 1 m for a total of 15 values. Then, the collection will be repeated to create a dataset for further training.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. (Color online) Distance measurements collected from LIDAR and GNSS/INS compared with reference data at various speeds: (a) 1, (b) 5, and (c) 10 km/h.

In the data collection process, measurements using the LiDAR and GNSS/INS sensors are conducted at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. During this process, the testing involves assessing values along two axes: the X - and Y -axes. The data are collected in a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

consistent manner for both axes. This approach ensures that the dataset encompasses a comprehensive understanding of the vehicle's movement and position in both horizontal dimensions, which is crucial for the accurate localization and navigation of autonomous vehicles.

In this research, ANFIS is utilized for sensor fusion. The input values for the fusion process are odometry data from both the LiDAR and GNSS/INS systems. The localization system collects odometry data from the following two sources: LiDAR odometry, which uses the point cloud information gathered by the LiDAR sensor and provides information about the vehicle's movement relative to its surroundings, and GNSS/INS odometry, which provides positional and navigational information based on satellite data and inertial measurements. These input values are then processed by ANFIS. The ANFIS model used is depicted in Fig. 5. ANFIS, by combining fuzzy logic with neural network techniques, analyzes and fuses these input values to produce a more accurate and robust estimation of the vehicle's odometry values. The output of this process is a fused positioning value representing a more precise and reliable calculation of the vehicle's position and movement obtained as a result of combining the strengths of both LiDAR and GNSS/INS data for localization. By using ANFIS for sensor integration, we aim to increase the accuracy of odometry under various conditions and environments, thereby improving the reliability and performance of the autonomous vehicle's navigation system.

In Fig. 6, which displays the dataset obtained from both the LiDAR and GNSS/INS sensors, where the x -axis represents the number of recorded values and the y -axis shows the distance measured in meters, it is observed that at a short distance from the starting point, the values from LiDAR closely match the actual distance. However, as the distance increases, the LiDAR readings start to deviate from the actual values. On the other hand, the GNSS/INS values show a consistent offset when compared with the LiDAR data. This observation indicates that while LiDAR provides high accuracy at shorter ranges, its precision diminishes over longer distances, whereas GNSS/INS maintains a consistent level of accuracy, albeit with a constant deviation

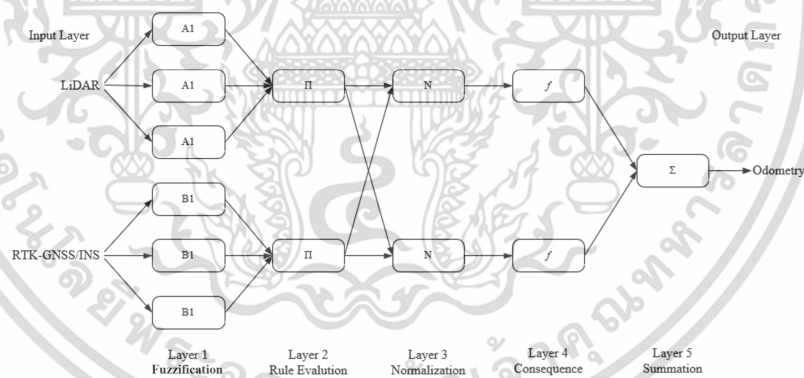


Fig. 5. ANFIS model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

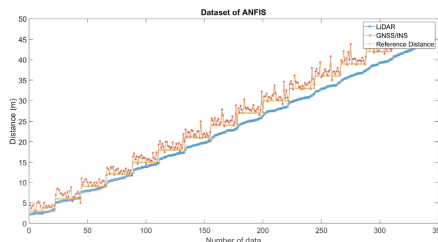


Fig. 6. (Color online) Dataset of ANFIS for training.

from the LiDAR readings. This type of analysis is crucial in understanding the behavior of these sensors over different distances and aids in optimizing their integration for accurate localization and navigation.

In this research, Gaussian functions were selected as the membership functions for ANFIS, as shown in Fig. 7, which has a universe of discourse of LiDAR and GNSS/INS represented by the x -axis, and the y -axis represents the degree of membership. This choice is due to the suitability of Gaussian functions for handling input values that do not change abruptly. This characteristic aligns well with the gradual changes in vehicle movement, where speed increases or decreases progressively rather than suddenly. In the context of ANFIS, Gaussian functions can adapt well during learning, providing a robust way to fuse data from LiDAR and GNSS/INS sensors. Overall, the use of Gaussian membership functions in ANFIS in this research helps to create a more accurate and reliable model for sensor fusion, accommodating the dynamic nature of vehicle movements.

