

การนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ
ภายนอกอาคารสำหรับหุ่นยนต์รถ

AUTONOMOUS NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE
CAPABILITY IN OUTDOOR ENVIRONMENTS FOR CAR ROBOT

สิทธิชัย บุญรักษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ
ภายนอกอาคารสำหรับหุ่นยนต์รถ

สิทธิชัย บุญรักษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติภายนอกอาคารสำหรับหุ่นยนต์รถ
ชื่อ – นามสกุล	นายสิทธิชัย บุญรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและออกแบบระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติภายนอกอาคารสำหรับทดสอบกับรถเอทีวีไฟฟ้าแบบ 4 ล้อ โดยการรวมเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ เทคนิคสนามศักย์ และเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์จีพีเอส เซนเซอร์วัดมุมเอียง และเซนเซอร์เลเซอร์ ในการป้อนกลับตำแหน่งของรถ ในการบ่งบอกการหันเหของรถ และในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง ตามลำดับ

การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนแรกเป็นการทดสอบระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางโดยใช้เทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางทั้งการทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม MATLAB และทดสอบจริงในพื้นที่การทำงาน ในส่วนสุดท้ายของการทดลองจะเป็นการปรับปรุงระบบนำทางให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้นในงานวิจัยนี้ทดสอบขั้นตอนการทำงานของตัวกรองคาลมานในการบูรณาการเซนเซอร์จีพีเอสร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร็ว

จากผลการทดลองจริงในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารนั้น ผลที่ได้คือ 1) หุ่นยนต์รถสามารถตรวจสอบและระบุตำแหน่งของสิ่งกีดขวางในพิกัดแบบโดยรวมทั้งหมดได้อย่างถูกต้องทั้งระยะทางที่ 8 และ 10 เมตร 2) หุ่นยนต์รถสามารถตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่และนำทางไปยังจุดพิกัดเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง 3) ระยะทางการเคลื่อนที่จากการบูรณาการข้อมูลเซนเซอร์ด้วยตัวกรองคาลมานมีความใกล้เคียงกับระยะทางในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ระยะทาง 20 เมตร มากกว่าระยะทางจากข้อมูลดิบที่ได้จากเซนเซอร์จีพีเอสรวมทั้งมีความเที่ยงตรงในการทำงานโดยจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายนั้นเป็นจุดเดียวกัน

คำสำคัญ: การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ เทคนิคสนามศักย์
เทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ หุ่นยนต์รถ ตัวกรองคาลมาน

Thesis Title	Autonomous Navigation and Obstacle Avoidance Capability in Outdoor Environments for Car Robot
Name - Surname	Mr. Sittichai Boonyarak
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Pradya Prempraneerach, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

In this research, the autonomous navigation and obstacle avoidance in outdoor environments are developed and designed for a four-wheel electrical ATV by combining occupancy-grid map, potential field technique and local incremental planning method. This four-wheel ATV is equipped with GPS, IMU, and laser range finder sensors for measuring car position, heading angle, and identifying obstacles, respectively.

The experiments can be separated into 3 parts. The first part of experiments is to test an obstacle detection system using an occupancy-grid map technique. The second part of experiments is to test an obstacle avoidance algorithm both in MATLAB simulation and in the field-test experiment. In the last experiment, the kalman filter is used for integrating GPS with accelerometer to yield an improved position of the car's navigation system.

For the outdoor-environment experiment, the result is comprised of 1) this car robot can detect and identify the obstacle position in the global coordinate system correctly at a distance 8 and 10 meter, 2) this car robot can detect obstacle, avoid stationary obstacle, and navigate to the desire target waypoints correctly using the proposed global occupancy map and 3) a distance from sensor fusion using kalman filter technique for a straight-line motion of 20-meter back-and-forth is better than that of raw GPS data.

Keywords: obstacle avoidance, occupancy-grid map, potential field, local incremental planning, car robot, kalman filter

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.มนุศักดิ์ จานทอง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.มนูกิจ พานิชกุล ผู้ทรงคุณวุฒิจากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ตลอดจนภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยพร้อมทั้งความช่วยเหลือในหลายๆด้านรวมทั้งข้อมูลที่ได้รับตามรายการอ้างอิงซึ่งมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งจนทำให้สามารถทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความรักและกำลังใจในการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สิทธิชัย บุญรักษา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	17
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	17
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	20
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	21
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	21
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถ.....	23
2.2 การแปลงพิกัด.....	25
2.3 เทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง.....	32
2.4 เทคนิคสนามศักย์ (Potential Field).....	39
2.5 กฎการควบคุม.....	44
2.6 เทคนิคการสร้างเส้นโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning).....	45
2.7 ตัวกรองคาลมาน.....	48
2.8 ระบบนำร่องแบบเฉื่อย (Inertial Navigation System หรือ INS).....	51
2.9 การบูรณาการเซนเซอร์ระหว่างระบบ INS และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS).....	57
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	62
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	62
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	65
3.3 เซนเซอร์ที่ใช้ในการรับค่า.....	70
3.4 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field).....	77
3.5 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง.....	78

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 การหาค่าสัญญาณรบกวนแบบสุ่มจากเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ด้วยฟังก์ชันการกระจายแบบเกาส์เซียน.....	80
3.7 การหาค่าความแปรปรวน (Variance) และค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เพื่อใช้ในตัวกรองคาลมาน.....	87
3.8 การหาค่าความแปรปรวน (Variance) และค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เพื่อใช้ในตัวกรองคาลมาน	93
บทที่ 4 ผลการทดลอง	96
4.1 การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในการเดินเป็นเส้นตรงที่ระยะ 20 เมตร	96
4.2 ผลการจำลองเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ใน MATLAB/Simulink	99
4.3 ผลการจำลองการทำงานของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เมื่อใช้ร่วมกับจลนศาสตร์ของรถและเทคนิค การป้อนกลับเชิงเส้น (Feedback Linearization)	102
4.4 การตรวจสอบสิ่งกีดขวางโดยใช้เทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ในสภาพแวดล้อมจริง	107
4.5 การทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์รถแบบ 4 ล้อในสภาพแวดล้อมจริง.....	116
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	126
5.1 สรุปวัตถุประสงค์ของการวิจัยและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	126
5.2 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผล.....	126
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	128
บรรณานุกรม	130
ภาคผนวก.....	132
ภาคผนวก ก	133
ประวัติผู้เขียน	147

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปสมการตัวกรองคาลมานแบบข้อมูลตัวเลขแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time)	51
ตารางที่ 3.1 แผนดำเนินการวิจัย.....	62
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลคุณสมบัติของเซนเซอร์ของ Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45	74
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลคุณสมบัติของ SICK LMS511-PRO.....	76



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 รถอัตโนมัติจากการแข่งขันรายการ DARPA.....	17
รูปที่ 1.2 รถอัตโนมัติ DARK-HORSE จากพีโป้.....	18
รูปที่ 1.3 รถอัจฉริยะจากสถาบันเอไอที	19
รูปที่ 1.4 เรือและอากาศยานแบบอัตโนมัติ.....	19
รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถ	24
รูปที่ 2.2 การหมุนของกรอบอ้างอิงแบบ ECEF เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงเฉื่อยที่แกนกลางโลก.....	25
รูปที่ 2.3 การแสดงผลต่างระหว่างละติจูดแบบ Geodetic (ด้วยมุม ϕ) และแบบ Geocentric (ด้วยมุม ϕ_C).....	26
รูปที่ 2.4 กรอบอ้างอิงแบบ Local Geodetic หรือระนาบสัมผัสในระบบพิกัดอ้างอิงเมื่อสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงแบบ ECEF.....	27
รูปที่ 2.5 ระบบพิกัดของยานพาหนะ.....	28
รูปที่ 2.6 วิธีการแปลงจากกรอบอ้างอิงแบบ ECEF ไปเป็นกรอบอ้างอิงแบบระนาบสัมผัสโดยใช้ R'_c ..	29
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะและระบบพิกัดกรอบอ้างอิงนำร่อง.....	31
รูปที่ 2.8 แนวความคิดในการสร้างตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid).....	35
รูปที่ 2.9 แนวความคิดในการสร้างตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid)	35
รูปที่ 2.10 การกำหนดค่าดัชนีประจำตัว (Index) ให้กับตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) และตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid)	36
รูปที่ 2.11 เมื่อหุ่นยนต์ไม่ตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน	36
รูปที่ 2.12 เมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน.....	37
รูปที่ 2.13 เมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นแต่มีข้อมูลบรรจุอยู่หลายหลายช่อง	38
รูปที่ 2.14 ตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เมื่อทำการกักกัน (Threshold) แล้ว.....	38
รูปที่ 2.15 แนวความคิดเกี่ยวกับฟังก์ชันศักร์แบบดั้งเดิม.....	39
รูปที่ 2.16 แนวความคิดเกี่ยวกับฟังก์ชันศักร์แบบผลัด.....	42
รูปที่ 2.17 แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับรถ.....	46
รูปที่ 2.18 ตัวเลือกเมื่อ $\beta_d : \beta_a - \beta < \pi / 2$ (ซ้าย) และ $\beta_a - \beta > \pi / 2$ (ขวา).....	47
รูปที่ 2.19 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose).....	58
รูปที่ 2.20 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลแบบแน่น (Tight)	59

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลเชื่อมโยงแบบหลวม (Loosely Coupled)	60
รูปที่ 2.22 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลเชื่อมโยงแบบแน่น (Tightly Coupled)	61
รูปที่ 3.1 รถเอทีวีไฟฟ้า	66
รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบควบคุมของรถอัตโนมัติ.....	67
รูปที่ 3.3 เซนเซอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า	68
รูปที่ 3.4 ระบบการควบคุมและประมวลผล.....	69
รูปที่ 3.5 รถเอทีวีไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเซนเซอร์และระบบต่างๆที่จำเป็นในการทำงาน.....	69
รูปที่ 3.6 แผนภาพการระบุตำแหน่งจากดาวเทียม 1 ดวง, 2 ดวงและ 3 ดวง.....	72
รูปที่ 3.7 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ของ Microstrain 3DM-GX3-45	73
รูปที่ 3.8 โครงสร้างภายในของเซนเซอร์ของ Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45	73
รูปที่ 3.9 หลักการทำงานเบื้องต้นของเลเซอร์สแกนเนอร์	75
รูปที่ 3.10 หลักการควบคุมเวลาที่ใช้ในการสะท้อน (Time of Flight).....	75
รูปที่ 3.11 SICK LMS511-PRO	76
รูปที่ 3.12 การจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวาง เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมาย และแสดงแรงเสมือนแบบดึงดูดและแบบผลักที่กระทำกับหุ่นยนต์ในแต่ละช่วงเวลา $v_{RO}(t)$	77
รูปที่ 3.13 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในแนวแกน x.....	78
รูปที่ 3.14 ค่าดัชนีประจำตัวเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางเป็นรูปครึ่งวงกลม	78
รูปที่ 3.15 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในแนวแกน y.....	79
รูปที่ 3.16 ค่าดัชนีประจำตัวเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	79
รูปที่ 3.17 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อแปรผันจำนวน แท่งของแผนภูมิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน z.....	81
รูปที่ 3.18 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อแปรผัน จำนวนแท่งของแผนภูมิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน z. 81	81
รูปที่ 3.19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อแปรผันจำนวน แท่งของแผนภูมิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน y	82

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.20	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน y	82
รูปที่ 3.21	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน x	83
รูปที่ 3.22	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน x	83
รูปที่ 3.23	ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)	84
รูปที่ 3.24	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน x	84
รูปที่ 3.25	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน y	85
รูปที่ 3.26	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน z	85
รูปที่ 3.27	ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)	86
รูปที่ 3.28	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน x	86
รูปที่ 3.29	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน y	87
รูปที่ 3.30	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน z	87
รูปที่ 3.31	ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)	88
รูปที่ 3.32	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน x	88
รูปที่ 3.33	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน y	89
รูปที่ 3.34	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน z	89
รูปที่ 3.35	ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)	90
รูปที่ 3.36	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน x	90
รูปที่ 3.37	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน y	91

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.38	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน z	91
รูปที่ 3.39	ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer).....	92
รูปที่ 3.40	ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope).....	92
รูปที่ 3.41	แสดงข้อมูลจริงที่ได้จากการเก็บจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ซ้ำๆกัน 5 ครั้ง เมื่อมีเซนเซอร์ จีพีเอส (GPS) ที่มีความแม่นยำกว่าเป็นตัวอ้างอิง (แสดงด้วยเส้นสีแดง).....	93
รูปที่ 3.42	ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในแนวแกน x และแกน y.....	94
รูปที่ 3.43	ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในแนวแกน x.....	94
รูปที่ 3.44	ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในแนวแกน y.....	95
รูปที่ 4.1	แสดงผลจากการบูรณาการข้อมูลเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer).....	97
รูปที่ 4.2	ค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของข้อมูลในแกน x (P_x^- สำหรับการคาดการณ์ ล่วงหน้า (Prior) และ P_x^+ สำหรับการปรับแก้ค่า (Posterior))	97
รูปที่ 4.3	ค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของข้อมูลในแกน y (P_y^- สำหรับการคาดการณ์ ล่วงหน้า (Prior) และ P_y^+ สำหรับการปรับแก้ค่า (Posterior))	98
รูปที่ 4.4	ค่าอัตราขยาย (Gain) ของข้อมูลในแกน x (K_x).....	98
รูปที่ 4.5	ค่าอัตราขยาย (Gain) ของข้อมูลในแกน y (K_y)	99
รูปที่ 4.6	แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่งเริ่มต้นในแกน x.....	100
รูปที่ 4.7	แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน x เป็นระยะทาง 60 เซนติเมตร	100
รูปที่ 4.8	แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน x เป็นระยะทาง 120 เซนติเมตร	101
รูปที่ 4.9	แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่งเริ่มต้นในแกน y.....	101
รูปที่ 4.10	แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน y เป็นระยะทาง 60 เซนติเมตร	102
รูปที่ 4.11	แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน y เป็นระยะทาง 120 เซนติเมตร	102
รูปที่ 4.12	การจำลองการวางแผนการเคลื่อนที่และแสดงแรงรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รวมทั้งเส้น ทางการเคลื่อนที่เมื่อมีสิ่งกีดขวางที่อยู่กับที่ 1 ขึ้น อยู่ในพื้นที่การทำงานอยู่ที่ตำแหน่ง (1, 8) เมตร.....	103

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13	ตัวแปรของหุ่นยนต์และตัวแปรในการควบคุมประกอบด้วย ตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแกน x และแกน y (สองรูปบน), มุมหัวรถ (θ), มุมเลี้ยว (ϕ), มุมเลี้ยวเมื่อเทียบกับแกน x (β) (สองรูปกลาง), อินพุตสำหรับล้อหน้า (u_1), อินพุตสำหรับล้อหลัง (u_2) (สองรูปล่าง) ในกรณีหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่ 1 ชั้น	104
รูปที่ 4.14	การจำลองการวางแผนการเคลื่อนที่กับแรงรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รถเมื่อมีสิ่งกีดขวางที่อยู่กับที่ 2 ชั้นอยู่ในพื้นที่การทำงาน ชั้นแรกอยู่ที่ตำแหน่ง (6, 10) เมตร และชั้นที่สองอยู่ที่ (18, 18) เมตร	105
รูปที่ 4.15	ตัวแปรของหุ่นยนต์และตัวแปรในการควบคุมประกอบด้วย ตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแกน x และแกน y (สองรูปบน), มุมหัวรถ (θ), มุมเลี้ยว (ϕ), มุมเลี้ยวเมื่อเทียบกับแกน x (β) (สองรูปกลาง), อินพุตสำหรับล้อหน้า (u_1), อินพุตสำหรับล้อหลัง (u_2) (สองรูปล่าง) ในกรณีหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่ 2 ชั้น	105
รูปที่ 4.16	การจำลองการวางแผนการเคลื่อนที่พร้อมกับแรงเสมือนรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รถเมื่อมีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ตามแนวแกน x ด้วยความเร็ว 2.3 เมตรต่อวินาที	106
รูปที่ 4.17	ตัวแปรของหุ่นยนต์และตัวแปรในการควบคุมประกอบด้วย ตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแกน x และแกน y (สองรูปบน), มุมหัวรถ (θ), มุมเลี้ยว (ϕ), มุมเลี้ยวเมื่อเทียบกับแกน x (β) (สองรูป กลาง), อินพุตสำหรับล้อหน้า (u_1), อินพุตสำหรับล้อหลัง (u_2) (สองรูปล่าง) ในกรณีหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบเคลื่อนที่ 1 ชั้น	107
รูปที่ 4.18	ตำแหน่งเริ่มต้นการทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยการติดตั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเลเซอร์สแกนเนอร์บนรถเซ็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร	108
รูปที่ 4.19	ขณะตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานที่ระยะ 4 เมตร เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร	109
รูปที่ 4.20	เมื่อสิ้นสุดการทดสอบรถเซ็นอยู่ที่ระยะ 10 เมตร และสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 8 เมตร ห่างจากจุดเริ่มต้น	109
รูปที่ 4.21	ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ข้อมูลของสิ่งกีดขวางที่ได้จากเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) ในตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid: กรอบสีแดง) เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้น เป็นระยะทาง 8 เมตร	110

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22	ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) เมื่อตรวจสอบพบสิ่ง กีดขวางและมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร.....	110
รูปที่ 4.23	ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เมื่อทำการอัปเดต จากข้อมูลแบบตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) โดยมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่ม ต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร.....	111
รูปที่ 4.24	ตำแหน่งเริ่มต้นการทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยการติดตั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเลเซอร์สแกนเนอร์บนรถเข็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เมื่อมีสิ่งกีด ขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร.....	112
รูปที่ 4.25	ขณะตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานที่ระยะ 6 เมตร เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุด เริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร	113
รูปที่ 4.26	เมื่อสิ้นสุดการทดสอบรถเข็นอยู่ที่ระยะ 10 เมตร และสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 10 เมตร ห่างจากจุด เริ่มต้น	113
รูปที่ 4.27	ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ข้อมูลของสิ่งกีดขวางที่ได้จากเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) ในตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid: กรอบสีแดง) เมื่อมีสิ่งกีด ขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร.....	114
รูปที่ 4.28	ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) เมื่อตรวจสอบพบสิ่ง กีดขวางและมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร.....	114
รูปที่ 4.29	ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เมื่อทำการอัปเดต จากข้อมูลแบบตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) โดยมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่ม ต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร.....	115
รูปที่ 4.30	ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน ประกอบด้วย: ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็น เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	117
รูปที่ 4.31	ตัวแปรของหุ่นยนต์รถเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน: ตำแหน่งในแนวแกน x (บนซ้าย), ตำแหน่งในแนวแกน y (ล่างซ้าย), มุมหัวรถ (บนขวา), มุมเลี้ยวของล้อหน้า (ล่างขวา).....	117

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.32 ตัวแปรการควบคุมและตำแหน่งสิ่งกีดขวางเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน : อินพุตของล้อหน้า (บนซ้าย), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน x (ล่างซ้าย), อินพุตของล้อหลัง (บนขวา), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน y (ล่างขวา) 118
- รูปที่ 4.33 ตัวแปรจากเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field): แรงดูดในแนวแกน x (บนซ้าย), แรงผลักในแนวแกน x (ล่างซ้าย), แรงดูดในแนวแกน y (บนขวา), แรงผลักในแนวแกน y (ล่างขวา) 118
- รูปที่ 4.34 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้น (ทดสอบครั้งที่ 1): ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, ลูกศรสีดำแสดงแรงผลัก, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, สีเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริง, สีเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่ได้จากการคำนวณ 120
- รูปที่ 4.35 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้น (ทดสอบครั้งที่ 2): ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, ลูกศรสีดำแสดงแรงผลัก, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, สีเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริง, สีเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่ได้จากการคำนวณ 121
- รูปที่ 4.36 สถานที่ทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง: สนามฟุตบอลภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล..... 122
- รูปที่ 4.37 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้น : ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, ลูกศรสีดำแสดงแรงผลัก, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, สีเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริง, สีเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่ได้จากการคำนวณ 123
- รูปที่ 4.38 ตัวแปรของหุ่นยนต์รถเมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นในพื้นที่การทำงาน: ตำแหน่งในแนวแกน x (บนซ้าย), ตำแหน่งในแนวแกน y (ล่างซ้าย), มุมหัวรถ (บนขวา), มุมเลี้ยวของล้อหน้า (ล่างขวา) 124
- รูปที่ 4.39 ตัวแปรการควบคุมและตำแหน่งสิ่งกีดขวางเมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นในพื้นที่การทำงาน : อินพุตของล้อหน้า (บนซ้าย), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน x (ล่างซ้าย), อินพุตของล้อหลัง (บนขวา), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน y (ล่างขวา)..... 124

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.40 ตัวแปรเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นในพื้นที่การทำงาน:
แรงดูดในแนวแกน x (บนซ้าย), แรงผลักในแนวแกน x (ล่างซ้าย), แรงดูดในแนวแกน y
(บนขวา), แรงผลักในแนวแกน y (ล่างขวา)..... 125



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

คำว่า “ระบบอัตโนมัติ” หมายถึง ระบบใดๆหรือกลไกที่สามารถเริ่มทำงานได้ด้วยตัวเอง โดยทำงานตามโปรแกรมที่วางไว้ เช่นระบบรดน้ำอัตโนมัติ ระบบตอบรับโทรศัพท์อัตโนมัติ ระบบอัตโนมัติ อาจเป็นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมจะทำงานถูกต้องต่อเมื่อมีการวางแผนหรือ โปรแกรมโดยมนุษย์ทั้งสิ้นรวมทั้งเป็นสิ่งที่ช่วยให้มนุษย์มีความสะดวกสบายและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น เมื่อเราสังเกตเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นในปัจจุบันนั้นจะมีอุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีอัตโนมัติเกี่ยวข้องอยู่ด้วยกันทั้งสิ้นหรือในบางงานเทคโนโลยีอัตโนมัติอาจจะเป็นจุดเด่นหรือจุดขายก็ได้ โดยถ้าแบ่งงานอัตโนมัติที่เกิดขึ้นให้ตรงกับประเภทของการคมนาคมแล้วก็จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆคือ ทางอากาศ ซึ่งอาจเรียกได้ว่าอากาศยานอัตโนมัติอาจจะเป็นเฮลิคอปเตอร์หรือเครื่องบินขนาดเล็กก็ได้ ทางน้ำ อาจจะเป็นเรือหรือยานดำน้ำอัตโนมัติ ส่วนประเภทสุดท้ายคือทางบกซึ่งนับได้ว่าเป็นประเภทการคมนาคมอันดับ 1 ทั้งในประเทศไทยและทั่วโลกและมีชื่อเรียกที่รู้จักกันว่า “รถอัตโนมัติ”



(ก) TARTAN [1]



(ข) MIT [2]

รูปที่ 1.1 รถอัตโนมัติจากการแข่งขันรายการ DARPA

ระบบอัตโนมัติที่ใช้กับยานพาหนะในหลากหลายชนิดนั้นต่างก็แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆนั่นคือ ระบบควบคุมและระบบวางแผนการเคลื่อนที่ ระบบวางแผนการเคลื่อนที่นั้นเป็นระบบที่สร้างขึ้นมากเพื่อคิดวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลต่างๆในสภาพแวดล้อมจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาซึ่งมีหลายเทคนิคที่มีการนำมาประยุกต์ใช้กันยานพาหนะอาทิเช่น เทคนิคแบบ Probabilistic Roadmaps [3],

เทคนิคแบบ Cell Decomposition [3], เทคนิคแบบ Potential Field [3] หรือเทคนิคแบบ Occupancy Grid [4] เป็นต้น ซึ่งผลที่ได้จากการวางแผนการเคลื่อนที่ก็คือเส้นทางหรือค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อส่งไปยังระบบควบคุมให้ทำการปรับค่าการสั่งงานของอุปกรณ์ต่างๆซึ่งจะทำให้ยานพาหนะที่ทำการควบคุมนั้นไปยังเป้าหมายที่ต้องการโดยระบบควบคุมส่วนใหญ่ที่มีการนำมาใช้งานกันคือ ระบบควบคุมแบบพีไอดี หรืออาจจะเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้น เป็นต้น ซึ่งการเลือกใช้ระบบควบคุมแบบต่างๆก็ขึ้นอยู่กับงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ว่าต้องการความแม่นยำและความทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากน้อยเพียงใดต่อไป



รูปที่ 1.2 รถอัตโนมัติ DARK-HORSE จากพีไอบี [5]

การประยุกต์ใช้งานระบบวางแผนการเคลื่อนที่และระบบควบคุมที่ผ่านมานั้นมีหลากหลายชนิดอาทิเช่น การแข่งขันรถอัตโนมัติในต่างประเทศที่จัดโดยหน่วยงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DARPA) ซึ่งมีทีมวิจัยส่งรถเข้าแข่งขันกันมากมายโดยในแต่ละทีมก็จะมีเทคนิคการวางแผนการเคลื่อนที่และการควบคุมที่แตกต่างกันออกไปซึ่งทีมที่มีความโดดเด่นคือ ทีมจากมหาวิทยาลัยแคเนนกีเมลลอน (Carnegie Mellon University) หรือทีม TARTAN [1] ดังรูปที่ 1.1 โดยมีการใช้เทคนิคการวางแผนการเคลื่อนที่หลายอย่างร่วมกันอาทิเช่น เทคนิคแบบ Road Map พร้อมกับการควบคุมแบบ Hierarchical ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกันแล้วทำให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีหรืออาจจะเป็นรถจากมหาวิทยาลัยเอมไอทีดังรูปที่ 1.1 เป็นต้น จนในปัจจุบันบางมหาวิทยาลัยหรือองค์กรบางองค์กรมีการพัฒนาจนสามารถนำไปใช้บนท้องถนนที่มีการจราจรหรือสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในเมืองไทยก็มีการพัฒนารถอัตโนมัติด้วยเช่นกัน เช่น DARK HORSE จากสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีไอบี) [5] ดังรูปที่ 1.2 โดยการใช้เทคนิคแบบ Teaching-Playback ร่วมกับ

เซนเซอร์ตรวจจับแบบคลื่นเสียงหรือรถอัจฉริยะจากสถาบันเอไอที [6] ได้มีการพัฒนารถอัตโนมัติโดยมีการประยุกต์ใช้กับรถยนต์จริงดังรูปที่ 1.3 ซึ่งประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพีซีซึ่งร่วมกับเลเซอร์สแกนเนอร์เป็นต้น



รูปที่ 1.3 รถอัจฉริยะจากสถาบันเอไอที

ในงานการสำรวจทางอากาศซึ่งมีการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำงานและมีการใช้เทคนิคการวางแผนการเคลื่อนที่ที่แตกต่างไปจากรถอาทิเช่น การใช้เทคนิคแบบ RRT (Rapidly Exploring Random Tree) ในการวางแผนการเคลื่อนที่หรือแม้กระทั่งเรืออัตโนมัติจากมหาวิทยาลัยเอ็มไอทีดังรูปที่ 1.4 ก็มีการใช้เทคนิคการวางแผนการเคลื่อนที่และการควบคุมที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อระบบที่นำไปประยุกต์ใช้งาน



(ก) เรืออัตโนมัติจาก MIT [7]



(ข) อากาศยานอัตโนมัติ [8]

รูปที่ 1.4 เรือและอากาศยานแบบอัตโนมัติ

ลิมาและเปโรรา [9] ได้พัฒนารถอัตโนมัติโดยใช้เทคนิค Vector Fields ร่วมกับเทคนิคแบบ Dynamic Window และได้มีการนำเทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นเข้ามาช่วยอีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ข้อมูลการรับรู้ของเซนเซอร์ว่าพื้นที่นั้นๆมีความปลอดภัยในการนำทางหรือไม่ วุฒิชูวงศ์, ศิริวัช ณะนัยและพานิชกุล [10] มีการนำเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) มาใช้ร่วมกับเซนเซอร์ต่างๆ อาทิ เช่น เซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์เข็มทิศและเลเซอร์สแกนเนอร์ ในงานวิจัยนี้ยังมีเทคนิคการนำทางที่น่าสนใจคือ “Behavior Based Navigation” หลังจากนั้นภายในประเทศไทยได้มีการพัฒนารถอัตโนมัติที่เป็นรถยนต์จริงโดยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติร่วมกับสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย [11] ซึ่งมีการเลือกใช้เทคนิคการหลบหลีกสิ่งกีดขวางคือ พีชชีลอจิกคอนโทรล

ในโครงการวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางในสถานะแวดล้อมภายนอกอาคารสำหรับรถอัตโนมัติโดยใช้เทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ร่วมกับเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) และการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) ซึ่งเป็นอีกระบบหนึ่งที่มีความน่าสนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายประเภทและยังได้มีการประยุกต์ใช้เซนเซอร์ต่างๆเพื่อตรวจวัดค่าตัวแปรทางกายภาพและสภาพแวดล้อมเพื่อทำการวิเคราะห์ว่ามีสิ่งกีดขวางที่เป็นอันตรายต่อเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หรือไม่รวมถึงการสร้างแบบจำลองต่างๆ อาทิเช่น การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ระบบการวางแผนเส้นทางการวิ่งเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เป็นต้น ซึ่งระบบประมวลผลและการรับค่าต่างๆจากภายนอกนั้นจะทำงานร่วมกับ MATLAB/Simulink เพื่อใช้ในการประมวลผลเส้นทางการวิ่งให้เหมาะสมกับสถานะต่างๆที่แตกต่างกันออกไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาและออกแบบการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งสิ่งกีดขวางด้วยอัลกอริทึมแบบแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) รวมทั้งระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางและการนำทางแบบอัตโนมัติด้วยอัลกอริทึมแบบเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) ร่วมกับเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning)

1.2.2 เพื่อทดสอบอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นมากับยานพาหนะต่างๆอาทิเช่น รถแบบ 4 ล้อที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

1.2.3 ศึกษาและประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) เพื่อวัดระยะทาง, เซนเซอร์วัดมุมเอียงเพื่อวัดองศาการหมุนในแต่ละแกนและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เพื่อวัดตำแหน่งของรถแบบ 4 ล้อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางอัตโนมัตินั้นจะแบ่งข้อมูลที่จะต้องประมวลผลออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งเป้าหมายและสิ่งกีดขวางในพื้นที่เป้าหมายโดยได้รับข้อมูลจากเซนเซอร์วัดระยะทาง ส่วนที่สองจะเป็นข้อมูลการวิเคราะห์ว่าในตำแหน่งนั้นๆจะมีความเร็วที่เหมาะสมและมุมหันเหเป็นอย่างไรและมีการตรวจสอบว่าตำแหน่งของหุ่นยนต์อยู่บริเวณใดในพื้นที่ทดสอบโดยจะตรวจสอบด้วยเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เพื่อบอกพิกัดตำแหน่ง ข้อมูลทั้งสองส่วนจะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกันด้วยอัลกอริทึมเพื่อหาค่าคำสั่งที่เหมาะสมไปสั่งงานระบบควบคุมในลักษณะการเคลื่อนที่ที่จะสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อัตโนมัติอย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 รถมินิเอทีวีไฟฟ้าแบบ 4 ล้อที่มีมุมเลี้ยวล้อหน้าไม่เกิน 15 องศา ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาทีและสามารถวิ่งได้ต่อเนื่องไม่เกิน 1 ชั่วโมง

1.4.2 ใช้อัลกอริทึมในการวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกันระหว่างเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) ร่วมกับเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) และเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) เพื่อใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับ

1.4.3 ประดิษฐ์ระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อใช้ร่วมกับการ์ดรับ-ส่งข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ (DAQ Card) และโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.4 สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ที่ระยะไม่เกิน 50 เมตร โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) เพื่อวัดระยะทางและประมวลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.5 ประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับอ่านค่าเซนเซอร์วัดมุมเอียง (IMU) มีความแม่นยำ ± 0.5 องศา และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) มีความแม่นยำ ± 5 เมตรจาก Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45 โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.6 จำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบ 4 ล้อทดสอบตามเส้นทางที่กำหนดเมื่อมีสิ่งกีดขวางโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.7 หุ่นยนต์รถสามารถควบคุมได้ด้วยรีโมทวิทยุรวมทั้งควบคุมผ่านระบบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติตามจุดพิกัดที่กำหนด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้สร้างระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับยานพาหนะหรือระบบประเภทต่างๆ

1.5.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่างๆได้ อาทิเช่น งานตรวจสอบความเสียหายจากภัยพิบัติ งานที่มนุษย์ไม่สามารถตรวจสอบได้โดยตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5.3 สามารถจัดระบบแนวความคิดพื้นฐานได้ซึ่งเป็นผลจากการเขียน โปรแกรมการทำงานของระบบอัตโนมัติ

1.5.4 พัฒนาทักษะทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จนสามารถแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าที่เกิดขึ้นได้

1.5.5 มีความเข้าใจในพื้นฐานและหลักการการทำงานของระบบอัตโนมัติรวมถึงเทคนิคต่างๆที่จะเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้การทำงานของระบบดียิ่งขึ้น



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

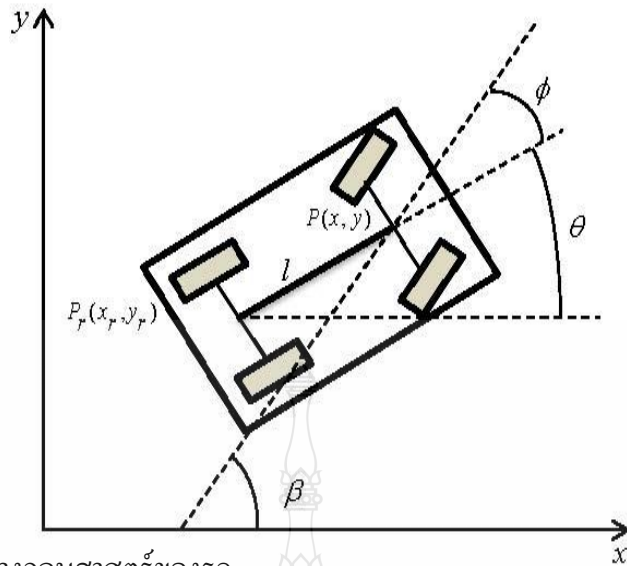
การวางแผนการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่จะนำไปสู่เป้าหมายที่ต้องการนั้นประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ 1) การระบุตำแหน่งเทียบกับแผนที่ (Localization) โดยใช้เซนเซอร์วัดระยะทาง 2) การนำทางโดยใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียงหรือเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) โดยในส่วนแรกนั้นจะใช้ในการตรวจสอบสิ่งกีดขวางว่าอยู่ตำแหน่งใดในพื้นที่การทำงานและในส่วนที่สองนั้นจะใช้นำทางยานพาหนะทดสอบเพื่อไปยังเป้าหมายที่ต้องการ แต่ในส่วนที่สองนั้นจะต้องมีการบูรณาการข้อมูลเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ จะทำการพัฒนาระบบวางแผนการเคลื่อนที่ของยานพาหนะทดสอบโดยใช้เทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เพื่อจำลองแรงสุทธิที่ป้องกันการชนสิ่งกีดขวางและมีทิศเข้าหาจุดเป้าหมายร่วมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นหรือ Feedback Linearization เพื่อใช้ควบคุมระบบการขับเคลื่อนรวมทั้งการประยุกต์ใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานร่วมกับเทคนิคการบูรณาการข้อมูลเซนเซอร์ และในขั้นแรกได้จำลองการหลบหลีกสิ่งกีดขวางในสถานะต่างๆด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทดสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมก่อนที่จะมีการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถจริงและในขั้นที่สองนั้นจะทำการทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางกับรถแบบ 4 ล้อที่ใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้ง 3 มาใช้กับเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ร่วมกับเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) และเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning)

2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถ [12]

จากแบบจำลองของหุ่นยนต์เสมือนรถดังรูปที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่าแกนล้อด้านหลังจะตรงกับแกนล้อด้านหน้าดังนั้นจึงสามารถคำนวณจุดกึ่งกลางของแกนล้อหน้าและจุดกึ่งกลางของแกนล้อหลังเหลือเพียงอย่างละล้อเดียวซึ่งจะสามารถลดแบบจำลองทางจลนศาสตร์ให้เหลือแบบจำลองเหมือนของจักรยานหรืออาจเรียกว่าแบบจำลองแบบล้อเดียวที่มีหนึ่งการพวงนั่นเอง

กำหนดให้ $P = (x, y)$, $P_r = (x_r, y_r)$ เป็นตำแหน่งของล้อหน้าและล้อหลัง ตามลำดับ, l เป็นระยะทางระหว่างล้อหน้าและล้อหลังตามแนวแกนสมมาตรของรถ, θ เป็นทิศทางการหันเห (Orientation) ของแกนกลางหรือแกนสมมาตรของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับแกนนอนของโลกหรือ x , ϕ เป็นมุมเลี้ยวของล้อหน้าเมื่อเทียบกับแกนสมมาตรของรถและ $\beta = \theta + \phi$ เป็นมุมเลี้ยวของล้อหน้า (Heading angle) เมื่อเทียบกับแกนนอนของโลกหรือ x



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถ

ดังนั้นพิกัดกึ่งกลางของล้อหน้า (P) และกึ่งกลางของล้อหลัง (P_r) ที่สัมผัสกับหุ่นยนต์จะได้

$$\begin{aligned} x &= x_r + l \cos \theta \\ y &= y_r + l \sin \theta \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อรถมีระบบขับเคลื่อนที่ล้อหลัง สมการทางจลนศาสตร์ที่เทียบกับพิกัดโลก (x, y) สามารถเขียนในรูปแบบนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= u_r \cos \theta \\ \dot{y}_r &= u_r \sin \theta \\ l\dot{\theta} &= u_r \tan \phi \\ \dot{\phi} &= u_\phi \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ u_r, u_ϕ เป็นความเร็วล้อหลัง และ อัตราการเลี้ยวของล้อหน้าตามลำดับ โดยกำหนดอินพุตหรือคำสั่งของระบบเป็น

$$\begin{aligned} u_r &= u_1 \cos \phi \\ u_\phi &= u_2 - \frac{u_1 \sin \phi}{l} \end{aligned} \quad (2.3)$$

เมื่อ u_1, u_2 เป็นความเร็วของล้อหลังและความเร็วของล้อหน้าที่กำหนดขึ้นมาใหม่ที่เทียบกับพิกัดโลก $x-y$ เมื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบจำลองในสมการที่ 2.2 ของรถที่ขับเคลื่อนล้อหลังให้เป็นของรถที่ขับเคลื่อนล้อหน้าที่แสดงเป็นฟังก์ชันของมุม β จะได้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u_1 \cos \beta \\ \dot{y} &= u_1 \sin \beta \\ l\dot{\theta} &= u_1 \sin(\beta - \theta) \\ \dot{\beta} &= u_2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

โดยสมการข้างต้นจะใช้ช่วยออกแบบระบบควบคุมโดยตรงในการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ในหัวข้อต่อไป

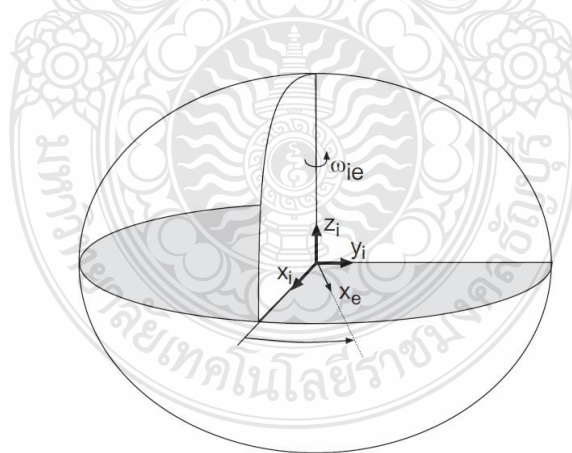
2.2 การแปลงพิกัด [13]

2.2.1 การกำหนดกรอบอ้างอิง

2.2.1.1 กรอบอ้างอิงเฉื่อย (Inertial Frame)

กรอบอ้างอิงเฉื่อยนั้นคือกรอบอ้างอิงที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ซึ่งจุดกำเนิดของระบบพิกัดความเฉื่อยนั้นสามารถกำหนดเป็นตำแหน่งใดๆก็ได้จะแล้วแต่การพิจารณาแต่แกนพิกัดทั้ง 3 แกนนั้นจะต้องตั้งฉากกัน ดังนั้นค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเฉื่อยทุกชนิดจะมีค่าที่สัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเฉื่อย

แต่เพื่อความสะดวกจึงมีการกำหนดกรอบอ้างอิงเฉื่อยไว้ที่แกนกลางโลกหรือที่เรียกว่ากรอบอ้างอิงเฉื่อยที่แกนกลางโลก (Earth Centered Inertial: ECI Frame) โดยจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดนี้จะทับกับจุดศูนย์กลางมวลของโลกดังรูปที่ 2.2 ที่เวลาเดียวกันความเฉื่อยบนแกน x และแกน z จะชี้ไปทางเวร์นอล อิกวินอกซ์ (Vernal Equinox) และตามการหมุนของแกนโลกตามลำดับ โดยแกน y จะกำหนดตามกฎมือขวา ในกรอบอ้างอิงแบบ ECEF (Earth Centered Earth Fixed Frames) นั้นการหมุนจะเทียบเท่ากับกรอบอ้างอิงแบบ ECI ด้วยอัตราความเร็วเชิงมุม ω_{ie} ซึ่งในกรอบอ้างอิงแบบ ECI นั้นเวกเตอร์อัตราเร็วเชิงมุมคือ $\omega_{ie}^i = [0, 0, \omega_{ie}]^T$



รูปที่ 2.2 การหมุนของกรอบอ้างอิงแบบ ECEF เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงเฉื่อยที่แกนกลางโลก [13]

2.2.1.2 กรอบอ้างอิงแบบ ECEF (Earth Centered Earth Fixed Frames)

กรอบชนิดนี้จะมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของโลก ซึ่งการหมุนของแกนจะสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเฉื่อยหรือกรอบอ้างอิงแบบ ECI ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมดังต่อไปนี้

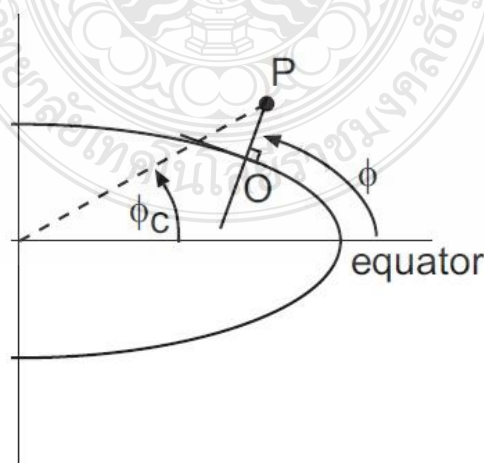
$$\omega_{ie} \approx \left(\frac{1 + 365.25 \text{ cycle}}{(365.25)(24) \text{ hr}} \right) \left(\frac{2\pi \text{ rad} / \text{ cycle}}{3600 \text{ sec} / \text{ hr}} \right) = 7.292115 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad (2.5)$$

เมื่อค่า 365.25 นั้นเป็นวันที่โลกหมุนต่อหนึ่งปีบวกกับหมุนรอบดวงอาทิตย์ 1 รอบ เมื่อการหมุนนั้นสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเฉื่อย ดังนั้นเวกเตอร์อัตราการหมุนของโลกที่สัมพันธ์กับแกนอ้างอิงแบบ ECEF คือ $\omega_{ie}^e = [0, 0, 1]^T \omega_{ie}$ ดังนั้นผิวระดับอ้างอิงความสูงของโลก (Earth's Geoid) ปกติสามารถประมาณเป็นวงรีที่หมุนรอบแกนรอง โดยจะกำหนดให้รูปร่างของโลกและตัวแปรแบบจำลองแรงโน้มถ่วงของโลกนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งค่า ω_{ie} ก็จะเป็นแค่ค่าประมาณเวลาที่นำไปใช้งาน

2.2.1.3 กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ (Geographic Frame)

กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นจะกำหนดเป็นเฉพาะส่วนให้สัมพันธ์กับ Earth's geoid โดยจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับระบบและจะฉายภาพจากจุดกำเนิด P ไปบนทรงรีอ้างอิงดังรูปที่ 2.3 โดยแกน z ของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นจะชี้ไปยังภายในของทรงรีตามลักษณะของทรงรีปกติ แกน x จะชี้ไปยังทิศเหนือที่แท้จริงและแกน y จะชี้ไปทางทิศตะวันออกตามกฎมือขวาในระบบพิกัดฉาก

เนื่องจากจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ (P) นั้นจะเคลื่อนที่ไปตามยานพาหนะ ดังนั้นแกนของกรอบก็จะหมุนไปเหมือนกับยานพาหนะทั้งในทิศเหนือหรือทิศตะวันออก เพราะการหมุนของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์จะเทียบกับพื้นที่ความเฉื่อย แต่กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นไม่ได้เป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อย โดยมีสองสิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือ 1. ทิศเหนือที่แท้จริงและทิศเหนือของเส้นแรงแม่เหล็กบ่อยครั้งจะมีทิศทางที่แตกต่างกัน 2. ดังรูปที่ 2.3 โดยปกติแล้วเส้นตั้งฉากของทรงรีอ้างอิง (หรือที่ประมาณโดย Earth Geoid) จะไม่ผ่านไปสู่ศูนย์กลางของทรงรี เว้นแต่จุด P อยู่ที่เส้นศูนย์สูตรหรืออยู่ตามแนวแกนการหมุนของโลก



รูปที่ 2.3 การแสดงผลต่างระหว่างละติจูดแบบ Geodetic (ด้วยมุม ϕ) และแบบ Geocentric (ด้วยมุม ϕ_c)

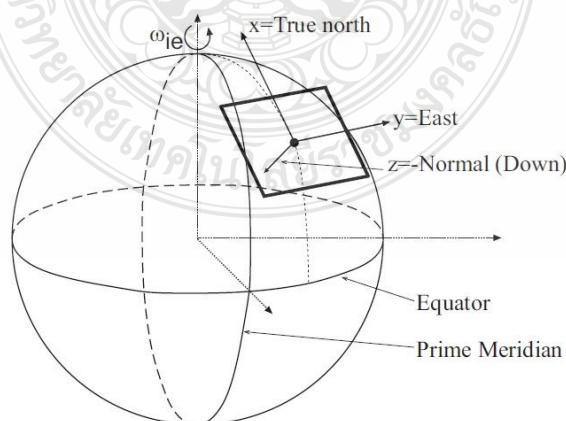
2.2.1.4 กรอบอ้างอิงแบบใช้จุดศูนย์กลางโลกเป็นหลัก (Geocentric Frame)

กรอบอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นคือ กรอบอ้างอิงแบบ geocentric ซึ่งสิ่งที่แตกต่างหลักๆคือ แกน z ของกรอบอ้างอิงแบบ Geocentric จะชี้จากตำแหน่งต่างๆไปยังศูนย์กลางของโลก แกน x จะชี้ไปยังทิศเหนือที่แท้จริงในระนาบที่ตั้งฉากกับแกน z ส่วนแกน y จะชี้ไปทางทิศตะวันออกตามกฎมือขวาในระบบพิกัดฉาก ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ นั่นคือ แกนของกรอบก็จะหมุนไปเหมือนกับยานพาหนะทั้งในทิศเหนือหรือทิศตะวันออกด้วยเหตุนี้ กรอบอ้างอิงแบบ Geocentric จึงไม่ใช่กรอบอ้างอิงเฉื่อย

2.2.1.5 กรอบอ้างอิงแบบใช้จุดศูนย์กลางโลกเป็นหลักเฉพาะที่ (Local Geodetic) หรือ ระนาบสัมผัส (Tangent Plane)

กรอบอ้างอิงแบบใช้จุดศูนย์กลางโลกเป็นหลักเฉพาะที่ (Local Geodetic) นั่นคือ ทิศเหนือ ตะวันออก และทิศซีกในในระบบพิกัดฉากดังรูปที่ 2.4 กรอบอ้างอิงนี้จะถูกกำหนดโดยการปรับระนาบสัมผัสให้สัมผัสกับวงรีอ้างอิงแบบ Geodetic ที่จุดสนใจ โดยระนาบสัมผัสจะติดอยู่บนจุดคงที่บนพื้นผิวของโลกเพื่อให้เป็นจุดที่มีความเหมาะสมในการวัดแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local) ซึ่งจุดนี้จะมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของกรอบแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local) แกน x จะชี้ไปทางทิศเหนือที่แท้จริง แกน z จะชี้ไปในทิศพุ่งเข้าหาแกนโลกและตั้งฉากกับวงรีอ้างอิง ส่วนแกน y จะเป็นไปตามกฎมือขวาและชี้ไปทิศตะวันออกดังในรูปที่ 2.4

สำหรับระบบที่อยู่กับที่นั่นตำแหน่งที่จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ และกรอบแบบระนาบสัมผัสจะทับกัน แต่เมื่อระบบมีการเคลื่อนที่จุดกำเนิดของระนาบสัมผัสนั้นจะอยู่กับที่ในขณะที่จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์จะโปรเจกชันลงบนวงรีอ้างอิงของโลก ระบบกรอบอ้างอิงสัมผัสนั้นบ่อยครั้งจะใช้ในระบบนำร่องแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local)

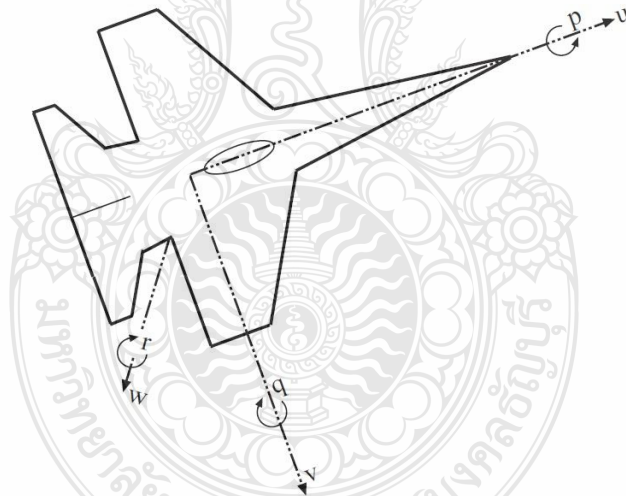


รูปที่ 2.4 กรอบอ้างอิงแบบ Local Geodetic หรือระนาบสัมผัสในระบบพิกัดอ้างอิงเมื่อสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงแบบ ECEF [13]

2.2.1.6 กรอบอ้างอิงของวัตถุ (Body Frame)

ในการประยุกต์ใช้ในการนำร่องนั้นวัตถุประสงค์คือเพื่อหาตำแหน่งและความเร็วของยานพาหนะที่ขึ้นอยู่กับการวัดค่าที่ได้มาจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนยานพาหนะ ด้วยสาเหตุที่กล่าวมานี้จึงกำหนดกรอบอ้างอิงของวัตถุที่รวมทั้งยานพาหนะและเครื่องมือวัดรวมทั้งความสัมพันธ์ต่างเกี่ยวกับระบบพิกัดอีกด้วย