From the dataset used for training in this research, it was found that the minimal training root mean square error ($RMSE$) achieved is 0.398562. An $RMSE$ of 0.398562 suggests that the ANFIS model, trained with the dataset from LiDAR and GNSS/INS sensors, has achieved a reasonably good level of accuracy in predicting the correct values. The relatively low $RMSE$ demonstrates the effectiveness of the sensor fusion approach using ANFIS. It indicates that combining data from LiDAR and GNSS/INS through the ANFIS model provides reliable and accurate results. Overall, achieving a minimal training $RMSE$ of 0.398562 is an encouraging outcome for this research and suggests that the ANFIS-based sensor fusion method effectively captures and integrates the dynamics of the vehicle's movement as measured by the sensors.⁽⁶⁾

4. Experimental Results

The collection and training of values from the dataset for sensor fusion were conducted over 500 epochs across 330 datasets, resulting in a minimal training $RMSE$ of approximately 0.398562. Subsequently, the trained model was tested against readings from LiDAR and GNSS/INS to compare the results of sensor fusion with the aim of evaluating the performance and effectiveness of the system. The outcomes of these tests are displayed in Figs. 8–10.

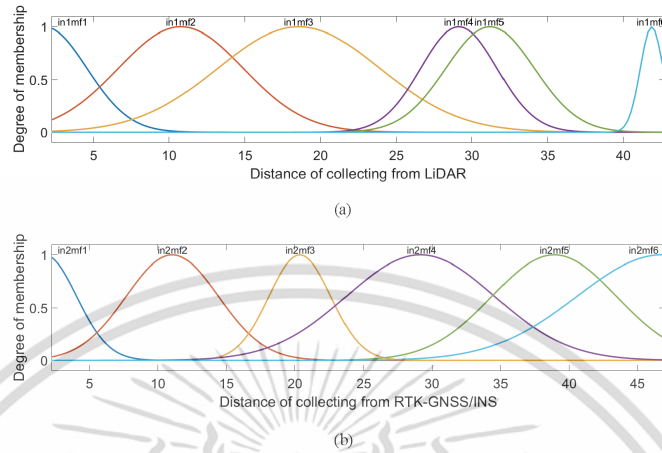


Fig. 7. (Color online) Membership functions of (a) LiDAR and (b) RTK-GNSS/INS.

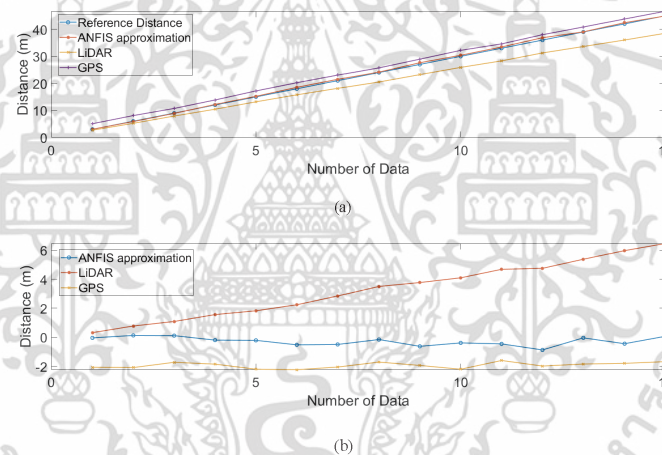
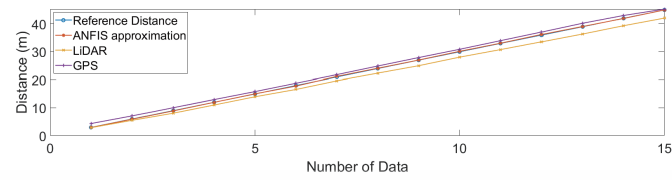


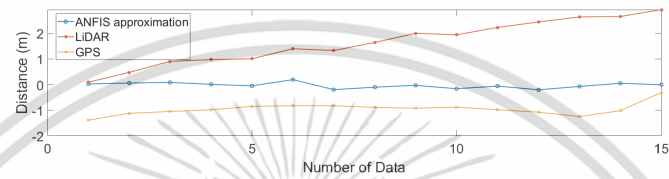
Fig. 8. (Color online) Sensor fusion at a speed of 1 km/h showing (a) efficiency and (b) the error between actual data.