กรอบอ้างอิงของวัตถุจะวางลงไปบนยานพาหนะที่เราสนใจบ่อยครั้งที่มันกำหนดให้อยู่กับที่ อาทิเช่น จุดศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงของวัตถุหรือจุดศูนย์กลางของมวล โดยการวางจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงวัตถุไว้ที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของวัตถุนั้นจะง่ายต่อการหาที่มาของสมการทางจลนศาสตร์และบ่อยครั้งมันมีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมโดยแกน u จะถูกกำหนดให้ชี้ไปด้านหน้าของยานพาหนะ แกน w จะกำหนดให้ชี้ลงด้านล่างของยานพาหนะและแกน v จะเป็นไปตามกฎมือขวาตามระบบพิกัดฉาก โดยทิศทางของแกนที่แสดงดังรูปที่ 2.5 นั้นไม่ได้เป็นลักษณะเฉพาะแต่เป็นรูปแบบที่จะประยุกต์ใช้กับอากาศยาน, ยานดำน้ำ เป็นต้น ดังนั้นสัญลักษณ์ $[u,v,w]$ จะใช้สำหรับแกนของยานพาหนะที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแทนรูปแบบมาตรฐาน $[x,y,z]$



รูปที่ 2.5 ระบบพิกัดของยานพาหนะ [13]

จากรูปจะเห็นได้ว่าเวกเตอร์อัตราหมุนของกรอบอ้างอิงวัตถุนั้นจะสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงแบบเฉื่อย โดยการหมุนรอบแกนวัตถุถูกกำหนดให้เป็น $\omega_b^i = [p, q, r]^T$ เมื่อ p เป็นอัตราความเร็วเชิงมุมรอบแกน u , q เป็นอัตราความเร็วเชิงมุมรอบแกน v และ r เป็นความเร็วเชิงมุมรอบแกน w โดยแต่ละอัตราความเร็วเชิงมุมนั้นจะเป็นบวกตามกฎมือขวาและกรอบอ้างอิงวัตถุนั้นจะไม่ใช่กรอบอ้างอิงแบบเฉื่อย

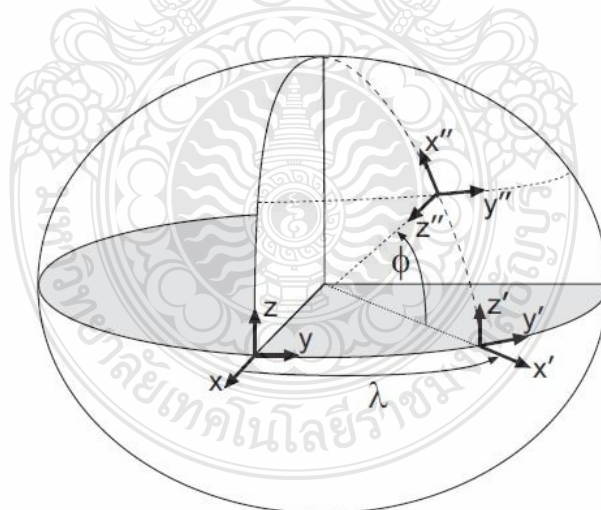
2.2.1.7 กรอบอ้างอิงของ Platform

ในที่นี้จะพิจารณากรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ที่วางอยู่กับที่เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงของยานพาหนะ ดังนั้นสำหรับระบบนำร่องที่ประยุกต์ใช้ความเฉื่อย (Inertial Navigation) นั้น อาทิเช่นระบบที่เรียกว่า “Strap-Down” เป็นต้น ดังนั้นจะต้องมีการชดเชยกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์หรืออาจจะต้องหมุนเทียบกับจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงวัตถุ โดยจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์อาจจะถูกนำไปตั้งอยู่ตรงไหนก็ได้ ซึ่งจะต้องกำหนดให้ทั้งสามแกนตั้งฉากซึ่งกันและกันและเป็นไปตามกฎมือขวาก็ด้วย แต่ทิศทางนั้นจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานที่ต่างกันไป โดยทั่วไปแล้วเมทริกซ์การหมุนของกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ไปยังกรอบอ้างอิงของวัตถุหรือยานพาหนะนั้นจะคงที่และหาได้จากขั้นตอนการออกแบบระบบ

2.2.2 การแปลงเวกเตอร์เฉพาะ

2.2.2.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงแบบ ECEF สู่กรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส

เมื่อกำหนดให้ $\Delta \hat{x}^e = [x, y, z]^e - [x_0, y_0, z_0]^e$ (2.6) โดยที่ $[x_0, y_0, z_0]^e$ คือจุดเริ่มต้นหรือจุดกำเนิดของพิกัดแบบ ECEF บนระนาบสัมผัสแบบบริเวณเฉพาะที่(Local), $\Delta \hat{x}^e$ คือเวกเตอร์สัมผัสของระยะทางในแต่ละแกนจากจุดกำเนิดของระนาบสัมผัสแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local) ไปยังตำแหน่งที่ต้องการพิจารณาซึ่งแสดงด้วยเวกเตอร์ $P^e = [x, y, z]^e$ ที่แสดงในแกน ECEF



รูปที่ 2.6 วิธีการแปลงจากกรอบอ้างอิงแบบ ECEF ไปเป็นกรอบอ้างอิงแบบระนาบสัมผัสโดยใช้ R_e^l [13]

การแปลงเวกเตอร์จาก ECEF ในพิกัด (x-y-z) ในรูปที่ 2.6 ไปยังระนาบสัมผัส (Tangent Plane) ในพิกัด (x''-y''-z'') ในรูปที่ 2.6 นั้นสามารถสร้างได้จากการหมุนระนาบ 2 ครั้งดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยครั้งแรกจะหมุนระนาบรอบแกน z ของพิกัดแบบ ECEF ให้ตรงกับแกนตะวันออกของระนาบสัมผัสซึ่ง

กำหนดโดยใช้ตัวแปร y' ครั้งที่สองจะหมุนระนาบรอบแกน y' ให้ตรงกับระนาบสัมผัสที่ชี้ไปยังเวกเตอร์ตั้งฉากจะได้แกน z ใหม่โดยกำหนดให้เป็น z'' ดังนั้นการแปลงเวกเตอร์จากพิกัดแบบ ECEF ไปยังระนาบสัมผัสจะแสดงด้วย $v' = R'_e v^e$ เมื่อ v^e คือความเร็วในพิกัดแบบ ECEF และ v' คือความเร็วในระนาบสัมผัส โดยที่

$$R'_e = \begin{bmatrix} -\sin(\phi)\cos(\lambda) & -\sin(\phi)\sin(\lambda) & \cos(\phi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\cos(\phi)\cos(\lambda) & -\cos(\phi)\sin(\lambda) & -\sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ดังนั้นการแปลงแบบผกผันของเวกเตอร์จากระนาบสัมผัสไปยังพิกัดแบบ ECEF คือ $v^e = R_e v'$ เมื่อ $R_e = (R'_e)^T$

2.2.2.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงแบบ ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์

ในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นมีจุดที่แตกต่างจากกรอบอ้างอิงแบบอื่นนั่นคือ 1) จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นมีการเคลื่อนที่ไปกับยานพาหนะและจะมีการโปรเจกชันจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงยานพาหนะลงบนวงรีอ้างอิง ดังนั้นตำแหน่งของยานพาหนะในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ $x^g = [0, 0, -h]^T$ โดยละติจูด ϕ และลองจิจูด λ กำหนดเป็นตำแหน่งของจุดกำเนิดกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์บนวงรีอ้างอิง 2) แต่ $\frac{d}{dt} x^g = [0, 0, -\dot{h}]^T$ ไม่ใช่เวกเตอร์ความเร็วสำหรับยานพาหนะ ดังนั้นเวกเตอร์ความเร็วที่สัมพันธ์กับโลกในกรอบอ้างอิง ECEF คือ $v_e^e = \frac{d}{dt} x^e$ ซึ่งเวกเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ได้ดังนี้

$$v_e^g = R_e^g v_e^e \quad (2.8)$$

เมื่อเวกเตอร์ v_e^g นั้นไม่ใช่อนุพันธ์ของเวกเตอร์ตำแหน่งในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ x^g โดยส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็วที่สัมพันธ์กับโลกในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ $v_e^g = [v_n, v_e, v_d]^T$ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็วในทิศเหนือ, ทิศตะวันออก, แนวต่ำลงตามแกนของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์และเวกเตอร์การหมุน R_e^g นั้นจะมีรูปแบบเดียวกับ R'_e แต่แตกต่างกันตรงที่ R_e^g จะคำนวณโดยใช้ค่าละติจูด ϕ และลองจิจูด λ ซึ่งเป็นตำแหน่งของยานพาหนะ ณ เวลาที่สนใจ ในขณะที่ R'_e เป็นเมทริกซ์คงที่โดยใช้ค่าละติจูด ϕ และลองจิจูด λ ที่จุดกำเนิดของระนาบสัมผัส ดังนั้นจากสมการที่ 2.9 จะได้ว่า

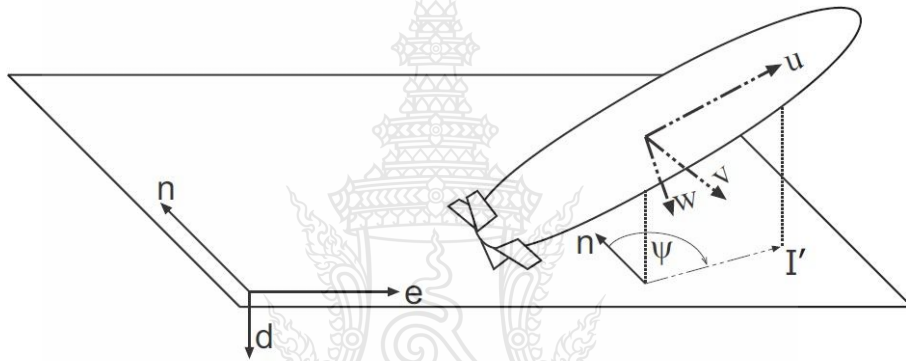
$$v_e^g = \begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_M + h)\dot{\phi} \\ \cos(\phi)(R_N + h)\dot{\lambda} \\ -\dot{h} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

และ

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_n}{R_M + h} \\ \frac{v_e}{\cos(\phi)(R_N + h)} \\ -v_d \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมื่อ R_M คือรัศมีของวงรีหรือรัศมีในแนวเมริเดียน, R_N คือรัศมีในแนวตั้งฉากและ h คือระดับความสูงเหนือวงรีอ้างอิง

2.2.2.3 การแปลงกรอบอ้างอิงยานพาหนะไปยังกรอบอ้างอิงนำร่อง



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างยานพาหนะและระบบพิกัดกรอบอ้างอิงนำร่อง [13]

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์รูปที่ 2.7 จะแสดงให้เห็นว่ามี 2 ระบบพิกัดคือ 1) เป็นกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ กำหนดเป็น (n, e, d) 2) เป็นกรอบอ้างอิงยานพาหนะกำหนดเป็น (u, v, w) โดยความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ระหว่างกรอบอ้างอิงยานพาหนะและกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นสามารถนำเสนอโดยใช้เมทริกซ์การหมุน R_b^g ซึ่งจะใช้ร่วมกับมุมออยเลอร์ประกอบด้วยมุมหมุน (ϕ), มุมเงย (θ), มุมหันเห (φ) ดังนั้นเวกเตอร์ที่แสดงในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์หรือในระนาบสัมผัสแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local) สามารถแปลงไปสู่กรอบอ้างอิงยานพาหนะได้โดยใช้มุมออยเลอร์ทั้งสามมุมร่วมกันจะได้

$$\begin{aligned} v^b &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\varphi & s\varphi & 0 \\ -s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} v^g \\ v^b &= \begin{bmatrix} c\varphi c\theta & s\varphi c\theta & -s\theta \\ -s\varphi c\phi + c\varphi s\theta s\phi & c\varphi c\phi + s\varphi s\theta s\phi & c\theta s\phi \\ s\varphi s\phi + c\varphi s\theta c\phi & -c\varphi s\phi + s\varphi s\theta c\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} v^g \\ v^b &= R_g^b v^g \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อ v^s เป็นความเร็วในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์, v^b เป็นความเร็วในกรอบอ้างอิงยานพาหนะและกำหนดให้ $cx = \cos(x)$, $sx = \sin(x)$ โดยที่การแปลงเวกเตอร์แบบผกผันจะได้ $v^s = R_b^g v^b = (R_g^b)^T v^b$

2.3 เทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง [14]

ระบบการตรวจสอบสิ่งกีดขวางนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ เพื่อวัตถุประสงค์ในการบ่งบอกตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริงในพิกัดโดยรวมทั้งหมด (Global Coordinate) และยังส่งผลต่อความถูกต้องในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอเทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวางซึ่งมีขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอนคือ 1. ขั้นตอนการแปลงค่าข้อมูลจากเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ให้อยู่ในพิกัดโลกที่แท้จริง 2. ขั้นตอนการหาตำแหน่งสิ่งกีดขวางโดยใช้เทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map)

2.3.1 การแปลงพิกัดข้อมูลจากเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder)

เนื่องจากการนำทางภายนอกอาคารนั้นจะต้องมีการใช้เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ในการนำทางซึ่งในกระบวนการคำนวณและประมวลผลนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องแปลงค่าจากละติจูด, ลองจิจูดและอัลติจูดหรือความสูงไปเป็นตำแหน่ง x, y, z เพื่อความง่ายและสะดวกในการนำไปใช้ในส่วนอื่นต่อไป

- การแปลงข้อมูลไปยังกรอบอ้างอิงแบบ ECEF โดยใช้สมการที่ 2.12

$$\begin{aligned} x &= (R_N + h) \cos(\phi) \cos(\lambda) \\ y &= (R_N + h) \cos(\phi) \sin(\lambda) \\ z &= [R_N (1 - e^2) + h] \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อ $R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\phi)}}$ คือรัศมีของโลก

a คือ รัศมีเส้นศูนย์สูตร = 6378137 เมตร

h คือ ระดับความสูงหรือความสูงในกรอบอ้างอิงแบบ Geodetic

e คือ ความเบี้ยว = 0.08181919

ϕ คือ ละติจูด (องศา)

λ คือ ลองจิจูด (องศา)

x คือ ตำแหน่งในแนวแกน x (เมตร)

y คือ ตำแหน่งในแนวแกน y (เมตร)

z คือตำแหน่งในแนวแกน z (เมตร)

- การแปลงค่าจากกรอบอ้างอิงแบบ ECEF ไปสู่ระนาบสัมผัสสามารถหาได้ดังสมการที่

2.13

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^t = R_t^e \left(\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}^e - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}^e \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ $R_t^e = \begin{bmatrix} -\sin(\phi)\cos(\lambda) & -\sin(\phi)\sin(\lambda) & \cos(\phi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\cos(\phi)\cos(\lambda) & -\cos(\phi)\sin(\lambda) & -\sin(\phi) \end{bmatrix}$ เมทริกซ์การหมุนจากพิกัด ECEF ไป

ยังระนาบสัมผัส

$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}^e$ คือ ตำแหน่งเริ่มต้นในกรอบอ้างอิงแบบ ECEF

$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}^e$ คือ ตำแหน่งที่ 2 ในกรอบอ้างอิงแบบ ECEF

$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^t$ คือ ระยะการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ 2 ในระนาบสัมผัส

- การแปลงข้อมูลของเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ไปยังพิกัดโดยรวมทั้งหมด (Global Coordinate)

โดยปกติแล้วในงานตรวจสอบสิ่งกีดขวางแบบภายนอกอาคารนั้นอาจจะต้องใช้เซนเซอร์ที่สามารถทนต่อแสงจ้าได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) หรืออาจเรียกว่า “เลเซอร์สแกนเนอร์” โดยส่วนใหญ่ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) จะอยู่ในพิกัดเชิงขั้วแต่ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการต่างๆในระบบพิกัดฉาก ดังนั้นการแปลงจากระบบพิกัดเชิงขั้วเป็นระบบพิกัดฉากสามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_l &= r \cos(\theta_l) \\ y_l &= r \sin(\theta_l) \end{aligned} \quad (2.14)$$

เมื่อ r คือ ระยะทางที่ได้จากเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ในระบบพิกัดเชิงขั้ว

θ_l คือ องศาการสแกนของข้อมูลระยะทางที่วัดได้ด้วยเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder)

x_l คือ ข้อมูลระยะทางเมื่อเทียบกับแกน x ในระบบพิกัดฉาก

y_l คือ ข้อมูลระยะทางเมื่อเทียบกับแกน y ในระบบพิกัดฉาก

หลังจากที่แปลงข้อมูลจากเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ให้อยู่ในระบบพิกัดฉากแล้วจากนั้นจะใช้เมทริกซ์การแปลงเพื่อให้ข้อมูลเลเซอร์อยู่ในพิกัดโดยรวมทั้งหมด (Global Coordinate) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_t = \begin{bmatrix} [RotationMatrix(3 \times 3)] & x_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_t \\ x_t \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ P_t คือ ข้อมูลของตำแหน่งวัตถุที่วัดด้วยเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ในพิกัดโดยรวมทั้งหมด (Global Coordinate)

x_t, y_t, z_t คือ เมทริกซ์การเลื่อนของยานพาหนะในระนาบสัมผัส

x_t, y_t คือ ข้อมูลของตำแหน่งวัตถุที่วัดด้วยเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ในพิกัดบริเวณเฉพาะที่ (Local Coordinate)

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cos(\alpha) & \sin(\theta)\sin(\beta)\cos(\alpha) - \cos(\theta)\sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\theta)\sin(\beta) + \sin(\theta)\sin(\alpha) \\ \cos(\beta)\sin(\alpha) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\theta) + \cos(\alpha)\cos(\theta) & \cos(\theta)\sin(\beta)\sin(\alpha) - \sin(\theta)\cos(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \sin(\theta)\cos(\beta) & \cos(\theta)\cos(\beta) \end{bmatrix}$$

เมื่อ R คือ เมทริกซ์การหมุนที่วัดจากมุมออยเลอร์

โดยที่ θ คือ มุมองศาการกลิ้ง (Roll) [เรเดียน]

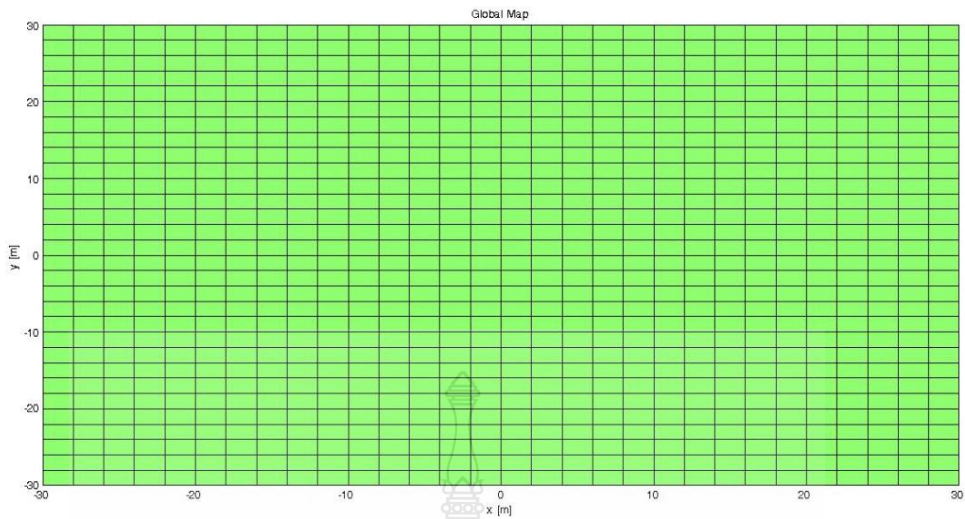
β คือ มุมองศาแก้ม-เงย (Pitch) [เรเดียน]

α คือ มุมองศาการหันเหของหัวยานพาหนะ (Yaw) [เรเดียน]

2.3.2 เทคนิคการสร้างแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map)

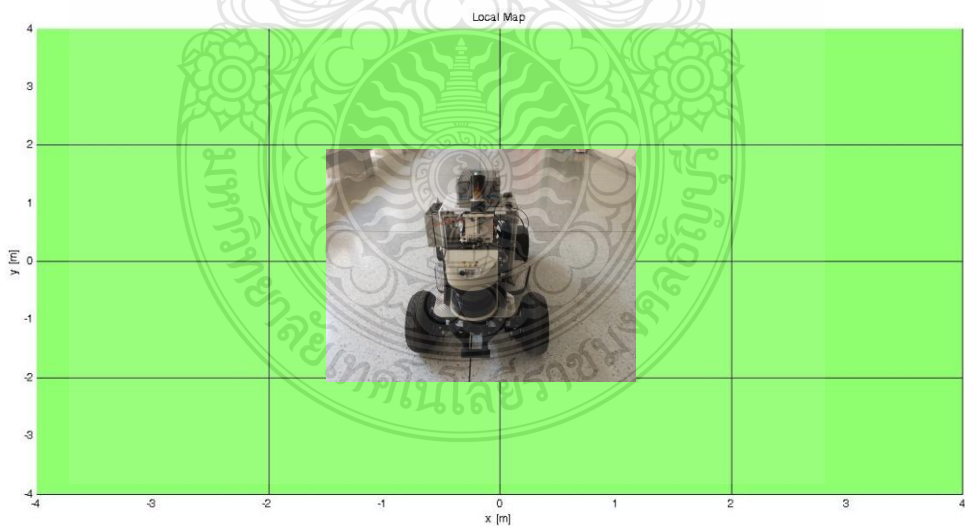
เทคนิคนี้ เป็นเทคนิคเบื้องต้นในการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง โดยจะได้เฉพาะตำแหน่งของสิ่งกีดขวางในพิกัดโดยรวมทั้งหมด (Global Coordinate) เท่านั้น โดยแนวความคิดเบื้องต้นของเทคนิคนี้คือ จะสร้างตาราง 2 ชนิดขึ้นมาโดยตารางแบบแรกเรียกว่า “ตารางโดยรวมทั้งหมดหรือ (Global Grid)” และตารางแบบที่สองเรียกว่า “ตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid)” โดยแต่ละชนิดของตารางนั้นจะแบ่งเป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆซึ่งจะมีขนาดหรือพื้นที่ตามที่ต้องการ ดังนั้นในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการสร้างตารางและการได้มาซึ่งตำแหน่งของสิ่งกีดขวางที่แสดงในตารางดังนี้

1) เริ่มต้นเมื่อรู้ว่าสถานที่ทดสอบหรือพื้นที่การทำงานจริงนั้นมีพื้นที่เท่าไร หลังจากนั้นก็มีการกำหนดตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) ขึ้นมาก่อนซึ่งขนาดของตารางสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเล็กๆอาจเรียกว่า “เซลล์” (หรือ Cell) ในงานวิจัยครั้งนี้จะกำหนดให้เซลล์มีขนาด 2x2 เมตร ดังรูปที่ 2.8 โดยขนาดของตารางที่กำหนดขึ้นมานั้นก็ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่ใช้ในการนำทางยานพาหนะอีกด้วย



รูปที่ 2.8 แนวความคิดในการสร้างตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid)

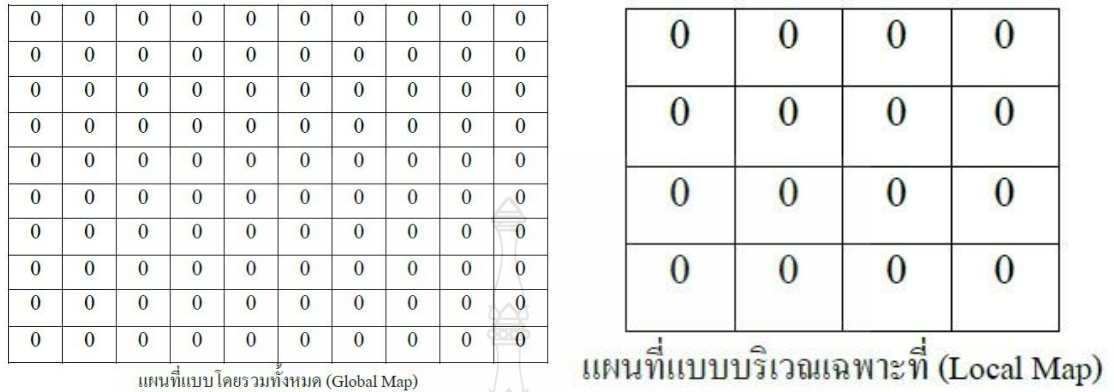
2) ในขั้นตอนต่อไปก็จะมีการสร้างตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ออกมาโดยจะสร้างให้จุดศูนย์กลางของตารางชนิดนี้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางของรถ ซึ่งขนาดของเซลล์ในตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ก็จะเท่ากับขนาดของเซลล์ในตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) แต่ขนาดทั้งหมดของตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) นั้นจะขึ้นอยู่กับมุมเลี้ยวหรือระยะในการเลี้ยวของยานพาหนะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แนวความคิดในการสร้างตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid)

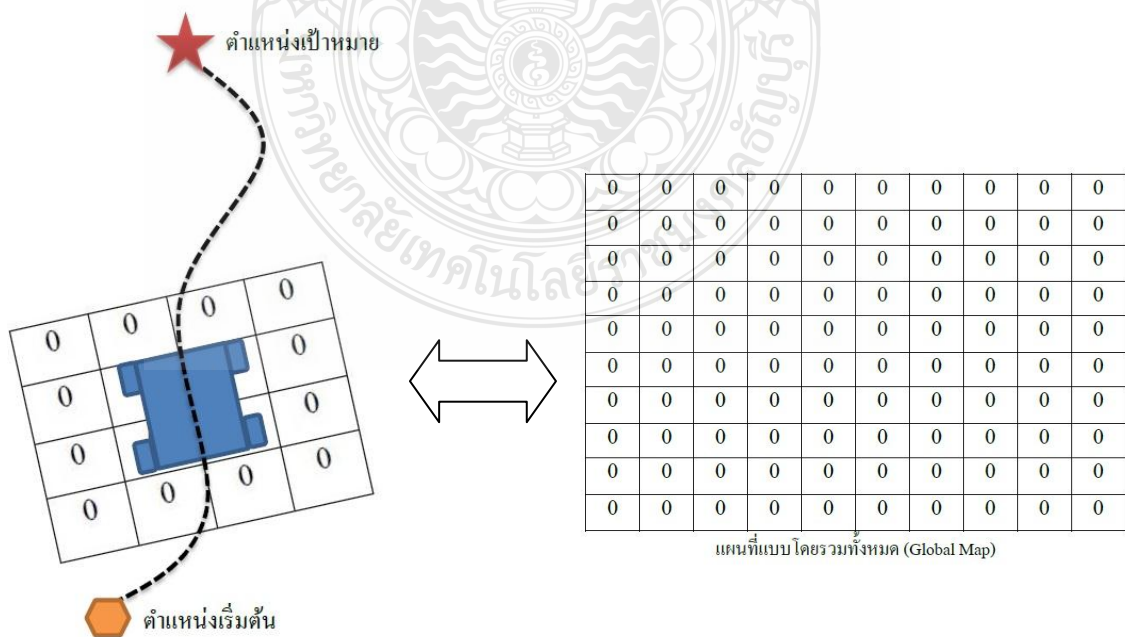
3) กำหนดค่าดัชนีประจำตัว (Index) เริ่มต้น โดยให้แต่ละตารางเป็นค่า 0 ทั้งหมดดังรูปที่

2.10



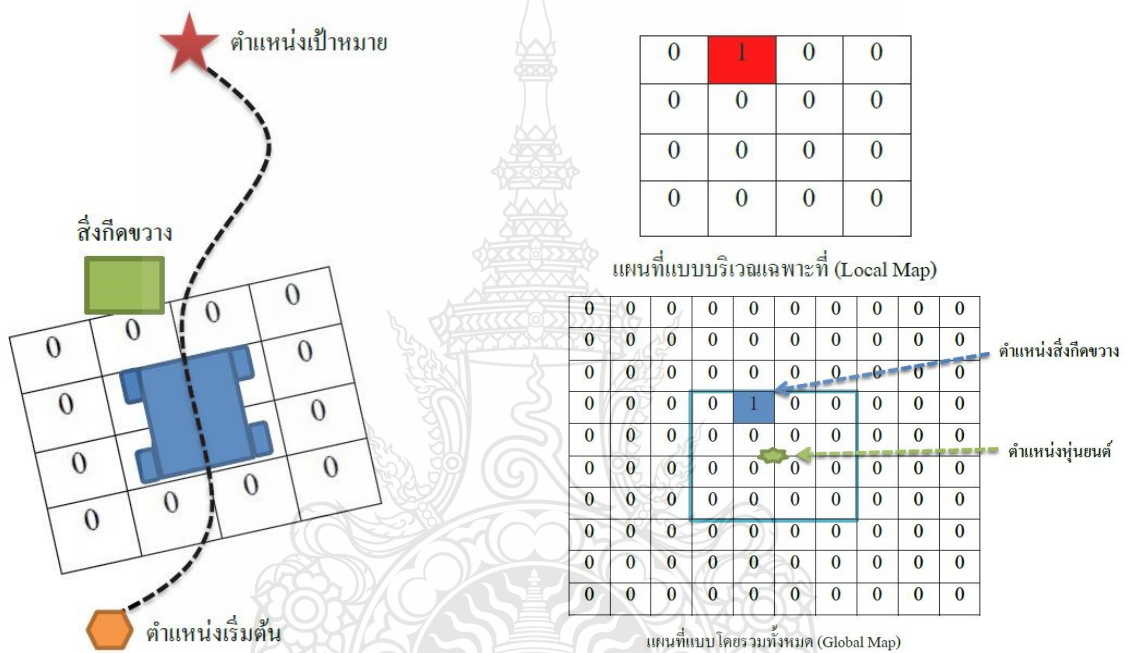
รูปที่ 2.10 การกำหนดค่าดัชนีประจำตัว (Index) ให้กับตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) และตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid)

4) การทำงานของเทคนิคนี้คือ ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์นั้นค่าดัชนีของตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) และตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) จะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด หลังจากนั้นการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จึงเริ่มขึ้น โดยที่ตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวหุ่นยนต์ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งถ้าตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ไม่ตรวจพบสิ่งกีดขวาง ค่าดัชนีของตารางทั้ง 2 ชนิดก็จะไม่มีค่าเพิ่มขึ้นจนไปถึงยังเป้าหมายที่ต้องการ



รูปที่ 2.11 เมื่อหุ่นยนต์ไม่ตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน

5) ถ้าตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ตรวจพบสิ่งกีดขวางดังรูปที่ 2.12 แผนที่แบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Map) จะอัปเดตและแสดงว่าสิ่งกีดขวางอยู่ในทิศทางไหนจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ไปปรับเปลี่ยนข้อมูลในตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) ก็จะทราบว่าสิ่งกีดขวางอยู่บริเวณไหนในตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) กรณีที่ตำแหน่งหุ่นยนต์เปลี่ยนไปแต่ตำแหน่งสิ่งกีดขวางอยู่ที่เดิมแผนที่แบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Map) จะมีการเปลี่ยนแปลงแต่แผนที่แบบโดยรวมทั้งหมด (Global Map) จะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากสิ่งกีดขวางอยู่ที่เดิมแต่จะมีค่าดัชนีที่มากขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับว่าตรวจพบสิ่งกีดขวางเป็นระยะเวลาานานเท่าไร

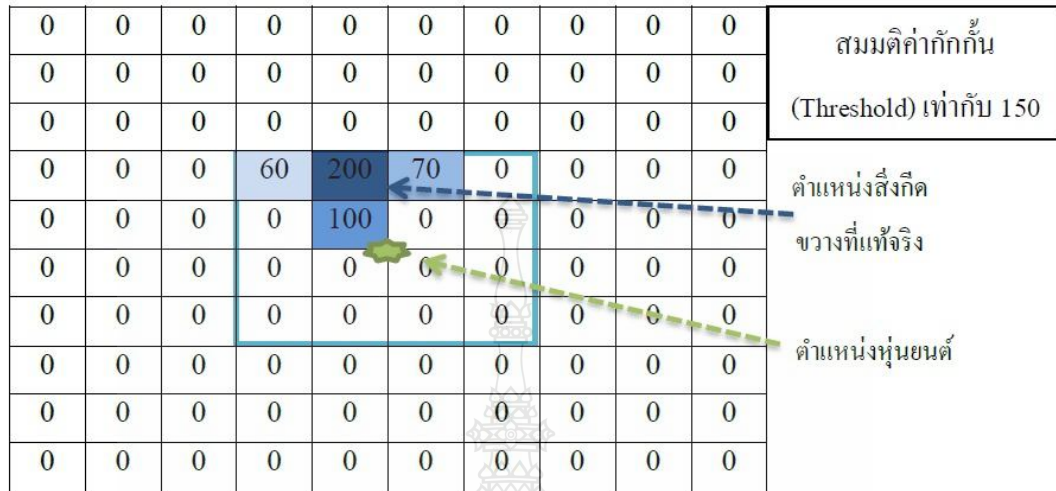


รูปที่ 2.12 เมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน

2.3.3 ระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวาง (Obstacle Detection)

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้มั่นใจว่าสิ่งที่อยู่ในแผนที่แบบโดยรวมทั้งหมด (Global Map) นั้นสามารถนำไปใช้งานได้ถูกต้องคือการตรวจสอบว่าข้อมูลนั้นๆ เป็นสิ่งกีดขวางหรือไม่ ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีเบื้องต้นในการตรวจสอบเพื่อหาสิ่งกีดขวางที่แท้จริงในพื้นที่การทำงานเรียกว่า “วิธีกักกัน (Threshold Method)” วิธีนี้จะต้องมีการหาค่ามาตรฐานเพื่อความมั่นใจในการบอกว่าช่องนั้นๆ ภายในตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เป็นสิ่งกีดขวางโดยอาจจะทำการทดสอบซ้ำหลายหลายครั้งๆ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลหรืออาจเป็นค่าที่คาดว่าจะครอบคลุมขอบเขตมากที่สุด ซึ่งค่านี้เป็นค่าที่สำคัญต่อประสิทธิภาพในการตรวจสอบสิ่งกีดขวางเป็นอย่างยิ่งโดยหลักการการทำงานเบื้องต้นคือ เมื่อตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) มีค่ามากกว่าศูนย์ดังรูปที่ 2.13 ระบบจะนำค่าดัชนีที่ได้มาจากตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) ลบกับค่ากักกัน (Threshold Value) เพื่อให้ได้ผลต่างออกมา ดังนั้นถ้าค่าผลต่างที่

ออกมามีค่ามากกว่าศูนย์ดังรูปที่ 2.14 ก็จะสามารถมั่นใจได้ว่าดัชนีหรือช่องนั้นๆในตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) บรรลุถึงกีดขวางไว้อย่างแน่นอน



รูปที่ 2.13 เมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นแต่มีข้อมูลบรรจุอยู่หลายหลายช่อง

เมื่อได้ค่าดัชนีที่แน่นอนจากการทำวิธีกักกัน (Threshold) แล้วจะต้องนำค่าดัชนีนี้มาแปลงเป็นตำแหน่งในแนวแกน x, ตำแหน่งในแนวแกน y ของสิ่งกีดขวางและนำไปใช้ในอัลกอริทึมแบบสนามศักย์ (Potential Field) ต่อไป ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวางเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการนำไปสู่ความสำเร็จของระบบการนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพ

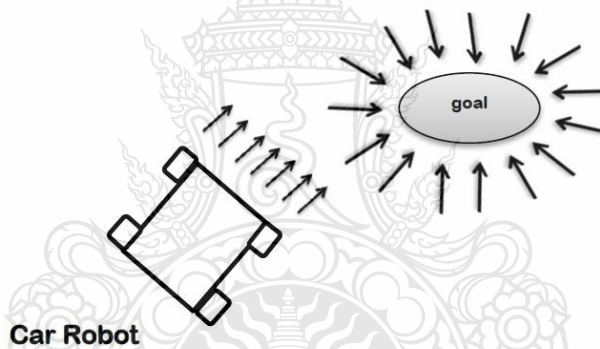


รูปที่ 2.14 ตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เมื่อทำการกักกัน (Threshold) แล้ว

2.4 เทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) [15]

การพัฒนาระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยใช้เทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) ซึ่งได้พัฒนาโปรแกรมใน MATLAB เพื่อทดสอบการทำงานของระบบนี้ก่อนนำมาใช้งานจริง เทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในการวางแผนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ความเรียบง่ายและให้ประสิทธิภาพที่ดี อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ประยุกต์ใช้เทคนิคนี้จะมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาการวางแผนการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในทางปฏิบัติ สภาพแวดล้อมจะเป็นแบบพลศาสตร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของสิ่งกีดขวางอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานให้ระบบนั้นเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน โดยมีสิ่งกีดขวางและเป้าหมายที่เคลื่อนที่ได้ในททุกขณะ ซึ่งในวิธีของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) นั้นจะสร้างเป็นฟังก์ชันศักย์ (Potential Function) ซึ่งประกอบด้วย

2.4.1 ฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูด (Attractive Potential Function)



รูปที่ 2.15 แนวความคิดเกี่ยวกับฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูด

โดยปกติแล้วฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูดถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันของระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์และเป้าหมายของหุ่นยนต์เท่านั้น โดยทั่วไปเป้าหมายจะถูกกำหนดให้อยู่นิ่งอยู่กับที่ในการวิจัยนี้มันจะเป็นประโยชน์ที่จะมีค่าความเร็วของหุ่นยนต์และเป้าหมายที่นำมาใช้ในการสร้างฟังก์ชันศักย์ นอกเหนือจากนั้นองศาอิสระจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินสมรรถนะการติดตาม เมื่อเป้าหมายเคลื่อนที่ฟังก์ชันศักย์แบบเดิมที่ใช้ตำแหน่งเพียงอย่างเดียวนั้นจะไม่สามารถใช้ได้โดยตรงและควรที่จะถูกปรับปรุงแก้ไข ในที่นี้ฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูดจะสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \alpha_p \|\mathbf{p}_{tar}(t) - \mathbf{p}(t)\|^m + \alpha_v \|\mathbf{v}_{tar}(t) - \mathbf{v}(t)\|^n \quad (2.16)$$

โดยที่ $p(t)$ และ $p_{tar}(t)$ แสดงถึงตำแหน่งของหุ่นยนต์และเป้าหมายที่เวลา t ตามลำดับ:

$$p = [x, y, z]^T \text{ ในปริภูมิแบบสามมิติหรือ } p = [x, y]^T \text{ ในปริภูมิแบบสองมิติ}$$

$$v(t) \text{ และ } v_{tar}(t) \text{ แสดงถึงความเร็วของหุ่นยนต์และเป้าหมายที่ } t \text{ ตามลำดับ}$$

$\|p_{tar}(t) - p(t)\|$ เป็นระยะการขจัดสัมพัทธ์ (Euclidean Distance) ระหว่างหุ่นยนต์และเป้าหมายที่เวลา t และ

$\|v_{tar}(t) - v(t)\|$ เป็นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์และเป้าหมายที่เวลา t

α_p และ α_v เป็นค่าสเกลาร์ที่เป็นบวก

m และ n เป็นค่าคงที่เป็นบวก

จากฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูด (Attractive Potential) หรือ $U_{att}(p, v)$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ก็ต่อเมื่อระยะทางสัมพัทธ์และความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์และเป้าหมายเป็นศูนย์ แล้วฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูด (Attractive Potential) หรือ $U_{att}(p, v)$ จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางและความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์และเป้าหมายที่เพิ่มขึ้น ถ้า $\alpha_v = 0$ และ $m = 2$ แล้วฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูดแบบใหม่จะลดรูปไปเป็นฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูดแบบทั่วไปที่มักนิยมใช้ในรูปของสมการกำลังสองดังนี้

$$U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = U_{att}(\mathbf{p}) = \alpha_p \|\mathbf{p}_{tar}(t) - \mathbf{p}(t)\|^2 \quad (2.17)$$

ซึ่งไม่มีข้อมูลของความเร็วของหุ่นยนต์หรือเป้าหมาย แรงดึงดูดเสมือน (Virtual Attractive Force) จะถูกกำหนดให้เป็นค่าติดลบของความชันของฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูด (Attractive Potential) ที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งดังนี้

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{p}) = -\nabla U_{att}(\mathbf{p}) = -\frac{\partial U_{att}(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} \quad (2.18)$$

สำหรับฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูดใหม่ (Attractive Potential) หรือ $U_{att}(p, v)$ จะเป็นฟังก์ชันของทั้งตำแหน่ง p และความเร็ว v ของหุ่นยนต์ดังนั้นควรจะกำหนดแรงดึงดูดแบบเสมือน (Virtual Attractive Force) เป็นค่าติดลบของความชันลบของฟังก์ชันศักย์แบบดึงดูดใหม่ซึ่งขึ้นกับทั้งตำแหน่งและความเร็ว ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) &= -\nabla U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \\ &= -\nabla_p U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_v U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

โดยที่ $\nabla_p U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \frac{\partial U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v})}{\partial \mathbf{p}}$ และ $\nabla_v U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \frac{\partial U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}}$

โดยตัวห้อย p และ v แสดงถึงความชันเมื่อเทียบกับตำแหน่งและความเร็วตามลำดับ ในการพิจารณาเพื่อเลือกค่า m และ n จะมีข้อสังเกตดังนี้

$U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v})$ จะไม่สามารถหาอนุพันธ์เทียบกับ p ที่ $p = p_{tar}$ สำหรับ $0 < m \leq 1$ และไม่สามารถหาอนุพันธ์เทียบกับ v ที่ $v = v_{tar}$ สำหรับ $0 < n \leq 1$ ตามลำดับ ค่าของ m และ n ที่จะเลือกนำมาใช้อาจจะเป็นสาเหตุของปัญหาในบางงาน แต่ก็จะไม่เป็นปัญหาสำหรับการนำไปใช้งานในทุกๆ กรณี

การประยุกต์ใช้งานของฟังก์ชันศักย์ความเร็วสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ ปัญหาการเข้าเป้าแบบชะลอความเร็ว (Soft-Landing) และปัญหาการเข้าเป้าแบบพุ่งเข้าใส่ (Hard-Landing Problem) โดยการเข้าเป้าแบบชะลอความเร็ว (Soft-Landing) หมายถึงหุ่นยนต์เคลื่อนเข้าหาเป้าหมายที่เคลื่อนที่ ด้วยความเร็วสัมพัทธ์ลดลงเป็นศูนย์หรือความเร็วของหุ่นยนต์จะเท่ากับความเร็วของเป้าหมาย ส่วนการเข้าเป้าแบบพุ่งเข้าใส่ (Hard-Landing) นั้นจะหมายถึงการเคลื่อนที่เข้าเป้าหมายแบบสมบูรณ์เมื่อ $p = p_{tar}$ โดยไม่คำนึงถึงค่าความเร็วของเป้าหมายและของหุ่นยนต์เลย ดังนั้นเมื่อ $p \neq p_{tar}$ และ $v \neq v_{tar}$ แทนเข้าไปยังการคำนวณหาแรงดึงดูดจะได้เป็น

$$\mathbf{F}_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \mathbf{F}_{att1}(\mathbf{p}) + \mathbf{F}_{att2}(\mathbf{v}) \quad (2.20)$$

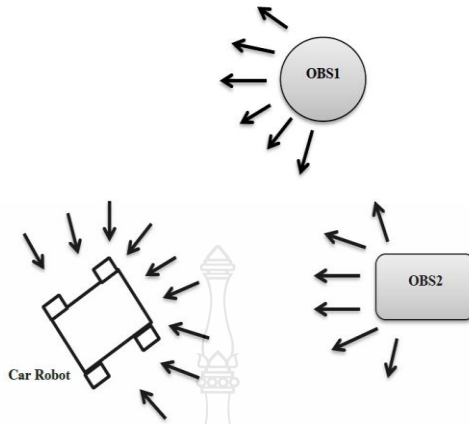
โดยที่ $\mathbf{F}_{att1}(\mathbf{p}) = m\alpha_p \|\mathbf{p}_{tar}(t) - \mathbf{p}(t)\|^{m-1} \mathbf{n}_{RT}$

และ $\mathbf{F}_{att2}(\mathbf{v}) = n\alpha_v \|\mathbf{v}_{tar}(t) - \mathbf{v}(t)\|^{n-1} \mathbf{v}_{RT}$

โดย n_{RT} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ที่ชี้ในทิศจากหุ่นยนต์ไปยังเป้าหมายและ n_{VRT} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) แสดงถึงทิศทางของความเร็วสัมพัทธ์ของเป้าหมายเทียบกับหุ่นยนต์ แรงดึงดูดหรือ F_{att} นั้นประกอบด้วยสองส่วน โดยแรงส่วนที่หนึ่ง ($F_{att1}(p)$) จะดึงหุ่นยนต์ไปยังเป้าหมายและจะช่วยลดระยะทางระหว่างหุ่นยนต์และเป้าหมายลง ส่วนประกอบของแรงส่วนที่สอง ($F_{att2}(p)$) จะพยายามทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกันกับเป้าหมาย

ถ้า $m > 1$ และ $n > 1$ เมื่อหุ่นยนต์เข้าใกล้เป้าหมาย เช่น $\|\mathbf{p}_{tar}(t) - \mathbf{p}(t)\|$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ F_{att1} เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อความเร็วของหุ่นยนต์ใกล้เคียงกับความเร็วเป้าหมาย F_{att2} ก็จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นเมื่อทั้งตำแหน่งและความเร็วของหุ่นยนต์เข้าใกล้ค่าเหล่านั้นของเป้าหมาย แรงดึงดูด F_{att} ก็จะเข้าใกล้ศูนย์ ฉะนั้นเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนเข้าเป้าหมายและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกันกับเป้าหมาย แรงดึงดูดนั้นจะเป็นศูนย์ ฉะนั้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปด้วยกันกับเป้าหมายเลย ดังนั้นค่า m และ n เป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการการเข้าเป้าแบบชะลอความเร็ว (Soft-Landing) แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการเข้าเป้าแบบพุ่งเข้าใส่ (Hard-Landing) จะไม่มีข้อจำกัดสำหรับค่า m และ n ที่มีค่า $m, n > 0$

2.4.2 ฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function)



รูปที่ 2.16 แนวความคิดเกี่ยวกับฟังก์ชันศักย์แบบผลัก

ในการแก้ปัญหาการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่นั้น วิธีง่าย ๆ ที่จะนำมาใช้ก็คือ กำหนดค่าตำแหน่งสัมพัทธ์และความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างตัวหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวางและนำมาใช้สร้างเป็นฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) ขึ้นมา โดยรูปแบบสมการที่จะกล่าวถึงนี้เป็นฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) แบบใหม่ซึ่งมีการใช้ข้อมูลทั้งตำแหน่งและความเร็วของสิ่งกีดขวาง เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์และง่ายต่อความเข้าใจจะสมมุติให้สิ่งกีดขวางมีรูปทรงลักษณะเป็นแบบโค้งออกและตัวหุ่นยนต์จะถูกพิจารณาเป็นเพียงหนึ่งจุด เพื่อให้เข้าใจและมองเห็นภาพการสร้างฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) แบบใหม่ขึ้น ซึ่งจะสามารถดัดแปลงในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจริง โดยการพิจารณารูปร่างและขนาดของหุ่นยนต์เพิ่มเข้าไปในฟังก์ชันนี้ โดยจะกำหนดให้ตำแหน่ง ($\mathbf{p}_{obs}(t)$) และความเร็ว ($\mathbf{v}_{obs}(t)$) ของจุดที่มีระยะทางสั้นที่สุดระหว่าง สิ่งกีดขวางและหุ่นยนต์ ที่สามารถประมวลผลหรือวัดได้ทุกขณะเวลา ดังนั้นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวาง ในทิศทางจากหุ่นยนต์ไปยังสิ่งกีดขวางสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$v_{RO}(t) = [\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_{obs}(t)]^T \mathbf{n}_{RO} \quad (2.21)$$

เมื่อ v_{RO} คือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวาง, $\mathbf{v}(t)$ คือความเร็วของหุ่นยนต์, $\mathbf{v}_{obs}(t)$ คือความเร็วของสิ่งกีดขวางและ \mathbf{n}_{RO} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศชี้จากหุ่นยนต์ไปยังสิ่งกีดขวาง ถ้า $v_{RO} \leq 0$ แล้วหุ่นยนต์จะเคลื่อนออกห่างจากสิ่งกีดขวาง ดังนั้นการเคลื่อนที่หลบหลีกจึงไม่จำเป็น ถ้า $v_{RO} > 0$ แล้วหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เข้าไปใกล้สิ่งกีดขวาง ดังนั้นการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางจึงจำเป็นต้องทำ

โดยสมมุติว่าที่เวลา t หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เข้าไปใกล้สิ่งกีดขวาง ดังนั้นระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวางจะให้เป็นตัวแปร $\rho_s(\mathbf{p}_{obs}(t), \mathbf{p}(t))$ โดยพิจารณากรณีที่หุ่นยนต์

เคลื่อนที่ไปยังสิ่งกีดขวางหรือ $v_{RO} > 0$ ถ้ากำหนดขนาดความหน่วงสูงสุด (a_{\max}) ที่ใช้กับหุ่นยนต์ให้สามารถลดความเร็วได้ แล้วระยะทางที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนที่ความเร็ว v_{RO} จะลดเป็นศูนย์สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\rho_m(v_{RO}) = \frac{v_{RO}^2(t)}{2a_{\max}} \quad (2.22)$$

ฉะนั้นแล้วฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) จะสามารถนิยามได้ดังนี้

$$U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) \geq \rho_0 \text{ or } v_{RO} \leq 0 \\ \eta \left(\frac{1}{\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO})} - \frac{1}{\rho_0} \right), & \text{if } 0 < \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) < \rho_0 \\ \text{not defined,} & \text{if } v_{RO} > 0 \text{ and } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) < \rho_m(v_{RO}) \end{cases} \quad (2.23)$$

เมื่อ U_{rep} ใช้แทนฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) ที่สร้างขึ้นจากสิ่งกีดขวาง, ρ_0 เป็นค่าคงที่ที่เป็นบวกที่มีอิทธิพลมาจากช่วงหลีกเลี่ยงการชนสิ่งกีดขวางและ η เป็นค่าคงที่ที่เป็นบวก

เมื่อ $\rho_s(\mathbf{p}_{obs}(t), \mathbf{p}(t)) < \rho_m(v_{RO})$ นั้น ฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) จะไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากจะไม่สามารถหาวิธีที่จะหลีกเลี่ยงการชนสิ่งกีดขวางได้ในกรณีที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังสิ่งกีดขวาง นอกจากนั้นจะสามารถสังเกตได้ว่าหุ่นยนต์อยู่ไกลจากสิ่งกีดขวางเมื่อ $\rho_s(\mathbf{p}_{obs}(t), \mathbf{p}(t)) - \rho_m(v_{RO}) \geq \rho_0$ ทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จึงไม่ขึ้นกับตำแหน่งของสิ่งกีดขวางและไม่จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางอีกด้วยแต่เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในช่วงที่ตำแหน่งที่สิ่งกีดขวางมีอิทธิพลค่า $\rho_s(\mathbf{p}_{obs}(t), \mathbf{p}(t))$ จะมีค่าเข้าใกล้ $\rho_m(v_{RO})$ แล้วฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) จะเข้าใกล้ค่าอนันต์ (∞) และความเร็วสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ (v_{RO}) จะเพิ่มขึ้นและฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยแม้ว่าระยะทางระหว่างหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวางนั้นไม่เข้าใกล้ศูนย์ ฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) ก็อาจจะเข้าใกล้ค่าอนันต์ (∞) ถ้าความเร็วสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ (v_{RO}) มีค่ามากพอ

คล้ายกับการกำหนดสมการของแรงดึงดูดแบบใหม่ แรงผลัก (Repulsive Force) แบบใหม่นั้นก็จะถูกนิยามให้เป็นค่าติดลบของความชันของฟังก์ชันศักย์แบบผลัก (Repulsive Potential Function) ที่ขึ้นอยู่กับทั้งตำแหน่งและความเร็วด้วยเช่นกัน ดังในสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) &= -\nabla U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \\ &= -\nabla_p U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_v U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

เมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับสิ่งกีดขวาง ในทิศทางจากหุ่นยนต์ไปยังสิ่งกีดขวางสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
v_{RO}(t) &= (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_{obs}(t))^T \mathbf{n}_{RO} \\
&= (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_{obs}(t))^T (\mathbf{p}_{obs}(t) - \mathbf{p}(t)) / \|\mathbf{p}_{obs}(t) - \mathbf{p}(t)\|
\end{aligned} \tag{2.25}$$

เมื่อ $v_{RO}(t)\mathbf{n}_{RO}$ เป็นส่วนประกอบความเร็วของ $\mathbf{v} - \mathbf{v}_{obs}$ ในทิศทางจากหุ่นยนต์ไปยังสิ่งกีดขวาง เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น จะกำหนดให้ $v_{RO\perp}\mathbf{n}_{RO\perp}$ เป็นส่วนประกอบความเร็วในทิศที่ตั้งฉากของ $v_{RO}(t)\mathbf{n}_{RO}$ จะได้ดังนี้

$$v_{RO\perp}\mathbf{n}_{RO\perp} = \mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_{obs}(t) - v_{RO}(t)\mathbf{n}_{RO} \tag{2.26}$$

ฉะนั้นแรงผลักเสมือน (Virtual Repulsive Force) ที่ถูกกำหนดขึ้นโดยตำแหน่งของสิ่งกีดขวางจะเป็น

$$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) \geq \rho_0 \text{ or } v_{RO} \leq 0 \\ \mathbf{F}_{rep1} + \mathbf{F}_{rep2}, & \text{if } 0 < \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) < \rho_0 \text{ and } v_{RO} > 0 \\ \text{not defined,} & \text{if } v_{RO} > 0 \text{ and } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) < \rho_m(v_{RO}) \end{cases} \tag{2.27}$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{F}_{rep1} = \frac{-\eta}{(\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}))^2} \left(1 + \frac{v_{RO}}{a_{max}}\right) \mathbf{n}_{RO}$$

$$\text{และ } \mathbf{F}_{rep2} = \frac{-\eta v_{RO} v_{RO\perp}}{(\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) a_{max} \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}))^2} \mathbf{n}_{RO\perp}$$

หลังจากที่สามารถคำนวณหาแรงแบบดึงดูด (Attractive Force) และแรงผลัก (Repulsive Force) ได้แล้วจะรวมเป็นแรงเสมือนรวม (Total Virtual Force) ได้ดังสมการด้านล่าง

$$\mathbf{F}_{total} = \mathbf{F}_{att} + \mathbf{F}_{rep} \tag{2.28}$$

สำหรับกรณีที่มีสิ่งกีดขวางหลายอันแรงผลักรวมนั้นสามารถคำนวณได้จากผลรวมของแรงผลักของแต่ละสิ่งกีดขวาง โดยแรงเสมือนรวมจะถูกนำไปใช้ในการวางแผนการเคลื่อนที่นั่นเอง

2.5 กฎการควบคุม [12]

โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้โดยใช้ล้อสามารถกำหนดได้จากแบบจำลองทางจลนศาสตร์ดังนี้

$$\dot{X} = G(X)u \tag{2.29}$$

เมื่อ $X \in R^n$ เป็นพิกัดทั่วไปของเวกเตอร์และ $u \in R^m$ ($m < n$) เป็นเวกเตอร์ของอินพุตในการควบคุม โดยสมการที่ 2.29 เป็นระบบทางกลแบบมีจำนวนอินพุตน้อยกว่าองศาอิสระในการเคลื่อนที่ (Underactuated)

ดังนั้นจึงกำหนดเส้นโคจรแบบราบเรียบที่เป็นไปได้เป็น $X_d(t)$ และออกแบบคำสั่งอินพุต u โดยใช้กฎการควบคุมแบบผกผันเทียม (Pseudo-Inverse)

$$u = G^\#(X)\dot{X}_d = [G^T(X)G(X)]^{-1}G^T(X)\dot{X}_d \quad (2.30)$$

โดยการแก้ปัญหาข้างต้นนั้นจะมีการหาค่าความผิดพลาดจาก $(\dot{X}_d - \dot{X})$ ดังนั้นถ้าความเร็วของทุกตัวแปร X (หรือ \dot{X}) นั้นเปลี่ยนไปตามความเร็วที่ต้องการ \dot{X}_d สมการที่ 2.30 จะมีความผิดพลาดของความเร็วจนถึงศูนย์ซึ่งทำให้การประยุกต์ใช้การผกผันเทียม (Pseudo-Inverse) สำหรับคำสั่งอินพุต u ในกฎการควบคุมนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ X นั่นเอง

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของรถในสมการที่ 2.4 จะสามารถกำหนดให้ตัวแปรสถานะของระบบ X ได้เป็นดังนี้

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \alpha l \theta \\ \beta \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

เมื่อ $\alpha > 0$ เป็นค่าคงที่แบบจำนวนจริง โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ 2.4 และใช้วิธีการผกผันเทียม (Pseudo-Inverse) ของ $G(X)$ ดังนั้นจะได้

$$G^\#(X) = \frac{1}{1 + \alpha^2 \sin^2(\beta - \theta)} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & \alpha \sin(\beta - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + \alpha^2 \sin^2(\beta - \theta) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

และกฎการควบคุมสำหรับติดตามเส้นโคจรที่ต้องการ $X_d = (x_d, y_d, \alpha l \theta_d, \beta_d)$ จะถูกกำหนดให้เป็น

$$u_1 = \frac{\dot{x}_d \cos \beta + \dot{y}_d \sin \beta + \alpha^2 l \dot{\theta}_d \sin \phi}{1 + \alpha^2 \sin^2 \phi} \quad (2.33)$$

$$u_2 = \dot{\beta}_d$$

เมื่อ $\phi = \{0, \pm\pi\}$ โดยในขั้นตอนต่อไปก็จะต้องมีการกำหนดค่าที่ต้องการซึ่งได้แก่ $\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{\theta}_d, \dot{\beta}_d$

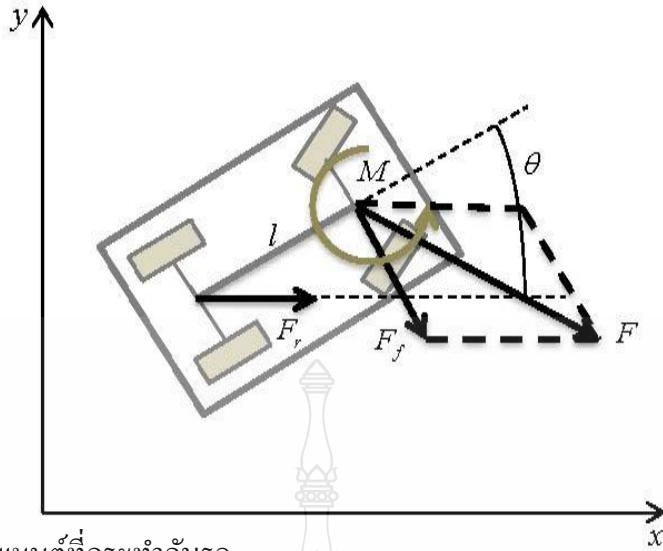
2.6 เทคนิคการสร้างเส้นโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) [12]

เมื่อกำหนดให้แรงที่สร้างขึ้นอยู่ในพื้นที่ที่เป็นพิกัดฉากแล้วจะทำให้เกิดการดึงให้หุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งเป้าหมายพร้อมกับหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วย โดยแรงที่เกิดขึ้นนี้จะได้จากส่วนประกอบของแรงดึงที่จะกระทำบนล้อหน้าเพียงอย่างเดียวและส่วนประกอบที่จะทำให้หุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้นจะเกิดขึ้นกับล้อทั้งสองล้อ จากรูปที่ 2.17 จะกำหนด $F_f = (F_{f,x}, F_{f,y}), F_r = (F_{r,x}, F_{r,y})$ คือแรงกระทำที่ล้อหน้าและล้อหลัง ตามลำดับและโมเมนต์ที่กระทำที่ล้อหน้าเป็น (M_θ)

เมื่อกำหนด $X_r = (x_r, y_r, \alpha l \theta, \beta)$ โดยที่

$$\dot{X}_r = J(X)\dot{X} \quad (2.34)$$

และเมทริกซ์แบบจาโคเบียนจะสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับรถ

$$J(X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & l \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & -l \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

เพื่อให้สอดคล้องกับหลักการงานเสมือน เมื่อแรง F_r ที่กระทำที่ล้อหลังนั้นจะสมดุลกับแรง F_f^r ที่กระทำที่ล้อหน้าและแรงบิด M_θ จะกระทำกับรถโดยจะมีความสัมพันธ์ดังในสมการนี้

$$\begin{bmatrix} F_{f,x}^r \\ F_{f,y}^r \\ M_\theta \\ M_\beta \end{bmatrix} = J^T(X) \begin{bmatrix} F_{r,x} \\ F_{r,y} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{r,x} \\ F_{r,y} \\ l(F_{r,x} \sin \theta - F_{r,y} \cos \theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

ดังนั้นจะได้

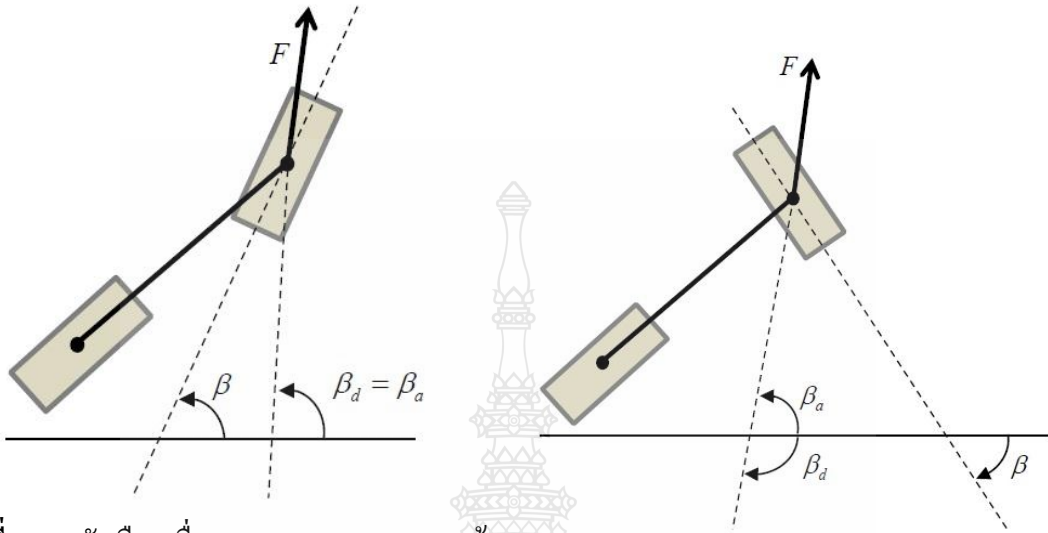
$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = F_f^r + F_f = F_r + F_f \\ M &= M_\theta \end{aligned} \quad (2.37)$$

โดยแรงรวมและแรงบิดจะนำไปใช้ในระบบพิกัด x, y, θ

เมื่อทำการหาอนุพันธ์เส้นโคจรที่ต้องการ $(\dot{X}_d, \dot{Y}_d, \dot{\theta}_d)$ เพื่อนำไปใช้เป็นอินพุตในการป้อนกลับแบบเชิงเส้น (u_1, u_2) ดังนั้นจึงมีการสมมุติให้ตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ใกล้เคียงกับสถานะคงตัว (Quasi-Static) ดังนั้นจากสมการที่ 2.36 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = k_f \mathbf{F} \quad \dot{\theta}_d = k_f M_\theta \quad (2.38)$$

เมื่อค่าคงที่ที่เป็นบวก $(k_{f_1}, k_{f_2}) > 0$ นั้นคล้ายกับสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้นและเชิงมุมผกผันในการควบคุม (u_1) ได้อย่างสมบูรณ์สามารถหาได้จากอนุพันธ์ในสมการที่ 2.36



รูปที่ 2.18 ตัวเลือกเมื่อ $\beta_d : \beta_a - \beta < \pi/2$ (ซ้าย) และ $\beta_a - \beta > \pi/2$ (ขวา)

หลังจากนั้นจึงหาคำสั่งในการเคลื่อน u_2 กรณี $F \neq 0$ โดยค่ามุมที่ต้องการ β_d ในรูปที่ 2.18 สามารถหาได้ดังนี้

เมื่อ
$$\beta_a = \text{ATAN2}(F_y, F_x) \quad (2.39)$$

และ
$$\beta_d = \beta - \arcsin(\sin(\beta - \beta_a)) \quad (2.40)$$

เมื่อ β_a คือมุมทิศทางของแรงล้อยหน้า, β_d คือมุมทิศทางของแรงล้อยหน้าที่ต้องการ

และ $\beta_d - \beta$ คือค่าความผิดพลาดของมุมเคลื่อนล้อยหน้าที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ดังนั้นเมื่อ β ทิศทางเดียวกับ β_d จะได้

$$\frac{d}{dt}(\beta - \beta_d) + k_\beta(\beta - \beta_d) = 0 \quad ; k_\beta > 0 \quad (2.41)$$

$$\frac{d}{dt}(\beta - \beta_d) = \text{sign}(\cos(\beta - \beta_a)) \left(\dot{\beta} - \frac{F_x \dot{F}_y - F_y \dot{F}_x}{F_x^2 + F_y^2} \right) \quad (2.42)$$

และอนุพันธ์แบบแยกส่วนของแรงรวมเมื่อเทียบกับระนาบในแนวนอนสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_x \\ \dot{F}_y \end{bmatrix} = \nabla F \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \nabla F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

จากสมการที่ 2.4 และกำหนดให้ฟังก์ชัน $\text{sign}(x)$ นั้นแสดงถึงเครื่องหมายของตัวแปร x ดังนั้นจะได้

$$u_2 = -\frac{k_\beta(\beta - \beta_d)}{\text{sign}(\cos(\beta - \beta_d))} + \frac{u_1}{\|F\|^2} \begin{bmatrix} -F_y & F_x \end{bmatrix} \nabla F \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

ผลที่ได้นั้นจะเป็นค่าเส้นทางที่เหมาะสมที่รถสามารถไปยังเป้าหมายได้รวมทั้งหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติอีกด้วย

2.7 ตัวกรองคาลมาน [13]

โดยปกติสิ่งที่เราต้องการรู้เมื่อวิเคราะห์ระบบก็คือ ณ เวลาหนึ่งๆระบบมีสถานะ (States) เป็นอย่างไรและสถานะของระบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไร ในทางปฏิบัติบ่อยครั้งการหาสถานะของระบบไม่ใช่เรื่องง่ายเพราะมีข้อจำกัดหลายปัจจัยเช่น ความไม่สมบูรณ์ของเซนเซอร์ที่ใช้วัดสถานะของระบบและความคลาดเคลื่อนในการวัด เป็นต้น ทำให้การหาสถานะของระบบนั้นแท้จริงนั้นต้องกระทำโดยการประมาณค่านั่นเอง โดยปัญหาการประมาณค่านี้มีทั้งระบบที่เป็นแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น ระบบเชิงแบบเส้นนั้นคือระบบที่มีแบบจำลองของระบบและเวกเตอร์การวัดเป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้นของเวกเตอร์สถานะ x โดยในกรณีของระบบเชิงเส้นนั้นจะสามารถประยุกต์ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบเชิงเส้นในการประมาณค่าของเวกเตอร์สถานะ x ได้ซึ่งตัวกรองสัญญาณแบบเชิงเส้นที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุดนั้นก็คือ ตัวกรองสัญญาณคาลมาน (Kalman Filter)

กระบวนการของตัวกรองสัญญาณคาลมานของระบบแบบเชิงเส้นนั้นเริ่มจากการคาดการณ์ค่าเริ่มต้นสำหรับเวกเตอร์สถานะ \hat{x}_0 หลังจากนั้นระบบจะทำการอัปเดตในแต่ละขั้นเวลาเพื่อคำนวณค่าประมาณของเวกเตอร์สถานะใหม่ \hat{x}_k^- ที่เวลา t_k หลังจากนั้นที่เวลาปัจจุบัน t_k เวกเตอร์สถานะจากการปรับแก้ค่า \hat{x}_k^+ จะถูกอัปเดตด้วย \hat{x}_k^- โดยใช้ค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) มาคำนวณหาค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ใช้ในการอัปเดตโดยจะใช้ควบคู่กับการเก็บค่าจากการวัดที่เวลา t_k แต่ถ้าระบบนั้นมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้นจะต้องมีการประยุกต์ใช้ตัวกรองที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเช่นกัน อาทิเช่น Extended Kalman Filter (EKF), Iterated Extended Kalman Filter (IEKF), Particle Filter (PF), Unscented Kalman Filter (UKF) เป็นต้น ซึ่งในเทคนิค EKF นั้นต้องทำการแปลงแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้นให้เป็นระบบแบบเชิงเส้นก่อนแล้วจึงสามารถนำตัวกรองคาลมานแบบเชิงเส้นมาประยุกต์ใช้งานได้เช่นกัน

ตัวกรองสัญญาณคาลมานเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกตั้งชื่อตาม รูดอล์ฟ อี คาลมาน (Rudolf E. Kalman) มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการประมาณค่าจากการวัดที่ถูกสังเกตในการประมาณค่าจากช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณรบกวนในรูปแบบสุ่มและมีค่าความไม่แน่นอนต่างๆ และค่าที่ผลิตได้จากการกรองสัญญาณแบบคาลมานจะมีความใกล้เคียงค่าที่แท้จริงมากกว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าคำนวณที่เกี่ยวข้องต่างๆของการวัด ตัวกรองคาลมานมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น การลด

สัญญาณรบกวน เป็นต้น ปัจจุบันการกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Kalman Filter) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในศาสตร์ของการบูรณาการข้อมูล (Data Fusion) เพื่อใช้บูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์หลายๆประเภทภายใต้สัญญาณรบกวน (Noise) จากหลายแหล่งมาใช้ร่วมกันในลักษณะที่ถูกลกันเพื่อหาค่าประมาณของสถานะของระบบที่ดีที่สุด (Optimal) ตัวอย่างของระบบที่ใช้การกรองสัญญาณแบบคาลมาน (Kalman Filter) ได้แก่ การบูรณาการของระบบ INS/GPS เป็นต้น

เมื่อพิจารณาตัวแปรสถานะของระบบที่เคลื่อนที่ (\bar{x}_k) อธิบายโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์แบบเชิงเส้นในรูปของข้อมูลตัวเลขแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Time) ดังนี้

$$\bar{x}_k = \phi_{k-1} \bar{x}_{k-1} + G_{k-1} \bar{u}_{k-1} + \bar{w}_{k-1} \quad (2.45)$$

เมื่อ \bar{w}_k คือสัญญาณรบกวนที่ได้รวมกับตัวแปรสถานะของระบบ \bar{x}_k นั้น ส่วนเอาต์พุตของระบบที่วัดได้ (\bar{y}_k)

$$\bar{y}_k = H_k \bar{x}_k + \bar{v}_k \quad (2.46)$$

เมื่อ \bar{v}_k คือสัญญาณรบกวนของเอาต์พุตที่วัดได้

โดยสมมุติให้ $E\{w_k w_j^T\} = Q \delta_{kj}$ และ $E\{v_k v_j^T\} = R \delta_{kj}$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาที่เวลา $t = kT$ การสร้างการประมาณค่าตัวแปรสถานะ \bar{x}_k ที่เหมาะสมนั้นจะสามารถแก้ไขโดยใช้ค่า y_k ได้และจะกำหนดให้ค่าที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับการวัดในลำดับก่อนหน้า $\{y_i\}_{i=0}^{k-1}$ รวมทั้งมีการประมาณค่าที่ไม่มีอคติ (Unbiased) เป็น $\hat{x}_{k-1}^+ = E\{x_{k-1}\}$ ซึ่งค่าความแปรปรวน (Variance) ของระบบสามารถหาได้ดังนี้

$$P_{k-1}^+ = \text{var}\{(\hat{x}_{k-1}^+)(\hat{x}_{k-1}^+)^T\} = \text{var}\{(\delta x_{k-1}^+)(\delta x_{k-1}^+)^T\} \quad (2.47)$$

ซึ่งการหาค่าตัวแปรสถานะ \bar{x}_k ที่เหมาะสมนั้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆดังต่อไปนี้

1. เมื่อพิจารณาวัตถุประสงค์ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ x_k และไม่มีค่าการวัดที่เวลา t_k ดังนั้นการประมาณเริ่มต้นจะกำหนดให้เป็น \hat{x}_k^- เมื่อเครื่องหมายลบนั้นเป็นตัวบอกว่าขั้นตอนนี้เป็น การประมาณเบื้องต้น (Estimate Prior) ซึ่งใช้ค่าการวัดใหม่เสมอ ดังนั้นจึงใส่ค่าการคาดหวังเข้าไปยังสมการที่ 2.45 จะได้

$$\begin{aligned} E\{x_k\} &= \phi_{k-1} E\{x_{k-1}\} + G_{k-1} u_{k-1} \\ &= \phi_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \end{aligned} \quad (2.48)$$

ดังนั้นการประมาณค่าที่ไม่มีอคติ (Unbiased) ของตัวแปรสถานะที่เวลา $t = kT$ จะรวมเข้ากับค่าจากการวัดซึ่งจะได้

$$\hat{x}_k^- = \phi_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \quad (2.49)$$

โดยการหาค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Error Variance) ในการประมาณค่าเบื้องต้นนั้นสามารถหาได้จากผลต่างของสมการที่ 2.45 และสมการที่ 2.49 จะได้

$$\delta x_k^- = x_k - \hat{x}_k^- = \phi_{k-1} \delta x_{k-1}^+ + w_{k-1} \quad (2.50)$$

เมื่อ
$$P_k^- = E\langle(\delta x_k^-)(\delta x_k^-)^T\rangle = \phi_{k-1}P_{k-1}^+\phi_{k-1}^T + Qd_{k-1} \quad (2.51)$$

2. ที่เวลา $t = kT$ (เมื่อการประมาณค่าเบื้องต้นนั้นได้รวมกับค่าการวัดใหม่) โดยให้ \hat{x}_k^- เป็นค่าการวัดและค่าความผิดพลาดในการวัดคือ δx_k^- ดังนั้นจึงมี 2 ชุดข้อมูลที่มีความเกี่ยวข้องกับค่า x_k คือ

$$\hat{x}_k^- = x_k - \delta x_k^- \text{ และ } \text{var}(\delta x_k^-) = P_k^- \quad (2.52)$$

$$\tilde{y}_k = H_k x_k + v_k \text{ และ } \text{var}(v_k) = R_k$$

ซึ่งแท้จริงแล้วตัวประมาณที่เหมาะสม \hat{x}_k^+ สำหรับ x_k จะถูกแก้ไขด้วยค่าที่วัดได้ \tilde{y}_k โดยหลังจากเปลี่ยนเครื่องหมายแล้วสมการที่ปรับเวลาสำหรับความแปรปรวนร่วม (Covariance) และตัวแปรสถานะที่วัดได้คือ

$$(P_k^+)^{-1} = (P_k^-)^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k \quad (2.53)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (\tilde{y}_k - H_k \hat{x}_k^-) \text{ เมื่อ } K_k = P_k^- H_k^T R_k^{-1} \quad (2.54)$$

ซึ่งอาจพอสรุปได้ว่าตัวกรองคาลมานประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ 1) การปรับเวลาดังสมการที่ 2.49-2.51 2) การแก้ไขค่าการวัดดังสมการที่ 2.53-2.54 โดยสมการที่กล่าวมานั้นจะแพร่กระจายทั้งการประมาณและความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Error Variance) อีกด้วยซึ่งความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนนั้นจะเพิ่มลงในส่วนของค่าอัตราขยาย (Gain) ในการประมาณค่าสถานะในแต่ละการวัดครั้งใหม่และนำไปสู่การใช้ข้อมูลการวัดครั้งใหม่ที่สัมพันธ์กับทุกๆส่วน (\hat{x}, P) ให้เหมาะสมที่สุด ดังนั้นตัวกรองคาลมานสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับระบบจะได้

$$\tilde{x}_k = \phi_{k-1} \tilde{x}_{k-1} + G_{k-1} \tilde{u}_{k-1} + \tilde{w}_{k-1} \quad (2.55)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (2.56)$$

การปรับเวลา

$$\hat{x}_k^- = \phi_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + G_{k-1} u_{k-1} \quad (2.57)$$

$$\hat{y}_k = H_k \hat{x}_k^- \quad (2.58)$$

$$P_k^- = \phi_{k-1} P_{k-1}^+ \phi_{k-1}^T + Qd_{k-1} \quad (2.59)$$

การแก้ไขค่าการวัด

$$(P_k^+)^{-1} = (P_k^-)^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k \quad (2.60)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T R_k^{-1} \quad (2.61)$$

$$r_k = \tilde{y}_k - \hat{y}_k \text{ (ค่าที่เหลือจากการวัด)} \quad (2.62)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (r_k) \quad (2.63)$$

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าที่เหลือจากการวัด (Measurement Residual) จึงสามารถเสนอเกี่ยวกับความถูกต้องของข้อมูลเซนเซอร์หรือความถูกต้องของแบบจำลองระบบและการวัดได้ ดังนั้นสมการปรับค่าการวัดสำหรับ P_k^+ และ K_k คือ

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2.64)$$

$$P_k^+ = [I - K_k H_k] P_k^- \quad (2.65)$$

โดยสมการที่ 2.64-2.65 เมื่อทำการพิสูจน์แล้วจะเห็นได้ว่าเท่ากับสมการที่ 2.60-2.61

ตัวกรองคาลมานั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้โดยหลากหลายเทคนิค ซึ่งจริงๆแล้วในบางเทคนิคที่ประยุกต์ใช้งานนั้นต้องการเวลาการคำนวณที่น้อยกว่าในขณะที่บางเทคนิคนั้นมีคุณสมบัติการคำนวณเชิงตัวเลขที่ดีกว่า เป็นต้น ซึ่งผู้เขียนโปรแกรมจะเป็นผู้เลือกเทคนิคที่เหมาะสมกับงานและสามารถประยุกต์ใช้ได้โดยลำดับถัดไป โดยรูปแบบของการปรับค่าการวัดดังสมการที่ 2.60-2.61 นั้นบ่อยครั้งไม่ค่อยสะดวกในการประยุกต์ใช้งานเนื่องจากจะต้องมีการแปลงพิกัดของเมตริกซ์ซึ่งทำให้เสียเวลาและมีความยุ่งยากในการคำนวณ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วในการประยุกต์ใช้งานจริงจะนิยมใช้สมการที่ 2.64-2.65

ดังนั้นสมการตัวกรองคาลมานแบบข้อมูลตัวเลขแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time) สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สรุปสมการตัวกรองคาลมานแบบข้อมูลตัวเลขแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time)

การกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization)	$\hat{x}_0^- = E\langle x_0 \rangle$
	$P_0^- = \text{var}(x_0^-)$
การคำนวณค่าอัตราขยาย (Gain Calculation)	$K_k = P_k^- H_k^T (R_k + H_k P_k^- H_k^T)^{-1}$
การปรับค่าการวัด (Measurement Update)	$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (\tilde{y}_k - \hat{y}_k)$
การปรับค่าความแปรปรวน (Covariance Update)	$P_k^+ = [I - K_k H_k] P_k^-$
	$P_k^+ = [I - K_k H_k] P_k^- [I - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T$
	$P_k^+ = P_k^- - K_k (R_k + H_k P_k^- H_k^T) K_k^T$
	$(P_k^+)^{-1} = (P_k^-)^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k$
การคาดการณ์สถานะ (State Prediction)	$\hat{x}_{k+1}^- = \Phi_k \hat{x}_k^+ + G_k u_k$
ความแปรปรวนที่มาจากความคลาดเคลื่อนในการคาดการณ์ (Prediction Error Covariance)	$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k^+ \Phi_k^T + Q d_k$

2.8 ระบบนำร่องแบบเฉื่อย (Inertial Navigation System หรือ INS) [13]

2.8.1 หลักการทั่วไปของระบบนำร่องแบบเฉื่อย (Inertial Navigation System หรือ INS)

โดยทั่วไปแล้วระบบนำร่องแบบเฉื่อย (Inertial Navigation System หรือ INS) จะประกอบด้วยเซนเซอร์วัดแรงเร่ง (Accelerometer) 3 แกน และ เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) 3 แกน เพื่อใช้วัดความเร่งใน 3 มิติ และ วัดอัตราการหมุนรอบแกนทั้ง 3 แกน ตามลำดับ โดยระบบ INS จะประกอบขึ้นมาจากส่วนประกอบแบบโซลิดสเตต (Solid State) ราคาต่ำซึ่งส่วนใหญ่จะสร้างเป็นรูปแบบที่เรียกว่า “Strap-Down” นั่นคือทั้งเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) และ

เซนเซอร์วัดแรงเร่ง (Accelerometer) จะยึดติดกับ โครงสร้างแบบคงที่ ซึ่งมีข้อดีคือจะไม่มีการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่างๆ แต่แท้จริงแล้วนั้นจะต้องใช้ซอฟต์แวร์ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากยิ่งขึ้นเพื่อใช้ในการหาค่าและแยกความเร่งเชิงเส้นที่แท้จริงออกจากความเร่งเชิงมุมรวมทั้งมุมหมุนหรือมุมเงยเมื่อเทียบกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยนานมาแล้วมีการนำค่าความเร่งเชิงเส้นที่แท้จริงไปใช้ในการหาตำแหน่งของยานพาหนะโดยการอินทิเกรตความเร่ง 2 ครั้งและหาทิศทางการหันเห (Orientation) จากการอินทิเกรตอัตราการหมุนที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) แต่เมื่อทำแล้วปรากฏว่าทำให้มีการผิดพลาดของตำแหน่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาซึ่งสาเหตุหลักๆก็คือ สัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ทราบค่าและไม่ได้ทำการชดเชยไว้รวมทั้งความไม่เชิงเส้นของเซนเซอร์อีกด้วย

ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาระบบ INS ให้ดียิ่งขึ้นสามารถคำนวณตำแหน่ง, ความเร็วและทิศทางการหันเห (Attitude) ของยานพาหนะโดยการวัดความเร่งและอัตราการหมุนเพื่อนำไปประยุกต์กับกรอบอ้างอิงความเฉื่อย โดยหน่วยวัดความเฉื่อยจะประกอบด้วยการวางแกนของเซนเซอร์วัดแรงเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) แบบตั้งฉากกันรวมทั้งได้มีการรวมหน่วยวัดความเฉื่อย (IMU) กับสมการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanization) เข้าด้วยกันเพื่อความเป็นไปได้ในการประมาณความผิดพลาดของระบบอีกด้วย

2.8.2 สมการจลนศาสตร์ของระบบ INS

ในสมการการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanized) ในระบบ INS นั้นเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะแนบมากับฐานที่ออกแบบมาให้อยู่ในแนวเดียวกับกรอบอ้างอิง a โดยมีการสมมติให้ตำแหน่งของฐานนั้นสอดคล้องกับกรอบอ้างอิง a ซึ่งแนวความคิดหลักในการออกแบบคือจะมีการให้แรงไปยังฐานแต่เอาต์พุตที่ออกมาของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะอยู่ที่ศูนย์และเป็นสิ่งที่ยืนยันว่าตัวฐานนั้นตรงกับกรอบอ้างอิง a รวมทั้งยังต้องการค่าอคติ (Bias) ที่มาจากการทดสอบเทียบอย่างแม่นยำด้วยและวิธีการแก้สมการการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanized) โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จะวัดแรงเฉพาะในกรอบอ้างอิง a ดังนั้นจึงมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $v^a(0)$ และ $p^a(0)$ และจัดวางกรอบอ้างอิงฐานกับกรอบอ้างอิง a ทำให้สามารถหาทิศทางการหันเห (Attitude) ของยานพาหนะโดยการวัดมุมระหว่างฐานและยานพาหนะได้

ในวิธีการของระบบ INS แบบ Strap-Down นั้นเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะวางบนฐานที่ยึดแน่นอยู่บนยานพาหนะโดยวิธีการคือเบื้องต้นเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะทดลองหมุนเพื่อหาอัตราการหมุนที่เต็มที่ ด้วยเหตุนี้แล้วความแม่นยำของ อัตราขยาย (Scale Factor) และความแม่นยำของค่าอคติ (Bias) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จะวัดแรงเฉพาะ f^b ในกรอบอ้างอิงวัตถุซึ่งสามารถแปลงไปยังกรอบอ้างอิง a ได้โดยใช้ความสัมพันธ์ $f^a = R_b^a f^b$ โดยใน

เบื้องต้นนั้นต้องการเงื่อนไขเริ่มต้น $v^a(0), p^a(0), R_b^a(0)$ ส่วนเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) นั้นจะใช้ในการหา $\omega_{ab}^b(t)$ ซึ่งระบบ INS สามารถหา $R_b^a(t)$ ได้จากการอินทิเกรตสมการต่อไปนี

$$\dot{R}_b^a = R_b^a \Omega_{ab}^b \quad (2.66)$$

สมการดังกล่าวมานั้นต้องมีการเลือกกรอบอ้างอิง a โดยจะมีการพิจารณาในลำดับต่อไปซึ่งสำหรับแต่ละกรอบอ้างอิงนั้นจะมีการหาที่มาของสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งตำแหน่ง, ความเร็วและทิศทางการหันเห (Attitude) แต่ในการประยุกต์ใช้งานนั้นจะใช้แค่กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ (Geographic Frame) เท่านั้นซึ่งจะกำหนดเป็นสัญลักษณ์ n เมื่อใช้ในการนำร่อง

2.8.2.1 กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์

จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นจะโปรเจกชันไปยังกรอบอ้างอิงยานพาหนะที่อยู่บนวงรีอ้างอิงของโลก เพราะฉะนั้นแล้วส่วนประกอบแนวราบของเวกเตอร์ตำแหน่งในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นตำแหน่งของยานพาหนะที่สัมผัสกับโลกจะใช้ค่าละติจูด (ϕ) และค่าลองติจูด (λ) ของจุดกำเนิดกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์และความสูง (h) ของยานพาหนะเมื่อเทียบกับวงรีของโลกดังสมการที่ 2.10

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_n}{R_M + h} \\ \frac{v_e}{\cos(\phi)(R_N + h)} \\ -v_d \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

เมื่อ $v_e^n = [v_n, v_e, v_d]^T$ ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงสามารถคำนวณโดยใช้กฎของโคโรไลดิสจะได้

$$\dot{v}_e^n = R_e^n (\Omega_{ne}^e v_e^e + \dot{v}_e^e) \quad (2.68)$$

เมื่อทำการกำจัด \dot{v}_e^e ออกจากสมการข้างต้นแล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$\dot{v}_e^n = R_b^n f^b + g^n - (\Omega_{ne}^e + 2\Omega_{ie}^n) v_e^n \quad (2.69)$$

โดยกำหนดให้

$$\omega_{en}^n = \begin{bmatrix} \dot{\lambda} \cos(\phi) \\ -\dot{\phi} \\ -\dot{\lambda} \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} \omega_{ie} \cos(\phi) \\ 0 \\ -\omega_{ie} \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของทิศทางเมทริกซ์โคไซน์ (Cosine Matrix) สามารถหาได้จาก

$$\dot{R}_b^n = R_b^n \Omega_{nb}^b = R_b^n (\Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^b) \quad (2.71)$$

เมื่อ $\Omega_{in}^b = [\omega_{in}^b \times], \omega_{in}^b = R_b^n \omega_{in}^n$ และ $\omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n$ ซึ่ง

$$\omega_m^n = \begin{bmatrix} (\dot{\lambda} + \omega_{ie}) \cos(\phi) \\ -\dot{\phi} \\ -(\dot{\lambda} + \omega_{ie}) \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

ดังนั้นสมการจลนศาสตร์ของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือสมการที่ 2.67, 2.69 โดยสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบนั้นจะมีอินพุตเป็น f^b และ ω_{ib}^b และต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นคือ $p(0) = [\phi(0), \lambda(0), h(0)]^T, v_e^n(0)$ และ $R_b^n(0)$

2.8.3 สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanization) ของ INS

โดยเริ่มต้นจะสมมติแบบจำลองการวัดค่าของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เป็น

$$\tilde{f}^b = f^b + \Delta f^b \quad (2.73)$$

$$\tilde{\omega}_{ib}^b = \omega_{ib}^b + \Delta \omega_{ib}^b \quad (2.74)$$

เมื่อ Δf^b และ $\Delta \omega_{ib}^b$ คือความผิดพลาดในการวัดแรงเฉพาและอัตราการความเร็วเชิงมุมสัมพัทธ์ โดยความผิดพลาดในการวัดนั้นจะประกอบด้วยสัญญาณรบกวนแบบสุ่มและตัวประกอบการสอบเทียบเครื่องมือวัดซึ่งสามารถประมาณและชดเชยได้ เมื่อกำหนดค่าที่วัดได้เป็น \tilde{f}, ω_{ib}^b และค่าประมาณตัวประกอบการสอบเทียบเป็น $\Delta \hat{f}^b, \Delta \hat{\omega}_{ib}^b$ ดังนั้นเวกเตอร์แรงเฉพาและอัตราการความเร็วเชิงมุมที่ใช้ในสมการนำร่องสามารถหาได้จาก

$$\hat{f}^b = \tilde{f}^b + \Delta \hat{f}^b \quad (2.75)$$

$$\hat{\omega}_{ib}^b = \tilde{\omega}_{ib}^b + \Delta \hat{\omega}_{ib}^b \quad (2.76)$$

สำหรับกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นจะกำหนด $p = [\phi, \lambda, h]^T$ และเวกเตอร์ความเร็วคือ $v^n = v_e^n = [v_n, v_e, v_d]^T$ ดังนั้นตำแหน่ง Geodetic ของจุดกำเนิดกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์และความสูงของยานพาหนะที่วัดบนวงรีอ้างอิงซึ่งอยู่ในตัวแปร p สามารถหาค่าได้จาก

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos(\phi)(R_N + h)} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_n \\ \hat{v}_e \\ \hat{v}_d \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

และความเร็วที่สัมพันธ์กับโลกในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{v}}_n \\ \dot{\hat{v}}_e \\ \dot{\hat{v}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{f}_n \\ \hat{f}_e \\ \hat{f}_d \end{bmatrix} + g^n \begin{bmatrix} 0 & -\omega_d & \omega_e \\ \omega_d & 0 & -\omega_n \\ -\omega_e & \omega_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_n \\ \hat{v}_e \\ \hat{v}_d \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} \omega_n \\ \omega_e \\ \omega_d \end{bmatrix} = (\omega_{en}^n + 2\omega_{ie}^n) = \begin{bmatrix} (\dot{\lambda} + 2\omega_{ie}) \cos(\hat{\phi}) \\ -\dot{\phi} \\ -(\dot{\lambda} + 2\omega_{ie}) \sin(\hat{\phi}) \end{bmatrix}, \quad (2.79)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_n \\ \hat{f}_e \\ \hat{f}_d \end{bmatrix} = \hat{f}^n = \hat{R}_b^n \hat{f}^b$$

และทิศทางเมทริกซ์โคไซน์ (Cosine Matrix) สามารถหาค่าได้จากกรอินทิเกรตสมการต่อไปนี้

$$\dot{\hat{R}}_b^n = \hat{R}_b^n (\hat{\Omega}_{ib}^b - \hat{\Omega}_{in}^n) \quad (2.80)$$

เมื่อ $\hat{\Omega} = [\hat{\omega} \times]$, $\hat{\omega}_{ib}^b$ นั้นหาได้จากสมการที่ 2.76, $\hat{\omega}_{in}^n = \hat{R}_b^n \hat{\omega}_{in}^n$ โดยที่

$$\hat{\omega}_{in}^n = \begin{bmatrix} \omega_N \\ \omega_E \\ \omega_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\dot{\lambda} + \omega_{ie}) \cos(\hat{\phi}) \\ -\dot{\phi} \\ -(\dot{\lambda} + \omega_{ie}) \sin(\hat{\phi}) \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

2.8.4 สมการพลศาสตร์ของค่าความผิดพลาดของระบบ INS

ค่าความผิดพลาดในระบบนำร่องนั้นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของเงื่อนไขเริ่มต้นและเกิดจากการสะสมความผิดพลาดของเครื่องมือวัด ดังนั้นจึงต้องมีการหาแบบจำลองปริภูมิสถานะสำหรับเวกเตอร์ความผิดพลาดในระบบนำร่องซึ่งจะเจาะจงใช้เฉพาะกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์เท่านั้น โดยแบบจำลองทางภูมิศาสตร์จะมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{p} \\ \delta \dot{v} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{pp} & F_{pv} & F_{p\rho} \\ F_{vp} & F_{vv} & F_{v\rho} \\ F_{\rho p} & F_{\rho v} & F_{\rho\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p \\ \delta v \\ \rho \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\hat{R}_b^n & 0 \\ 0 & \hat{R}_b^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta f^b \\ \delta \omega_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

เมื่อเวกเตอร์ความผิดพลาดประกอบด้วยความผิดพลาดตำแหน่ง, ความผิดพลาดความเร็วและความผิดพลาดทิศทางการหันเห (Attitude) กำหนดให้เป็น $\delta x = [\delta p, \delta v, \rho]^T$ โดยที่

$$\begin{aligned} \delta p &= [\delta \phi, \delta \lambda, \delta h]^T \\ \delta v &= [\delta v_n, \delta v_e, \delta v_d]^T \\ \rho &= [\varepsilon_N, \varepsilon_E, \varepsilon_D]^T \end{aligned} \quad (2.83)$$

และเมื่อพิจารณาคุณลักษณะความผิดพลาดของระบบ INS จะได้แบบจำลองทางพลศาสตร์แบบเชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยตัวแปรสถานะความผิดพลาด 9 ตัวแปรดังนี้

$$\delta \dot{x}(t) = F(t) \delta x(t) + \Gamma q \quad (2.84)$$

เมื่เมทริกซ์ F คือ

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\rho_E}{R_e} & \frac{1}{R_e} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\rho_D}{\cos(\phi)} & 0 & \frac{-\rho_N}{R_e \cos(\phi)} & 0 & \frac{1}{R_e \cos(\phi)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ F_{41} & 0 & F_{43} & k_D & 2\omega_D & -\rho_E & 0 & f_D & -f_E \\ F_{51} & 0 & F_{53} & F_{54} & F_{55} & F_{56} & -f_D & 0 & f_N \\ -2v_E \Omega_D & 0 & F_{63} & 2\rho_E & -2\omega_N & 0 & f_E & -f_N & 0 \\ -\Omega_D & 0 & \frac{\rho_N}{R_e} & 0 & \frac{-1}{R_e} & 0 & 0 & \omega_D & -\omega_E \\ 0 & 0 & \frac{\rho_E}{R_e} & \frac{1}{R_e} & 0 & 0 & -\omega_D & 0 & \omega_N \\ F_{91} & 0 & \frac{\rho_D}{R_e} & 0 & \frac{\tan(\phi)}{R_e} & 0 & \omega_E & -\omega_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{เมทริกซ์ } \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\hat{R}_b^n & 0 \\ 0 & \hat{R}_b^n \end{bmatrix}$$

$$\text{และเมทริกซ์ } q = [(\delta f^b)^T, (\delta \omega_{ib}^b)^T]^T$$

เมื่อกำหนดสัญลักษณ์หรือตัวแปรต่างๆ ในเมทริกซ์ F ดังต่อไปนี้

$$\Omega_N = \omega_{ie} \cos(\phi)$$

$$\Omega_D = -\omega_{ie} \sin(\phi)$$

$$\rho_N = \frac{v_e}{R_e}$$

$$\rho_E = \frac{-v_n}{R_e}$$

$$\rho_D = \frac{-v_e \tan(\phi)}{R_e}$$

$$\omega_N = \Omega_N + \rho_N$$

$$\omega_E = \rho_E$$

$$\omega_D = \Omega_D + \rho_D$$

$$k_D = \frac{v_d}{R_e}$$

$$F_{41} = -2\Omega_N v_e - \frac{\rho_N v_e}{\cos^2(\phi)}$$

$$F_{43} = \rho_E k_D - \rho_N \rho_D$$

$$F_{51} = 2(\Omega_N v_n + \Omega_D v_d) + \frac{\rho_N v_n}{\cos(\phi)^2}$$

$$F_{53} = -\rho_E \rho_D - k_D \rho_N$$

$$F_{54} = -(\omega_D + \Omega_D)$$

$$F_{55} = k_D - \rho_E \tan(\phi)$$

$$F_{56} = \omega_N + \Omega_N$$

$$F_{63} = \rho_N^2 + \rho_E^2 - 2\frac{g}{R_e}$$

$$F_{91} = \Omega_N + \frac{\rho_N}{\cos(\phi)^2}$$

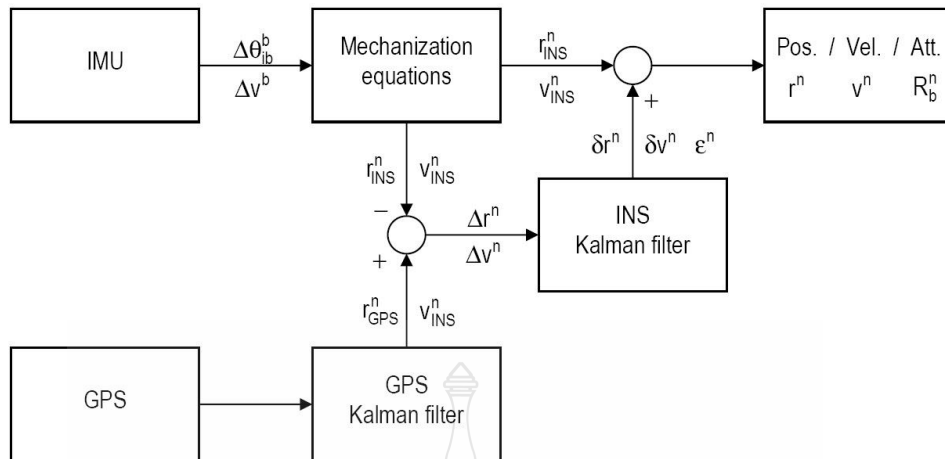
2.9 การบูรณาการเซนเซอร์ระหว่างระบบ INS และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) [16-17]

โดยเบื้องต้นแล้วทุกวิธีที่ใช้ในการรวมข้อมูลของระบบ INS และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) นั้นคือเซนเซอร์วัดมุมเพียงจะกำหนดเส้นโคจรที่ต้องการในขณะที่เซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จะใช้ในการการปรับระบบโดยระบบ INS นั้นจะมีความถี่ในการวัดที่สูงกว่าการวัดของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) มากซึ่งโดยปกติแล้วความถี่ในการวัดของระบบ INS จะมีค่าประมาณ 100 – 400 เฮิร์ตซ์ (HZ) ส่วนความถี่ในการวัดของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จะอยู่ประมาณที่ 1 – 10 เฮิร์ตซ์ (HZ) ดังนั้นตัวแปรเวกเตอร์สถานะจะสามารถหาได้จากข้อมูลที่ได้อาจมาจากความถี่สูงแต่การปรับตัวแปรหรือการแก้ไขนั้นจะมาจากข้อมูลที่มาจากความถี่ต่ำและทำให้สังเกตได้ว่าความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบ INS และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) คืออัตราการวัดข้อมูลที่ไม่เท่ากันนั่นเอง โดยบางวิธีในการรวมข้อมูลก็ใช้ข้อมูลร่วมกันแล้วนำไปผ่านการกรองข้อมูลหรือในบางวิธีก็จะแยกการกรองข้อมูลไปยังข้อมูลแต่ละเซนเซอร์ที่ต้องการหรือบางครั้งก็อาจจะมีการป้อนข้อมูลกลับเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น

2.9.1 การบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose)

ระเบียบการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose) นั้นจะมีการใช้ตัวกรองกาลมาน 2 ตัวที่มีความแตกต่างกันเพื่อแยกในการกรองข้อมูลโดยตัวที่หนึ่งสำหรับการวัดค่าของเซนเซอร์ GPS หรืออาจเรียกว่า GPS Kalman Filter และอีกหนึ่งตัวสำหรับการวัดค่าของระบบ INS หรือเรียกว่า INS Kalman Filter โดยขั้นตอนเบื้องต้นในระเบียบการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ประมวลผลข้อมูลคิบบที่วัดได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ผ่าน GPS Kalman Filter เพื่อหาตำแหน่งและความเร็วจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในที่นี้กำหนดตัวแปรเป็น r_{GPS}^n, v_{GPS}^n
2. ประมวลผลข้อมูลคิบบที่วัดได้จากระบบ INS ($\Delta\theta_{ib}^b, \Delta v^b$) โดยใช้สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanization) เพื่อหาตำแหน่งและความเร็วจากระบบ INS กำหนดเป็นตัวแปร r_{INS}^n, v_{INS}^n
3. ใช้ตำแหน่งและความเร็วจากข้อ 1. เป็นอินพุตไปยัง INS Kalman Filter โดยภายในตัวกรองนั้นจะทำให้เกิดผลต่างระหว่างตำแหน่งและความเร็วที่ได้มาจากข้อ 1. และ 2. ($\Delta r^n, \Delta v^n$) ในการหาการประมาณความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็ว ($\delta r^n, \delta v^n$) บวกกับความผิดพลาดของแนว (Misalignment: ε^n)
4. ใช้ค่าจากการประมาณความผิดพลาดในข้อ 3. เพื่อปรับตำแหน่งและความเร็วที่ได้จากข้อ 2. เพื่อให้ได้ค่าเวกเตอร์สถานะที่ถูกต้อง (r^n, v^n, R_b^n)



รูปที่ 2.19 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose) [16]

ข้อดีของวิธีการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose) นั้นคือสามารถสังเกตเวลาในการประมวลผลของอัลกอริทึมได้โดยทั่วไปแล้วจะเป็นเวกเตอร์สถานะที่มีขนาดเล็กแต่จะไม่ได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ส่วนข้อเสียหลักๆก็คือ ไม่สามารถปรับค่าการวัดที่อยู่ภายใน GPS Filter ได้เมื่อข้อมูลที่ได้อาจไม่ถูกต้องหรือพบความเพี้ยนน้อยกว่า 4 ดวง โดยข้อเสียที่กล่าวมานั้นจะไม่เกิดขึ้นกับวิธีการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) และเป็นเหตุผลที่สำคัญในการบอกว่าวิธีการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) นั้นดีกว่าวิธีการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุมชนเมือง โดยระเบียบวิธีการบูรณาการข้อมูลแบบหลวม (Loose) นั้นอาจเรียกเป็นระเบียบวิธีการบูรณาการแบบแยกจากส่วนกลาง (Decentralized)

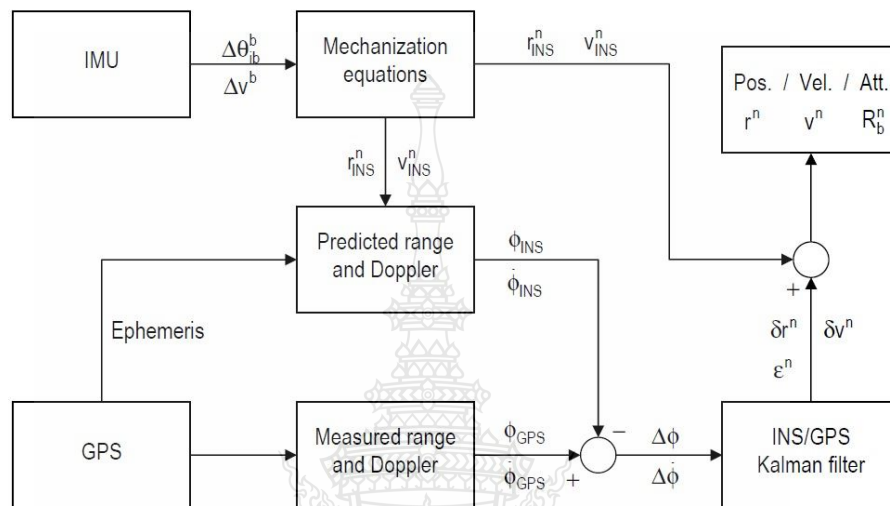
2.9.2 การบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight)

ระเบียบการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) นั้นจะมีตัวกรองกาลมานแบบเดี่ยวเท่านั้นซึ่งอาจเรียกว่า INS/GPS Kalman Filter โดยขั้นตอนเบื้องต้นในระเบียบการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ประมวลผลข้อมูลดิบที่วัดได้จากระบบ INS ($\Delta\theta_{ib}^b, \Delta v^b$) ผ่านสมการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanization) เพื่อหาตำแหน่งและความเร็วจากระบบ INS กำหนดเป็นตัวแปร r_{INS}^n, v_{INS}^n
2. ใช้ข้อมูลดิบ GPS ephemeris รวมทั้งตำแหน่งและความเร็วจากข้อ 1. เพื่อทำนายระยะทางที่คำนวณกลับ (Pseudo Ranges) และค่าที่วัดได้ของการสะท้อนกลับ (Doppler) กำหนดเป็นตัวแปร $(\Phi_{INS}, \dot{\Phi}_{INS})$
3. ใช้ค่าทำนายจากข้อ 2. เพื่อเป็นค่าอินพุตใน INS/GPS Kalman Filter โดยภายในตัวกรองนั้นจะคิดผลต่างระหว่างค่าทำนายที่ได้จากข้อ 2. และค่าดิบที่วัดได้จริงทั้งค่าระยะทางที่คำนวณกลับของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS Pseudorange) และค่าที่วัดได้ของการสะท้อนกลับ (Doppler) ที่วัดได้เพื่อหา

ความผิดพลาดในการประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วกำหนดเป็นตัวแปร ($\delta r^n, \delta v^n$) บวกกับความผิดพลาด (Misalignment หรือ (ε^n))

4. ใช้ค่าความผิดพลาดในการประมาณค่าจากข้อ 3. เพื่อปรับค่าตำแหน่งและความเร็วจากข้อ 1. และนำไปสู่เวกเตอร์สถานะแบบสมบูรณประกอบด้วย (r^n, v^n, R_b^n)



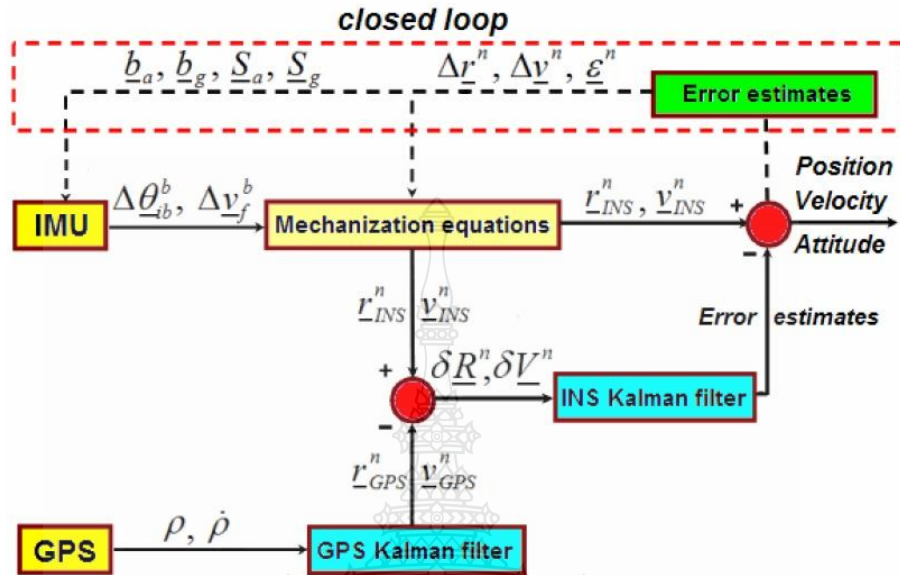
รูปที่ 2.20 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) [16]

ข้อดีของการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) คือบ่อยครั้งที่สัญญาณจากดาวเทียม นั้นไม่ค่อยดีหรืออาจเจอสัญญาณดาวเทียมเพียง 4 ดวง แต่การปรับแก้ค่าสามารถใช้ข้อมูลจากระบบ INS ได้โดยใช้ค่าจากการทำนารวมทั้งค่าระยะทางที่คำนวณกลับ (Pseudo Range) และค่าการสะท้อนกลับ (Doppler) ที่วัดได้อีกด้วย ซึ่งโดยปกติแล้ววิธีนี้จะใช้ในชุมชนเมืองหรือในสถานที่ที่ที่เซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ไม่สามารถรับสัญญาณได้บ่อยครั้ง ส่วนข้อเสียของวิธีนี้คือ ขนาดของเวกเตอร์สถานะจะเพิ่มขึ้น และต้องการระยะเวลาในการประมวลผลที่มากขึ้น โดยระเบียบวิธีการบูรณาการข้อมูลแบบแนบแน่น (Tight) นั้นอาจเรียกเป็นระเบียบวิธีการบูรณาการแบบร่วมกับส่วนกลาง (Centralized)

2.9.3 การบูรณาการข้อมูลเชื่อมโยงแบบหลวม (Loosely Coupled)

ในการบูรณาการข้อมูลของวิธีเชื่อมโยงแบบหลวม (Loosely Coupled) นั้นภายในตัวรับของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จะมีตัวกรองกาลมานอยู่หรืออาจเรียกว่า “GPS Filter” เพื่อประมวลผลหาค่าระยะทางที่คำนวณกลับ (Pseudo Range) และค่าการสะท้อนกลับ (Doppler) ซึ่งจะในการคำนวณตำแหน่งและความเร็วต่อไป โดยผลต่างระหว่างระบบ INS และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งและความเร็ว นั้นจะนำไปใช้ในตัวกรองกาลมานชุดที่ 2 หรือเรียกว่า “INS Filter” โดยภายในจะใช้สมการทางพลศาสตร์ความผิดพลาดของระบบ INS เป็นแบบจำลองของระบบ โดยระบบ INS Filter

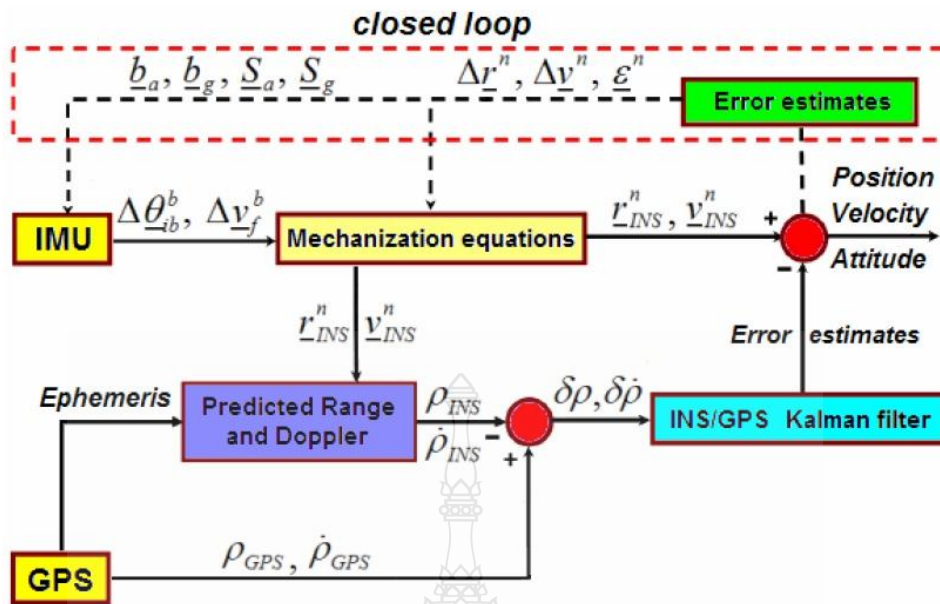
จะประมาณทุกๆความผิดพลาดของระบบ INS ที่สามารถสังเกตการณ์ได้ ซึ่งจะใช้ในการปรับแก้ค่าระบบ INS ที่วัดได้และชดเชยเอาที่พุดของระบบอีกด้วย



รูปที่ 2.21 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลเชื่อมโยงแบบหลวม (Loosely Coupled) [17]

2.9.4 การบูรณาการข้อมูลเชื่อมโยงแบบแนบแน่น (Tightly Coupled)

วิธีนี้จะใช้ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) และค่าระยะทางที่คำนวณกลับ (Pseudo Range) และค่าการสะท้อนกลับ (Doppler) ที่ได้จากระบบ INS เพื่อทำการเปรียบเทียบและใช้เป็นอินพุตในตัวกรองคาลมาน ดังนั้นการรวมด้วยตัวกรองคาลมานหรือเรียกว่า “INS/GPS Filter” ประกอบด้วยสมการที่ใช้หาความผิดพลาดในการนำทาง (ตำแหน่ง, ความเร็ว, ความสูง) รวมไปถึงความผิดพลาดของเซนเซอร์ทั้งระบบ INS และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)



รูปที่ 2.22 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลเชื่อมโยงแบบแนบแน่น (Tightly Coupled) [17]

2.9.5 ระเบียบวิธีการรวมแบบอื่น

ระเบียบวิธีแบบอื่นที่เป็นที่นิยมใช้กันนั้นประกอบด้วยการบูรณาการแบบไม่เชื่อมโยง (Uncoupled) และ Deep/Ultra-tight โดยวิธีแบบไม่เชื่อมโยง (Uncoupled) นั้นจะใช้เฉพาะเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ถ้าเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) มีข้อมูล แต่ถ้าเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ไม่มีข้อมูลแล้วจะใช้ระบบ INS โดยเมื่อเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) นั้นมีข้อมูลจะทำการตั้งค่าตำแหน่งและความเร็วของระบบ INS ใหม่โดยใช้ข้อมูลเวลาปัจจุบันของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ซึ่งระบบจะไม่มีการป้อนกลับค่าความผิดพลาดที่ประมาณได้ไปยังสมการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ (Mechanization) ดังนั้นค่าความผิดพลาดทั้งตำแหน่งและความเร็วจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ไม่มีค่าเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) โดยปกติแล้วระเบียบวิธีนี้ไม่ค่อยจะมีความแม่นยำและไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับระบบการนำทางที่ต้องการความแม่นยำสูง ส่วนวิธีแบบ Deep/Ultra-tight นั้นจะทำการปรับค่าจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ไปยังระบบ INS และต้องการเข้าถึงเฟิร์มแวร์ (Firmware) ของตัวรับเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ด้วย

ตารางที่ 3.1 แผนดำเนินการวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม	2556				2557						2558		
	มี.ย.	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย	พ.ค. มี.ย.	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.	พ.ค.
4. ศึกษาและทดลองเซนเซอร์													
5. ศึกษาและออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และไครฟ์ขับเคลื่อนอเตอร์													
6. ศึกษาและออกแบบอัลกอริทึมแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy - Grid Map)													

ตารางที่ 3.1 แผนดำเนินการวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม	2556				2557						2558		
	มี.ย.	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.
		ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ย	มิ.ย.	ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ย.	
7. ศึกษาและ ออกแบบ อัลกอริทึม แบบสนาม ศักย์ (Potential Field)													
8. ศึกษาและ ออกแบบ อัลกอริทึม แบบการ วางแผน เส้นทาง โคจรแบบ เฉพาะที่ (Local Incremental Planning)													
9. ศึกษา เทคนิคตัว กรองกาล มาน													
10. ศึกษาวิธี การบูรณา การ เซนเซอร์													

ตารางที่ 3.1 แผนดำเนินการวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม	2556				2557						2558		
	มี.ย.	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.
		ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ย	มิ.ย.	ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ย.	
11. ทดสอบระบบพร้อมทั้งวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา													
12. สรุปและจัดพิมพ์รายงาน													

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

3.2.1 รถเทรวิไฟฟ้าพร้อมมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งล้อหน้าและล้อหลัง

คุณสมบัติทางกายภาพ

- ความยาว 150 เซนติเมตร
- ความกว้าง 60 เซนติเมตร
- น้ำหนัก 20 เซนติเมตร
- ความเร็วไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาที
- วงเลี้ยวไม่เกิน 15 องศา



รูปที่ 3.1 รถเอทีวีไฟฟ้า

3.2.2 แผนภาพอุปกรณ์รถอัตโนมัติ

ขั้นตอนก่อนที่จะออกแบบระบบควบคุมนั้นก็จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่กำหนด โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

- ติดตั้งมอเตอร์ 24 VDC เพื่อใช้ในการบังคับเลี้ยวของล้อหน้า
- ติดตั้งไดรฟ์ขับเคลื่อนรวมทั้งเซนเซอร์วัดรอบมอเตอร์ทั้งด้านหน้าและด้านหลังรวมทั้งระบบจ่ายไฟ 36 V เพื่อใช้เป็นอินพุตให้กับไดรฟ์มอเตอร์และระบบขับเคลื่อน

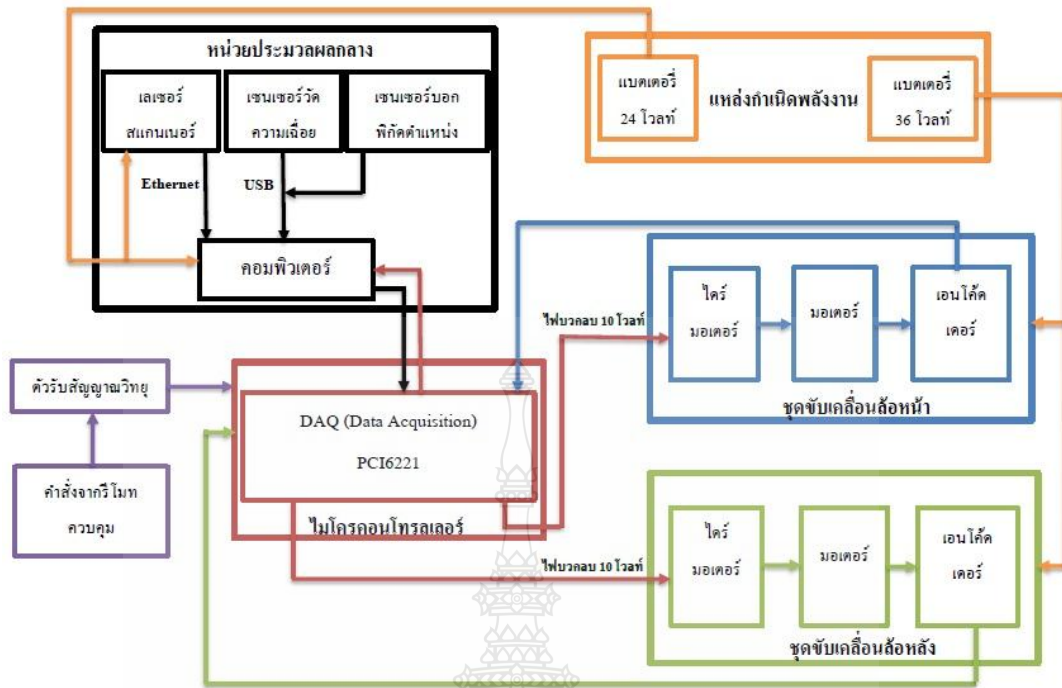
- ติดตั้งหน่วยประมวลผลกลางหรือคอมพิวเตอร์และแหล่งจ่ายไฟ 24 VDC

- ติดตั้งระบบคอนโทรลเลอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยใช้การ์ด DAQ (Data Acquisition)

รุ่น PCI 6221

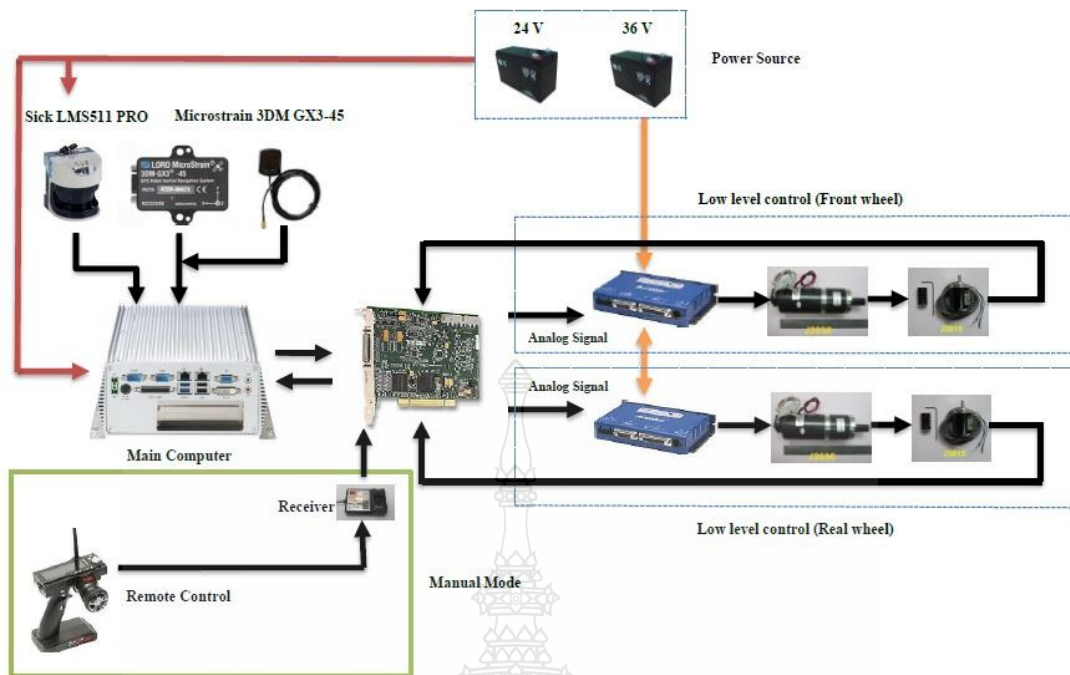
- ติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดค่า ได้แก่ เลเซอร์สแกนเนอร์ โดยจะใช้แหล่งจ่ายไฟเดียวกันกับคอมพิวเตอร์คือ 24 VDC และเซนเซอร์วัดมุมเอียงรวมทั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)

- ติดตั้งตัวรับสัญญาณรีโมทวิทย์พร้อมทั้งทดสอบระบบบังคับด้วยรีโมทวิทย์



รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบควบคุมของรถอัตโนมัติ

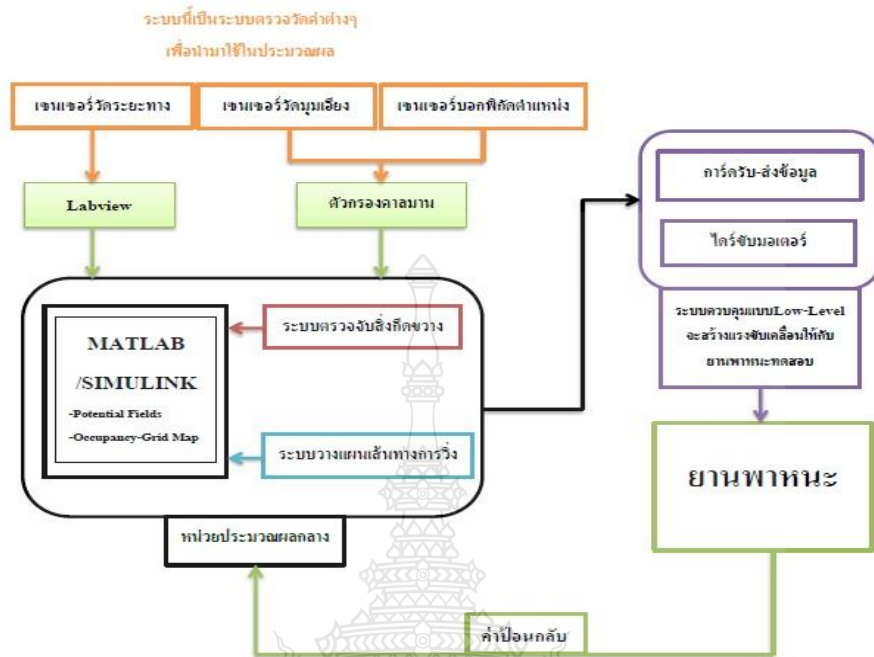
การทำงานของรถอัตโนมัติจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือระบบบังคับด้วยรีโมทวิทยุและระบบขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติ โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงหลักการงานเบื้องต้นของระบบบังคับด้วยวิทยุ เริ่มต้นเมื่อผู้บังคับกรีโมทจะมีสัญญาณพัลส์จากตัวรับสัญญาณวิทยุส่งเข้าไปยังการ์ดรับ-ส่งข้อมูล (DAQ Card) หลังจากนั้นจึงผ่านกระบวนการประมวลผลแล้วมีคำสั่งเอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อไปสั่งไปยังไดร์มอเตอร์ เมื่ออยู่ในขั้นตอนนี้จะมีการควบคุมเบื้องต้นเกิดขึ้นและเมื่อเสร็จสิ้นแล้วก็มีคำสั่งออกไปยังมอเตอร์ 24 VDC ของล้อหน้ารวมทั้งมอเตอร์ 36 VDC ของล้อหลังซึ่งทั้งขนาดของความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนที่ของรถก็จะขึ้นอยู่กับคำสั่งจากผู้บังคับเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.3 เซนเซอร์และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ในส่วนที่สองจะอธิบายการทำงานของระบบอัตโนมัติอย่างย่อๆ เริ่มต้นต้องมีการกำหนดเป้าหมายที่ต้องการเป็นลำดับแรกหลังจากนั้นเมื่อตรวจสอบระบบแล้วจึงปล่อยให้หุ่นยนต์ทำงาน โดยระหว่างที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะมีการทำงานอยู่ 3 ส่วนหลักคือ 1) ตรวจสอบสิ่งกีดขวาง 2) หาเส้นทางการวิ่ง 3) สั่งงานและรับค่าป้อนกลับ ทั้ง 3 จะทำงานพร้อมๆ กันซึ่งถ้าระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางไม่พบสิ่งกีดขวางตัวหุ่นยนต์ก็จะมุ่งหน้าไปยังเป้าหมายที่ต้องการเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อไหร่ที่ตรวจพบสิ่งกีดขวางระบบจะคำนวณและหาคำสั่งที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นการเดินหน้า, ถอยหลัง, เลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวา ก็ได้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้รับมารวมทั้งหาเส้นทางการวิ่งที่จะสามารถไปยังเป้าหมายได้สำเร็จอีกด้วย โดยการที่จะนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติได้สำเร็จจะต้องมีตัวรับรู้อย่างน้อยที่สุดคือ เซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียง, เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) และเอนโค้ดเดอร์ (ถ้ามี)

3.2.3 แผนภาพแสดงระบบควบคุมและระบบประมวลผล



รูปที่ 3.4 ระบบการควบคุมและประมวลผล



รูปที่ 3.5 รถเอทีวีไฟฟ้าเมื่อติดตั้งเซนเซอร์และระบบต่างๆที่จำเป็นในการทำงาน

3.3 เซนเซอร์ที่ใช้ในการรับค่า

3.3.1 เซนเซอร์วัดมุมเอียง (Inertia Measurement Unit/IMU)

เซนเซอร์วัดมุมเอียงนั้นเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัดและเก็บข้อมูลซึ่งประกอบด้วยความเร็ว, มุมการหันเห (Orientation) และแรงโน้มถ่วงของระบบหรือวัตถุที่ต้องการวัดหรือทดสอบโดยการรวมผลจากเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) หรือในบางชนิดของเซนเซอร์วัดมุมเอียง อาจจะมีเซนเซอร์วัดแม่เหล็กอีกด้วย โดยส่วนใหญ่เซนเซอร์วัดมุมเอียง นั้นจะใช้งานอากาศยานอาทิเช่น เครื่องบินไร้คนขับ (UAVs) หรืออาจจะเป็นในยานอวกาศเป็นต้น เมื่อไม่นานนี้มีการพัฒนาให้เซนเซอร์วัดมุมเอียง สามารถใช้ร่วมกับเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เพื่อช่วยให้สามารถทำงานได้ในสภาวะที่ตัวรับของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ไม่เจอสัญญาณ อาทิเช่น ในอาคาร, ในท่อหรือในที่ที่มีสัญญาณรบกวนสูง เป็นต้น ซึ่งเซนเซอร์วัดมุมเอียง เป็นองค์ประกอบหลักของระบบนำทางที่ใช้ในอากาศยาน, ยานอวกาศหรือขีปนาวุธหรืองานอื่นๆ เป็นต้น โดยพื้นฐานแล้วเซนเซอร์วัดความถี่จะประกอบด้วยเซนเซอร์ต่างๆดังต่อไปนี้

3.3.1.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

เซนเซอร์วัดความเร่ง คือ ตัววัดความเร่งจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยหลักการทำงานนั้นให้แก๊สถึงห้องสี่เหลี่ยมเล็กๆที่ทุกด้านของกำแพงจะมีสปริงติดอยู่เวลาที่ห้องนี้เอียงไปทางใดทางหนึ่งสปริงก็จะยุบไปด้านนั้นๆ โดยคิดว่าแรงดันของสปริงมีน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลกและใช้วงจรไฟฟ้าในการดึงสัญญาณเอาต์พุตออกมาใช้งาน โดยเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จะขึ้นกับแรงโน้มถ่วงนั้นหมายถึงค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ไม่มีทางหยุดนิ่งเฉยแม้ปล่อยทิ้งไว้สัญญาณก็จะวิ่งขึ้นๆลงๆสั้นๆไปสั้นมา โดยจะใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) สำหรับเป็นตัวชี้ว่าอยู่ในสถานะนิ่งๆหรือเคลื่อนไปหาพื้นที่ไหนนั้นทำให้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เป็นเซนเซอร์สำหรับบอกสถานะวัดความเร่งได้ทั้งในแกน x แกน y และแกน z

ซึ่งค่าความเร่งที่ได้มานั้นอาจมีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจจะต้องใช้โปรแกรมในการตัดสัญญาณรบกวนและใช้เทคนิคการประมาณค่าเพื่อกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นออกไปเพื่อที่จะได้ค่าที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานและสามารถนำมาอินทิเกรตเพื่อประมาณค่าความเร็วและตำแหน่งต่อไปซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบที่จะนำมาใช้

3.3.1.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะทำหน้าที่วัดความเร็วเชิงมุม โดยความเร็วในการหมุนเชิงมุมในวิชาฟิสิกส์ยกตัวอย่างถ้าเราจับตัวเซนเซอร์มาเอียงแล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตเราจะพบว่าสัญญาณจากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะออกมาก็ต่อเมื่อเกิดการเอียงหรือกำลังจะเอียงหรือเกิดการเคลื่อนไหว ซึ่งเมื่อวัตถุอยู่นิ่งค่าจากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะ

มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เพราะไม่มีความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ เมื่อเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ที่ปล่อยทิ้งไว้ให้อยู่หนึ่งกับที่ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะเกิดการแกว่งไปมาเนื่องจากสัญญาณรบกวนและถ้าเรานำค่าเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) มาหาปริพันธ์ หลังจากที่ได้กรองหรือตัดสัญญาณรบกวนออกไปก็จะสามารถคำนวณหามุมการหมุนได้ (เพราะเอาต์พุตของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เป็นความเร็วเชิงมุมถ้าอินทิเกรตจะได้ องศาการหมุน)

ซึ่งการทำงานเบื้องต้นของเซนเซอร์วัดมุมเอียงนั้นจะทำการตรวจสอบอัตราเร่งที่สถานะปัจจุบันโดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในขณะที่การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการหมุนนั้นจะได้ข้อมูลซึ่งประกอบด้วยมุมการก้มรอบแกน x (Roll), มุมเงยรอบแกน y (Pitch) และมุมหันรอบแกน z (Yaw) โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) และในบางครั้งจะใช้เซนเซอร์วัดแม่เหล็กในการช่วยเทียบการเคลื่อนของมุมการหันเห (Orientation) ได้อีกด้วย

3.3.2 เซนเซอร์บอกพิกัดตำแหน่ง (Global Positioning System/GPS) [19]

GPS (Global Positioning System) คือระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกผ่านดาวเทียม โดยพิกัดบนพื้นโลกที่ได้ จะมาจากการคำนวณสัญญาณนาฬิกาที่ส่งจากดาวเทียม มาที่เครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) ดาวเทียมจีพีเอส (GPS) ที่สามารถระบุตำแหน่งได้นั้น จะถูกออกแบบมาโดยเฉพาะให้โคจรรอบโลก เพื่อส่งข้อมูลที่จะนำไปใช้คำนวณพิกัดออกมาตลอดเวลา ระบบจีพีเอส (GPS) จะทำงานได้นั้นต้องประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1) สถานีฐาน: มีหน้าที่ควบคุมการทำงาน รวมถึงวงโคจรของดาวเทียม และให้ค่าสัญญาณนาฬิกาที่ถูกต้อง กับดาวเทียมจีพีเอส (GPS)

2) ดาวเทียมจีพีเอส (GPS): ส่วนของดาวเทียมจีพีเอส (GPS) ในปัจจุบันนั้นจะมาจาก 3 ชาติหลักๆ คือ

- NAVSTAR: จากของประเทศอเมริกา มีทั้งหมด 24 ดวง โคจรรอบโลกที่ความเร็ว 12 ชั่วโมงต่อ 1 รอบ

- Galileo: ถูกพัฒนาโดยสหภาพยุโรป ร่วมกับประเทศจีน อิสราเอล อินเดีย โมร็อกโก ซาอุดีอาระเบีย เกาหลีใต้ และยูเครน รวมจำนวน 27 ดวง

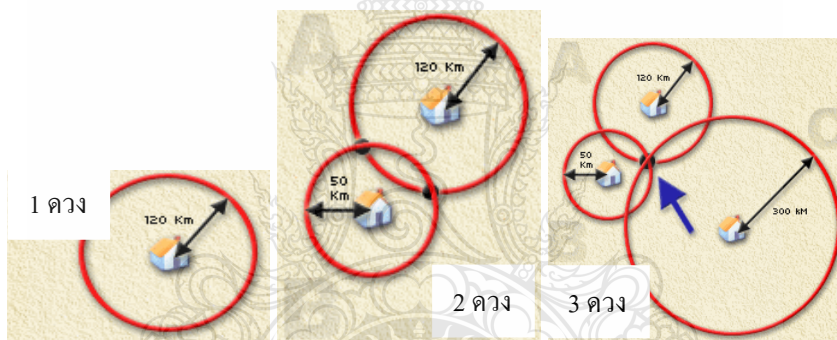
- GLONASS: (GLObal NAVigation Satellite System) ที่พัฒนาโดยรัสเซีย

- Beidou: เป็นดาวเทียมจีพีเอส (GPS) ที่กำลังพัฒนาโดยประเทศจีน

3) เครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (GPS): ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) ได้จากอุปกรณ์หลายๆอย่าง เช่น โทรศัพท์มือถือที่รับสัญญาณจีพีเอส (GPS) ได้, GPS Receiver (ต่อกับคอมพิวเตอร์, มือถือ) หรือ เครื่อง PNA (Personal Navigation Assistant) หรือเรียกง่ายๆว่า GPS Navigator, GPS ตีครด

การทำงานและประโยชน์ของระบบจีพีเอส (GPS) แรกเริ่มนั้นการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจุดประสงค์ทางการทหารเป็นหลัก แต่ต่อมาทางการสหรัฐอเมริกา ได้เปิดให้ประชาชนทั่วไปได้ใช้ประโยชน์ จากข้อมูลที่ส่งออกมาจาก ดาวเทียมจีพีเอส (GPS) ได้ฟรี บริษัทต่างๆจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ระบุพิกัด จากการรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆทางเช่น ใช้ในการนำทางยานพาหนะ ติดตามยานพาหนะหรือบุคคล หรือใช้ในการอ้างอิงสถานที่ในการเดินทาง และอื่นๆความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของจีพีเอส (GPS)

ตัวรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) นั้นจะสามารถระบุตำแหน่งของเราได้แม่นยำแค่ไหนขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียม ที่สามารถรับสัญญาณได้ในขณะนั้น การระบุพิกัดขั้นต่ำ ต้องการดาวเทียมอย่างน้อย 3 ดวง เพื่อระบุตำแหน่งให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยตัวเครื่องจีพีเอส (GPS) จะนำสัญญาณนาฬิกา ที่ได้รับจากดาวเทียมทั้ง 3 ดวง มาคำนวณห่างของเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) กับดาวเทียมเพื่อแจ้งพิกัดปัจจุบัน



รูปที่ 3.6 แผนภาพการระบุตำแหน่งจากดาวเทียม 1 ดวง, 2 ดวงและ 3 ดวง [19]

จากรูปด้านบนจะเห็นได้ว่า หากรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) จากดาวเทียมได้เพียงดวงเดียว เราจะได้พิกัดในลักษณะเป็นวงกว้าง ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ แต่ภาพกลาง เมื่อรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) จากดาวเทียมได้ 2 ดวง จะทำให้สามารถระบุพิกัดได้ แต่จะมีพิกัดจำนวน 2 จุดที่เกิดจากการตัดกันของสัญญาณจีพีเอส (GPS) จากดาวเทียม 2 ดวง ซึ่งก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งที่ชัดเจนได้ และภาพด้านขวามือจะสามารถระบุพิกัดบนพื้นโลกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องรับสัญญาณจีพีเอส (GPS) สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ 3 ดวง ทำให้ตัวเครื่องสามารถคำนวณหาพิกัด ซึ่งเกิดจากจุดตัดจากสัญญาณดาวเทียมทั้ง 3 ดวงได้ ดังนั้นการแสดงพิกัดที่ถูกต้อง ตัวเครื่องที่รับสัญญาณจีพีเอส (GPS) จะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมจีพีเอส (GPS) ได้อย่างน้อย 3 ดวงขึ้นไป (ยิ่งมากยิ่งดี)

3.3.3 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ของ Microstrain 3DM-GX3-45 [20]

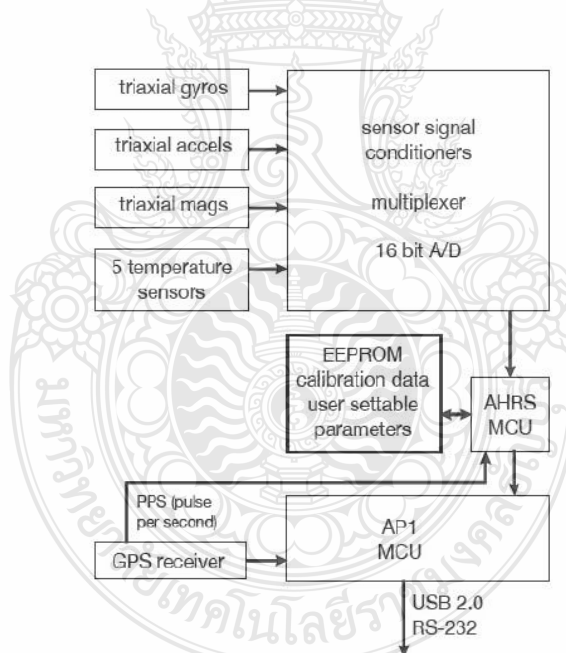
โดยรุ่นนี้จะมีทั้งเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) อยู่ในตัวเดียวกันโดยส่วนประกอบหลักคือ เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) แบบ 3 แกน, เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

(Gyroscope) แบบ 3 แกน, เซนเซอร์แม่เหล็ก (Magnetometer) แบบ 3 แกนและตัวรับสัญญาณเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)



รูปที่ 3.7 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ของ Microstrain 3DM-GX3-45 [20]

โดยข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียงหรือเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) นั้นจะส่งข้อมูลผ่าน USB/RS232 ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในส่วนอื่นต่อไป โดยโครงสร้างภายในของระบบแสดงดังไดอะแกรมต่อไปนี้



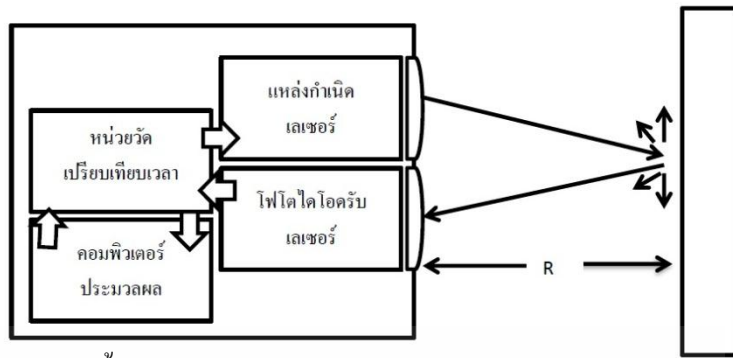
รูปที่ 3.8 โครงสร้างภายในของเซนเซอร์ของ Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45 [20]

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลคุณสมบัติของเซนเซอร์ของ Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45 [20]

ความถูกต้องในการวัดตำแหน่ง	± 2.5 เมตรในแนวนอนกันพื้นโลก และ ± 5 เมตรในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก
อัตราการส่งออกข้อมูลของเซนเซอร์วัดมุมเอียง	1 ถึง 100 เฮิร์ตซ์
ช่วงการวัดของเซนเซอร์วัดความเร่ง	± 5 เมตร
ช่วงการวัดของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม	± 300 องศาต่อวินาที
ความถูกต้องของมุมออยเลอร์เมื่ออยู่กับที่	± 0.5 องศา
ความถูกต้องของมุมออยเลอร์เมื่อเคลื่อนที่	± 2 องศา
ช่วงการวัดของเซนเซอร์วัดแม่เหล็ก	± 2.5 เกาส์
ความสามารถในการวัดซ้ำ	0.2 องศา
ความถูกต้องขององศาการหันเหของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	0.5 องศา
ความถูกต้องความเร็วของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	0.1 เมตรต่อวินาที
ความถูกต้องตำแหน่งในแนวนอนของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	2.5 เมตร CEP
อัตราการส่งออกข้อมูลของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	1 ถึง 4 เฮิร์ตซ์

3.3.4 เลเซอร์สแกนเนอร์

ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์มีเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ การรังวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้ประโยชน์จากการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังในการทะลุทะลวงและเป็นลำแสงความเข้ม เช่น แสงเลเซอร์ (Laser) เครื่องวัดระยะทางจะกำเนิดเลเซอร์และจับเวลาในการเดินทางด้วยหน่วยวัดเปรียบเทียบเวลา เมื่อแสงไปตกกระทบพื้นผิวแสงจะสะท้อนกลับการสะท้อนกลับได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดพื้นผิวว่าเป็นของแข็ง เรียบหรือหยาบ แห้งหรือชื้น เมื่อแสงเดินทางกลับมายังเครื่องรับจะมีการเปรียบเทียบเวลาอีกครั้ง

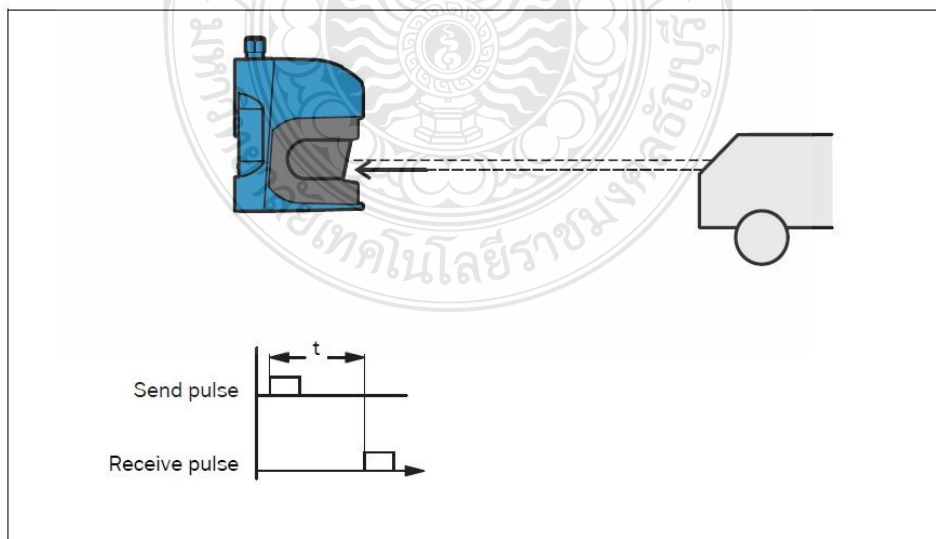


รูปที่ 3.9 หลักการทำงานเบื้องต้นของเลเซอร์สแกนเนอร์

โดยเลเซอร์สแกนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือเลเซอร์สแกนเนอร์ของ SICK รุ่น 511 PRO ซึ่งจะทำการสแกนในระนาบเดียวและอยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้วแบบ 2 มิติอีกด้วย ถ้าแสงของเลเซอร์ที่ปล่อยออกมานั้นไปกระทบกับวัตถุเป้าหมายจะทำให้ได้ของข้อมูลเป้าหมายในรูปแบบของระยะทางและรัศมีซึ่งการสแกนจะอยู่ภายใน 190 องศาและระยะสแกนสูงสุดที่ 80 เมตร

3.3.4.1 การวัดระยะทาง

เลเซอร์สแกนจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกมาเป็นพัลส์โดยใช้เลเซอร์ไดโอด ถ้าแสงเลเซอร์นั้นสามารถสะท้อนบนวัตถุเป้าหมายได้จะทำให้เกิดการสะท้อนของลำแสงกลับไปยังตัวรับแสงที่ตัวเซนเซอร์ โดยระยะทางของวัตถุนั้นคำนวณได้โดยใช้เวลาดังแต่ปล่อยลำแสงออกมาเกิดการสะท้อนและรับกลับไปยังตัวเซนเซอร์ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้เรียกว่า “เวลาที่ใช้ในการสะท้อน (Time Of Flight)”



รูปที่ 3.10 หลักการควบคุมเวลาที่ใช้ในการสะท้อน (Time of Flight) [21]

3.3.4.2 การวัดทิศทาง

แสงเลเซอร์ที่กระจายออกไปนั้นจะหันเหได้โดยการใช้กระจกที่สามารถหมุนได้ อยู่ภายในและสแกนในลักษณะที่เป็นวงกลม ซึ่งจะหมุนเป็นลำดับที่สม่ำเสมอโดยใช้เซนเซอร์วัดรอบการ หมุนแบบเชิงมุม

3.3.4.3 ข้อจำกัด

ขนาดของวัตถุที่เลเซอร์สแกนจะสามารถค้นพบได้นั้นต้องมีขนาดใหญ่กว่าเส้น ผ่านศูนย์กลางของแสงเลเซอร์ โดยในที่นี้ลำแสงของเลเซอร์นั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.6 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 SICK LMS511-PRO [21]

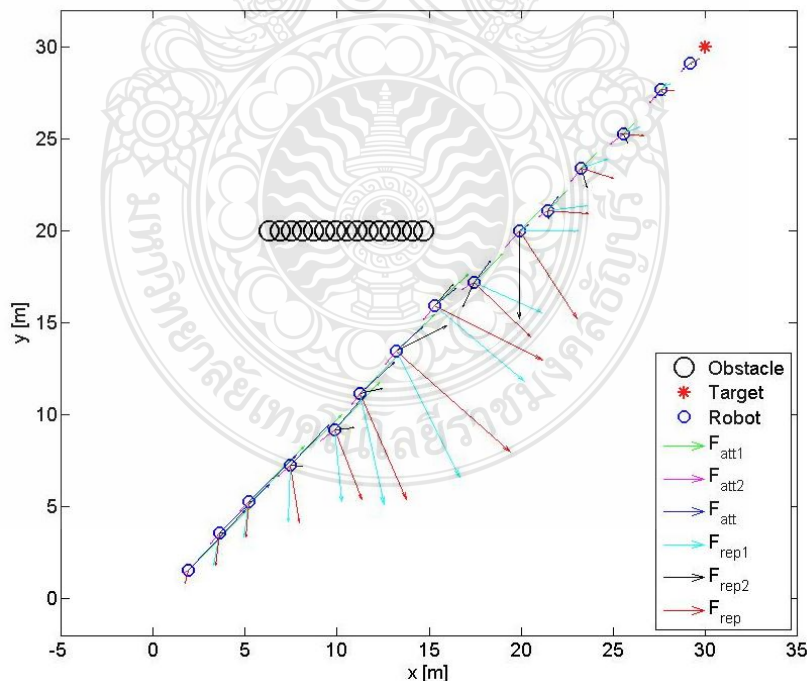
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลคุณสมบัติของ SICK LMS511-PRO [21]

องศาการสแกน	190 องศา
ความถี่การสแกน	25 ถึง 100 เฮิร์ตซ์
ความละเอียดเชิงมุม	0.1667 ถึง 1 องศา
ความถูกต้องในการวัด	± 24 มิลลิเมตร
ช่วงในการวัดระยะทาง	0.7 ถึง 80 เมตร
ขนาดของเลเซอร์	185x155x160 มิลลิเมตร
แหล่งกำเนิดไฟฟ้า	24 โวลต์

3.4 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field)

3.4.1 การจำลองแรงเสมือนแบบดึงดูดและแบบผลักและแรงเสมือนรวม

เนื่องจากเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เป็นเทคนิคขั้นสูงที่ใช้ในการวางแผนการเคลื่อนที่และประกอบด้วยข้อดีและข้อเสียต่างๆรวมอยู่ด้วยกันจึงต้องมีการจำลองการทำงานของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบค่าตัวแปรและความเป็นไปได้ต่างๆในการเคลื่อนที่ โดยในกรณีนี้ได้ทดสอบการคำนวณหาแรงเสมือนแบบดึงดูดและแบบผลักจากฟังก์ชันศักย์ที่ขึ้นกับตำแหน่งและความเร็วที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 โดยได้กำหนดให้หุ่นยนต์เป็นวงกลมเล็กที่เคลื่อนที่ในแนวทแยงมุมโดยเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_r(0) = 1$ เมตร, $y_r(0) = 1$ เมตร) และเป้าหมายแบบอยู่นิ่งที่เป็นรูปดาวอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_t = 30$ เมตร, $y_t = 30$ เมตร) และสิ่งกีดขวางเป็นรูปวงกลมใหญ่ที่เคลื่อนที่ในเฉพาะแกน x โดยเริ่มต้นที่ตำแหน่ง $(x_o(0) = 6$ เมตร, $y_o(0) = 20$ เมตร) และเคลื่อนที่ครั้งละ 30 เซนติเมตร โดยการจำลองการเคลื่อนที่นี้ได้สร้างแรงเสมือนทั้งแบบดึงดูดและแบบผลักที่กระทำต่อหุ่นยนต์ในแต่ละตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในแนวทแยงมุม ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าแรงเสมือนแบบดึงดูดจะมีค่าดึงดูดมากและจะค่อยลดลงเมื่อหุ่นเคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมาย ส่วนแรงเสมือนแบบผลักนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวาง และมีค่าผลักมากที่สุดก่อนจะถึงสิ่งกีดขวางและแรงเสมือนแบบผลักจะมีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ห่างสิ่งกีดขวางออกไป

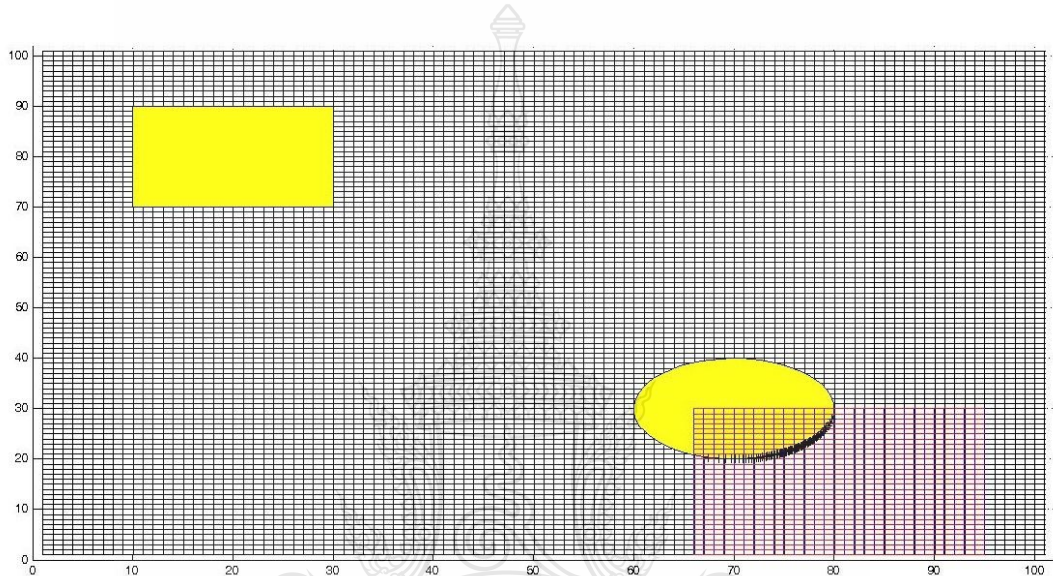


รูปที่ 3.12 การจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวาง เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายและแสดง แรงเสมือนแบบดึงดูดและแบบผลักที่กระทำกับหุ่นยนต์ในแต่ละช่วงเวลา $v_{RO}(t)$

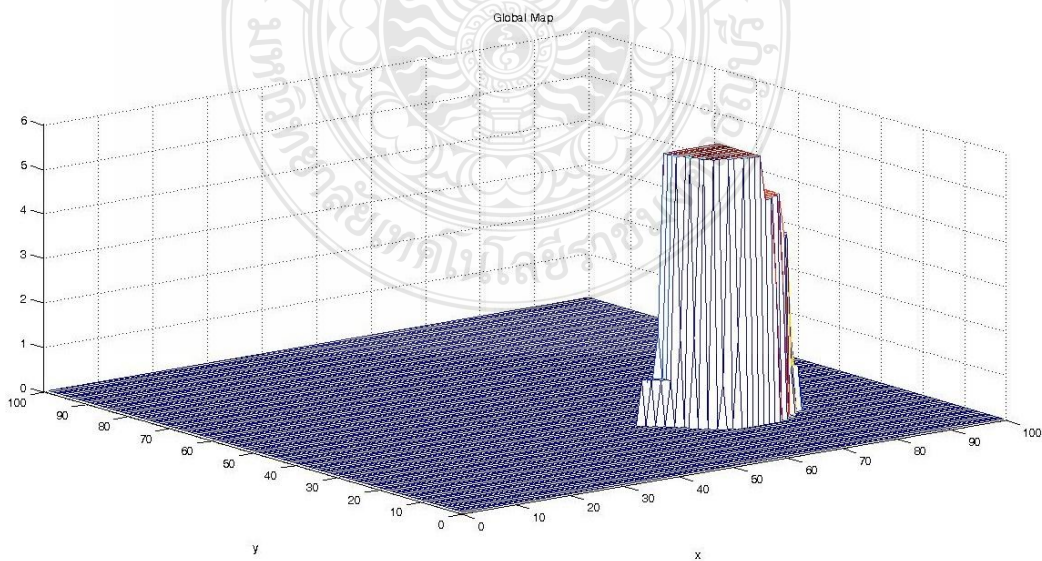
3.5 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง

ในเบื้องต้นของเทคนิคการตรวจสอบสิ่งกีดขวางนั้นได้มีการทดลองสมมติว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ในพื้นที่การทำงาน 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นสิ่งกีดขวางที่เป็นทรงกลมและชั้นที่สองเป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยที่สมมุติการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อยู่ภายในกรอบสีแดงซึ่งมีการทดสอบใน 2 ลักษณะคือเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขนานกับแกน x และหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขนานกับแกน y