Figures 8–10 show the capabilities of sensor fusion based on ANFIS compared with actual distances, where the x-axis represents the number of recorded values and the y-axis shows the distance measured in meters. The values from LiDAR and GNSS/INS at various speeds tend to diverge. The odometry values from LiDAR gradually deviate from the true values, being

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

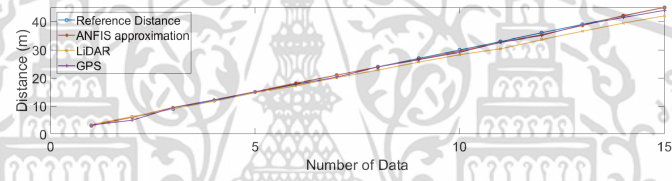


(a)

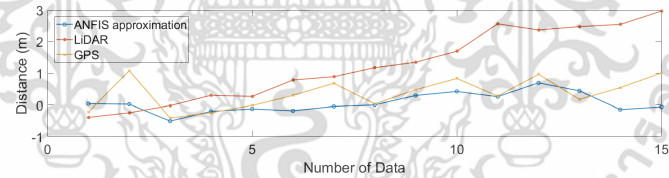


(b)

Fig. 9. (Color online) Sensor fusion at a speed of 5 km/h showing (a) efficiency and (b) the error between actual data.



(a)



(b)

Fig. 10. (Color online) Sensor fusion at a speed of 10 km/h showing (a) efficiency and (b) the error between actual data.

accurate only in the initial phase of the testing. However, the odometry values from GNSS/INS have a consistent deviation from the actual values with inaccuracy. When the sensor fusion based on ANFIS is utilized, it is evident that the fused sensor values are closer to the actual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

values, and the error compared with the real distances of LiDAR and GNSS/INS is significantly smaller. Therefore, the values from the sensor fusion based on ANFIS can be effectively used for determining the position during vehicle movement.

At the end of this study, a comparison between ANFIS and extended Kalman filter (EKF)^(16,17) was conducted to analyze the improvement of robot localization accuracy. The comparative analysis is presented in Fig. 11 and Table 2.

Figure 11 and Table 2 show the values for ANFIS and EKF. The average percentage error for ANFIS is 2.58278% with a standard deviation of percentage errors at 3.09173%. On the other hand, EKF has an average percentage error of 5.67086% with a standard deviation of percentage errors at 13.31051%. As observed, ANFIS exhibits a lower average percentage error than EKF, indicating a lesser deviation from the measured values. Additionally, ANFIS also demonstrates a lower standard deviation, implying a higher measurement stability than EKF.

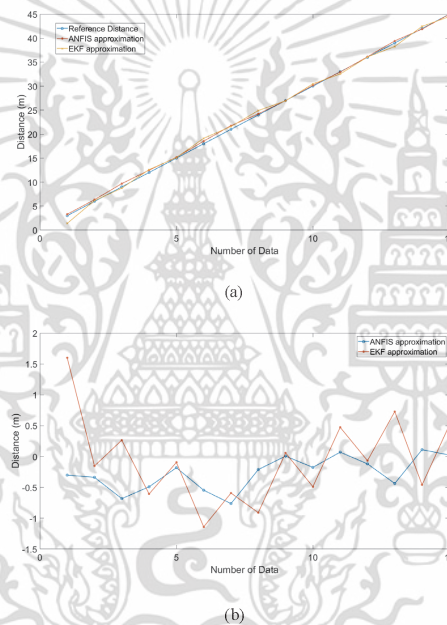


Fig. 11. (Color online) Comparison of sensor fusion between ANFIS and EKF showing (a) efficiency and (b) the error between actual data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2
Comparison between ANFIS and EKF.

Reference (m)	ANFIS (m)	EKF (m)	ANFIS (%error)	EKF (%error)
3	3.301841434	1.398909494	10.0613811	53.36968
6	6.338048882	6.152553211	5.63414804	2.542554
9	9.683320755	8.735862053	7.59245284	2.934866
12	12.49093677	12.60793217	4.09113977	5.066101
15	15.18193696	15.09518036	1.21291306	0.634536
18	18.54640556	19.14086377	3.03558642	6.338132
21	21.76389549	21.59279341	3.63759755	2.822826
24	24.21155327	24.90996676	0.88147197	3.791528
27	26.99368361	26.94181607	0.02339404	0.215496
30	30.17662315	30.48922456	0.58874382	1.630749
33	32.92936388	32.52696684	0.21404885	1.433434
36	36.11931053	36.06725431	0.33141814	0.186818
39	39.43728269	38.27143649	1.12123767	1.868112
42	41.88955522	42.45995099	0.26296376	1.095121
45	44.97604013	44.49019338	0.05324415	1.132904

5. Conclusions

In this study, we observed that integrating LiDAR and GNSS/INS readings into a unified dataset significantly improved localization for odometry processing in ROS using ANFIS. The process of sensor fusion using ANFIS, which achieved a minimal training *RMSE* of approximately 0.398562, yields results that align more closely with actual measurements than with the data from LiDAR and GNSS/INS separately. The results reveal that our proposed ANFIS has lower standard deviation and average error than the conventional EKF method. Therefore, the ANFIS-based sensor fusion is more suitable and stable than EKF for implementation in the localization of outdoor autonomous mobile robot applications.