3.5.1 การตรวจสอบสิ่งกีดขวางเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขนานกับแกน x



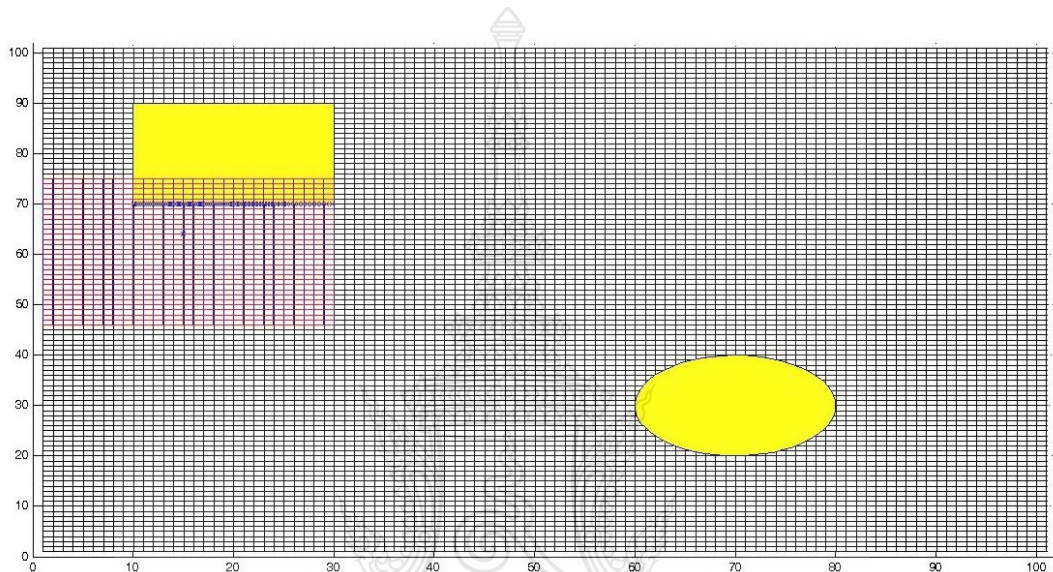
รูปที่ 3.13 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในแนวแกน x



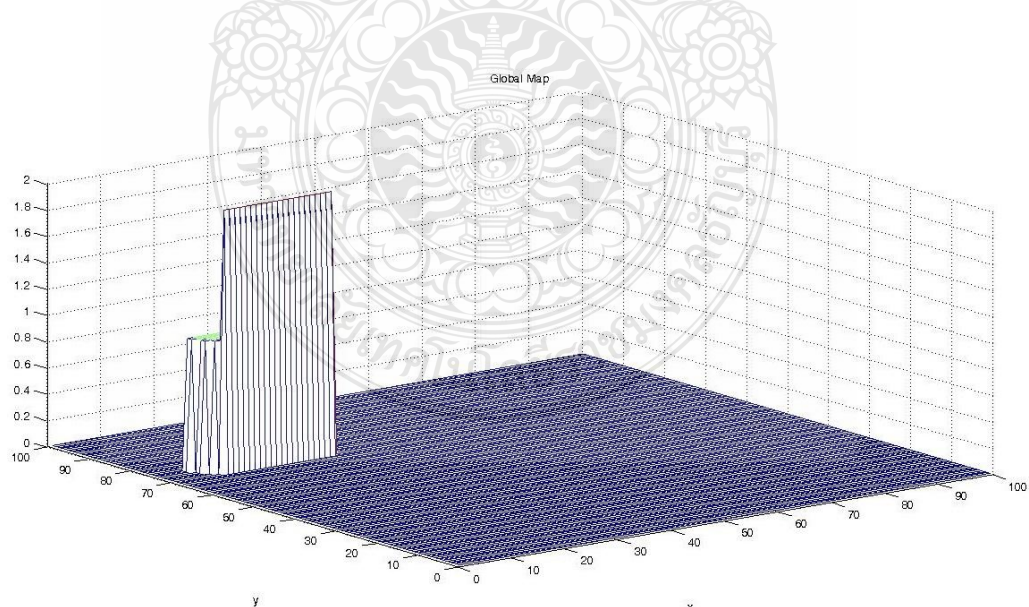
รูปที่ 3.14 ค่าดัชนีประจำตัวเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางเป็นรูปครึ่งวงกลม

จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในแนวแกน x และตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ซึ่งแสดงด้วยตารางสีแดงดังรูปที่ 3.13 และหรือทับกับสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน ช่องหรือตารางนั้นๆก็จะมีอาการอัปเดตให้มีความมากกว่าศูนย์อาจจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การตรวจพบของตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ดังรูปที่ 3.14 ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าที่บ่งบอก ถึงความน่าจะเป็นในการตรวจพบสิ่งกีดขวางที่แท้จริงในพื้นที่การทำงาน

3.5.2 การตรวจสอบสิ่งกีดขวางเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ขนานกับแกน y



รูปที่ 3.15 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในแนวแกน y



รูปที่ 3.16 ค่าดัชนีประจำตัวเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยม

เช่นเดียวกับกรณีที่ 1 คือในที่นี้สมมติให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวแกน y และมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน สังกัดจากรูปที่ 3.15 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนไปถึงตำแหน่งที่สิ่งกีดขวางวางอยู่ ตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ซึ่งแสดงด้วยตารางสีแดงดังรูปที่ 3.15 ก็จะทำงานเมื่อตัวมันเองแตะกับสิ่งกีดขวางและสามารถแสดงค่าดัชนีความน่าจะเป็นของตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริงดังรูปที่ 3.16

3.6 การหาค่าสัญญาณรบกวนแบบสุ่มจากเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และ เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ด้วยฟังก์ชันการกระจายแบบเกาส์เซียน

สำหรับการประเมินสมรรถนะของระบบนั้นความผิดพลาดแบบสุ่มสามารถเสนอเป็นข้อมูลทางคณิตศาสตร์ได้เพื่อนำไปรวมกับความผิดพลาดที่ทราบค่าในเวลาต่อมา โดยในทางปฏิบัตินั้นจะทำการสมมติให้ความผิดพลาดแบบสุ่มอยู่ภายในส่วนประกอบของระบบ INS ซึ่งมีลักษณะแบบเกาส์เซียนหรือการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นฟังก์ชันความหนาแน่นในความน่าจะเป็นกำหนดเป็น

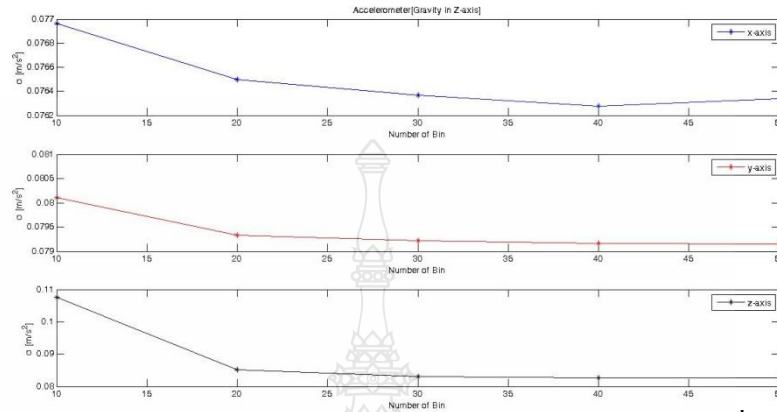
$$p_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

เมื่อค่าเฉลี่ย μ มีค่าเป็นศูนย์ โดยนำฟังก์ชันข้างต้นไปรวมกับการแก้สมการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาค่า σ หรือเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดแบบสุ่มของสัญญาณทั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

โดยทำการเก็บเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) แบบหยุดนิ่งที่ความถี่ 4 เฮิรตซ์ (HZ) เวลา 1 ชั่วโมงซึ่งมีการทดสอบ 3 สถานะคือ 1) ให้แรงดึงดูดอยู่ในแกน z 2) ให้แรงดึงดูดอยู่ในแกน y 3) ให้แรงดึงดูดอยู่ในแกน x

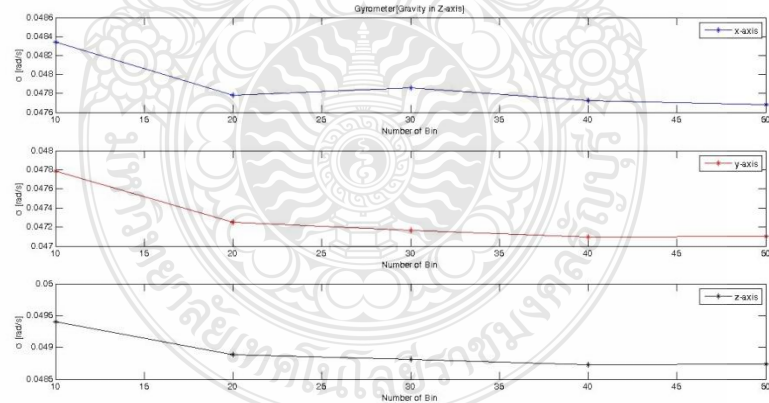
3.6.1 เมื่อแรงดึงดูดอยู่ในแกน z

- เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จะมีค่าความแปรปรวนของค่าความเร่งในทั้ง 3 แกน ดังนี้



รูปที่ 3.17 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผนภูมิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน z

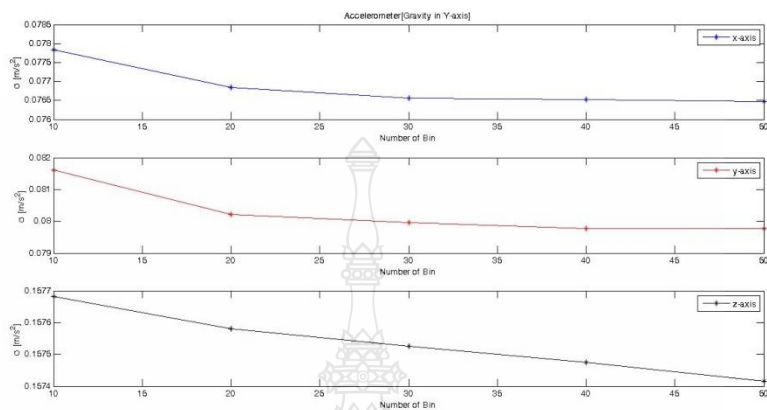
- เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะมีค่าความแปรปรวนของค่าความเร็วเชิงมุมในทั้ง 3 แกน ดังนี้



รูปที่ 3.18 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผนภูมิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน z

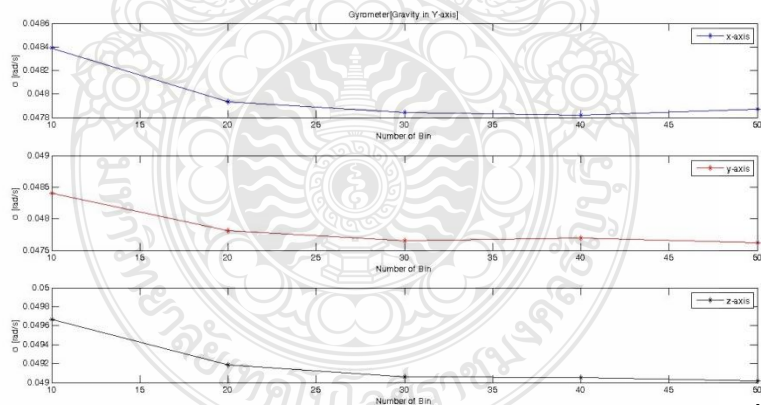
3.6.2 เมื่อแรงดึงดูดอยู่ในแกน y

- เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จะมีค่าความแปรปรวนของค่าความเร่งในทั้ง 3 แกน ดังนี้



รูปที่ 3.19 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน y

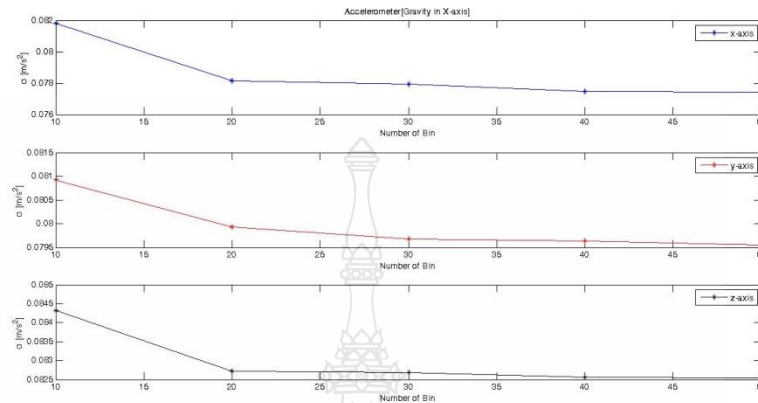
- เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะมีค่าความแปรปรวนของค่าความเร็วเชิงมุมในทั้ง 3 แกน ดังนี้



รูปที่ 3.20 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน y

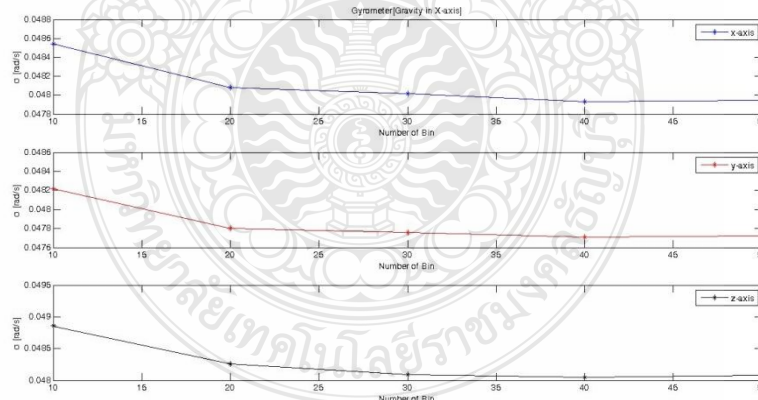
3.6.3 เมื่อแรงดึงดูดอยู่ในแกน x

- เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จะมีค่าความแปรปรวนของค่าความเร่งในทั้ง 3 แกน ดังนี้



รูปที่ 3.21 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน x

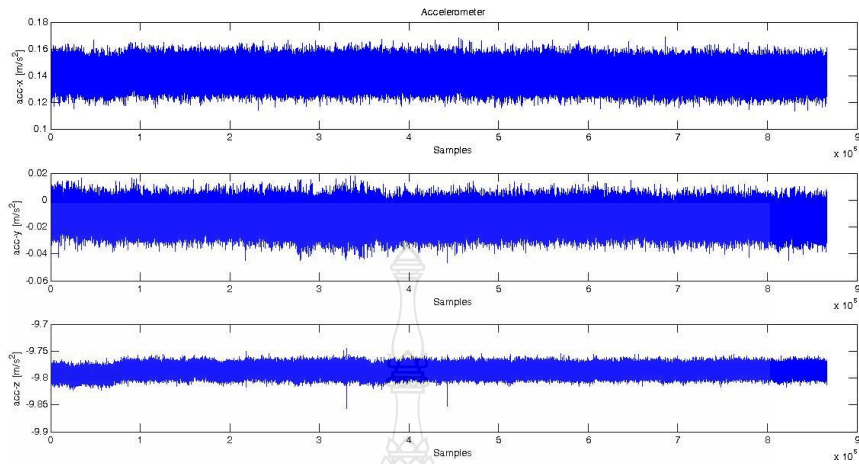
- เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) จะมีค่าความแปรปรวนของค่าความเร็วเชิงมุมในทั้ง 3 แกน ดังนี้



รูปที่ 3.22 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อแปรผันจำนวนแท่งของแผ่นกุ่มิแท่ง (Histogram) 10,20,30,40,50 แท่งและมีแรงดึงดูดอยู่ในแกน x

3.6.4 เมื่อเก็บข้อมูลเซนเซอร์วัดมุมเอียงประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) แบบอยู่กับที่เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ (Hz) ดังนั้นจึงหาสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียน ได้ดังนี้

3.6.4.1 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)



รูปที่ 3.23 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

3.6.4.2 สัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในแกน x เท่ากับ 0.005931019783020

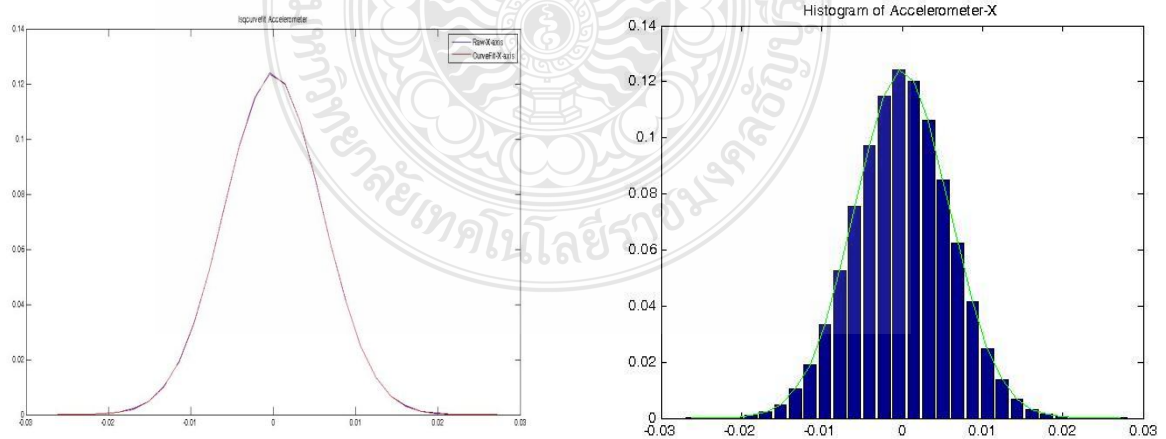
$$m^2 / s^4$$

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในแกน y เท่ากับ 0.006515145301819

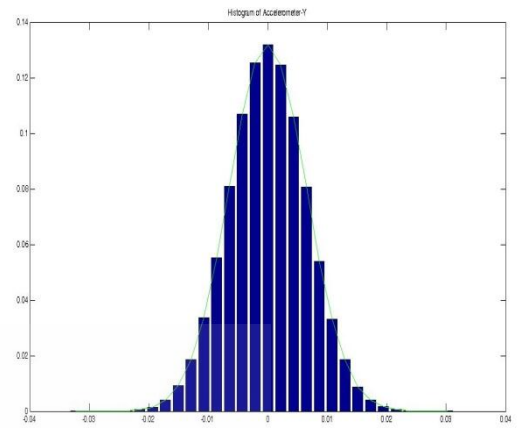
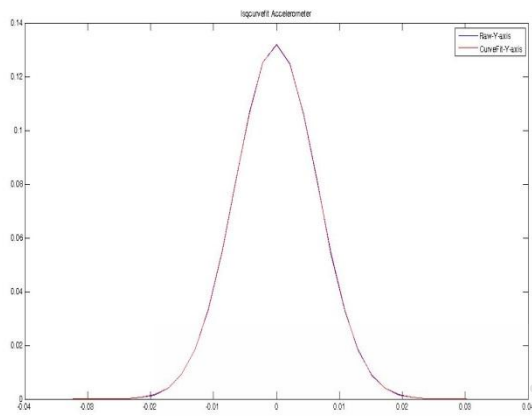
$$m^2 / s^4$$

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในแกน z เท่ากับ 0.007208049297333

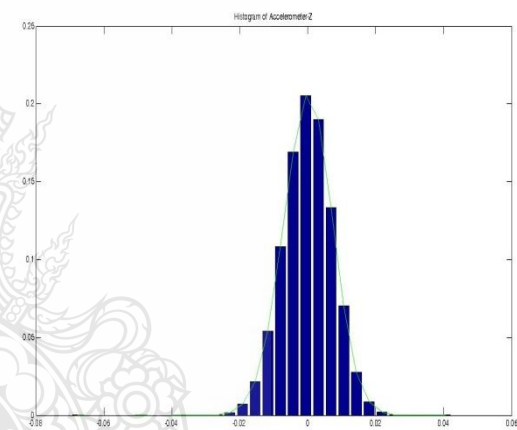
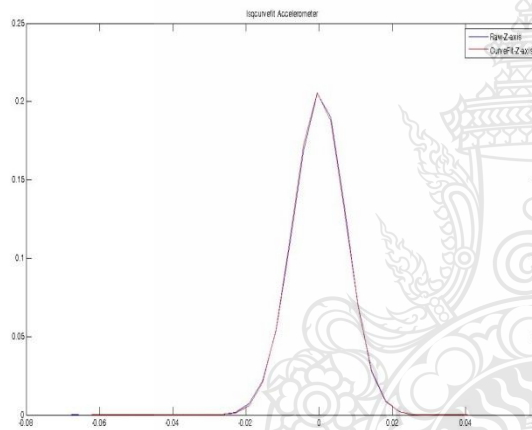
$$m^2 / s^4$$



รูปที่ 3.24 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน x

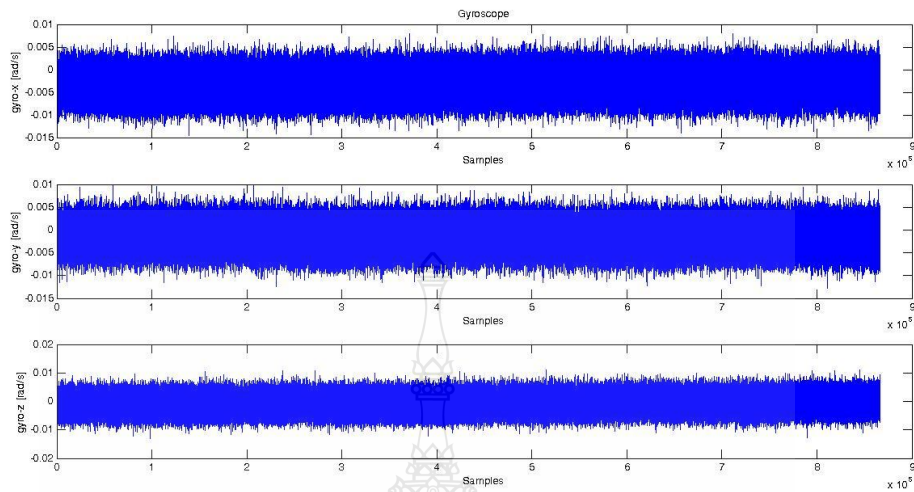


รูปที่ 3.25 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน y



รูปที่ 3.26 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน z

3.6.4.3 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)



รูปที่ 3.27 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

3.6.4.4 สัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

(Gyroscope)

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในแกน x เท่ากับ 0.002414047718048

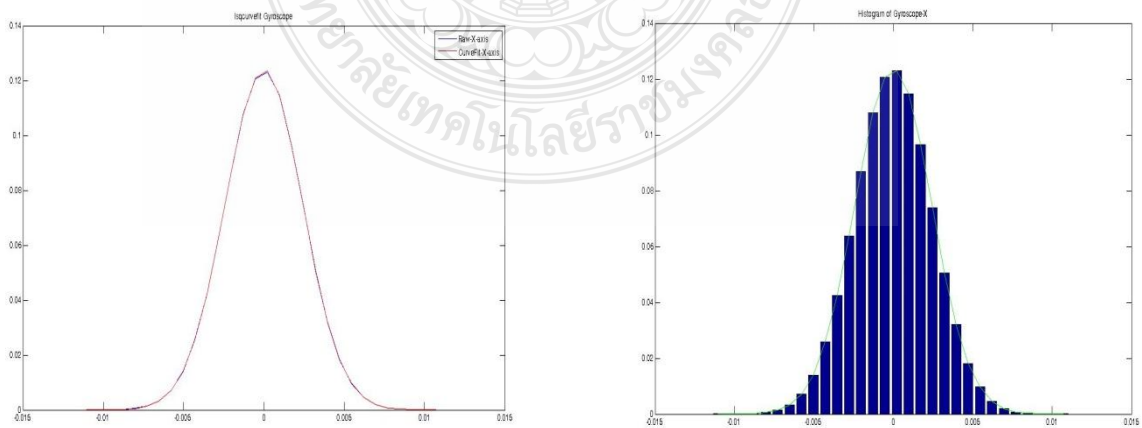
$$\text{rad}^2 / \text{s}^2$$

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในแกน y เท่ากับ 0.002395570278168

$$\text{rad}^2 / \text{s}^2$$

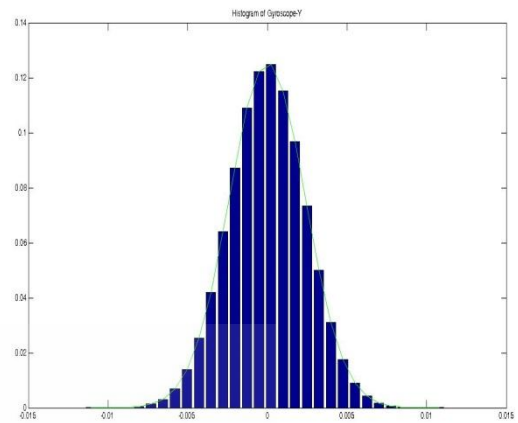
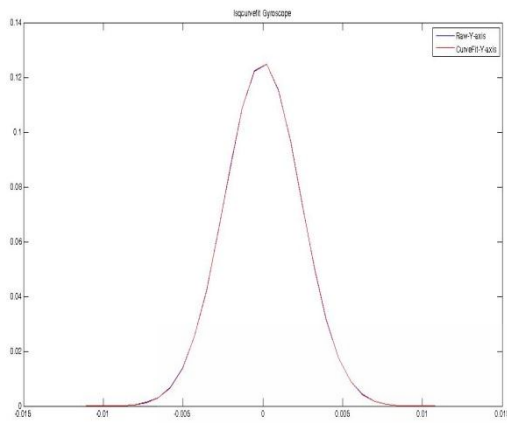
ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในแกน z เท่ากับ 0.002609252929688

$$\text{rad}^2 / \text{s}^2$$

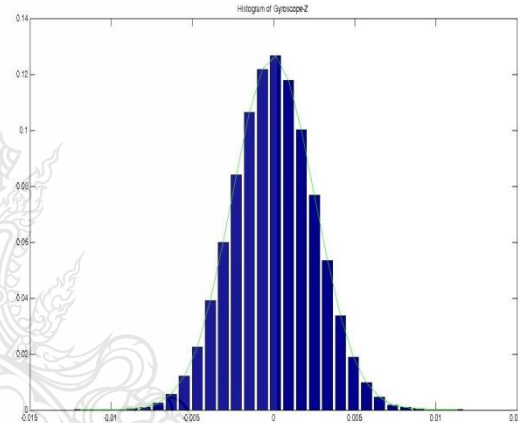
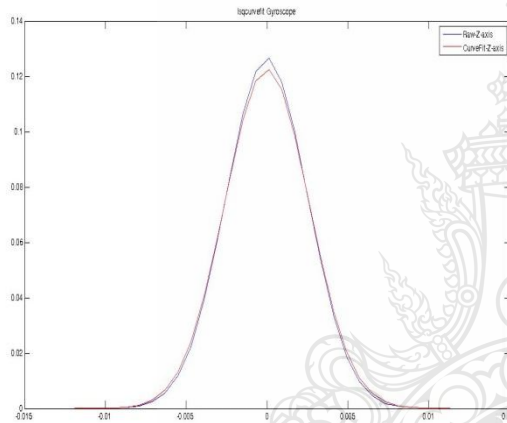


รูปที่ 3.28 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

(Gyroscope) ในแกน x



รูปที่ 3.29 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน y



รูปที่ 3.30 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนประเภทเกาส์เซียนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน z

3.7 การหาค่าความแปรปรวน (Variance) และค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เพื่อใช้ในตัวกรองคาลมาน

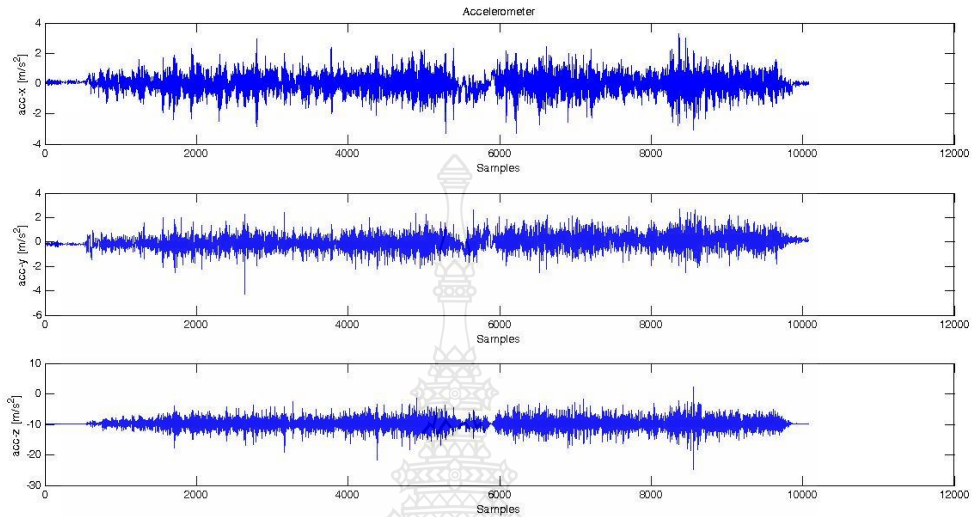
3.7.1 การหาค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) โดยการหาค่าความแปรปรวน (Variance) ในการคำนวณค่าความแปรปรวน (Variance) ของทั้งสองเซนเซอร์ข้างต้นจะกำหนดเป็นตัวแปร σ^2 เมื่อถือเซนเซอร์ทั้งสองแล้วมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 20 เมตรและทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายแบบเกาส์เซียนในการแก้หาค่าความแปรปรวนดังนี้

$$p_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.2)$$

เมื่อค่าเฉลี่ย (Mean) = 0 ดังนั้นจะได้

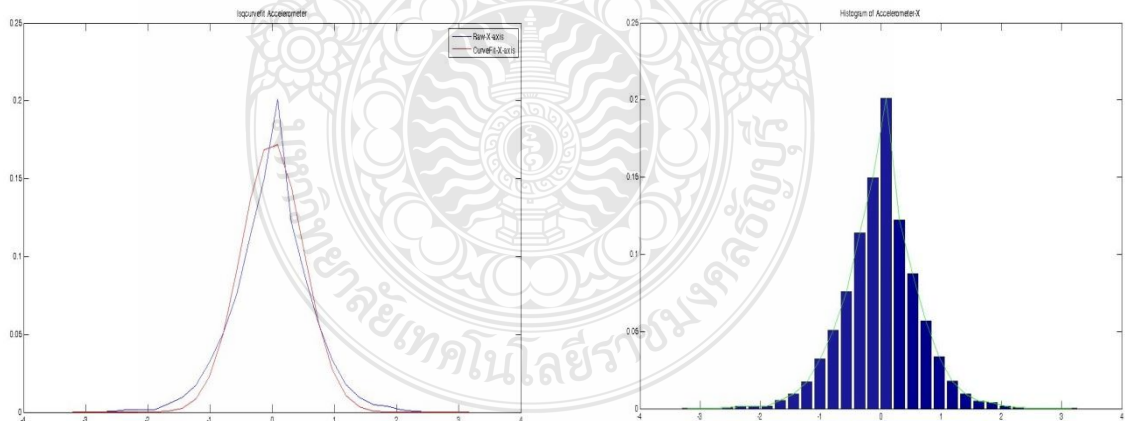
$$p_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.3)$$

3.7.1.1 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)



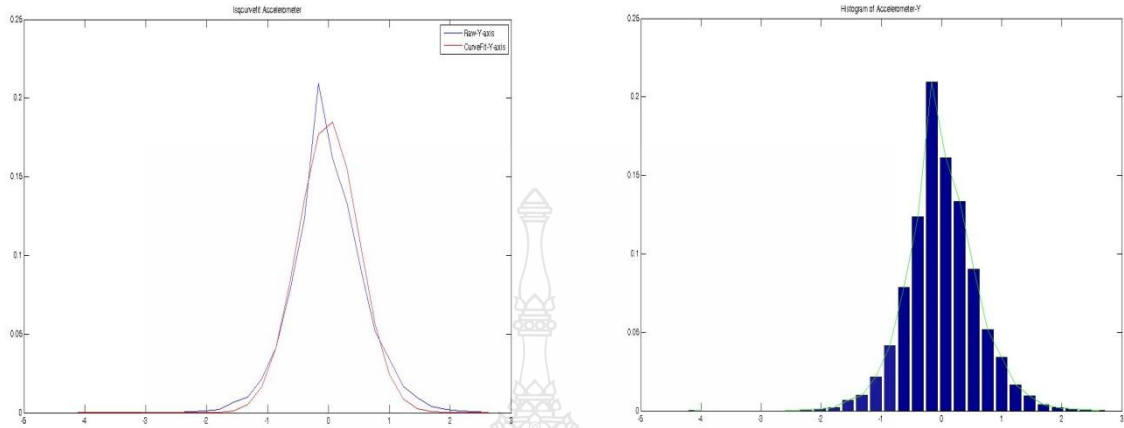
รูปที่ 3.31 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

3.7.1.2 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ของแกน x เท่ากับ $0.501981735229492 \text{ m}^2 / \text{s}^4$



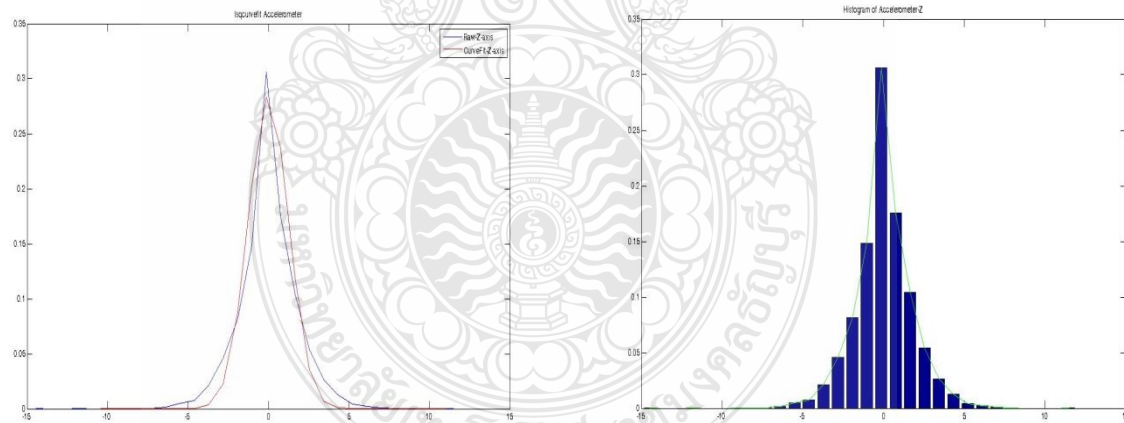
รูปที่ 3.32 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน x

3.7.1.3 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ของแกน y เท่ากับ $0.496154785156250 \text{ m}^2 / \text{s}^4$



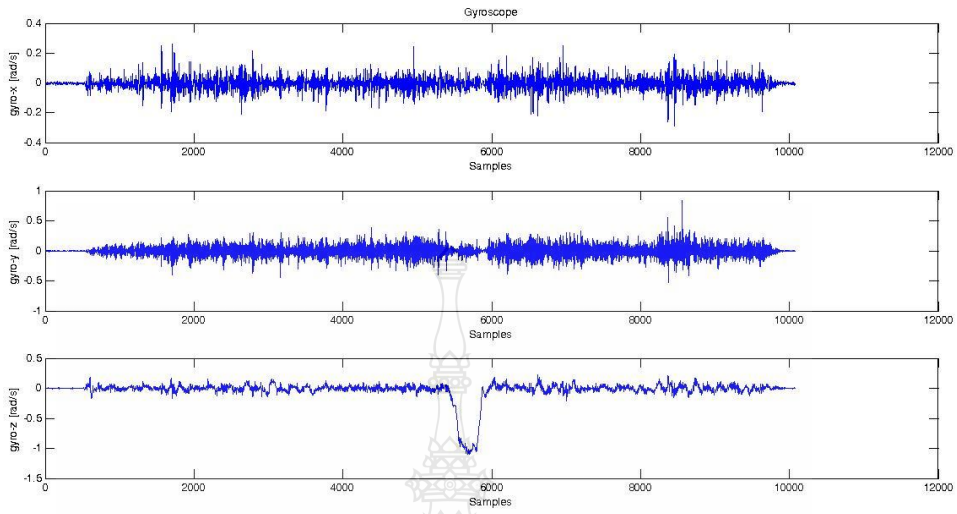
รูปที่ 3.33 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน y

3.7.1.4 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ของแกน z เท่ากับ $1.252075195312500 \text{ m}^2 / \text{s}^4$



รูปที่ 3.34 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในแกน z

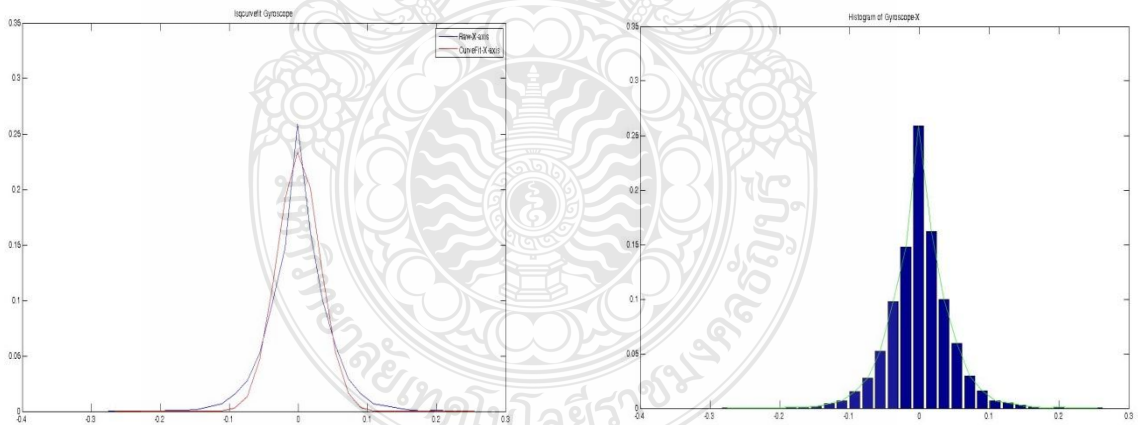
3.7.1.5 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)



รูปที่ 3.35 ข้อมูลจริงของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

3.7.1.6 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

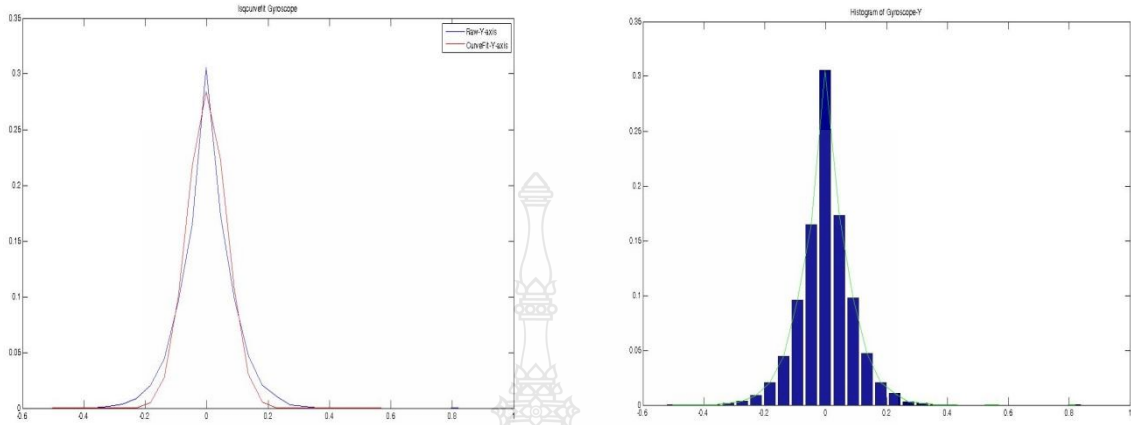
ของแกน x เท่ากับ $0.031209945678711 \text{ rad}^2 / \text{s}^2$



รูปที่ 3.36 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน x

3.7.1.7 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

ของแกน y เท่ากับ $0.064024090766907 \text{ rad}^2 / \text{s}^2$



รูปที่ 3.37 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน y

3.7.1.8 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

ของแกน z เท่ากับ $0.053151011466980 \text{ rad}^2 / \text{s}^2$



รูปที่ 3.38 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในแกน z

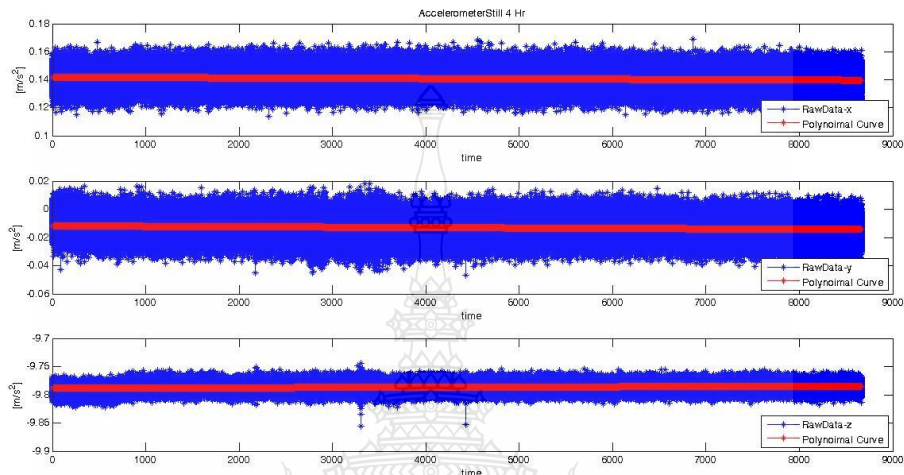
3.7.2 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) โดยในการหาค่านั้นจะใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับ 1 เข้ามาช่วยในการหาค่าซึ่งในที่นี้จะพิจารณาค่าอคติ (Bias) ที่เรียกว่าค่าอคติแบบเลื่อน (Bias Drift) ของตัวเซนเซอร์ซึ่งทำการเก็บข้อมูลแบบหยุดนิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อัตรา 100 เฮิรตซ์แล้วใช้การแก้สมการกำลังสองแบบค่าน้อยที่สุด (Least Square Solution) เพื่อใช้ในการคำนวณหรือประมาณค่าอคติ (Bias) ต่อไป

3.7.2.1 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เมื่อค่า

แกน x เท่ากับ $0.000000250706634 \text{ m}^2 / \text{s}^5$

แกน y เท่ากับ $0.000000290374159 \text{ m}^2 / \text{s}^5$

แกน z เท่ากับ $0.000000404774380 \text{ m}^2 / \text{s}^5$



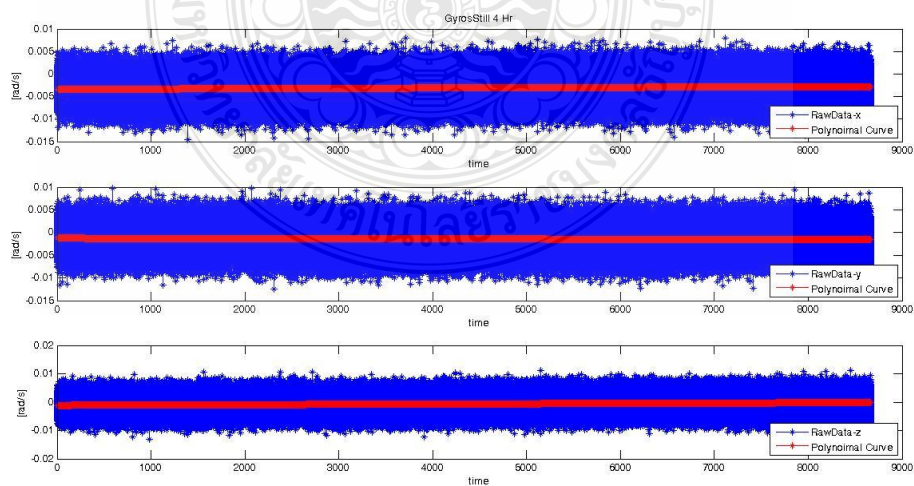
รูปที่ 3.39 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

3.7.2.2 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) เมื่อค่า

แกน x เท่ากับ $0.000000071597956 \text{ rad}^2 / \text{s}^3$

แกน y เท่ากับ $0.000000035825470 \text{ rad}^2 / \text{s}^3$

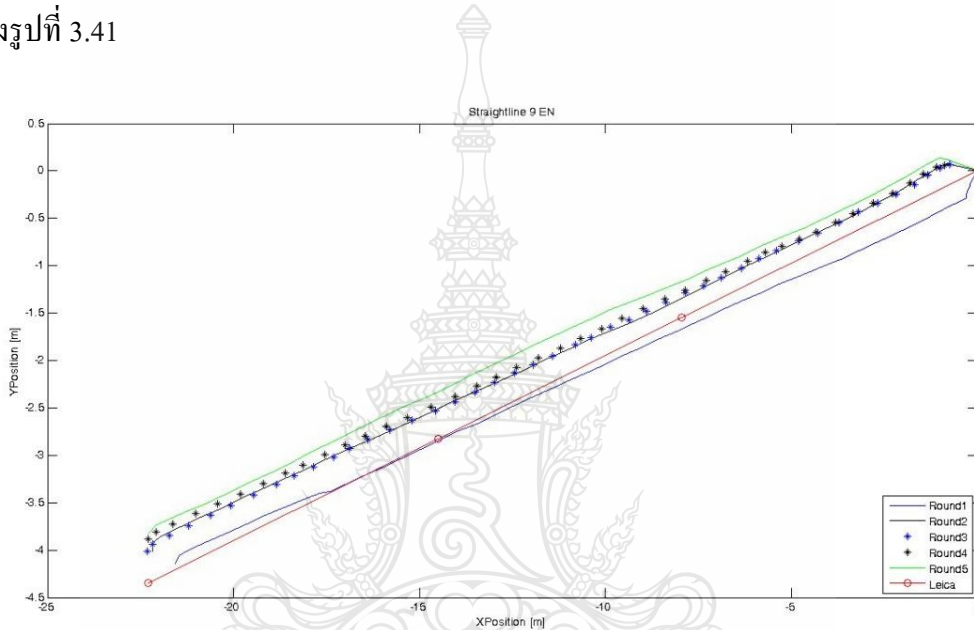
แกน z เท่ากับ $0.000000112601344 \text{ rad}^2 / \text{s}^3$



รูปที่ 3.40 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope)

3.8 การหาค่าความแปรปรวน (Variance) และค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เพื่อใช้ในตัวกรองกาลมาน

ในการเก็บข้อมูลเพื่อหาค่าความแปรปรวน (Variance) และค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จะทำการเก็บข้อมูลในการเดินเป็นเส้นตรงซ้ำๆกัน 5 ครั้ง โดยเส้นทางที่ใช้ในการเก็บข้อมูลนี้ จำเป็นที่จะต้องมิเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่มีความแม่นยำกว่าเป็นตัวอ้างอิงอีกด้วยซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการใช้เซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ยี่ห้อ Leica ที่มีความแม่นยำไม่เกิน 1 เมตร ซึ่งผลจากการเก็บข้อมูลจะแสดงดังรูปที่ 3.41



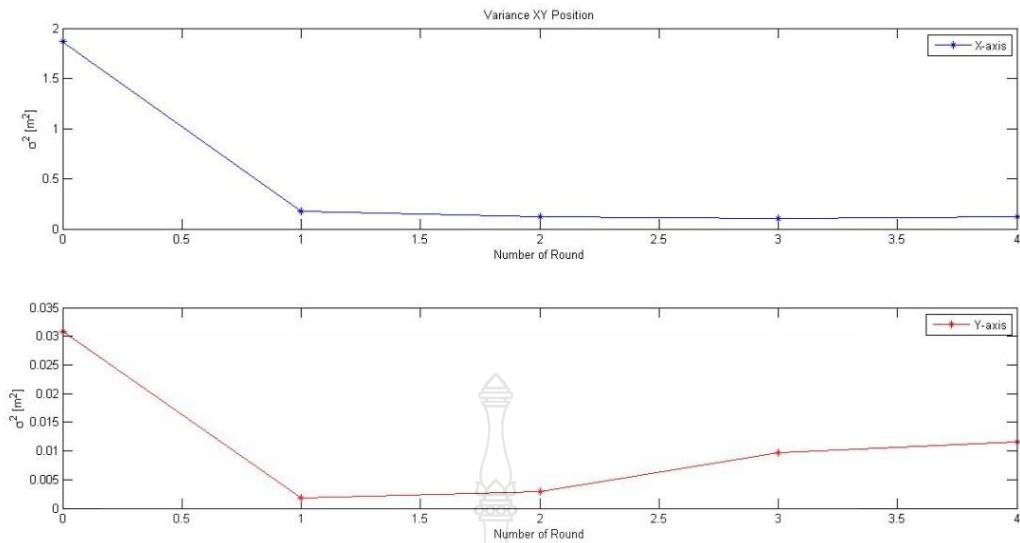
รูปที่ 3.41 แสดงข้อมูลจริงที่ได้จากการเก็บจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ซ้ำๆกัน 5 ครั้ง เมื่อมีเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่มีความแม่นยำกว่าเป็นตัวอ้างอิง (แสดงด้วยเส้นสีแดง)

3.8.1 การหาค่าความแปรปรวนจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)

ในการหาค่าความแปรปรวนจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จะต้องหาค่าความผิดพลาดของแต่ละชุดข้อมูลกับข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่มีความแม่นยำก่อนหลังจากนั้นจึงหาค่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดในแต่ละชุดข้อมูลและต้องมีการพิจารณาว่าข้อมูลชุดไหนไม่เข้าพวกจึงตัดออก สุดท้ายจะนำชุดข้อมูลที่เหลือมาเฉลี่ยหาค่าความแปรปรวนทั้งในแกน x และแกน y ดังต่อไปนี้

$$\text{แกน } x = 0.132654087466685 \text{ m}^2$$

$$\text{แกน } y = 0.004273874069435 \text{ m}^2$$



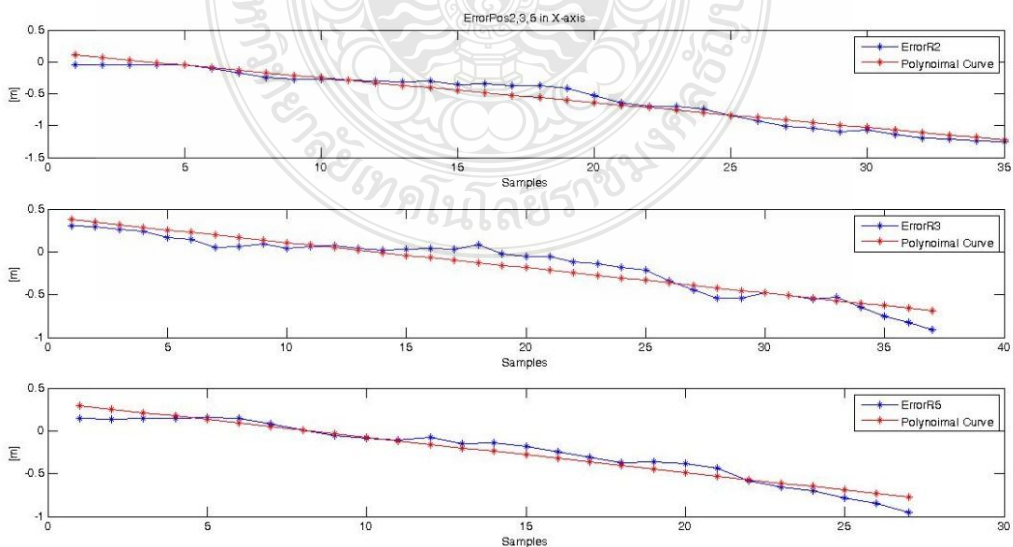
รูปที่ 3.42 ค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในแนวแกน x และแกน y

3.8.2 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)

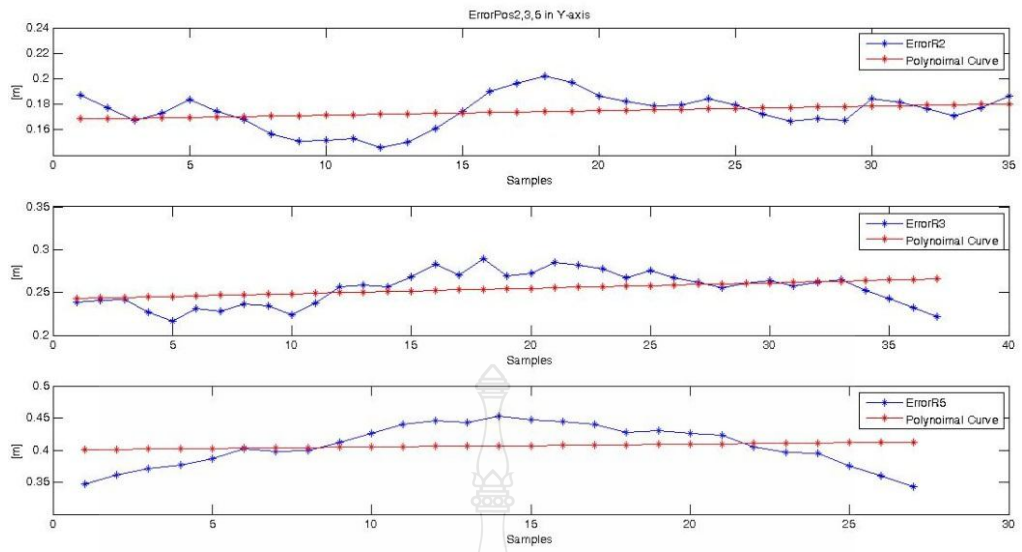
โดยในการหาค่าอคติ (Bias) นั้นจะใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับ 1 เข้ามาช่วยในการหาค่า ซึ่งจะใช้ข้อมูลเดียวกันกับการหาค่าความแปรปรวน (Variance) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาและเลือกใช้เฉพาะข้อมูลชุดที่ 2,3 และ 5 ดังนั้นค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ทั้งแกน x และแกน y มีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{แกน x} = 0.036600485479633 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{แกน y} = 4.772285638466190\text{e-}004 \text{ m}^2 / \text{s}$$



รูปที่ 3.43 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในแนวแกน x



รูปที่ 3.44 ค่าอคติ (Bias) ของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ในแนวแกน y



บทที่ 4

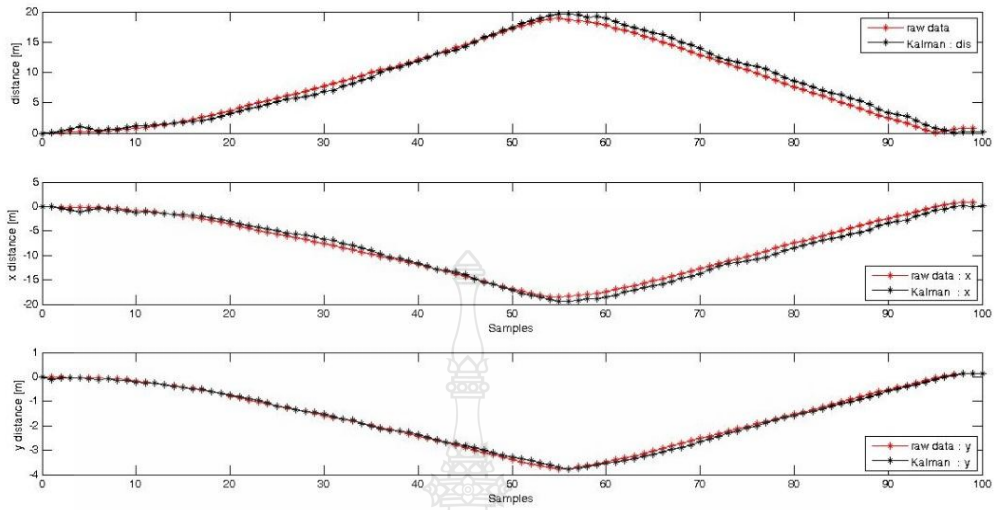
ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทดสอบการทำงานและตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้แล้ว ในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงโดยใช้เซนเซอร์ต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นในการรับรู้ค่าสภาวะแวดล้อม โดยจะแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนหลักหลัก คือ 1) ผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) โดยใช้ตัวกรองคาลมาน 2) ผลการตรวจสอบสิ่งกีดขวางในสภาวะแวดล้อมจริง 3) ผลการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและการนำทางอัตโนมัติ

4.1 การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ในการเดินเป็นเส้นตรงที่ระยะ 20 เมตร

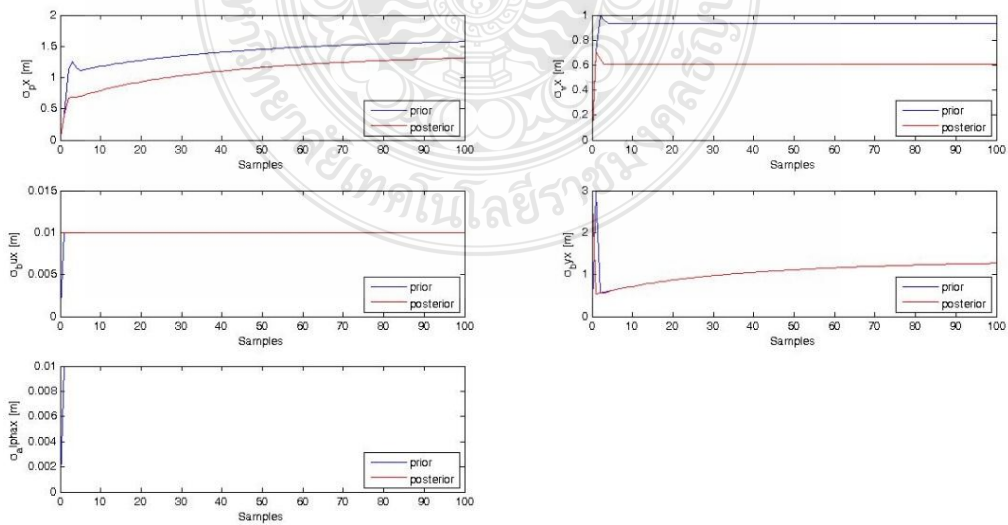
ในการนำทางภายนอกอาคารที่มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีค่าเซนเซอร์บอกพิกัดตำแหน่งที่ดี โดยในได้มีการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เพื่อความราบเรียบและเที่ยงตรงในการนำทางของหุ่นยนต์ ซึ่งในเบื้องต้นได้มีการทดสอบการทำงานของการบูรณาการข้อมูลผ่านการเดินเป็นเส้นตรงที่ระยะ 20 เมตรโดยเอียงขึ้นมาจากทิศตะวันออกเล็กน้อยเมื่อกำหนดให้ในทิศเหนือเป็นแกน y และทิศตะวันออกเป็นแกน x ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นการทดสอบความถูกต้องของตัวกรองคาลมานเท่านั้น ดังนั้นในการทดสอบการทำงานของตัวกรองคาลมานจึงทดสอบแบบนำมาประมวลผลภายหลัง (Off-Line) เพียงแบบเดียว

4.1.1 ผลการบูรณาการเซนเซอร์โดยใช้ตัวกรองคาลมาน

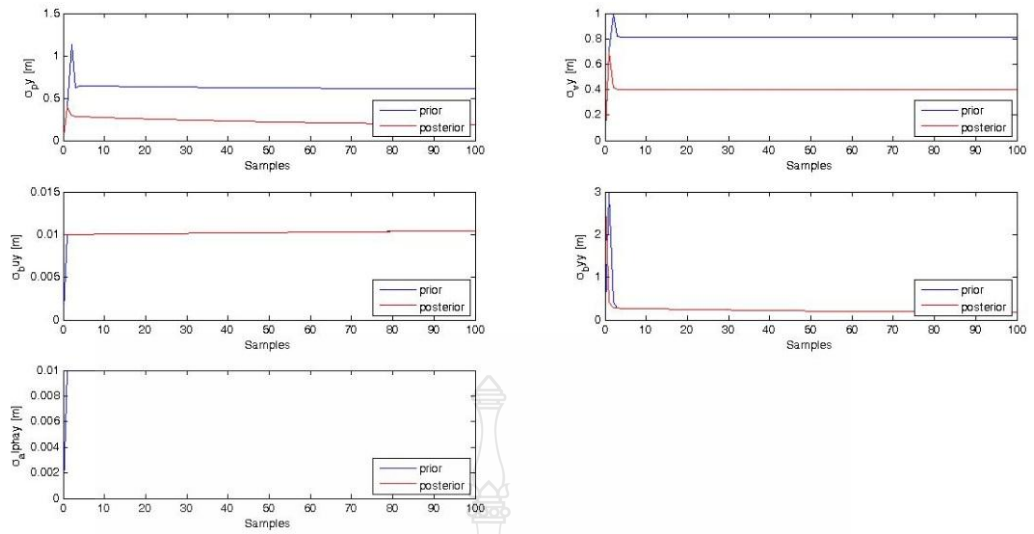


รูปที่ 4.1 แสดงผลจากการบูรณาการข้อมูลเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

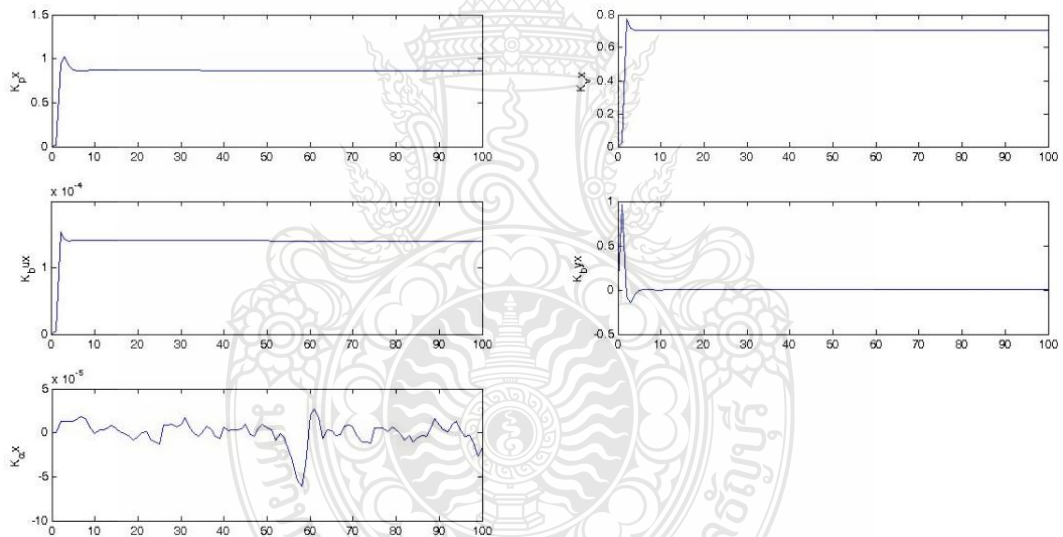
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้มาจากการบูรณาการเซนเซอร์นี้มีระยะที่ใกล้เคียงกับระยะเป้าหมาย (ระยะทาง = 20 เมตร) โดยที่ระยะเริ่มต้นจะเริ่มที่ 0 เมตรและกลับมาที่ระยะ 0 เมตรแสดงด้วยเส้นสีดำดังรูปที่ 4.1 ซึ่งระยะทางที่ได้จากข้อมูลจริงจะเริ่มที่ระยะ 0 เมตรแต่เมื่อสิ้นสุดการทดสอบจะไม่กลับมาที่ตำแหน่งเดิม โดยมีระยะความห่างจากจุดเริ่มต้นประมาณ 50 เซนติเมตรดังแสดงด้วยเส้นสีแดงในรูปที่ 4.1



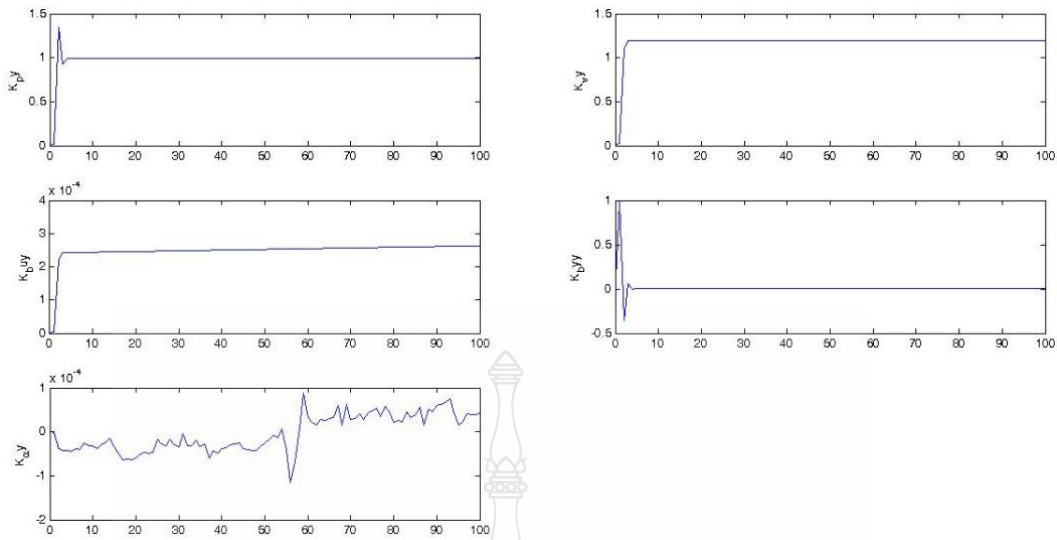
รูปที่ 4.2 ค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของข้อมูลในแกน x (P_x^- สำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้า (Prior) และ P_x^+ สำหรับการปรับแก้ค่า (Posterior))



รูปที่ 4.3 ค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของข้อมูลในแกน y (P_y^- สำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้า (Prior) และ P_y^+ สำหรับการปรับแก้ค่า (Posterior))



รูปที่ 4.4 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของข้อมูลในแกน x (K_x)



รูปที่ 4.5 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของข้อมูลในแกน y (K_y)

ในการบูรณาการเซนเซอร์ผ่านตัวกรองคาลมานั้นตัวแปรที่จำเป็นต้องแสดงผลออกมาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องคือค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 และค่าอัตราขยายของตำแหน่งทั้งในแกน x และแนวแกน y ดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ดังนั้นผลที่ได้จากการบูรณาการข้อมูลเซนเซอร์นี้เป็นการทดสอบการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบนำมาประมวลผลภายหลัง (Off-Line) และต่อไปจะมีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับระบบนำทางแบบประมวลผล ณ ขณะจริง (On-Line) ต่อไป

4.2 ผลการจำลองเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ใน MATLAB/Simulink

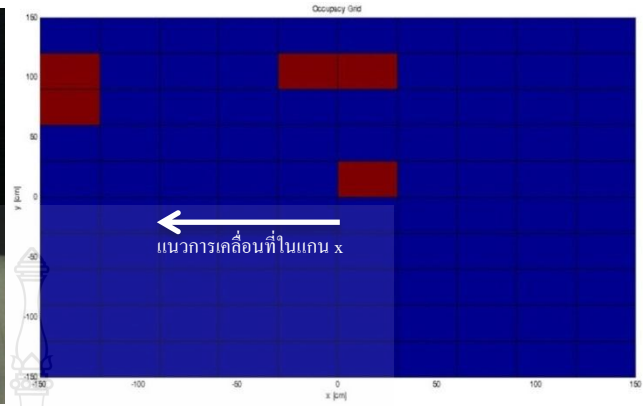
ในเบื้องต้นของการตรวจสอบสิ่งกีดขวางนั้น ได้มีการทดสอบภายในอาคารโดยสมมติให้มีการเคลื่อนที่ของเลเซอร์สแกนเนอร์ทั้งในแกน x และแกน y มีค่าคงที่ ซึ่งได้แบ่งตารางเป็น 10 x 10 เซลล์ โดยความกว้างแต่ละช่องเป็น 30 x 30 เซนติเมตรทั้งการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแกน y ดังนี้

4.2.1 มีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหน้าเลเซอร์สแกนเนอร์ 2 ชั้นและเลเซอร์เคลื่อนเข้าใกล้วัตถุตามแนวแกน x ด้วยระยะการเคลื่อนที่ครั้งละ 30 เซนติเมตร

- ตำแหน่งเริ่มต้น



(ก) การวัดระยะด้วยเลเซอร์



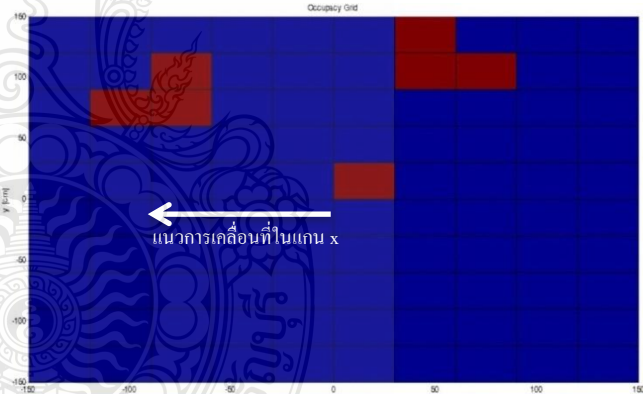
(ข) ตารางแผนที่ (Occupancy-Grid)

รูปที่ 4.6 แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่งเริ่มต้นในแกน x

- ตำแหน่งเมื่อเคลื่อนที่ไป 60 เซนติเมตร



(ก) การวัดระยะด้วยเลเซอร์



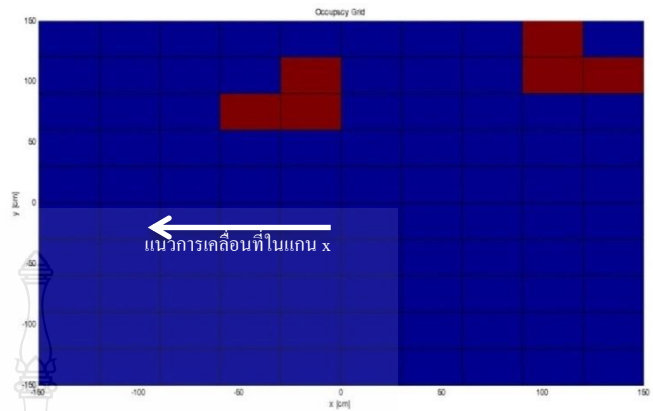
(ข) ตารางแผนที่ (Occupancy-Grid)

รูปที่ 4.7 แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน x เป็นระยะทาง 60 เซนติเมตร

- ตำแหน่งเคลื่อนที่ไป 120 เซนติเมตร



(ก) การวัดระยะด้วยเลเซอร์



(ข) ตารางแผนที่ (Occupancy-Grid)

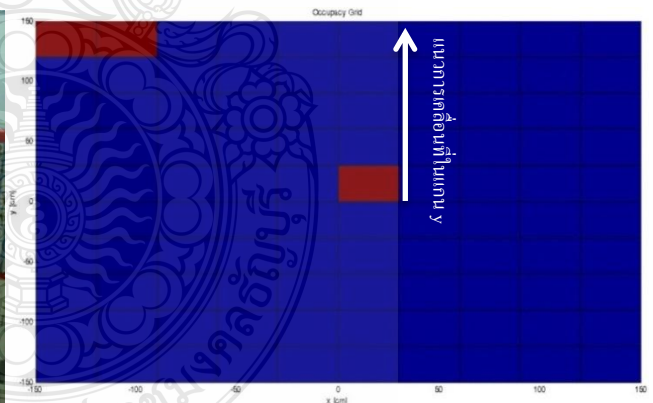
รูปที่ 4.8 แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน x เป็นระยะทาง 120 เซนติเมตร

4.2.2 มีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหน้าเลเซอร์สแกนเนอร์ 2 ชั้นและเลเซอร์เลื่อนเข้าไปวัดตามแนวแกน y ด้วยระยะการเคลื่อนที่ครั้งละ 30 เซนติเมตร

- ตำแหน่งเริ่มต้น



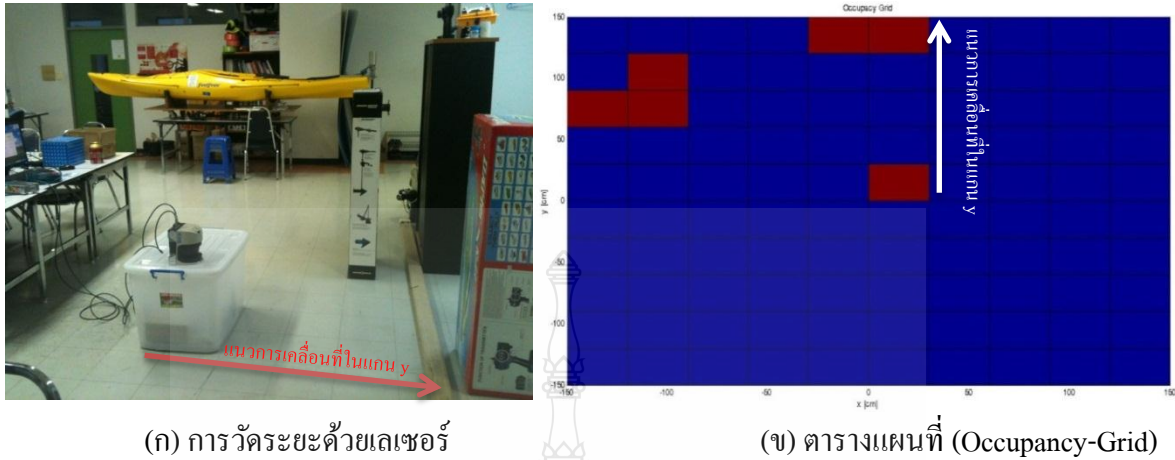
(ก) การวัดระยะด้วยเลเซอร์



(ข) ตารางแผนที่ (Occupancy-Grid)

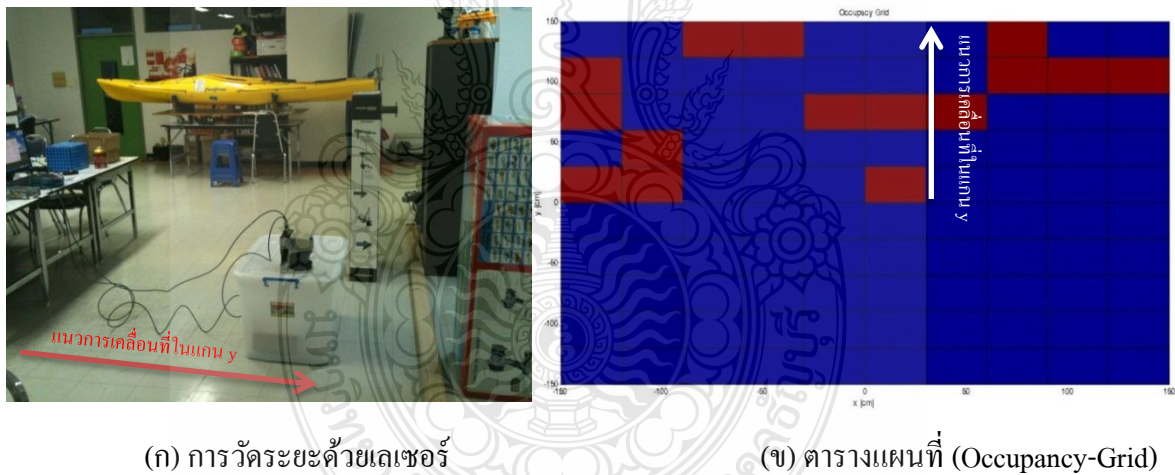
รูปที่ 4.9 แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางที่ตำแหน่งเริ่มต้นในแกน y

- ตำแหน่ง 60 เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน y เป็นระยะทาง 60 เซนติเมตร

- ตำแหน่ง 120 เซนติเมตร



รูปที่ 4.11 แสดงการสแกนสิ่งกีดขวางเมื่อเคลื่อนที่ในแกน y เป็นระยะทาง 120 เซนติเมตร

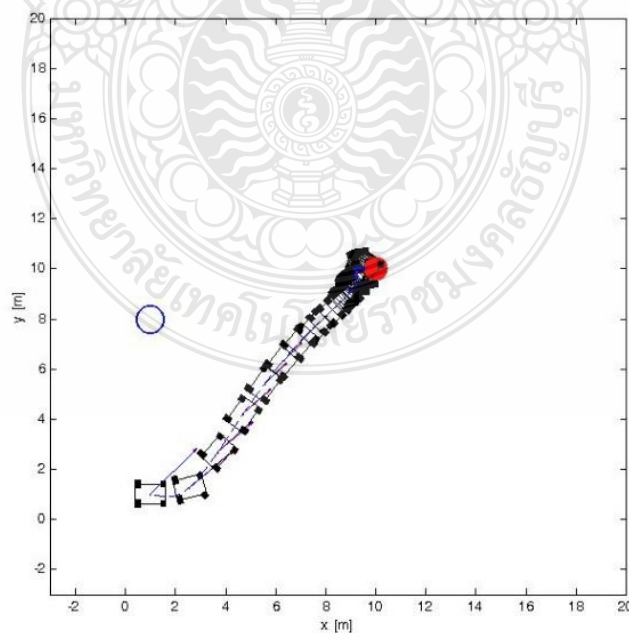
4.3 ผลการจำลองการทำงานของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เมื่อใช้ร่วมกับ จลนศาสตร์ของรถและเทคนิค การป้อนกลับเชิงเส้น (Feedback Linearization)

4.3.1 เมื่อสิ่งกีดขวางอยู่กับที่

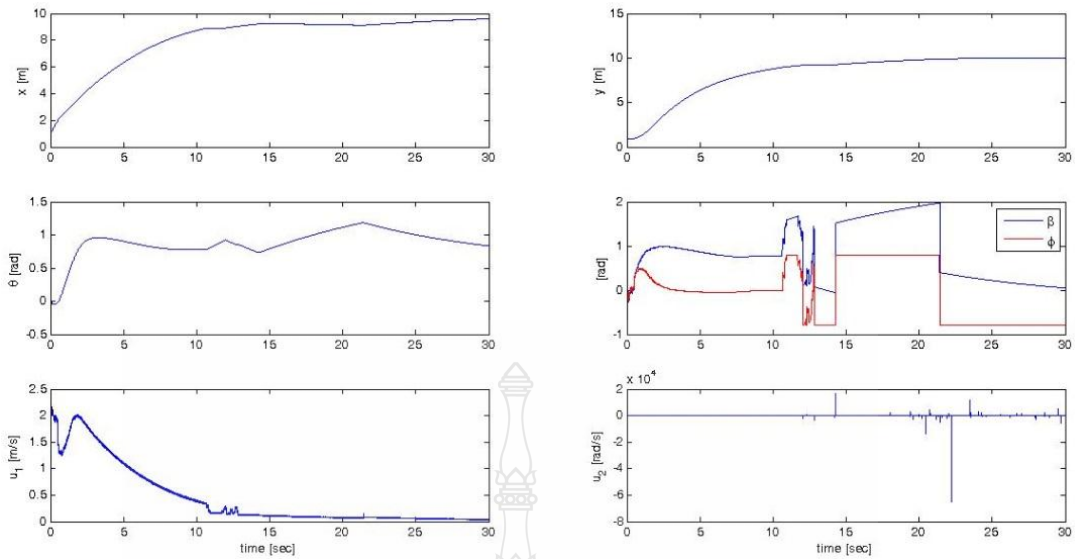
เพื่อแสดงผลจากการรวมเทคนิคสนามศักย์ (Potential Filed) และเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) เข้าด้วยกันจึงต้องมีการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถในปริภูมิ 2 มิติเพื่อทดสอบความสามารถของเทคนิคนี้ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและไปยัง

เป้าหมายได้สำเร็จโดยใช้การวางแผนการเคลื่อนที่ที่มาจากการรวมกันของ 2 เทคนิคนั่นเอง โดยจะนำเสนอผลการจำลองการหลบหลีกสิ่งกีดขวางใน 2 รูปแบบด้วยกันคือ 1) ในพื้นที่ทดสอบมีสิ่งกีดขวาง 1 หรือ 2 ชั้นอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างจุดเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมายและ 2) ในพื้นที่การทำงานมีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยจะสมมติให้สิ่งกีดขวางมีลักษณะเป็นรูปวงกลมและในการจำลองการเคลื่อนที่จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับเทคนิคการแก้สมการเชิงอนุพันธ์แบบรังกาคุดต้า (Runge-Kutta) โดยใช้ช่วงเวลาที่คงที่ ($\Delta t = 0.001$ วินาที) โดยขนาดของรถมีความยาว 1.2 เมตรความกว้าง 0.8 เมตรและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรถเริ่มต้นอยู่ที่ (0,0), มีมุมหันเห (Heading Angle) = 0 องศา, มุมเลี้ยวเริ่มต้นของล้อหน้าอยู่ที่ 0 องศา เมื่อค่าคงที่ในการควบคุมแบบป้อนกลับเชิงเส้นประกอบด้วย $k_p = 1$, $k_{f1} = 1$, $k_{f2} = 2.5$ และ $\alpha = 1$ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางและด้วยข้อจำกัดคือล้อหน้าจะเลี้ยวไม่เกิน 45 องศาและมีเป้าหมายอยู่ในแนวทแยงมุม 45 องศาหรือเป้าหมายอยู่ที่ตำแหน่ง (10, 10) เมตร

ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบแรกนั้นจะมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นแบบอยู่กับที่อยู่ที่ตำแหน่ง (1, 8) เมตร และตำแหน่งเป้าหมายอยู่ที่ $(x_{tar}, y_{tar}) = (10, 10)$ เมตร เบื้องต้นหุ่นยนต์จะคำนวณหาแรงผลัก (Repulsive Force) และแรงดึงดูด (Attractive Force) จากตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่อยู่ในพื้นที่การทำงานและนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) ซึ่งจะเห็นว่าหุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ภายใน 19 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยตัวแปรของหุ่นยนต์ที่ได้จากการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.13

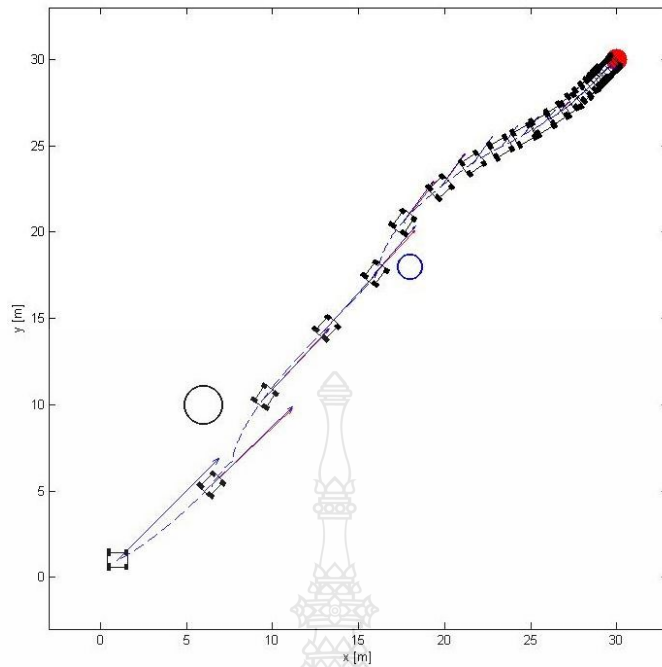


รูปที่ 4.12 การจำลองการวางแผนการเคลื่อนที่และแสดงแรงรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รวมทั้งเส้นทางการเคลื่อนที่ เมื่อมีสิ่งกีดขวางที่อยู่กับที่ 1 ชั้น อยู่ในพื้นที่การทำงานอยู่ที่ตำแหน่ง (1, 8) เมตร

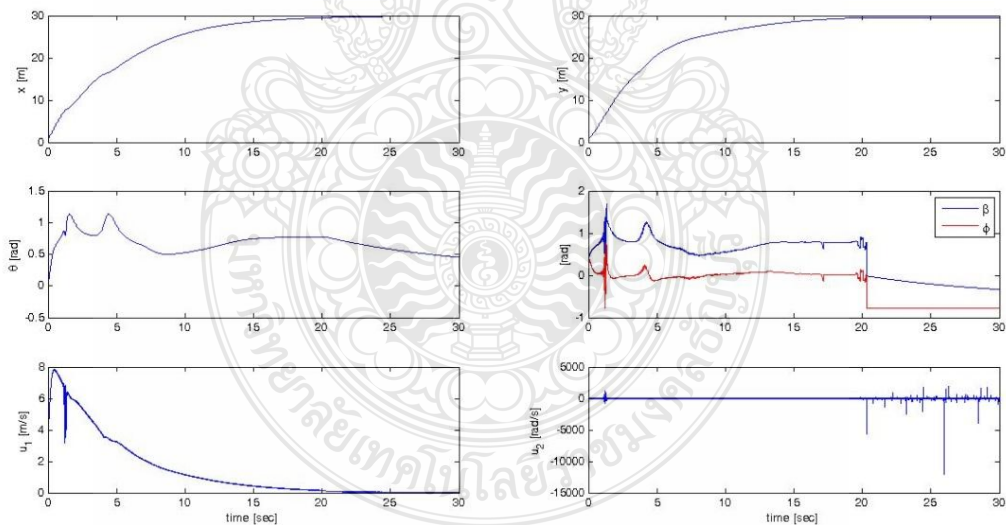


รูปที่ 4.13 ตัวแปรของหุ่นยนต์และตัวแปรในการควบคุมประกอบด้วย ตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแกน x และแกน y (สองรูปบน), มุมหัวรถ (θ), มุมเลี้ยว (ϕ), มุมเลี้ยวเมื่อเทียบกับแกน x (β) (สองรูปกลาง), อินพุตสำหรับล้อหน้า (u_1), อินพุตสำหรับล้อหลัง (u_2) (สองรูปล่าง) ในกรณีหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่ 1 ชั้น

ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบสองชั้นจะมีสิ่งกีดขวาง 2 ชั้นแบบอยู่กับที่และตำแหน่งเป้าหมายอยู่ที่ $(x_{tar}, y_{tar}) = (30, 30)$ เมตร ชั้นแรกอยู่ที่ตำแหน่ง (6, 10) เมตร และชั้นที่สองอยู่ที่ตำแหน่ง (18, 18) เมตร เทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) จะสร้างคำสั่งแบบป้อนกลับและใช้แรงเสถียรภาพที่หามาจากฟังก์ชันศักย์ (Potential Function) ในแต่ละเวลา โดยขนาดและทิศทางของแรงเสถียรภาพที่กระทำต่อหุ่นยนต์ทุก 1 วินาทีจะแสดงโดยลูกศรในรูปที่ 4.14 นอกจากนั้นแล้วเส้นโคจรการเคลื่อนที่จะแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 4.14 ด้วยเช่นกัน ซึ่งตัวแปรทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์จะแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์จะสามารถเลี้ยวออกห่างสิ่งกีดขวางและกลับเข้ามายังเส้นทางในแนวทแยงเพื่อไปยังเป้าหมายได้ซึ่งแรงเสถียรภาพแบบคิงคูดเริ่มต้นจะมีขนาดใหญ่และจะค่อยๆ ลดลงไปสู่ศูนย์เมื่อใกล้เป้าหมายภายใน 30 วินาที ดังนั้นหุ่นยนต์จะสามารถลดความเร็วและหยุดลงที่ตำแหน่งเป้าหมายได้ ส่วนแรงเสถียรภาพแบบผลักจะมีขนาดใหญ่เฉพาะเมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหน้าตัวหุ่นยนต์



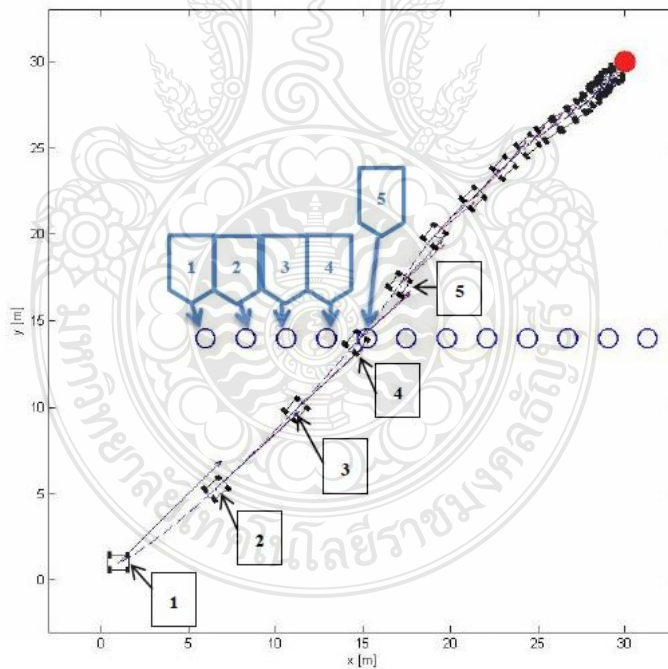
รูปที่ 4.14 การจำลองการวางแผนการเคลื่อนที่กับแรงรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รถเมื่อมีสิ่งกีดขวางที่อยู่กับที่ 2 ชั้นอยู่ในพื้นที่การทำงาน ชั้นแรกอยู่ที่ตำแหน่ง (6, 10) เมตร และชั้นที่สองอยู่ที่ตำแหน่ง (18, 18) เมตร



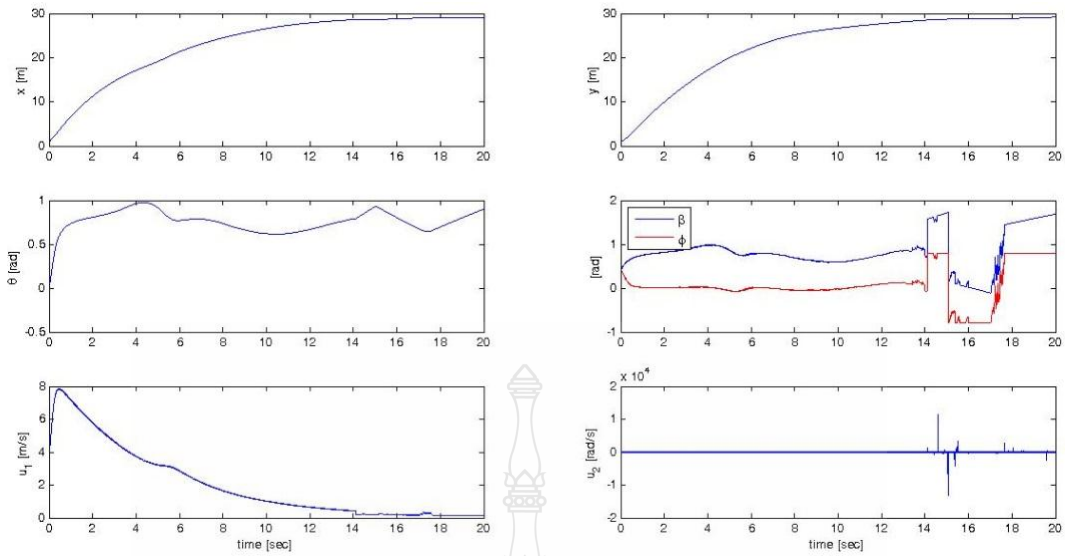
รูปที่ 4.15 ตัวแปรของหุ่นยนต์และตัวแปรในการควบคุมประกอบด้วย ตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแกน x และแกน y (สองรูปบน), มุมหัวรถ (θ), มุมเลี้ยว (ϕ), มุมเลี้ยวเมื่อเทียบกับแกน x (β) (สองรูปกลาง), อินพุตสำหรับล้อหน้า (u_1), อินพุตสำหรับล้อหลัง (u_2) (สองรูปล่าง) ในกรณีหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่ 2 ชั้น

4.3.2 เมื่อสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาสถานะแวดล้อมที่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงนั่นคือ มีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตามเวลาจึงได้ทำการจำลองในแบบที่ 2 เมื่อสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ตามแนวนอนหรือแนวแกน x ด้วยความเร็ว 2.3 เมตรต่อวินาที ดังนั้นการวางแผนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถอาจจะใช้ทั้งค่าตำแหน่งและความเร็วของสิ่งกีดขวางในการคำนวณหาอินพุตที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ เช่นเดียวกับในกรณีแรกก็จะแสดงลูกศรของแรงเสมือนรวมและเส้นประของเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังในรูปที่ 4.16 และแสดงตัวแปรทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์รวมถึงตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ดังรูปที่ 4.17 โดยแสดงแรงเสมือนรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รถทุกๆ 1 วินาทีและเส้นโคจรของหุ่นยนต์นั้นคำนวณมาจากเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) โดยตำแหน่งเริ่มต้นของสิ่งกีดขวางอยู่ที่ตำแหน่ง (6, 20) เมตร และจะแสดงตำแหน่งใหม่ทุกๆ วินาทีซึ่งจะตัดกับเส้นทางของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย ซึ่งรูปที่ 4.16 จะแสดงให้เห็นเส้นโคจรของหุ่นยนต์ที่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่ได้และสามารถมุ่งไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้ภายใน 20 วินาที



รูปที่ 4.16 การจำลองการวางแผนการเคลื่อนที่พร้อมกับแรงเสมือนรวมที่กระทำต่อหุ่นยนต์รถเมื่อมีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ตามแนวแกน x ด้วยความเร็ว 2.3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.17 ตัวแปรของหุ่นยนต์และตัวแปรในการควบคุมประกอบด้วย ตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแกน x และแกน y (สองรูปบน), มุมหัวรถ (θ), มุมเลี้ยว (ϕ), มุมเลี้ยวเมื่อเทียบกับแกน x (β) (สองรูป กลาง), อินพุตสำหรับล้อหน้า (u_1), อินพุตสำหรับล้อหลัง (u_2) (สองรูปล่าง) ในกรณีหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบเคลื่อนที่ 1 ชั้น

4.4 การตรวจสอบสิ่งกีดขวางโดยใช้เทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ในสภาพแวดล้อมจริง

ก่อนที่จะมีการทดสอบการหลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้นปัจจัยหรือตัวแปรที่สำคัญคือ ตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบที่ถูกต้องและแม่นยำเพื่อควมมีประสิทธิภาพในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ดังนั้นจึงมีการทดสอบระบบการตรวจวัดสิ่งกีดขวางที่ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) นำข้อมูลมาบูรณาการร่วมกับเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ที่ติดตั้งบนรถเซ็น โดยให้สิ่งกีดขวางอยู่หนึ่งกับที่แล้วจึงเคลื่อนรถเซ็นที่เสมือนหุ่นยนต์รถเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวาง หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความถูกต้องและความเสมือนจริงว่าระบบการตรวจวัดสิ่งกีดขวางสามารถนำไปใช้กับระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์รถได้หรือไม่ โดยสิ่งกีดขวางนั้นเป็นกล่องที่มีความกว้าง 30 เซนติเมตรและสูง 80 เซนติเมตร

ในการตรวจสอบสิ่งกีดขวางครั้งนี้นั้นได้มีการตั้งค่าตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ให้มีความกว้าง 4 ตาราง ความยาว 4 ตาราง โดยในแต่ละตารางจะมีขนาด 4 ตารางเมตรและตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) จะมีความกว้าง 30 ตารางและความยาว 30 ตารางเช่นเดียวกัน ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีคือ 1) เมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 8 เมตร 2) เมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 10 เมตร เมื่อเซนเซอร์ทั้งหมดนั้นถูกกำหนดให้ส่งข้อมูลมาประมวลผลในคอมพิวเตอร์ด้วยความถี่ 1 เฮิรตซ์ (HZ)

4.4.1 เมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 8 เมตร

ในการเริ่มต้นการทดสอบนั้นได้มีการติดตั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียง และเลเซอร์สแกนเนอร์บนรถเข็นเพื่อทำการทดสอบดังรูปที่ 4.18 และทำการทดสอบเข็นรถเสมือนว่ารถเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวาง เมื่อรถเข็นห่างจากสิ่งกีดขวางเป็นระยะประมาณ 4 เมตรหรือสิ่งกีดขวางเข้ามาอยู่ในตารางพิกัดเฉพาะที่ (Local Grid) ดังรูปที่ 4.19 ระบบก็จะสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าหุ่นยนต์ได้และที่ระยะ 10 เมตรซึ่งเป็นระยะที่สิ้นสุดการทดสอบ ระบบจะไม่สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางเนื่องจากหุ่นยนต์นั้นได้โดยสิ่งกีดขวางมาแล้วดังนั้นเซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) จะไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ ดังรูปที่ 4.20

- เริ่มต้นการทดสอบ



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งเริ่มต้นการทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยการติดตั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเลเซอร์สแกนเนอร์บนรถเข็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร

- ระหว่างตรวจจับสิ่งกีดขวาง



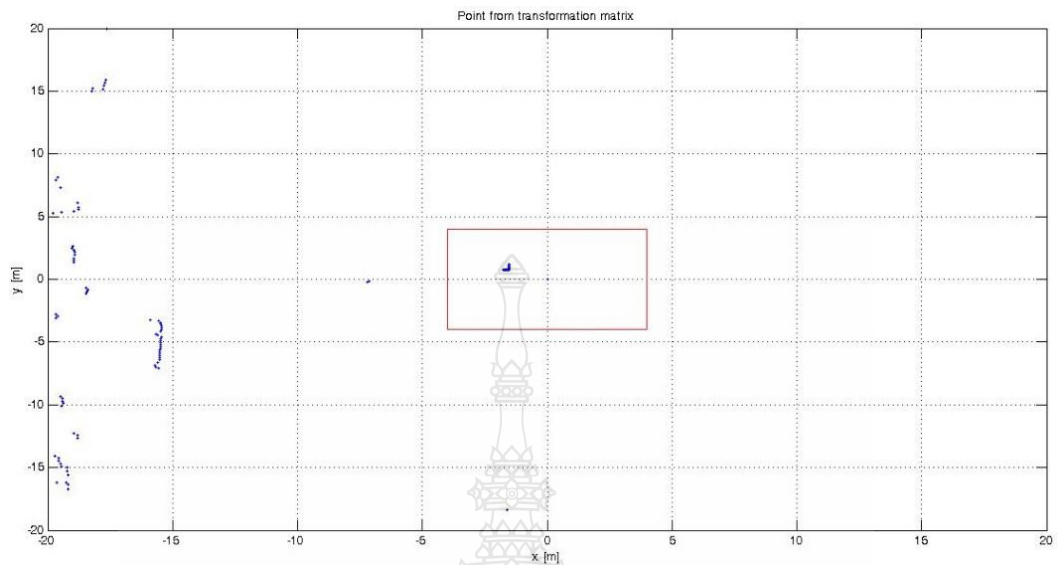
รูปที่ 4.19 ขณะตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานที่ระยะ 4 เมตร เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร

- สิ้นสุดการทดสอบที่ระยะ 10 เมตร

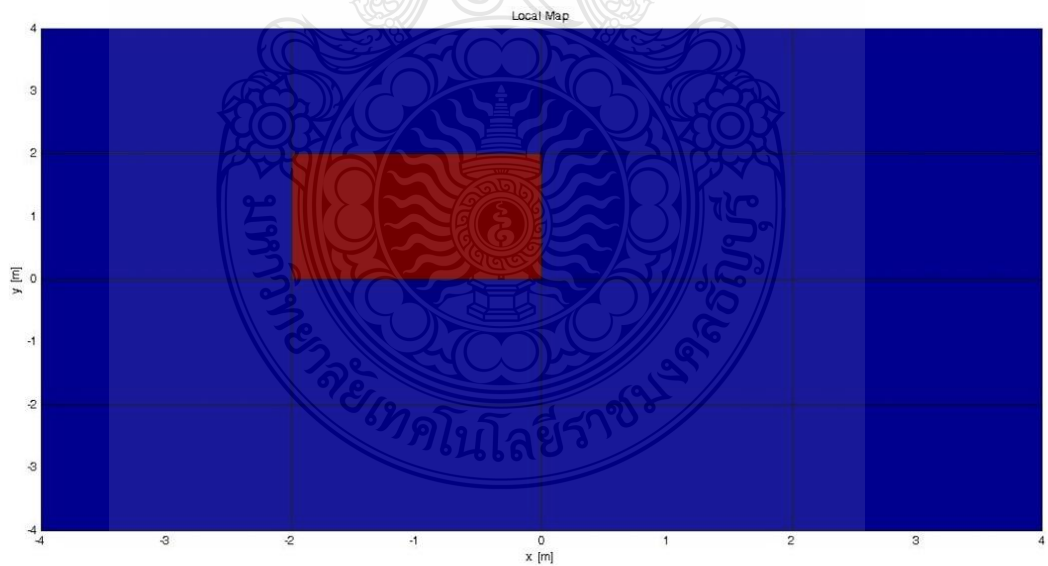


รูปที่ 4.20 เมื่อสิ้นสุดการทดสอบรถเข็นอยู่ที่ระยะ 10 เมตร และสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 8 เมตร ห่างจากจุดเริ่มต้น

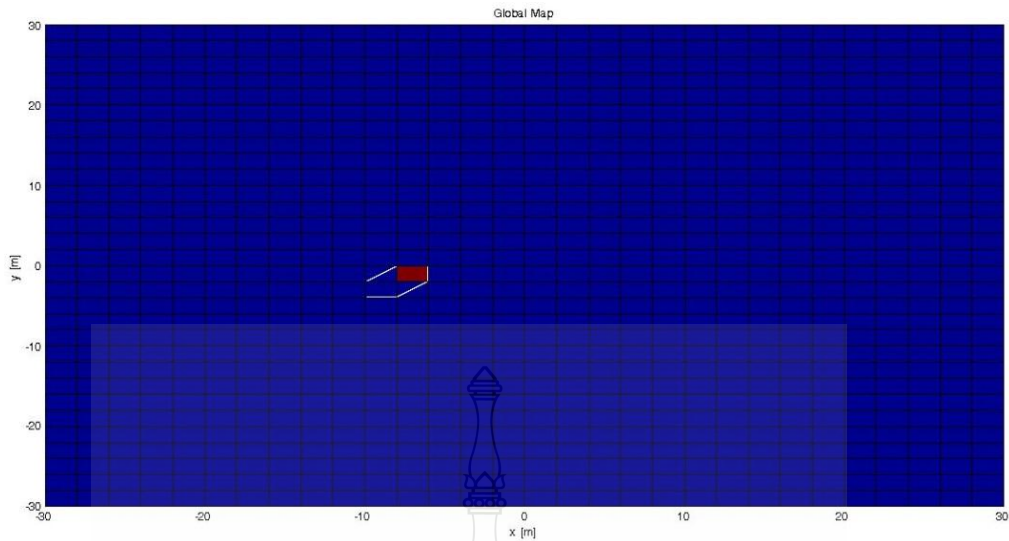
- ผลการตรวจสอบสิ่งกีดขวางที่ระยะ 8 เมตร



รูปที่ 4.21 ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ข้อมูลของสิ่งกีดขวางที่ได้จากเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) ในตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid: กรอบสีแดง) เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้น เป็นระยะทาง 8 เมตร



รูปที่ 4.22 ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) เมื่อตรวจสอบพบสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร



รูปที่ 4.23 ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เมื่อทำการอัปเดตจากข้อมูลแบบตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) โดยมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 8 เมตร