Acknowledgments

This work was supported by the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

References

1. S. R.-Gómez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. González-Sarabia, C. Torre-Ferrero, and J. Pérez-Oria: *IEEE Access* **5** (2017) 26754. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2773127>
2. A. S. Rajawat, P. Bedi, S. B. Goyal, P. K. Shukla, A. Zaguia, A. Jain, and M. M. Khan: *Mobile Inf. Syst.* **2021** (2021) 10. <https://doi.org/10.1155/2021/4744220>
3. D. Duan, S. Chen, Z. Feng, and J. Li: *Struct. Chang. Eon. Dyn.* **67** (2023) 388. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2023.08.002>
4. M. B. Alatise and G. P. Hancke: *IEEE Access* **8** (2020) 39830. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975643>
5. N. Csanyi and C. K. Toth: *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **73** (2007) 385. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.4.385>
6. J.-S. R. Jang: *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* **23** (1993) 665. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
7. ROS: <https://www.ros.org> (accessed December 2023).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8 V. G.-Juan, L. Armesto, D. H.-Ferrández, J. F. Dols and A. Sala: IEEE Trans. Veh. Technol. **70** (2021) 8617. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3101515>
- 9 G.-S. Cai, H.-Y. Lin and S.-F. Kao: Proc. 2019 Int. Automatic Control Conf. (CAC, 2019) 1.
- 10 Z. Ji and S. Sanjiv: Proc. Robotics Science and Systems Conf. (RSS, 2014) 109.
- 11 A. Censi: Proc. 2008 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA, 2008) 19.
- 12 T. Ando, W. Kugimiya, T. Hashimoto, F. Momiyama, K. Aoki and K. Nakano: IEEE Trans. Intell. Veh. **6** (2021) 78. <https://doi.org/10.1109/ITV.2020.2992857>
- 13 Z. Niu, X. Zhao, J. Sun, L. Tao, and B. Zhu: IEEE Access **8** (2020) 185638. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028119>
- 14 I. Um, S. Park, H. T. Kim, and H. Kim: IEEE Access **8** (2020) 76228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989276>
- 15 A. Thakur, B. Anand, H. Verma, and P. Rajalakshmi: Proc. 2022 8th Int. Conf. Automation, Robotics and Applications (ICARA, 2022) 181.
- 16 T. K. Das, P. A. D. Harischandra, and A. M. H. S. Abeykoon: Proc. 2017 Moratuwa Engineering Research Conf. (MERCOn, 2017) 58–63.
- 17 S. Reece and S. Roberts: 2010 13th Int. Conf. Information Fusion (FUSION, 2010) 1–9.

About the Authors



Thitipong Thepsit received his B.Eng. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2021. He is currently working towards his M.Eng. degree in robotics and artificial intelligence at KMITL. His research interests are in the areas of control systems and mobile robots. (t.thepsit@gmail.com)



Poom Konghuayrob received his B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2012, 2013, and 2018, respectively. Currently, he works at KMITL in the Department of Electrical Engineering. His research interests are in the areas of robust control, DC/AC inverters, solar cell fields, and artificial intelligence. (poom.ko@kmitl.ac.th)



Anakkapon Saenthon received his B.Eng. degree in computer engineering and M.Eng. degree in electrical engineering from Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, and Ph.D. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2005, 2007, and 2011, respectively. Currently, he works at KMITL in the Department of Electrical Engineering. His research interests are in the areas of image processing, automatic visual inspection systems, and artificial intelligence. (anakapon.sa@kmitl.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Sarucha Yanyong received his B.Eng. degree in mechatronics engineering and his M.Eng. and Ph.D. degrees in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, in 2012, 2014, and 2023, respectively. His research interests are in the areas of mobile robotics, machine learning, control systems, and artificial intelligence. (sarucha.ya@kmitl.ac.th)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล รุติพงศ์ เทปสิทธิ์
วัน เดือน ปีเกิด 30 เมษายน 2542 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ 40/2 หมู่ที่ 5 ต.ทรงคนอง อ.สามพราน จ.นครปฐม 73210

ประวัติการศึกษา:

2560 โรงเรียนนาคประสิทธิ์ จังหวัดนครปฐม
2564 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:

2567 ตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการในหัวข้อ “Localization for Outdoor Mobile Robot Using LiDAR and RTK-GNSS/INS” Sensors and Materials, Volume 36, Number 4(2) (2024)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้