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่ออุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ไปถึงระยะที่ตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) จะสามารถรับรู้ได้ (4, 4) เมตร แผนที่ตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid Map) จะทำการอัปเดตตัวเองว่าเจอสิ่งกีดขวางในทิศทางไหนในแนวการเคลื่อน หลังจากนั้นจึงนำค่าในแผนที่ตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid Map) ที่อัปเดตแล้วไปทำการอัปเดตแผนที่ตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid Map) ต่อไปซึ่งในแผนที่ตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid Map) นี้เองจะนำค่าดัชนีจากแผนที่มาทำการหาตำแหน่งที่แท้จริงของสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน ผลที่ได้นั่นคือเมื่ออุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ไปถึงระยะแกน $x = 6.5$ เมตรจากทิศเหนือไปยังทิศใต้และแกน $y = 0$ เมตร เทคนิคการสร้างแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) จะสามารถตรวจสอบสิ่งกีดขวางได้ค่าออกมาอยู่ที่ตำแหน่งคือ $x = 8$ เมตร, $y = 1$ เมตร ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับระยะของสิ่งกีดขวางในภาคสนามจริงมากคือ อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 8$ เมตร, $y = 0.8$ เมตร

4.4.2 เมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 10 เมตร

ในการเริ่มต้นการทดสอบครั้งนี้นั้นได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสิ่งกีดขวางให้มีระยะในแนวแกน x ที่ไกลขึ้นคือ 10 เมตรรวมทั้งมีการวางสิ่งกีดขวางไว้ 1 ชั้นที่ตำแหน่ง $x = 10$ เมตร, $y = 0.8$ เมตร โดยมีการติดตั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเลเซอร์สแกนเนอร์บนอุปกรณ์ทดสอบเช่นเดียวกับกรณีแรกดังรูปที่ 4.24 หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบเสมือนว่ารถเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวางและเมื่อถึงระยะประมาณ 6 เมตรดังรูปที่ 4.25 ระบบก็จะสามารถตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานได้และที่ระยะ 10 เมตรซึ่งเป็นระยะที่สิ้นสุดการทดสอบ ระบบจะไม่สามารถตรวจจับสิ่งกีด

ขวางได้เนื่องจากรถเข็นได้เคลื่อนที่เกินระยะของสิ่งกีดขวางไปแล้วทำให้เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) ไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังรูปที่ 4.26

- เริ่มการทดสอบ



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งเริ่มต้นการทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยการติดตั้งเซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเลเซอร์สแกนเนอร์บนรถเข็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร



- ระหว่างตรวจจับสิ่งกีดขวาง



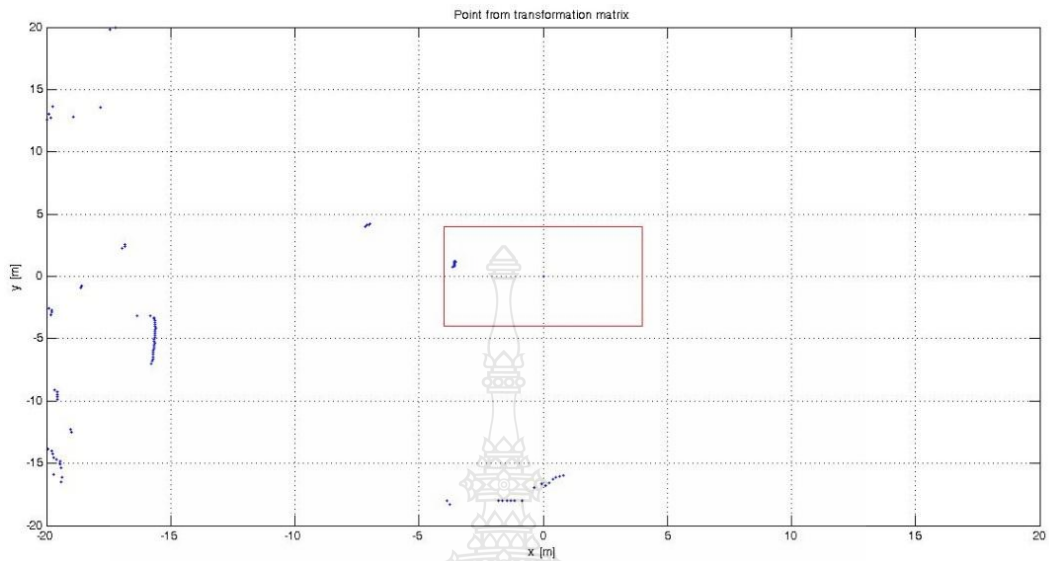
รูปที่ 4.25 ขณะตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานที่ระยะ 6 เมตร เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร

- สิ้นสุดการทดสอบที่ระยะ 10 เมตร

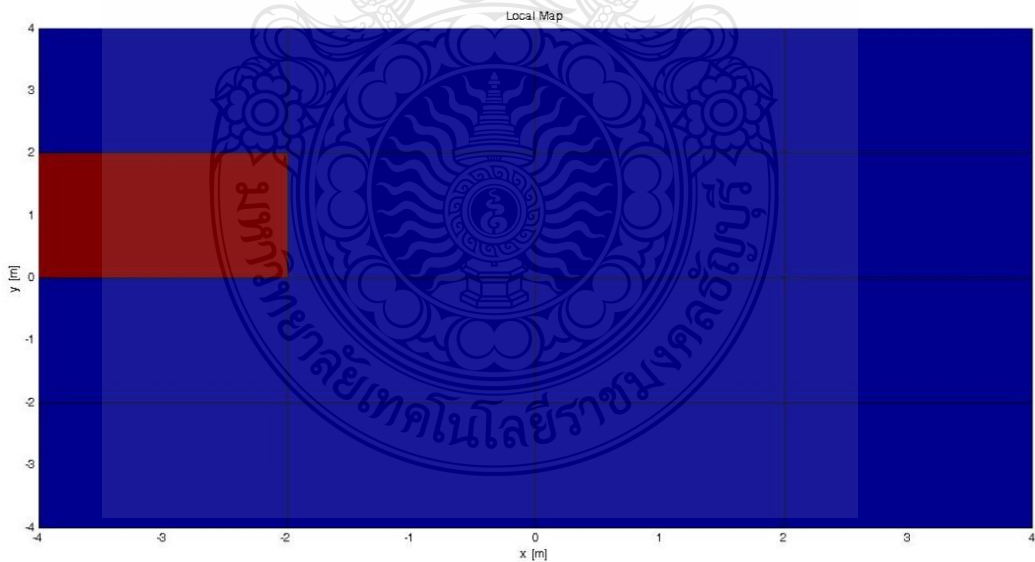


รูปที่ 4.26 เมื่อสิ้นสุดการทดสอบรถเข็นอยู่ที่ระยะ 10 เมตร และสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 10 เมตร ห่างจากจุดเริ่มต้น

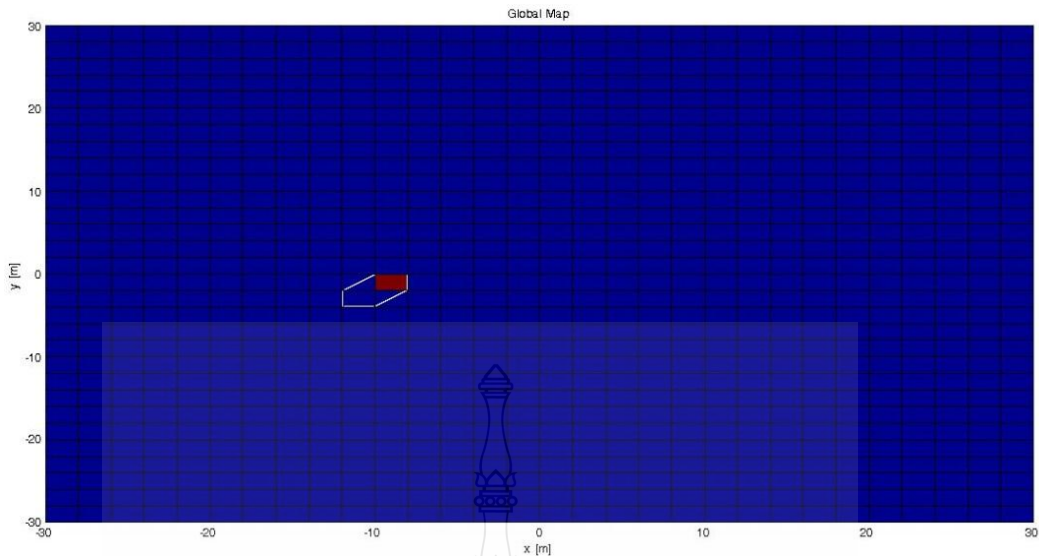
- ผลการตรวจสอบสิ่งกีดขวางที่ระยะ 10 เมตร



รูปที่ 4.27 ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ข้อมูลของสิ่งกีดขวางที่ได้จากเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) ในตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid: กรอบสีแดง) เมื่อมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร



รูปที่ 4.28 ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบ ตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) เมื่อตรวจสอบพบสิ่งกีดขวางและมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร



รูปที่ 4.29 ในขณะที่เริ่มต้นการทดสอบตารางแบบโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) เมื่อทำการอัปเดตจากข้อมูลแบบตารางบริเวณเฉพาะที่หรือ (Local Grid) โดยมีสิ่งกีดขวางห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 10 เมตร

จากผลการทดสอบในครั้งนี้เมื่ออุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ไปถึงระยะที่ตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) จะสามารถรับรู้ได้ (4, 4) เมตร หรือมีข้อมูลของสิ่งกีดขวางที่ตรวจสอบได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์เข้ามาภายในขอบเขตของตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) ดังรูปที่ 4.27 แผนที่แบบตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid Map) จะทำการอัปเดตตัวเองเพื่อให้ทราบว่าตอนนี้สิ่งกีดขวางที่เป็นอันตรายต่อระบบอยู่บริเวณไหน หลังจากนั้นจึงนำค่าในแผนที่แบบตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid Map) ที่ได้ไปทำการอัปเดตแผนที่แบบตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid Map) ต่อไป ซึ่งแผนที่ตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid Map) ในงานวิจัยนี้จะเป็นแผนที่แบบมีขนาดคงที่และไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา โดยหลังจากที่แผนที่แบบตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid Map) ทำการอัปเดตแล้วจะนำค่าดัชนีชี้วัดสิ่งกีดขวางจากแผนที่มาทำการหาค่าตำแหน่งที่แท้จริงของสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน โดยผลที่ได้คือเมื่ออุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ไปถึงที่ระยะแกน $x = 6.3$ เมตรจากทิศเหนือไปยังทิศใต้และแกน $y = 0$ เมตร อัลกอริทึมแบบแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) จะสามารถตรวจสอบและคำนวณหาค่าตำแหน่งของสิ่งกีดขวางได้ซึ่งผลที่ออกมาคือ สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้อยู่ที่ตำแหน่ง $x = 10$ เมตร, $y = 1$ เมตร ซึ่งเมื่อไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริงจะพบว่ามี ความใกล้เคียงกันมาก

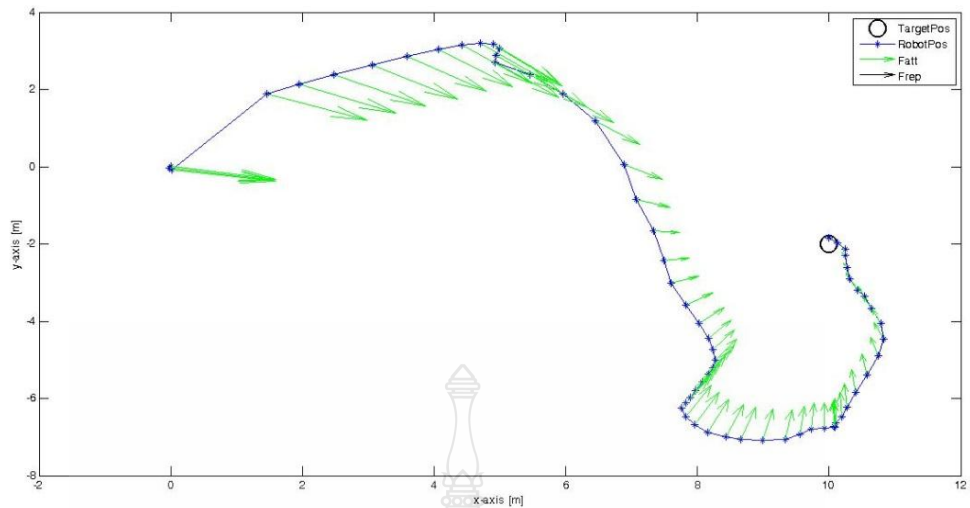
4.5 การทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์รถแบบ 4 ล้อในสภาพแวดล้อมจริง

ในเบื้องต้นของการทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัตินั้นได้มีการทดสอบการตรวจสอบตำแหน่งสิ่งกีดขวางในสภาวะแวดล้อมจริงซึ่งผลที่ได้คือสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้อย่างแม่นยำดังแสดงไว้ในหัวข้อข้างต้นแล้ว เพื่อทดสอบรถหุ่นยนต์แบบ 4 ล้อที่มีความซับซ้อนกว่าคือการรวมระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางเข้ากับรถหุ่นยนต์แบบ 4 ล้อให้สามารถตอบสนองต่อสิ่งกีดขวางและเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่ต้องการได้แบบอัตโนมัติ โดยสิ่งกีดขวางที่ใช้ในการทดสอบในหัวข้อนี้จะมีขนาดเป็นดังนี้ ความกว้าง 30 เซนติเมตร และความสูง 80 เซนติเมตร

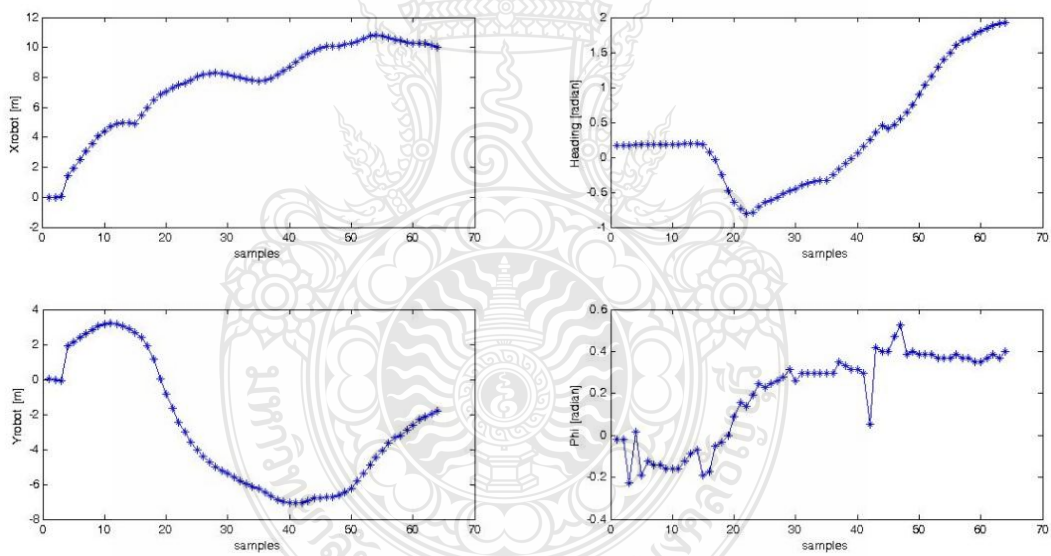
ในการทดสอบนี้จะมีการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณีคือ ในกรณีแรกเมื่อพื้นที่การทำงานไม่มีสิ่งกีดขวางและในกรณีที่สองในพื้นที่การทำงานมีสิ่งกีดขวาง 1 ชิ้นอยู่ที่ตำแหน่ง (6, -0.5) เมตร ห่างจากจุดเริ่มต้น โดยทั้งสองกรณีนั้นจะมีเป้าหมายอยู่ที่ตำแหน่ง (10, -2) เมตร

4.5.1 กรณีเมื่อพื้นที่การทำงานไม่มีสิ่งกีดขวาง

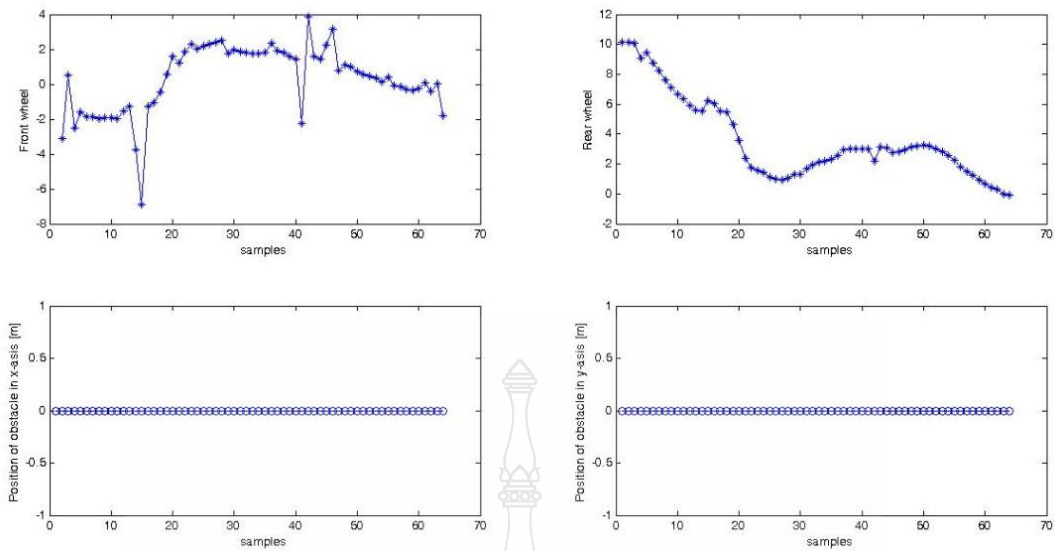
การทดสอบครั้งแรกนี้เป็นการทดสอบการไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้แบบอัตโนมัติ โดยใช้ทั้งระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและอัลกอริทึมในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางรวมทั้งระบบการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น โดยมีการกำหนดเป้าหมายไว้ที่ตำแหน่ง $x = 10$ เมตร, $y = -2$ เมตร ซึ่งในการทดสอบจริงนั้นได้มีการปรับตัวแปรของเทคนิคการหลบหลีกสิ่งกีดขวางคือ $(\alpha_p, \alpha_v, m_p, n_v)$ รวมทั้งตัวแปรของการควบคุมคือ $(k_{f1}, k_{f2}, k_\beta, \alpha)$ ด้วยซึ่งถ้าไม่เหมาะสมหุ่นยนต์รถแบบ 4 ล้อก็จะไม่สามารถไปตามเป้าหมายที่วางไว้ได้ ตัวแปรทางด้านการควบคุมจะประกอบด้วย $k_{f1} = 5$, $k_{f2} = 0.1$, $k_\beta = 2$, $\alpha = 1$ ตัวแปรของแรงคู่ประกอบด้วย $\alpha_p = 0.08$, $\alpha_v = 0.02$, $m_p = 2$, $n_v = 2$ และตัวแปรของผลึกคือ $\eta = 5$, $a_{\max} = 19$ โดยระบบประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งหมดจะทำงานอยู่ที่ 1 เฮิรตซ์ (Hz) ในการคำนวณและสั่งค่าคำสั่งหรือเอาต์พุตออกไปยังชุดขับเคลื่อนความเร็วของล้อหลังและชุดขับเคลื่อนการบังคับเลี้ยวของล้อหน้า



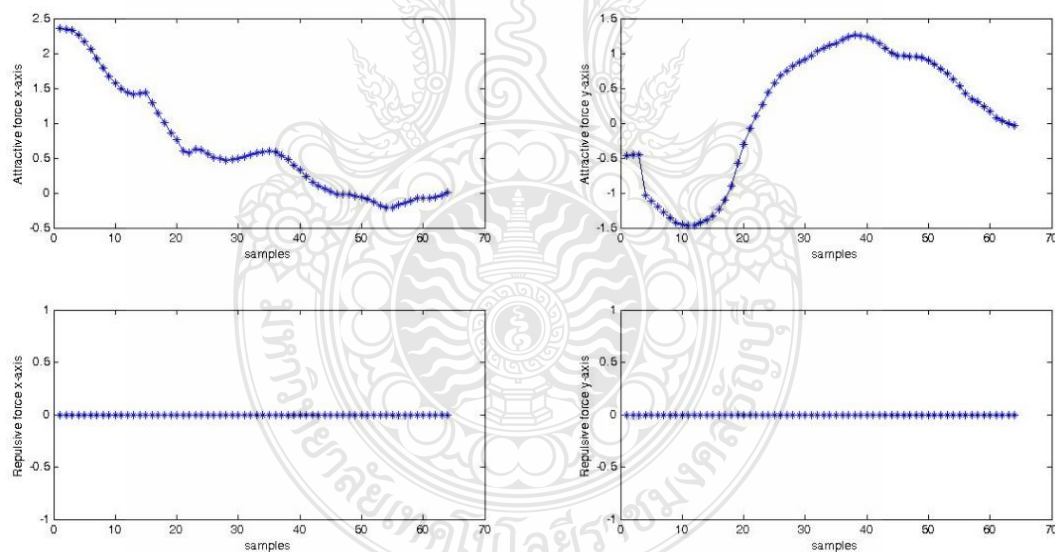
รูปที่ 4.30 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน ประกอบด้วย: ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.31 ตัวแปรของหุ่นยนต์เมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน: ตำแหน่งในแนวแกน x (บนซ้าย), ตำแหน่งในแนวแกน y (ล่างซ้าย), มุมหัวรถ (บนขวา), มุมเลี้ยวของล้อหน้า (ล่างขวา)



รูปที่ 4.32 ตัวแปรการควบคุมและตำแหน่งสิ่งกีดขวางเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน : อินพุตของล้อหน้า (บนซ้าย), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน x (ล่างซ้าย), อินพุตของล้อหลัง (บนขวา), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน y (ล่างขวา)



รูปที่ 4.33 ตัวแปรจากเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field): แรงดึงดูดในแนวแกน x (บนซ้าย), แรงผลักในแนวแกน x (ล่างซ้าย), แรงดึงดูดในแนวแกน y (บนขวา), แรงผลักในแนวแกน y (ล่างขวา)

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าหุ่นยนต์รถสามารถออกจากตำแหน่งเริ่มต้น (0, 0) เมตร และมีพฤติกรรมในการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติเข้าหาขังเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ได้สำเร็จ โดยในสภาวะเริ่มต้นหุ่นยนต์จะมีระยะที่ไกลจากตำแหน่งเป้าหมายซึ่งจะทำให้เกิดแรงดูดที่มากและมีทิศทางชี้ไปยัง

ตำแหน่งเป้าหมายซึ่งแสดงด้วยลูกศรสีเขียวดังรูปที่ 4.30 ซึ่งเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ไปใกล้เป้าหมายมากขึ้น แรงดูดก็จะมีขนาดที่ลดลงและมีค่าเป็นศูนย์เมื่อหุ่นยนต์อยู่ที่เป้าหมายที่กำหนดไว้

จากรูปที่ 4.31 เป็นกราฟที่แสดงถึงตำแหน่งของหุ่นยนต์ผ่านเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) รวมทั้งทิศทางของหุ่นยนต์ซึ่งมาจากเซนเซอร์วัดมุมเอียงรวมทั้งมุมเลี้ยวของล้อหน้าที่ได้มาจากเซนเซอร์วัดรอบของมอเตอร์อีกด้วย ซึ่งในการนำทางภายในสภาวะแวดล้อมแบบกลางแจ้งนั้นตัวแปรที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งคือ ตำแหน่งหุ่นยนต์ในแนวแกน x และตำแหน่งหุ่นยนต์ในแนวแกน y ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้จะเห็นได้ว่า 2 ตัวแปรข้างต้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนดไว้นั้นหมายถึง การเข้าหาเป้าหมายที่ต้องการได้สำเร็จอย่างแม่นยำ จากรูปที่ 4.32 ด้านล่างนั้นจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานซึ่งสอดคล้องกับแรงดูดที่มีค่าเป็นศูนย์ดังรูปที่ 4.33 ด้านล่างและจากภาพ ด้านบนจะแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของแรงดูดซึ่งจะสัมพันธ์กับอินพุตที่ใช้ในการควบคุมล้อหน้าและล้อหลังของรถดังรูปที่ 4.32 ด้านบน

4.5.2 กรณีเมื่อพื้นที่การทำงานมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้น

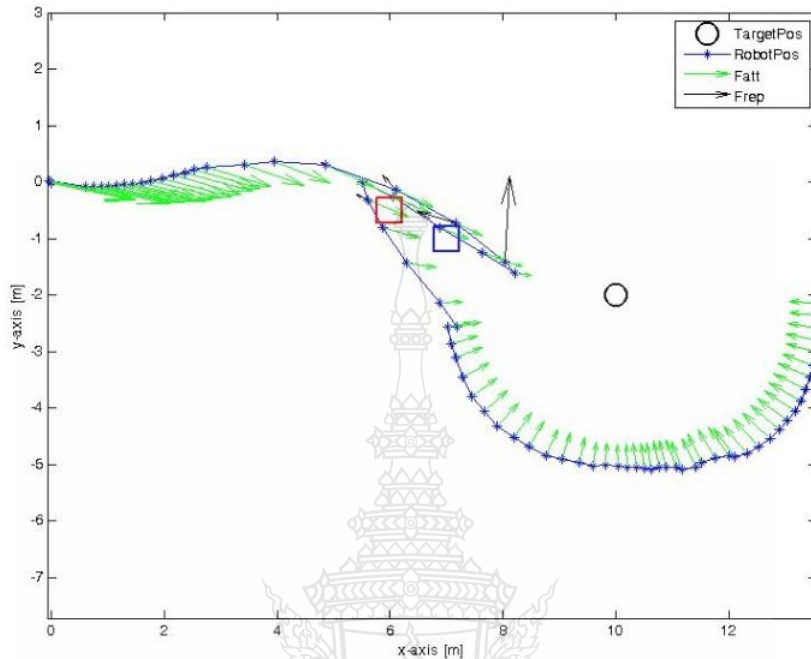
ในการทดสอบการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและไปยังเป้าหมายที่ต้องการพร้อมๆกันนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องมีการทดลองหลายหลายครั้ง โดยประสิทธิภาพในการทำงานของระบบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆนั้นคือ ตำแหน่งที่วัดได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) โดยในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองเป็น 3 ครั้งซึ่งในแต่ละครั้งก็จะมีค่าความแตกต่างกันอย่างชัดเจนรวมทั้งผลการหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่สมบูรณ์จะแสดงในการทดสอบครั้งที่ 3 ด้วย

- การทดสอบการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ครั้งที่ 1

ในการทดสอบครั้งที่ 1 นั้นจะเห็นได้ว่ามีข้อบกพร่องอยู่หลายส่วน โดยส่วนแรกเป็นการตรวจสอบสิ่งกีดขวางที่ต้องมีความสัมพันธ์กับแรงผลักที่เกิดขึ้นซึ่งผลที่ได้คือ ตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่คำนวณได้จากเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) อยู่ที่ตำแหน่ง (7, -1) เมตร แต่สิ่งกีดขวางที่แท้จริงนั้นอยู่ที่ตำแหน่ง (6, 0.5) เมตร ตามรูปที่ 4.34 ซึ่งความแตกต่างนั้นมาจากการตั้งค่าตารางและรายละเอียดต่างภายในอัลกอริทึม และ เมื่อสังเกตการเกิดแรงผลักที่คำนวณจากเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) โดยเมื่อรถหุ่นยนต์อยู่ใกล้สิ่งกีดขวางจะต้องมีขนาดของแรงผลักที่มากขึ้นนั้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มของขนาดของแรงผลักปรับเปลี่ยนค่าซ้ำซึ่งเลยตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่สามารถตรวจสอบได้ไปแล้วแสดงโดยลูกศรสีดำดังรูปที่ 4.34 ส่วนที่สองเป็นเรื่องของการไปยังเป้าหมายที่ต้องการจะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดแรงผลักที่มากขึ้นแล้วจะทำให้หุ่นยนต์ไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ยากขึ้น ดังรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์ต้องใช้ระยะเวลาในการตีวงเลี้ยวเพื่อเข้าหาเป้าหมายที่ต้องการรวมทั้งใช้ระยะทางในการเข้าหาเป้าหมายที่มากเกินไปอีกด้วย

จากรูปที่ 4.34 จะเห็นความผิดพลาดของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่ใช้ในการนำทางและตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยจะเห็นได้ว่าเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผิดพลาดผ่านสิ่งกีดขวางที่

คำนวณได้ซึ่งจากการเคลื่อนที่ที่แท้จริงของหุ่นยนต์รถนั้นสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่แท้จริงในพื้นที่การทำงานได้ ดังนั้นเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการนำทางภายนอกอาคาร



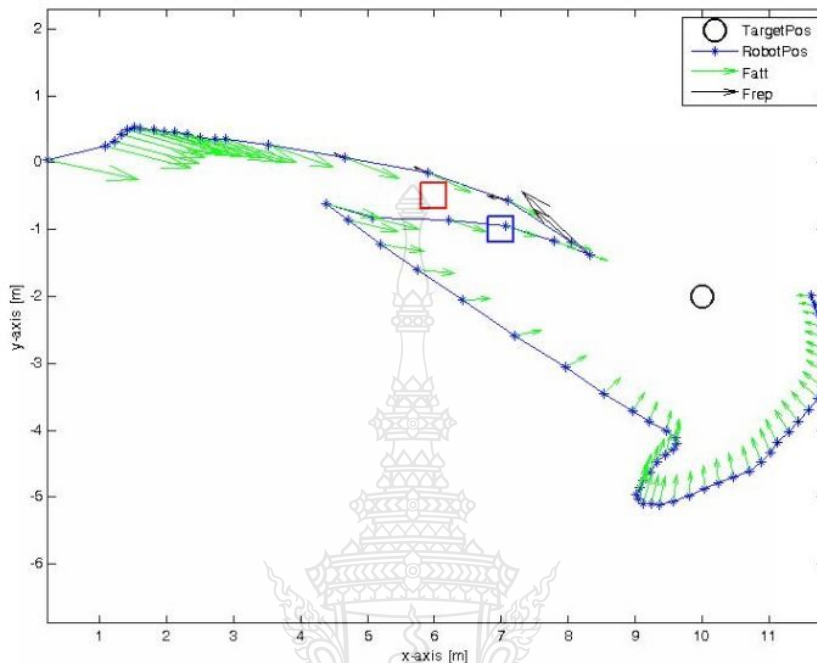
รูปที่ 4.34 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้น (ทดสอบครั้งที่ 1): ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, ลูกศรสีดำแสดงแรงผลัก, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, สีเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริง, สีเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่ได้จากการคำนวณ

- การทดสอบการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์รถครั้งที่ 2

ในการทดสอบครั้งนี้ได้มีการปรับค่าอัลกอริทึมต่างๆอีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่าพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถและข้อมูลที่ได้วัดจากเซนเซอร์และคำนวณนั้นจะเหมือนกับในกรณีแรกหรือไม่ ผลที่ได้คือระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางยังทำงานผิดพลาดอยู่ ซึ่งแรงผลักก็ยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีแรกคือแสดงผลในการควบคุมที่ล่าช้า แต่สิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปคือเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รวมทั้งลักษณะการเคลื่อนที่เข้าไปยังเป้าหมายที่ต้องการค่อนข้างที่จะดีขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นทางไปยังเป้าหมายน้อยกว่ากรณีแรกประมาณ 1 เมตร ผลการเปลี่ยนแปลงไปนี้สืบเนื่องมาจากการปรับระบบและตัวแปรต่างๆให้เข้ากันมากยิ่งขึ้น

ดังรูปที่ 4.35 แสดงความล่าช้าในการประมวลผลของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เนื่องจากระบบประมวลผลทำงานอยู่ที่ 1 เฮิรตซ์ (Hz) แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถอยู่

ที่ประมาณ 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่นี้มากเกินไปทำให้เกิดความล่าช้าในการคำนวณแรงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงผลึก ซึ่งแสดงด้วยลูกศรสีดำ ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้น (ทดสอบครั้งที่ 2): ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, ลูกศรสีดำแสดงแรงผลึก, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, สีเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริง, สีเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่ได้จากการคำนวณ

- การทดสอบการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์รถที่สมบูรณ์

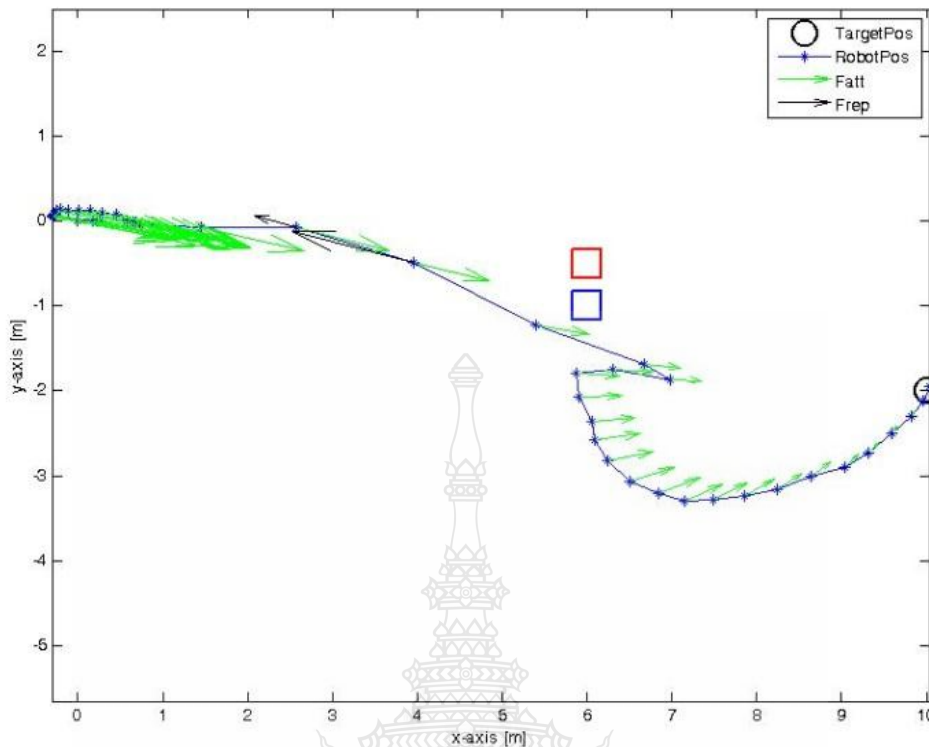
ในการทดสอบครั้งนี้นั้นเป็นการทดสอบที่หุ่นยนต์รถสามารถเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางและเข้าหาเป้าหมายที่ต้องการได้แบบอัตโนมัติตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งเอาไว้ เช่นเดียวกับกรณีข้างต้นในการทดสอบครั้งนี้ได้กำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ที่ $x = 10$ เมตร, $y = -2$ เมตร และสิ่งกีดขวางอยู่ที่ตำแหน่ง $x = 6$ เมตร, $y = 0.5$ เมตร ที่สนามฟุตบอลภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 สถานที่ทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง: สนามฟุตบอลภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

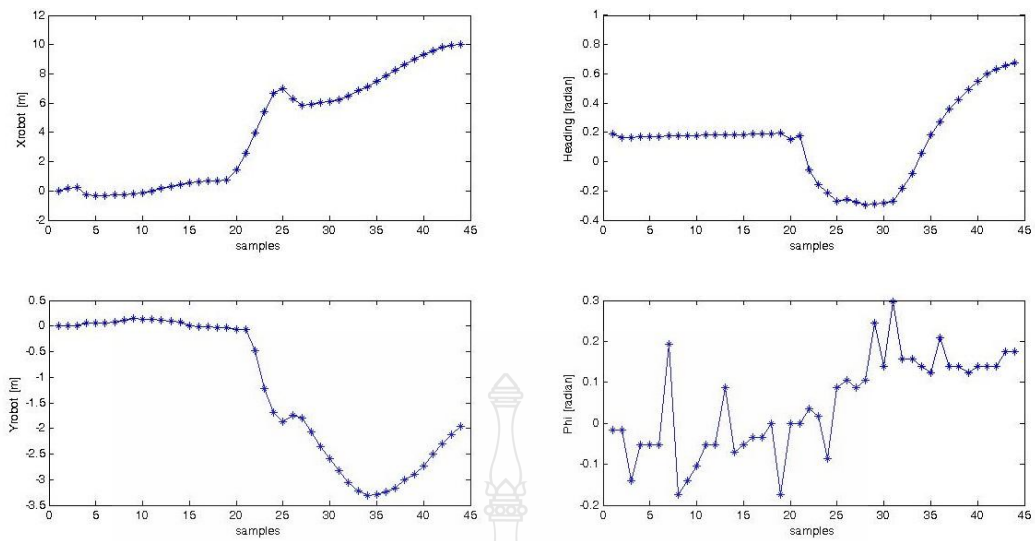
ในการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักหลักคือส่วนตรวจสอบสิ่งกีดขวางและส่วนหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ในส่วนแรกคือส่วนตรวจสอบสิ่งกีดขวาง ส่วนนี้จะเป็นตัวบอกว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ในพื้นที่การทำงานหรือไม่ซึ่งได้มีการตั้งค่าระยะการตรวจจับสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 3 เมตร และขนาดของตารางบริเวณเฉพาะ (Local Grid) คือ 2×2 เมตร ซึ่งน่าจะเหมาะสมกับหุ่นยนต์รถขนาดนี้ นั่นหมายความว่าเมื่อหุ่นยนต์รถเข้าใกล้สิ่งกีดขวางที่ระยะประมาณ 3 เมตร อัลกอริทึมจะสามารถตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางและคำนวณระบุตำแหน่งของสิ่งกีดขวางเข้าไปในตารางบริเวณทั้งหมด (Global Grid) เพื่อนำไปใช้กับเทคนิคต่อไป

ในส่วนที่สองเป็นส่วนระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางและการควบคุมซึ่งได้มีการทดสอบปรับค่าตัวแปรต่างต่างจนมีค่าที่เหมาะสมประกอบด้วยค่าตัวแปรของเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field): ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแรงดูดคือ $\alpha_p = 0.1$, $\alpha_v = 0$, $m_p = 2$, $n_v = 2$ ส่วนตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแรงผลักคือ $\eta = 20$, $a_{\max} = 19$ จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแรงผลัก ส่วนตัวแปรทางด้านควบคุมได้แก่ $k_{f1} = 4.5$, $k_{f2} = 0.2$, $k_\beta = 8$, $\alpha = 1$ โดยค่าต่างๆที่กล่าวมานี้ล้วนมีความสำคัญและส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถด้วยกันทั้งสิ้น

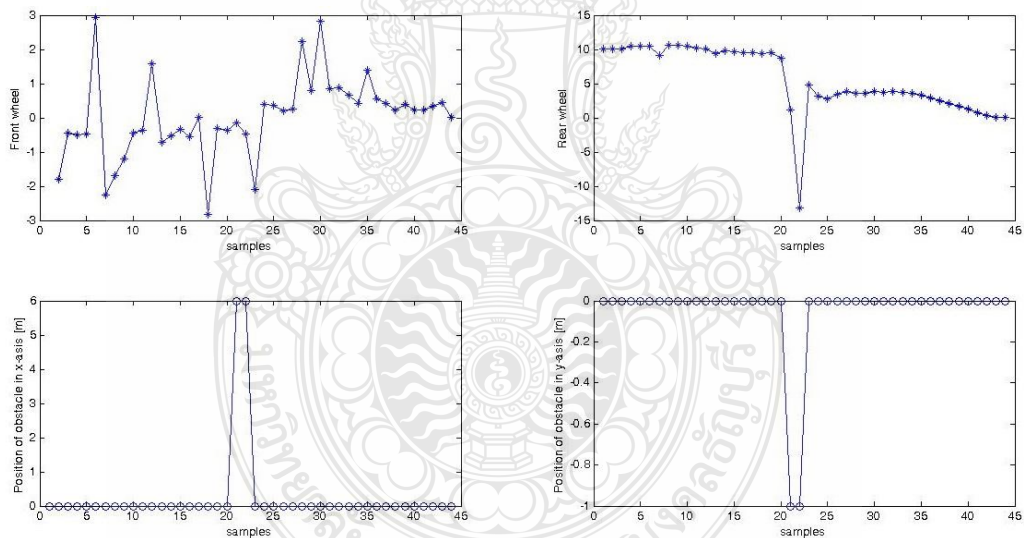


รูปที่ 4.37 ผลของการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติ กรณีมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้น : ลูกศรสีเขียวแสดงแรงดูด, ลูกศรสีดำแสดงแรงผลัก, วงกลมสีดำแสดงเป้าหมาย, เส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์, สีเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริง, สีเหลี่ยมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่ได้จากการคำนวณ

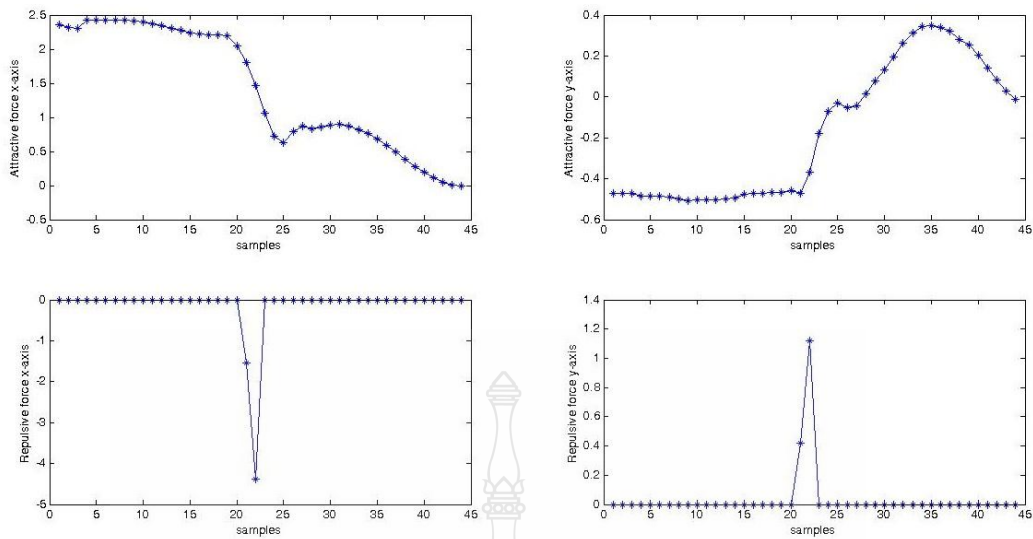
ผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.37 นั้นแสดงถึงความถูกต้องของพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ที่ตำแหน่งเริ่มต้นนั้นจะมีแรงดูดที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากอยู่ไกลจากตำแหน่งเป้าหมาย แต่ขนาดจะค่อยๆลดลงและเป็นศูนย์เมื่อถึงยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ โดยทิศทางของแรงดูดจะหันเหไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้เช่นกันซึ่งแสดงด้วยลูกศรสีเขียวดังรูปที่ 4.37 เมื่อพิจารณาถึงแรงผลักที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่าเมื่อรถเคลื่อนที่ไปเป็นระยะประมาณ 3-4 เมตรจะเกิดแรงผลักขึ้นเนื่องจากตรวจพบสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานซึ่งขนาดของแรงผลักจะมีค่ามากเมื่ออยู่ใกล้สิ่งกีดขวางและมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกับสิ่งกีดขวาง แสดงด้วยลูกศรสีดำดังรูปที่ 4.37 ตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่คำนวณมาจากอัลกอริทึมมีค่า $x = 6$ เมตร, $y = -1$ เมตร แสดงด้วยสีเหลี่ยมสีน้ำเงินดังรูปที่ 4.37 ส่วนตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่แท้จริงคือ $x = 6$ เมตร, $y = -0.5$ เมตร แสดงด้วยสีเหลี่ยมสีแดงดังที่รูปที่ 4.37



รูปที่ 4.38 ตัวแปรของหุ่นยนต์เมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นในพื้นที่การทำงาน: ตำแหน่งในแนวแกน x (บนซ้าย), ตำแหน่งในแนวแกน y (ล่างซ้าย), มุมหัวรถ (บนขวา), มุมเลี้ยวของล้อหน้า (ล่างขวา)



รูปที่ 4.39 ตัวแปรการควบคุมและตำแหน่งสิ่งกีดขวางเมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 ชั้นในพื้นที่การทำงาน : อินพุตของล้อหน้า (บนซ้าย), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน x (ล่างซ้าย), อินพุตของล้อหลัง (บนขวา), ตำแหน่งสิ่งกีดขวางในแนวแกน y (ล่างขวา)



รูปที่ 4.40 ตัวแปรเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) เมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 ชิ้นในพื้นที่การทำงาน: แรงดึงดูดในแนวแกน x (บนซ้าย), แรงผลักในแนวแกน x (ล่างซ้าย), แรงดึงดูดในแนวแกน y (บนขวา), แรงผลักในแนวแกน y (ล่างขวา)

รูปที่ 4.38 แสดงตัวแปรทางกายภาพของหุ่นยนต์ได้แก่ ตำแหน่งในแนวแกน x, ตำแหน่งในแนวแกน y, มุมหันเห (Heading angle), มุมเลี้ยวของล้อหน้า ซึ่งผลที่ได้คือทั้งตำแหน่งทั้งในแนวแกน x และ y ที่จุดสุดท้ายมีค่าเท่ากับจุดเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ซึ่งบ่งบอกในความสำเร็จในการนำทางของหุ่นยนต์ รูปที่ 4.39 ด้านล่างแสดงถึงตำแหน่งของสิ่งกีดขวางที่หามาจากเทคนิคแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ที่มีความสัมพันธ์กับแรงผลัสดังแสดงในรูปที่ 4.40 ด้านล่าง และรูปที่ 4.40 ด้านบนแสดงแรงดูดที่จะสัมพันธ์กับอินพุตที่ใช้ในการควบคุมล้อหลัง (u_1) ในรูปที่ 4.39 บนขวา ซึ่งตัวแปรทุกตัวที่ได้นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงนี้ล้วนแต่มีความสำคัญในการบ่งบอกถึงการนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบอัตโนมัติด้วยกันทั้งสิ้น

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปวัตถุประสงค์ของการวิจัยและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นความสำคัญของระบบอัตโนมัติที่มีบทบาทต่อมนุษย์มากยิ่งขึ้น จึงได้มีการพัฒนาระบบนำทางแบบมีความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยการรวมหลายเทคนิคเข้าด้วยกันประกอบด้วยอัลกอริทึมแบบแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ร่วมกับอัลกอริทึมแบบสนามศักย์ (Potential Field) และเทคนิคการวางแผนเส้นทางโคจรแบบเฉพาะที่ (Local Incremental Planning) โดยการใช้เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder), เซนเซอร์จีพีเอส (GPS) และเซนเซอร์วัดมุมเอียง ร่วมกันในการส่งค่าป้อนกลับไปยังระบบทดลองจนทดสอบระบบที่ได้พัฒนาขึ้นกับยานพาหนะต่างต่างทดลองจนมีการพัฒนาความมีประสิทธิภาพของระบบนำทางให้ดียิ่งขึ้นผ่านตัวกรองกาลมาน

เบื้องต้นได้มีการติดตั้งมอเตอร์และเซนเซอร์ต่างๆที่จำเป็นในการใช้งานสำหรับระบบ Low Level Control อาทิเช่น เอนโค้ดเดอร์ (Encoder), การ์ด DAQ (Data Acquisition) เป็นต้นเพื่อให้สามารถใช้งานการบังคับด้วยรีโมทวิทยุได้ จากนั้นได้มีการศึกษาอัลกอริทึมต่างๆและมีการจำลองเงื่อนไขต่างต่างในโปรแกรม MATLAB/Simulink และหาค่าตัวแปรที่สำคัญสำคัญของเซนเซอร์อีกด้วยเมื่อตรวจสอบว่ามีความถูกต้องแล้วจึงได้มีการทดสอบระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางและระบบหลบหลีกอัตโนมัติในสภาวะแวดล้อมจริงและปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการทดลองนั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางและระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ในส่วนแรกเป็นระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางโดยใช้เทคนิคแบบแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ร่วมกับเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) ซึ่งก่อนที่จะมีการทดลองจริงนั้นได้มีการจำลองสร้างแผนที่ตาราง (Grid-Map) ขึ้นทั้งตารางแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) และตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) และมีการเคลื่อนที่ไปทั้งในแกน x และแกน y ผลที่ออกมาคือสามารถสร้างแผนที่ได้ถูกต้องและตรวจสอบสิ่งกีดขวางได้ตรงกับตำแหน่งที่แท้จริง จากนั้นจึงมีการทดสอบการตรวจสอบสิ่งกีดขวางในสถานที่ทดสอบโดยใช้เซนเซอร์จีพีเอส (GPS), เซนเซอร์เลเซอร์ (Laser Range Finder) และเซนเซอร์วัดมุมเอียง โดยมีการทดสอบที่ 2 ระยะคือมีสิ่งกีดขวางที่ระยะ 8 เมตรและมีสิ่งกีดขวางที่ระยะ 10 เมตร โดยสมมุติให้มีการเคลื่อนที่เป็นระยะ 10 เมตร ในการสร้างแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) ครั้งนี้ได้กำหนดให้ตารางแต่ละช่องมี

พื้นที่ 4 ตารางเมตรและกำหนดให้ตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) สามารถรับรู้ได้ที่ระยะ 4 เมตร ผลที่ได้คืออัลกอริทึมสามารถตรวจสอบตำแหน่งสิ่งกีดขวางได้ ดังนี้

เมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ที่ระยะทาง 8 เมตร:

ตำแหน่งในแนวแกน x ที่แท้จริงของสิ่งกีดขวาง = 8 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน x ที่คำนวณได้ = 8 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน y ที่แท้จริงของสิ่งกีดขวาง = 0.8 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน y ที่คำนวณได้ = 1 เมตร

เมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ที่ระยะทาง 10 เมตร:

ตำแหน่งในแนวแกน x ที่แท้จริงของสิ่งกีดขวาง = 10 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน x ที่คำนวณได้ = 10 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน y ที่แท้จริงของสิ่งกีดขวาง = 0.8 เมตร

ตำแหน่งในแนวแกน y ที่คำนวณได้ = 1 เมตร

ดังนั้นจากผลที่ได้จึงสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคแบบแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) สามารถตรวจสอบสิ่งกีดขวางได้โดยมีความแม่นยำไม่เกิน 1 เมตร

ในการทดลองส่วนที่ 2 จะเป็นการทดสอบระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เช่นเดียวกับส่วนแรกคือมีผลการจำลองและผลการทดสอบจริง ในผลการจำลองนั้นมีการกำหนดให้มีสถานะที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริง 2 กรณี ได้แก่ 1) เมื่อมีสิ่งกีดขวาง 1 หรือ 2 ชั้นแบบอยู่กับที่ในพื้นที่การทำงาน 2) เมื่อมีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ตัดผ่านเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ผลที่ได้คือหุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้สำเร็จทั้ง 2 กรณี โดยหลังจากตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมดังกล่าวแล้วจึงมีการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง โดยมีการกำหนดเป้าหมายไว้ที่ตำแหน่ง (10, -2) เมตร และมีสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 1 ชั้นอยู่ที่ตำแหน่ง (6, -0.5) เมตร ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้มีการปรับลดให้ตารางบริเวณเฉพาะที่ (Local Grid) สามารถรับรู้ได้ที่ระยะ 3 เมตร

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแรงที่คำนวณได้จากเทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) มีการเพิ่มลดและมีทิศทางที่ถูกต้อง ทำให้หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและเข้าหาพิคัดเป้าหมายตลอดจนลดความเร็วลงเป็นศูนย์และหยุดที่เป้าหมายที่ต้องการได้ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้เวลาในการเข้าหาเป้าหมาย 45 วินาทีและหุ่นยนต์มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุดไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาที

ในส่วนเพิ่มเติมจะเป็นการบูรณาการเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เพื่อความมีประสิทธิภาพในการนำทางที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดสอบตัวกรองคาลมานว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องหรือไม่ซึ่งต่อไปจะนำไปประยุกต์ใช้กับการนำทางจริง ผลที่ได้คือระยะทางที่วัดได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) มีความใกล้เคียงกับระยะทางที่แท้จริง (20 เมตร) น้อยกว่าระยะทางที่ได้จากการบูรณาการเซนเซอร์และข้อมูลที่ได้จากการบูรณาการเซนเซอร์จะมีความเที่ยงตรง

กว่าข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) จากผลที่ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้ 1) ความถูกต้องของค่าระยะทางจากการบูรณาการเซนเซอร์มีค่าอยู่ที่ 19.8 เมตร คิดเป็น 99 % เมื่อเทียบระยะทางเป้าหมายที่ 20 เมตร ส่วนค่าระยะทางที่วัดได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เพียงอย่างเดียวอยู่ที่ 19 เมตร คิดเป็น 95 % เมื่อเทียบระยะทางเป้าหมายที่ 20 เมตร (เมื่อค่า 20 เมตร คิดเป็น 100 % และ 0 เมตร คิดเป็น 0 %) ส่วนค่าความเที่ยงตรงของผลที่ได้จากการบูรณาการเซนเซอร์เมื่อเทียบกับตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่ 10 เซนติเมตร คิดเป็น 99.5 % และค่าที่ได้จากเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เมื่อเทียบกับตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่ 50 เซนติเมตร คิดเป็น 97.5 % (เมื่อค่า 20 เมตร คิดเป็น 0 % และ 0 เมตร คิดเป็น 100 %)

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

- เซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ที่ใช้ทางมีการแกว่งของข้อมูลทำให้ระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางและระบบหลบหลีกมีความผิดพลาดในบางครั้ง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ถือว่าเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบเป็นอย่างมาก

- เทคนิคแบบแผนที่ตารางการครอบครองพื้นที่ (Occupancy-Grid Map) นั้นจะต้องมีการปรับค่าสัดส่วนระหว่างดัชนีของแผนที่และตำแหน่งสิ่งกีดขวางที่จะนำไปใช้จริงซึ่งต้องมีการทดสอบซ้ำหลายหลายครั้ง

- ระบบประมวลผลของหุ่นยนต์รถในงานวิจัยครั้งนี้จะทำงานอยู่ที่ 1 เฮิรตซ์ (Hz) ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการนำทางเมื่อวิ่งด้วยความเร็วมากกว่า 1 เมตรต่อวินาที ทำให้ระบบประมวลผลไม่ทันและไม่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้สำเร็จ

จากผลการทดสอบนั้นสามารถทำได้ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตที่วางไว้แต่เพื่อควมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นจึงต้องมีการพัฒนาต่อทั้งในด้านของระบบประมวลผลให้มีความไวมากขึ้น หลังจากนั้นอาจจะต้องมีการทดสอบโดยการวางสิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงาน 2-3 ชั้นและกำหนดจุดเป้าหมายหลายหลายจุดแบบต่อเนื่องกันเพื่อตรวจสอบว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องหรือไม่ ตลอดจนสร้างตารางโดยรวมทั้งหมด (Global Grid) แบบไม่คงที่และสุดท้ายคือหุ่นยนต์รถสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบเคลื่อนที่ได้สำเร็จ

ข้อเสนอแนะ

- เทคนิคสนามศักย์ (Potential Field) นั้นเป็นเทคนิคที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้สำหรับรถอัจฉริยะที่จะนำไปวิ่งบนถนนจริงเนื่องจากปัญหาจากการรวมแรงหรือที่เรียกว่า “Local Minima” นั้นเกิดขึ้น หรือไม่ก็ควรที่จะต้องมีการใช้เทคนิคอื่นๆเข้ามาช่วยในการทำงาน

- ในการพัฒนาต่อจากนี้เพื่อให้เกิดเป็นรถอัจฉริยะขึ้นอาจจะต้องมีการประยุกต์ใช้การวางแผนเส้นทางการวิ่ง (Path Planning) ร่วมกับเทคนิคการควบคุมตามกฎ (Rule-based Control) หรือเทคนิคการควบคุมตามพฤติกรรม (Behavior-Based Control) เป็นต้น

- การบูรณาการเซนเซอร์เพื่อควมมีประสิทธิภาพในการนำทางของระบบอัตโนมัติภายนอกอาคารสำหรับหุ่นยนต์รถควรถือจะต้องมีการประยุกต์ใช้เช่นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Encoder) ร่วมด้วยเพื่อความถูกต้องและความแม่นยำในการนำทางมากยิ่งขึ้น

- จะต้องมีมีการประยุกต์ใช้ผลจากการบูรณาการเซนเซอร์กับระบบของหุ่นยนต์ในการทำงาน ณ ขณะเวลาจริง (On-Line) เพื่อควมมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดียิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Carnegie Mellon University, Carnegie Mellon Tartan Racing (Online), 2007, Available: www.cmu.edu/news/archive/2007/November/nov4_tartanracingwins.shtml, (24 August 2014).
- [2] Team MIT DARPA Urban Challenge, MIT DARPA Grand Challenge Team (Online), 2007, Available: <http://grandchallenge.mit.edu/>, (1 August 2014).
- [3] S.A.M. Coenen, "Motion Planning for Mobile Robots-A Guide," Master Thesis, Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2012.
- [4] Elfes, A. E., "Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation," *Computer Magazine*, vol. 22, No. 6, pp. 46-57, June 1989.
- [5] สถาบันวิทยากรหุ่นยนต์ภาคสนาม, รถอัจฉริยะแบบไร้คนขับ (Intelligent Vehicle "Dark Horse") (Online), 2007, Available: <http://fibo.kmutt.ac.th/fiboweb/2013/index.php/th/component/flexicontent/25-research-th/932-th-intelligentvehicle>, (31 August 2014).
- [6] Nassaree Benalie, Worrawut Pananurak, Somphong Thanok, and Manukid Parnichkun, "Improvement of Adaptive Cruise Control System based on Speed Characteristics and Time Headway," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 2403-2408.
- [7] MIT marine Robotics Group, Autonomous Mapping of Complex Marine Environments (Online), 2011, Available: http://groups.csail.mit.edu/marine/wiki/index.php?title=Autonomous_Mapping_of_Complex_Marine_Environments (15 August 2014).
- [8] Dan Masi, Unmanned Aerial Vehicles (Online), 2014, Available: <http://pilir.blogs.law.pace.edu/2014/02/23/pilir-bound-edition-preview-unmanned-aerial-vehicles-legitimate-weapon-systems-or-unlawful-angels-of-death/comment-page-1/>, (23 February 2014).
- [9] Danilo Alves de Lima, Guiherme Augusto Silva Pereira, "Navigation of An Autonomous Car Using Vector Fields and the Dynamic Window Approach," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 24, pp. 106-116, April 2013.
- [10] Chairit Wuthishuwong, Chaiyaporn Silawatchananai, Manukid Parnichkun, "Navigation of an Intelligent Vehicle by using Stand-alone GPS, Compass and Laser Range Finder," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2008, pp. 2121-2126.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติและสมาคมวิชาการหุ่นยนต์ไทย, โครงการ การศึกษาการพัฒนาารถอัจฉริยะ, 2005.
- [12] A. Bemporad, A.D. Luca and G. Oriolo, "Local Incremental Planning for a Car-Like Robot Navigation among Obstacles," in *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, pp. 1205-1211.
- [13] Jay A. Farrell (2008). *Aided Navigation GPS with High Rate Sensors*. : McGrawHill.
- [14] M. Stewart Geyer and Eric N. Johnson, "3D Obstacle Avoidance in Adversarial Environments for Unmanned Aerial Vehicles," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006, pp. 1-12.
- [15] S.S. Ge and Y.J. Cui, "Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method," *Autonomous Robots*, vol. 13, pp. 207-222, November 2002.
- [16] Casper Ebbesen Schultz, "INS and GPS Integration," Master Thesis, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Lyngby, 2006.
- [17] Adriano Solimeno, "Low-Cost INS/GPS Data Fusion with Extended Kalman Filter for Airbone Applications," Master Thesis, Aerospace Engineering, Technical University of Lisbon, Lisbon, 2007.
- [18] National Instruments, NI PCI-6221 (Onlines), 2013, Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/pdf/lang/en/nid/14132>, (1 November 2013).
- [19] เซนเซอร์บอกพิกัดตำแหน่ง (Global Positioning System/GPS), ขอนแก่น โน้ตบุ๊ก (Onlines), 2014, Available: http://www.kknotebook.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=89:gps--&catid=3:2009-06-13-10-56-28, (10 May 2014)
- [20] Microstrain, LORD Microstrain SENSING SYSTEMS (Onlines), 2013, Available: <http://www.microstrain.com/inertial/3dm-gx3-45>, (10 October 2013).
- [21] SICK, Laser Measurement Sensors (Onlines), 2013, Available: <https://mysick.com/saqqara/im0037514.pdf>, (6 November 2013).



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

TSAE 2015

การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ระดับชาติ ครั้งที่ 16 ประจำปี 2558
และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 8
The 16th TSAE National Conference and
the 8th TSAE International Conference
(TSAE 2015)

ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค
บางนา กรุงเทพมหานคร
17-19 มีนาคม 2558

จัดโดย
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย



สนับสนุนโดย

vnu exhibitions
asia pacific





Scientific Committee

1	Prof. Dr. Somchert Sopannornnit	Chair's Committee
2	Assoc. Prof. Dr. Winit Chinsuwan	Committee
3	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon	Committee
4	Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin	Committee
5	Assoc. Prof. Dr. Somkiat Prachayawarakom	Committee
6	Assoc. Prof. Dr. Adisak Nathakaranakule	Committee
7	Asst. Prof. Dr. Verachai Arjhan	Committee
8	Asst. Prof. Dr. Somposh Sudajan	Committee
9	Asst. Prof. Dr. Sunate Surbkar	Committee
10	Dr. Wannat Abdullakasin	Committee
11	Dr. Myanekom Sutassanamarlee	Committee
12	Dr. Anuchit Chamsing	Committee
13	Dr. Vasu Udompetaikul	Committee
14	Dr. Danuwat Thangdee	Committee
15	Dr. Damorn Bunturat	Committee
16	Prof. Vijaya Raghavan	Committee
17	Prof. Anus S. Mujumdar	Committee
18	Asst. Prof. Munehiro Tanaka	Committee
19	Dr. George Szrednicki	Committee
20	Asst. Prof. Dr. Rose-Prabir Kingsly Ambrose	Committee
21	Asst. Prof. Dr. Klein E. Ilicic	Committee
22	Prof. Dr. Xiao Dong Chen	Committee
23	Prof. Donald C. Slack	Committee
24	Prof. Dr. Dirk E. Maier	Committee
25	Prof. Ito Nobutaka	Committee
26	Prof. Dr. Chin Chen Hsieh	Committee
27	Mrs. Dares Kittiyopas	Committee
28	Mr. Aikapol Sennarong	Committee
29	Mr. Wiboon Thepent	Committee
30	Mr. Charawat Munkit	Committee and Secretary
31	Asst. Prof. Dr. Prasan Choomaihan	Committee and Asst. Secretary
32	Dr. Watchapol Chayaprasert	Committee and Asst. Secretary



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (REVIEWER)

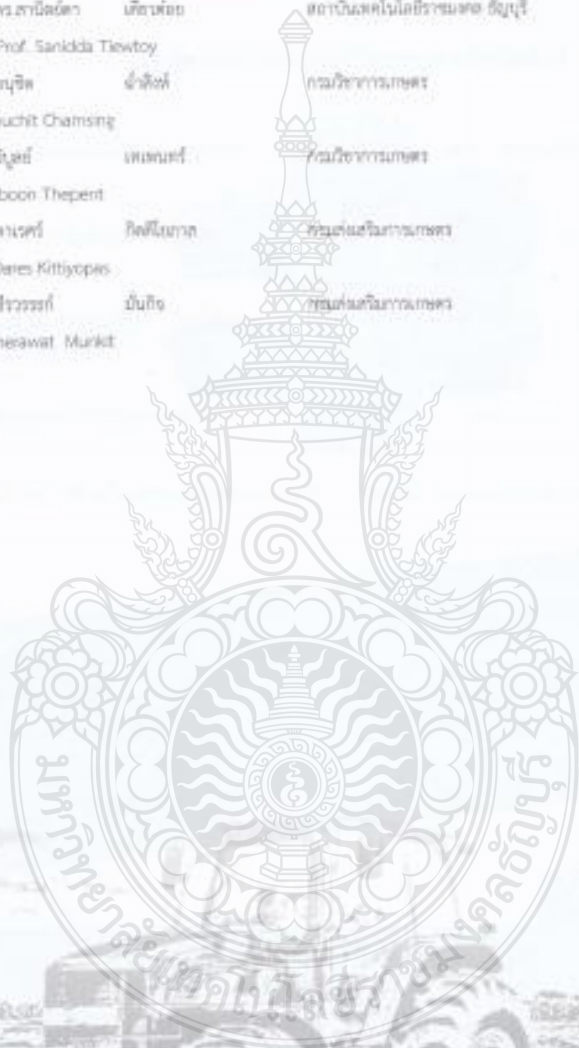
1	ศ. ดร. สมชาติ โสภณวรรณฤทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
	Prof. Dr. Somchart Soponronnarit	
2	รศ. ดร. สักกาน เดวหะสทิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
	Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin	
3	รศ. ดร. อรุณรัตน์ เทอดวงศ์วารกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	Assoc. Prof. Dr. Anurupin Terd Wongvorakul	
4	ดร. วันรัฐ อับดุลลาฮิม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	Dr. Werratt Abdullakasm	
5	ดร. วัชรพล ชยประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	Dr. Watcharapol Chayaprasert	
6	ผศ. สมชาย ชวนสุคน	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
	Asst. Prof. Somchai	
7	ดร. พญูดี ทางสี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี
	Dr. Danuwat Thangdee	
8	ดร. ฤทธิจักร บุคคาจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี
	Dr. Khridsakakhon Booddathan	
9	รศ. เสมะขวัญ พันศิริกุล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
	Assoc. Prof. Samerkwan Tantikul	
10	ผศ. ดร. สุเนศวร สิบคำ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
	Asst. Prof. Dr. Sunate Surbkar	
11	ดร. นิยามกร สุทธิภณชาติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
	Dr. Nyankom Subassanakitree	
12	รศ. ดร. ปานสมิต ศิริสมบูรณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	Assoc. Prof. Dr. Panamas Sirisomboon	
13	รศ. สาธิป จิตนาศกร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	Assoc. Prof. Satip Jittanapakorn	
14	ผศ. ดร. ประสันต์ ชนธิชาญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	Asst. Prof. Dr. Prasan Chochujathan	
15	ผศ. ดร. พงษ์วุฒิ แฉงจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	Asst. Prof. Dr. Songvoot Sangchan	
16	ดร. วสุ อุฒเพชชกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	Dr. Vasu Udornpetakul	





รายงานผู้ทรงคุณวุฒิ (REVIEWER)

17	ดร. รัชดาภรณ์ แก้วกลิ่น	มหาวิทยาลัยบูรพา
	Dr. Rachadaporn Kaewikulm	
18	ดร. จิตพรศักดิ์ สิงห์กลิ่น	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต
	Dr. Jitprong Langkapi	
19	ดร. ศรธานีธิดา เกียรติก้อง	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต
	Asst. Prof. Sanicka Tiewtoy	
20	ดร. อรุณชัย คำสิงห์	กรมวิชาการเกษตร
	Dr. Anuchit Chamsing	
21	นาย วิบูลย์ เทพนนท์	กรมวิชาการเกษตร
	Mr. Viboon Thepent	
22	นาง ดารณี กิติยอป	กรมส่งเสริมการเกษตร
	Mrs. Dares Kitiyopes	
23	นาย ชีววัฒน์ มั่นนิย	กรมส่งเสริมการเกษตร
	Mr. Cheawat Munkt	





ETA-12	AUTONOMOUS NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE CAPABILITY IN OUTDOOR ENVIRONMENTS FOR CAR ROBOT	68
ETA-13	THE POTENTIAL OF JATROPHA CARCUS PLANTING AS RENEWABLE ENERGY CROP UNDER MALAYSIA WEATHER CONDITION	69
FE-01	PRODUCING OIL-FREE CRISP DURIAN CHIP USING COMBINED MICROWAVE-HOT AIR DRYING WITH STEP-DOWN MICROWAVE POWER INPUT TECHNIQUE.....	70
FE-02	QUALITY AND DRYING KINETICS OF INSTANT PARBOILED RICE FORTIFIED WITH TURMERIC USING HOT AIR AND MICROWAVE-ASSISTED HOT AIR DRYING	71
FE-03	EFFECT OF BANANA VARIETY AND PUFFING CONDITIONS ON PUFFED BANANA QUALITY	72
FE-04	IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF EDIBLE CHITOSAN FILMS BY COMBINED USE OF PLASTICIZER AND EMULSIFIER	73
FE-06	MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE-ASSISTED HOT AIR DRYING FOR MACADAMIA NUTS	74
FE-07	PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BIOSURFACTANT PRODUCED BY <i>Ochrobactrum anthropi</i> 2/3 USING DURIAN SEED POWDER AS A NOVEL SUBSTRATE	75
OT-02	ASIA GROWTH STRATEGY IN AGRICULTURE.....	76
PT-01	DETERMINATION OF THE EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT AND THE HEAD RICE YIELD OF PARBOILED PADDY BY FLUIDIZED BED DRYING	77
PT-02	PREDICTION OF PARTICLE RESIDENCE TIME IN AN IMPINGING STREAM DRYER VIA CFD-DEM MODEL.....	78
PT-04	NUMERICAL SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER INSIDE A SINGLE RICE KERNEL DURING FLUIDIZED BED DRYING	79
PT-08	DRYING KINETICS AND QUALITY OF DRIED LONGAN USING MICROWAVE-VACUUM TECHNIQUE	80
PT-10	EFFECT OF PACKAGING AND STORAGE TEMPERATURE ON QUALITY ATTRIBUTE OF ORGANIC BROWN RICE	81
PT-11	DESIGN FACTORS AFFECTING LOSSES OF AN AXIAL FLOW CORN SHELLING UNIT	82
PT-13	EFFECT OF SOAKING TIME ON GABA CONTENT AND BROWN RICE QUALITY IN THE SOAKING PROCESS OF PADDY FOR GERMINATED BROWN RICE	83

AUTONOMOUS NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE CAPABILITY IN OUTDOOR ENVIRONMENTS FOR CAR ROBOT

*Sittichai BOONYARAK, Pradya PREMPRANEERACH

*Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Road, Klong6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand*

Corresponding author: Sittichai BOONYARAK. E-mail: south_phuket@hotmail.com

Keywords: Obstacle Avoidance; Occupancy-Grid Map; Potential Field; Local Incremental Planning; Car Robot

ABSTRACT

In this research, we propose and implement obstacle detection and avoidance methods combining with a local incremental planning technique for navigating a car-like robot, equipped with GPS, IMU, and laser range finder sensors. To detect an obstacle, radial distance data from laser range finder is transformed to cartesian coordinate and mapped to a global occupancy-grid map. Thus, obstacles in real dynamic environment can be detected from a probability of occurrence in the global occupancy-grid map according to a specified threshold. Then, an integration of the local incremental planning and potential field techniques employ obstacles' location from the global map to plan a trajectory from the robot current position to a desired target position. As a result, the vehicle can seek the target and avoid obstacles at the same time. Results of a vehicle simulation, developed in Matlab, reveal that the car-like robot can approach the target point and steer away from static obstacles according to an instantaneous virtual force acting on the vehicle center. Experimental results show that the proposed navigation method, developed in Matlab, can detect obstacle and avoid static obstacles and navigate to the desire target waypoints in the global occupancy map.

INTRODUCTION

In present, autonomous and semi-autonomous technologies have played an important role in our daily life in various fields, such as communication, harvesting, manufacturing, and transportation. Particularly, modern transportations on land, in water or in air, are somehow contained an autonomous or semi-autonomous function, like a cruise control for car and an auto-pilot for airplanes and boats, to assist human driving and to reduce human error. To avoid frequent car accidents in Thailand and around the world, most active controls with network communication have been developed for automatic parking, preventive crash stop as well as autonomous driving. For a few decades, researchers in both university and automotive industry have been interested in developing a completely autonomous car, like in

Drappra grand challenge or Google car, such a smaller number of accidents will occur on the road.

The autonomous system architecture for car is comprised for two main systems: control and motion-planning systems. Analyzing information from dynamic environments in real time is performed by the motion-planning system, such as Probabilistic roadmaps [1], Cell decomposition technique [1], Potential field technique [1] or Vector field Histogram method [2], which the algorithm of interest. The objective of the motion planning is 1) to evaluate optimal path from current position to the desired location with respect to specified quantity, 2) to generate commands to several control systems, including low-level controls, and 3) to receive feedback signals from all sensors. Most of low-level control systems employ a PID control or a feedback linearization control, which can be applied to our research.

To achieve the autonomous navigation with obstacle avoidance capability, two main systems: perception and motion planning are required. First, one of the popular perception techniques is to measure radial distances using a laser range finder because of its accuracy. S. Geyer and E. Johnson [3] demonstrated three techniques for obstacle mapping with data from the laser range finder 1) grid-based map, 2) map scrolling, and 3) confidence algorithm. According to J. Borenstein and Y. Koren [4], their perception method used a certainty grid map or a fixed-size grid map, which is similar to that in [3], and contained simple map analysis as well. Moreover, S. Solanki [6] introduced a traversability-grid approach, which is better than the certainty grid map since this map always aligns along the North-East direction. Also, the robot is located at the center of the traversability-grid for safety in obstacle avoidance behavior. J. Roberts and P. Corke [5] described a threshold of gradient method for building the terrain map. Likewise, R. Zou [7] basically detected obstacles in general environment using a threshold method which in this research, it can detect obstacles using a stereo camera and a radar sensor instead. Second, the motion planning performs the obstacle avoidance and the goal-seeking behavior at the same time, which employ feedback signal from all sensors and control low-level systems. A. Bemporad, etc. [8] proposed a local incremental planning method using potential function. S.S.GE and Y.J.CUI [9] modified

the potential function technique, that is applicable for dynamic environment. C. Wuthishuwong, C. Silawatchananai and M. Parnichkun [10] applied the potential field method to an intelligent vehicle for the autonomous navigation with obstacle-avoidance ability. However, the virtual force is directly computed from laser range finder without building the obstacle map.

Main objective of our research is to implement the obstacle avoidance method and the automatic target-seeking navigation for the car-like robot by combining the obstacle detection method with the potential field technique and the local incremental planning. This paper is organized as the following: Section 1 describes hardware of the car-like robot, Section 2 introduces the obstacle detection method and the occupancy-grid map, Section 3 explains the goal-seeking navigation and obstacle avoidance method using potential field and local incremental planning, and Section 4 presents simulation and experimental results of automatic navigation with obstacle avoidance ability of the car-like robot in real environment.

I. HARDWARE

In this paper, the car-like robot is the modified electrical ATV. A vehicle steering for turning two front wheels is equipped with a 24V DC brush motor, controlled its angular rotation in the position mode. The vehicle is real-wheel drive using a 36V DC brushless motor, controlled its angular velocity in the velocity mode. Both front- and rear-wheels motor drives, using Accelus Panels from Copley Motion Control, are connected to a NI PCI-6221 Data Acquisition (DAQ) card from National Instrument to perform the low-level control of these two DC motors. The low-level control commands are calculated from the robot position and obstacles' position at each instance. After motion-planning command computation using MATLAB, the DAQ card generates the analog control signal to motor drives and receives encoder pulses from two motors.

For the high-level control, an embedded computer receives the car position and the heading angle from the Global Positioning System (GPS) of and Inertia Measurement Unit (IMU), respectively. Microstrain 3DM GX3-45 IMU combined with GPS can provide the robot orientation from 3-axis Euler angles with a sensor x-axis pointing forward and the robot position from Latitude/Longitude. Furthermore, obstacles' location in perception module can be detected with an outdoor LMS511-Pro Sick laser scanner for real-time virtual force calculation. This Sick laser scanner has a maximum detection range of 80 m with a maximum field of view of 180 degrees.

Fig. 1 illustrates the hardware architecture with both low-level and high-level controls of the car-like robot. Fig. 2 shows successfully installation of all sensors, actuators, and controllers in the car-like robot.

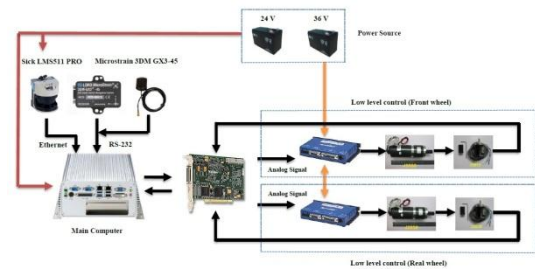


Fig. 1 Hardware architecture of the car-like robot



Fig. 2 The car-like robot

II. OBSTACLE DETECTION METHOD

Main objective of the perception module is to detect all obstacles in the vehicle path, to identify obstacle location in the global coordinates, and to pass through the correct obstacle information to the motion planning algorithm. Our car-like robot is operated in outdoor environment. In this section, the global coordinate's system and ECEF transformation equation are presented for evaluating obstacles' location relative to the global fixed environment. Furthermore, a fixed grid map is constructed as a place holder for obstacle locations. In the last part, a specify threshold is applied to a probability of obstacle occurrence in the global occupancy-grid map to provide more accurate obstacle locations.

Coordinate Transformation

In this paper, Earth Centered Earth Fixed (ECEF) frame and tangent plane [11] are employed as the main reference frames. The coordinate transformation from Latitude/Longitude to the ECEF frame and that from the ECEF frame to the tangent plane are described below.

ECEF Coordinate Transformation:

Latitude/Longitude and altitude measured form GPS at each instance are transformed to the x, y, z position in the ECEF frame as in Eqn. (1):

$$\begin{aligned}
x &= (R_N + h) \cos(\phi) \cos(\lambda) \\
y &= (R_N + h) \cos(\phi) \sin(\lambda) \\
z &= [R_N(1 - e^2) + h] \sin(\phi)
\end{aligned} \tag{1}$$

where

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\phi)}} \text{ is the normal radius of earth.}$$

a is equatorial radius = 6378137 [m].

h is altitude or geodetic height [m].

e is eccentricity = 0.08181919.

ϕ is latitude [degree].

λ is longitude [degree].

ECEF to tangent plane Transformation: the position in ECEF frame can be transformed to the tangent plane, which an origin is located at the vehicle center. The x- and z-axes of the tangent plane point toward true North and perpendicular to the Earth surface. This transformation could be written as in Eqn. (2):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_t^e \left(\begin{bmatrix} x_2^e \\ y_2^e \\ z_2^e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0^e \\ y_0^e \\ z_0^e \end{bmatrix} \right) \tag{2}$$

where

$$R_t^e = \begin{bmatrix} -\sin(\phi) \cos(\lambda) & -\sin(\phi) \sin(\lambda) & \cos(\phi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\cos(\phi) \cos(\lambda) & -\cos(\phi) \sin(\lambda) & -\sin(\phi) \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} x_0^e & y_0^e & z_0^e \end{bmatrix}^T$ is an initial position in the ECEF frame.

$\begin{bmatrix} x_2^e & y_2^e & z_2^e \end{bmatrix}^T$ is a current position in the ECEF frame

$\begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix}^T$ is a distance from initial position to current position along the tangent plane

Transformation from radial distance of laser data to global coordinate: all radial distance data from laser range finder sensor, which generally expressed in a polar coordinate, must be transformed to the global vehicle coordinate system that is based on a Cartesian coordinate system. Thus, the transformation from the polar to Cartesian coordinates can be determined as the following Eqn. (3).

$$\begin{aligned}
x_l &= r_l \cos(\theta_l) \\
y_l &= r_l \sin(\theta_l)
\end{aligned} \tag{3}$$

where

r_l is radial distance data from laser in the polar coordinate.

θ_l is angle of each radial distance data

x_l is distance along the x-axis of the Cartesian coordinate

y_l is distance along the y-axis of the Cartesian coordinate

With the assumption that the car-like robot motion is restricted only in the horizontal plane and a z-axis of

IMU coordinate system is opposite to the z-axis of the tangent plane. As a result, the transformation of the laser sensor coordinate to the global coordinate is expressed as in Eqn. (4).

$$P_t = \begin{bmatrix} R_{(3 \times 3)} & x_l & y_l & z_l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_l \\ x_l \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

where

P_t is laser data in global coordinates

x_l, y_l, z_l is translation matrix in tangent plane

x_l, y_l is point laser in local coordinate

And a rotation matrix, $R(3 \times 3)$, used in Eqn. (4), can be expressed as the following from

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \cos(\alpha) & \sin(\theta) \sin(\beta) \cos(\alpha) - \cos(\theta) \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cos(\theta) \sin(\beta) + \sin(\theta) \sin(\alpha) \\ \cos(\beta) \sin(\alpha) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\theta) + \cos(\alpha) \cos(\theta) & \cos(\theta) \sin(\beta) \sin(\alpha) - \sin(\theta) \cos(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \sin(\theta) \cos(\beta) & \cos(\theta) \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

where

θ is a roll angle [radian]

β is a pitch angle [radian]

α is a yaw angle [radian]

All coordinate transformation in Eqn. (1)-(4) mentioned above will be applied to the obstacle detection and obstacle avoidance method, described in later section of this paper.

Occupancy-grid map

One of the existing map construction techniques is the occupancy-grid map representation. The occupancy-grid map, used in this research, consists of two types of grid maps: local- and global-grid maps, representing in the Cartesian coordinate. For the local-grid map, we divide a whole workspace of 4 m² into square elements (or called "cell") where each cell dimension is 2 m by 2 m. A center of the local-grid map is coincided with a center of the car-like robot and the local-grid map is translates and rotated within the global-grid map along with the robot motion. The fixed global-grid map contains an entire workspace of 90 m², which its origin is located at the lower left corner. A diagram in Fig. 4 illustrates the occupancy-grid map concept. At each instance of time following the robot motion, radial-distance measurements, returned from the laser range finder, are transformed into the global coordinate. Then, an occurrence value of each cell is incremented according to those transformed distances that fall within corresponding cell area. After the occurrence value in the global-grid map is archived, obstacle location could be detected in next step.

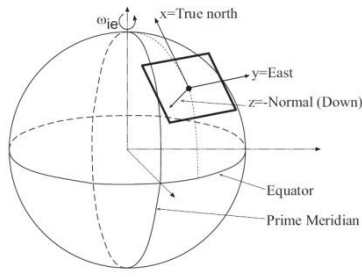


Fig. 3 ECEF coordinate and tangent plane [11]

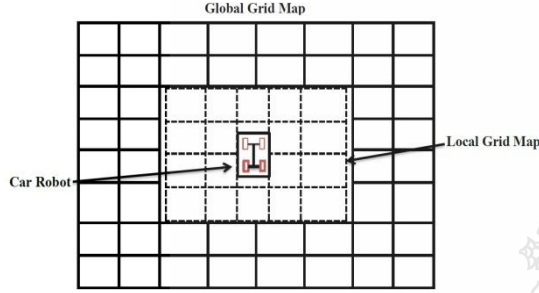


Fig. 4 Diagram of the occupancy-grid map, consisted of local- and global-grid maps

Obstacle detection The obstacle detection technique is one of the important part of perception module so that the obstacle avoidance capability could be achieved. In this research, the occurrence probability of obstacles in the global occupancy-grid map is proposed to help us identify the obstacles' location. After the global-grid map is updated at each instance following the robot motion, the occurrence probability in each cell increases. Then, the obstacle location could be detected when the occurrence probability increases above a specified threshold. If the occurrence probability of each cell in the global-grid map exceeds a pre-defined threshold, the algorithm will label that individual cell as then obstacle instead of free space. In next iteration, the algorithm continuously updates until the robot reaches the target point. The obstacle position from this detection algorithm then passes to the potential filed method to generate the virtual force for the motion-planning system.

III. OBSTACLE AVOIDANCE

The proposed autonomous obstacle avoidance method for outdoor environment combines the potential field method with the local incremental planning technique, which is a feedback control algorithm using the virtual force from the potential field. In this section, both the potential field method along with its attractive and repulsive functions and the local incremental planning are introduced.

Potential field method

The potential field method is used for creating a virtual force, acting on the robot, to attract the robot to a desired target point and to push the robot away from nearby obstacles at the same time. Two relative

distances between obstacles and current robot position as well as between current robot locations and the target point help to compute the repulsive force and the attractive force, respectively. The advantage of the potential field are 1) the virtual force can be updated in real time such that the robot path in the global occupancy grid does not need to be pre-planned in advance and 2) the planning method can be coupled directly to the potential field. Its main disadvantage is that the robot might be trapped at the local minim position. The potential field is comprised of two potential functions as the following:

Attractive Potential Function: In literature, the existing attractive potential function [12] is defined as a Euclidean norm or a relative distance between car robot and target. A weighted sum of the relative distance and relative speed between robot and target is used in a new attractive potential function [9], in Eqn. (5), so that target movement can be accounted for.

$$U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \alpha_p \|\mathbf{p}_{tar}(t) - \mathbf{p}(t)\|^m + \alpha_v \|\mathbf{v}_{tar}(t) - \mathbf{v}(t)\|^n \quad (5)$$

where $p(t)$ and $p_{tar}(t)$ are positions of robot and target, respectively. Similarly, $v(t)$ and $v_{tar}(t)$ correspondingly denote the robot and target velocities. The symbol $\|\bullet\|^m$ is represented the m-norm of vector, α_p and α_v are positive scalar weights for relative position and velocity norms, and m and n are positive constants. Note that all positions are expressed in a 3-dimensional space as $p = [x, y, z]^T$ or in a 2-dimensional space as $p = [x, y]^T$.

The virtual attractive force is defined as a negative gradient of the attractive potential function with respect to the robot position and velocity as in Eqn. (6).

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) &= -\nabla U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \\ &= -\nabla_p U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_v U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (6)$$

where, the gradient of the attractive potential with respect to position is

$$\nabla_p U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \partial U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) / \partial \mathbf{p} \quad (7)$$

And the gradient of the attractive potential with respect to velocity is

$$\nabla_v U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \partial U_{att}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) / \partial \mathbf{v} \quad (8)$$

Repulsive Potential Function: To avoid collision with obstacles, the hyperbolic repulsive potential function, calculated as inverse of the relative position between robot and obstacle, is generally used to generate the repulsive force. With an assumption of convex-shape obstacles, a new repulsive potential function, defined in

[9], included both of the inverse of relative position and relative velocity, is expressed as the following.

$$U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) \geq \rho_0 \text{ or } v_{RO} \leq 0 \\ \eta \left(\frac{1}{\rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO})} - \frac{1}{\rho_0} \right), & \text{if } 0 < \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) < \rho_0 \text{ and } v_{RO} > 0 \\ \text{not defined,} & \text{if } v_{RO} > 0 \text{ and } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) < \rho_m(v_{RO}) \end{cases} \quad (9)$$

where $\rho_s(\mathbf{p}_{obs}(t), \mathbf{p}(t))$ is defined as a shortest Euclidean distance between robot and obstacle, $v_{RO}(t)$ is a relative velocity between robot to obstacle, $\rho_m(v_{RO})$ is defined as a distance traveled before robot's v_{RO} reduce to zero, ρ_o denotes a maximum obstacle size, and η is positive constants. Thus, the virtual repulsive force can be computed as a negative gradient of the repulsive potential function, as in eqn. (10).

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) &= -\nabla U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \\ &= -\nabla_p U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) - \nabla_v U_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (10)$$

where, ∇_p, ∇_v are the gradient with respect to position and velocity, as well. Or, Eqn. (10) can be rewritten as

$$\mathbf{F}_{rep}(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \begin{cases} 0, & \text{if } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) \geq \rho_0 \text{ or } v_{RO} \leq 0 \\ \mathbf{F}_{rep1} + \mathbf{F}_{rep2}, & \text{if } 0 < \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) - \rho_m(v_{RO}) < \rho_0 \text{ and } v_{RO} > 0 \\ \text{not defined,} & \text{if } v_{RO} > 0 \text{ and } \rho_s(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{obs}) < \rho_m(v_{RO}) \end{cases}$$

where the first part of the repulsive force, \mathbf{F}_{rep1} , points in a direction away from the obstacle and the second part of repulsive force, \mathbf{F}_{rep2} , helps pushing the robot to go around the obstacle.

Local Incremental Planning

The local incremental planning is one of the motion-planning techniques that can generate a real-time robot trajectory. The local incremental planning consists of a high-level nonlinear control algorithm that incorporates both real-time velocity and position of the car-like robot, target, as well as all obstacles. The generated trajectory from this planning method includes the resultant virtual force acting on the robot, computed from the potential functions. As a result, the car-like robot can avoid obstacles and approach the desired target at the same time.

Nonlinear Control Law: According to a kinematic model of the car-like robot in [8], a state-space representation can be described in a nonlinear form as in Eqn. (11).

$$\dot{\mathbf{X}} = G(\mathbf{X})u \quad (11)$$

where $\mathbf{X} = [x \ y \ \alpha l \theta \ \beta]^T$ and α is a positive weighting constant. Given a specify desired feasible trajectory: $\mathbf{X}_d = [x_d \ y_d \ \alpha l \theta_d \ \beta_d]^T$, a control law or command input (u) can be computed from a pseudo-inverse of the nonlinear function $G(\mathbf{X})$ as

$$u = G^\#(\mathbf{X})\dot{\mathbf{X}}_d = [G^T(\mathbf{X})G(\mathbf{X})]^{-1}G^T(\mathbf{X})\dot{\mathbf{X}}_d \quad (12)$$

A feedback linearization technique, minimizing the trajectory tracking error in a least-square sense, is applied to the above control law. Therefore, the feedback law for the robot steering and for rear-wheel drive can be reformulated as the following

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{\dot{x}_d \cos \beta + \dot{y}_d \sin \beta + \alpha^2 l \dot{\theta}_d \sin \phi}{1 + \alpha^2 \sin \phi}, \text{ and} \\ u_2 &= \dot{\beta}_d \end{aligned} \quad (13)$$

Local Trajectory Generation: To create the desired trajectory, the virtual forces could be obtained from the potential function. The virtual attractive force in Eqn. (6) must act only on front wheels to steer the robot toward the target, while the virtual repulsive force in Eqn. (10) must be imposed on both front and rear wheels as shown in Fig. 5. $\mathbf{F}_f = (\mathbf{F}_{f,x}, \mathbf{F}_{f,y})$ and $\mathbf{F}_r = (\mathbf{F}_{r,x}, \mathbf{F}_{r,y})$ respectively represent forces acting on front wheels and rear wheels. These forces relate to each other and to a moment on a front-wheel axle (\mathbf{M}_θ) according to the virtual work principle [8], as shown in Eqn. (14).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{f,x} \\ \mathbf{F}_{f,y} \\ \mathbf{M}_\theta \\ \mathbf{M}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{r,x} \\ \mathbf{F}_{r,y} \\ l(\mathbf{F}_{r,x} \sin \theta - \mathbf{F}_{r,y} \cos \theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

As a result, the total virtual force and moment acting on the robot's front wheel are expressed as

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_r \\ \mathbf{M} &= \mathbf{M}_\theta \end{aligned} \quad (15)$$

Derivatives of the desired trajectory are required in the feedback linearization command (u_1, u_2) in Eqn. (13), thus these derivatives could be computed from the total virtual force and moment acting on front wheels, as in Eqn. (16), with a simple quasi-static assumption.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = k_{f1} \mathbf{F} \text{ and } \dot{\theta}_d = k_{f2} \mathbf{M} \quad (16)$$

where, positive constants, (k_{f1}, k_{f2}) , are equivalent to inverse linear and angular damping coefficients. Thus, the calculation of the control input u_1 in Eqn. (13) should obtain sufficient damping from these derivatives in Eqn. (16).

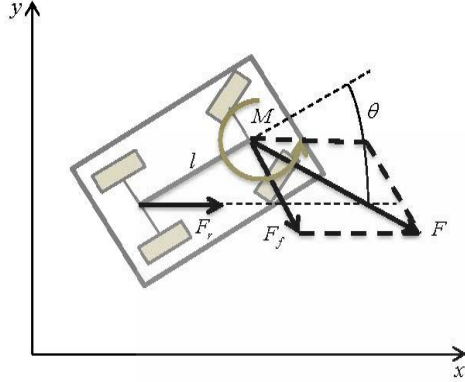


Fig. 5 Forces and torque acting on the car-like robot.

Furthermore, the steering control input u_2 could be expressed as in Eqn. (17),

$$u_2 = -\frac{k_\beta(\beta - \beta_d)}{\text{sign}(\cos(\beta - \beta_d))} + \frac{u_1}{\|F\|^2} \begin{bmatrix} -F_y & F_x \end{bmatrix} \nabla F \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

where $\beta_a = \text{ATAN2}(F_y, F_x)$ is a directional angle of the front-wheel force, $\beta_d = \beta - \arcsin(\sin(\beta - \beta_a))$ is a directional angle of the desired front-wheel force, k_β is a positive constant gain of a steering response time, and a partial derivative of the total force with respect to the horizontal plane axes is given below

$$\nabla F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (18)$$

According to the virtual force from the potential field, these input commands produce desired linear and angular velocities of the car-like robot as well as the steering angle of the front wheel. Next, the motion planning of the robot using this trajectory generation technique is tested on the car-like robot kinematics simulations.

IV. SIMULATION RESULTS

To validate the motion planning algorithm combining with the potential field, kinematic model of the car-like robot is implemented in MATLAB/Simulink, then goal-seeking simulations with obstacles in the global-grid map. This section demonstrates two main simulations: 1) the obstacle

detection in the global-grid map and 2) target-seeking with two fixed obstacles in the global map.

In the first simulation, constructions of the global- and local-grid maps are tested for the obstacle detection by threshold the probability of occurrence. There are two obstacles in the global map and the robot moves forward along a straight line parallel to the x-axis from left to right. In the global-grid map, we subdivide workspace into small square grids with dimension of 100 x 100 cells. The local-grid map around the car-like robot has a dimension of 30 x 30 cells. As the robot moves along the x direction with 10 cell increments until its center locates at 80 unit, as in Fig. 6 the global map contain value in each cell equal zero but if it can detect obstacle as show in Fig. 6. The probability of occurrence in the global-grid map is updated as in Fig. 7. A circular obstacle becomes prominent such that the thresholding could help identifying the obstacle location.

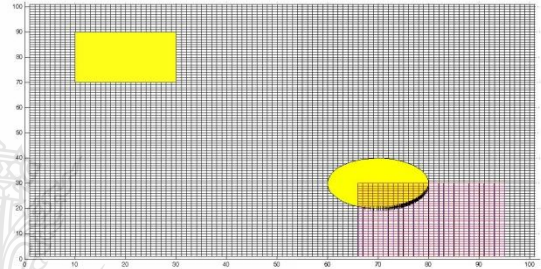


Fig. 6 Simulation of obstacle detection

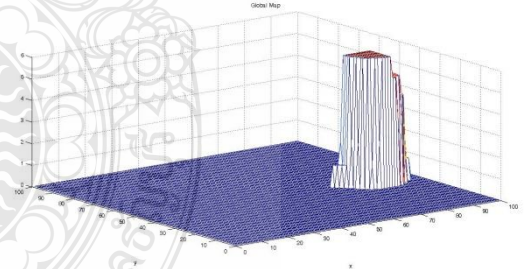


Fig. 7 The probability of occurrence in the global-grid map when the robot moves along x direction.

In the second simulation implemented with MATLAB/Simulink, two fixed obstacles, located at (6m,10m) and (20m,20m), along the straight path from current robot position to the target point in the workspace. In this simulation, a dimension of the car-like robot is 1.2 m long x 0.8 m wide. An initial center position of the car-like robot is located at (0,0) with initial heading angle of 0° and initial front-wheel steering angle of 0° and a target point is located at (30m,30m). All feedback linearization control constants are $k_\beta = 1$, $k_{f1} = 2.5$, $k_{f2} = 1$ and $\alpha = 0.95$. The attractive virtual force is initially large and it gradually decreases to zero as it approaches the target within 30 sec. The repulsive force is almost zero at an initial

position and near the target, which is far away from obstacles. But, when the robot is near the obstacle, the repulsive force reaches a maximum value. Therefore, the car-like robot can reach the target point softly and avoid colliding with obstacles, as shown in Fig. 8.

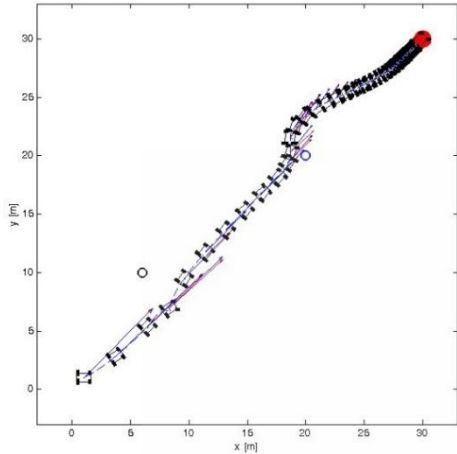


Fig. 8 Motion planning simulation with the virtual force acting on the car-like robot when there exists two fixed obstacles, located at (6m,10m) and (20m,20m).

V. EXPERIMENTAL RESULTS

Similar to simulation results, we demonstrate two experimental cases: 1) obstacle detection using laser range finder in the occupancy-grid map 2) real-time obstacle avoidance in outdoor environment.

In the first experiment, the global occupancy-grid map with a dimension of 90 x 90 cells is created in a soccer field at mechanical engineering department, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, as shown in Fig. 9, so that the obstacle detection algorithm using the local-grid map with a dimension of 5 x 10 cells. Before testing with the car-like robot, we test a car movement simulation using GPS, IMU, and laser range finder, installed on a cart. The cart is moved along a straight path from North to East or along x-axis of the global-grid map when there exists a box obstacle in the front. This experimental result are shown in Fig. 10, it shows a correction identification of the box obstacle location at $(x,y) = (8,1)$ m in the global-grid map. So, in next step, the obstacle location is used as an input for the local incremental planning.



Fig. 9 Obstacle detection test in outdoor environment.

In the second experiment, we use a similar outdoor setup, as in previous test, to perform a real-time computation of the virtual force for the car robot. Then, command inputs for front-wheel steering and rear-wheel drive are generated from motion-planning control law and send to low-level motor controls. Also, this test shows that our obstacle detection technique could be operated with the obstacle avoidance. Both target and initial robot position are located along x axis of the global-grid map. Moreover, a box obstacle is placed in between robot and target point.

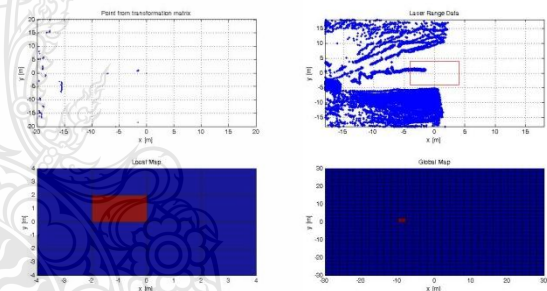


Fig. 10 Experimental results of the obstacle detection technique. Top Left: Initial point cloud from laser scanner at initial instance, Top Right: Overlay point cloud from laser scanner as the robot moves forward from right to left, Bottom Left: Local-grid map updated at the final time, Bottom Right: Global-grid map updated at the final time.

According to Fig. 11, initially the car-like robot moves directly toward the obstacle because the repulsive force is still smaller than the attractive force. Once the robot moves closer to the obstacle, its front wheels start steering to the right to avoid the obstacle in front or the robot moves around the obstacle. Then, the robot is steered back toward the target. Thus, the result shows that the car-like robot can avoid the obstacle, move to the safe zone, and gradually approach the target at the same time.

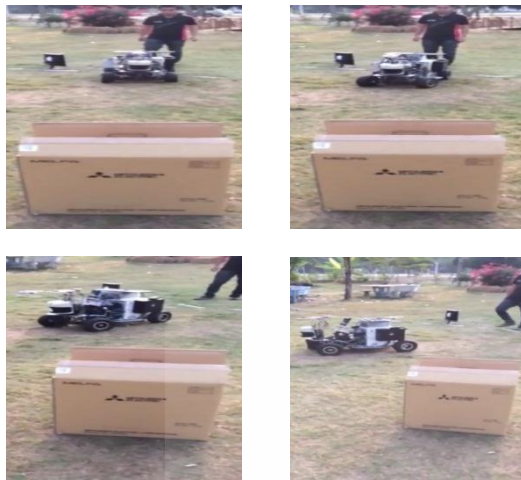


Fig. 11 Experimental results of the obstacle avoidance for the car-like robot.

VI. CONCLUSION

In this research, we proposed and developed the obstacle detection technique and a combination of the potential field with the local incremental planning methods for autonomous navigation with obstacle avoidance ability for the car-like robot. This car robot is equipped with GPS, IMU, and laser range finder sensors. First, the proposed method is tested by simulating the robot in MATLAB/Simulink: 1) the obstacle detection using the occupancy-grid map, consisting of the local- and global-grid map, which can identify the obstacle location according to the probability of occurrence and 2) autonomous navigation for the car-like robot, which pursues the target and avoids fixed obstacles along its path.

For experimental results in outdoor environment, we demonstrated two tests in the soccer field parallel with those from simulation: 1) the obstacle detection algorithm using laser range data and GPS position can identify the obstacle location in the global occupancy-grid map, and 2) obstacle avoidance can be achieved when the car-like robot moves toward the target along the straight path.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank Rajamangala University of Technology Thanyaburi and the National Research Council of Thailand (NRCT) for 2557 annual research grant to financially support this research.

REFERENCES

- 1 Coenen, S.A.M. Motion planning for mobile robots-a guide. Master Thesis, Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Eindhoven (2012)
- 2 Borenstein, J. and Koren, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robot in cluttered environments. Proc. of the IEEE International

Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, Ohio, pp. 572-577 (1990)

- 3 Geyer, Mark J. and Johnson, Eric N. 3D obstacle avoidance in adversarial environments for unmanned aerial vehicles. Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado (2006)
- 4 Borenstein, J. and Koren, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robot. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 19: 1179-1187 (1989)
- 5 Roberts, J. and Corke, P. Obstacle detection for a mining vehicle using a 2-D laser. Proc. of the Australian Conference on Robotics and Automation. (2000)
- 6 Sanjay Champalal Solanki. Development of sensor component for terrain evaluation and obstacle detection for an unmanned autonomous vehicle. PhD. Thesis, Computer science and Electrical Engineering, University of Florida, California (2007)
- 7 Ruimin Zou. Free space detection based on occupancy gridmaps. Master Thesis, Darmstadt University of Technology, Darmstadt (2012)
- 8 Bemporad, A. Luca, A.D. and Oriolo, G. Local incremental planning for a car-like robot navigation among obstacles. Proc. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1205-1211 (1996)
- 9 Ge, S.S. and Cui, Y.J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. Autonomous Robots. 13: 207-222 (2002)
- 10 Wuthishuwon, C. Silawatchananai, C. and Parnichkun, M. Navigation of intelligent vehicle by using stand-alone GPS, compass and laser range finder. Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, pp. 2121-2127 (2009)
- 11 Farrell, Jay A. Aided navigation GPS with high rate sensors, McGrawHill (2008)
- 12 Koren, Y. and Borenstein, J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. Proc. of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1398-1404 (1991)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สิทธิชัย บุญรักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	3 กุมภาพันธ์ 2533
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ความชำนาญเฉพาะทาง	ระบบนำทางและการวางแผนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

