สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

INDOOR MOBILE ROBOT TRACKING METHOD USING INERTIAL MEASUREMENT UNIT AND FINGERPRINT TECHNIQUE

ฉัตรชัย ไชยรัตน์

CHUTCHAI CHAIYARAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 132917
วัน,เดือน,ปี 10 ก.ย. 2557
.b.12629257
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-IT-M-001-006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INDOOR MOBILE ROBOT TRACKING METHOD USING INERTIAL MEASUREMENT UNIT AND FINGERPRINT TECHNIQUE

CHUTCHAI CHAIYARAT

A THESIS SUBMITTED IN PATIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN INFORMATION TECHNOLOGY

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

KMITL-2014-IT-M-001-006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

INDOOR MOBILE ROBOT TRACKING METHOD USING INERTIAL MEASUREMENT UNIT AND FINGERPRINT TECHNIQUE

นักศึกษา นายฉัตรชัย ไชยรัตน์

รหัสประจำตัว ๕๒๖๖๐๗๓๖

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โอฬาร วงศ์วิรัตน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล	
ดร.สรเดช ครุฑจ้อน	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โอฬาร วงศ์วิรัตน์	
ดร.สุเมธ ประภาวัต	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ ๒๐ พฤษภาคม ๒๕๕๗ เวลา ๑๓.๓๐ น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง ๓๓๓ ชั้น ๓ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์บูรณ์ สถิตวิริยวงศ์)

คณบดีคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

วันที่ ๒๐ **เดือน** พฤษภาคม **พ.ศ.** ๒๕๕๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์
นักศึกษา	นายฉัตรชัย ไชยรัตน์
รหัสนักศึกษา	52660736
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
แขนงวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศและการจัดการ
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. โอฬาร วงศ์วิรัตน์

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน การใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อย (Inertial sensor) ในการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารมีข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ภายในที่ใช้ในการตรวจวัด จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสม ส่งผลทำให้การติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์มีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นในแต่ละจุดที่มีการเคลื่อนที่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร โดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อยร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อช่วยลดปัญหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นดังกล่าว โดยอาศัยหลักการในการนำข้อมูลตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU: Inertial Measurement Unit) มาทำการปรับค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละจุดด้วยข้อมูลตำแหน่งอ้างอิงจากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) ซึ่งข้อมูลตำแหน่งอ้างอิงจะถูกสร้างขึ้นด้วยค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (RSS: Receive Signal Strength) จากเครือข่ายไร้สาย

งานวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการติดตามตำแหน่งฯ ที่นำเสนอโดยอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยซึ่งได้จากสภาพแวดล้อมในการทดลองที่กำหนดขึ้นร่วมกับการจำลอง (Simulation) เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า วิธีการติดตามตำแหน่งของงานวิจัยที่นำเสนอให้ค่าความถูกต้องของตำแหน่งมากกว่าการใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Indoor mobile robot tracking method using inertial measurement unit and fingerprint technique
Student	Mr. Chutchai Chaiyarat
Student ID.	52660736
Degree	Master of Science
Program	Information Technology
Major	Information Technology and Management
Year	2014
Thesis Advisor	Asst. Prof.Dr. Olarn Wongwirat

ABSTRACT

Currently, using an inertial sensor for tracking positions of indoor mobile robot has some restriction from the sensors used for measurement inside. It results in accumulated position errors. As a consequence, the tracking of mobile robots has the errors increasing on each point along the moving path.

This thesis proposes a tracking method of indoor mobile robot by using the inertial sensor and fingerprint technique to reduce the position errors occurred. The proposed tracking method acquires position data from an inertial measurement unit (IMU). The IMU position data are used to correct the error on each point by using reference positions from the fingerprint technique. The reference positions are created by using the receive signal strengths (RSSs) acquiring from wireless networks.

The experiment is conducted in this research to evaluate the performance of proposed tracking method. The IMU position data from actual environment defined by the experiment are used with the simulation of fingerprint technique. The simulation is performed on a computer running MATLAB/Simulink program. The results of experiment express that the proposed tracking method yields more accurate positions than the IMU position data alone.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดี ด้วยรับคำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่งของ ผศ.ดร. โอฬาร วงศ์วิรัตน์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ มาโดยตลอด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนั้นผู้วิจัยต้องขอขอบคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท-เอก ที่คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ ที่ให้ความรู้ เทคนิค และคำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจทาน

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและเพื่อนๆ ของผู้วิจัยที่คอยให้กำลังใจ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ฉัตรชัย ไชยรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....2

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....3

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....3

1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....3

1.6 ขั้นตอนของการวิจัย.....4

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....5

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....6

2.1 หลักการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่.....6

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย.....7

2.3 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordination).....11

2.4 ระบบนำร่องความเฉื่อย (Inertial navigation system).....14

2.5 วิธีการระบุตำแหน่ง (Positioning method).....15

2.6 เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix).....16

2.7 หลักการระบุพิกัดตำแหน่งภายในอาคาร.....17

2.8 เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์.....19

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....21

บทที่ 3 การติดตามตำแหน่งด้วยเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์.....24

3.1 การติดตามตำแหน่งด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย(IMU).....24

3.2 การระบุพิกัดอ้างอิงด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์.....30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การรวมข้อมูลและปรับแก้ข้อผิดพลาดในการติดตามตำแหน่ง.....33

บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพ.....36

4.1 สภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง.....36

4.2 ผลการทดลอง.....47

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....50

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....54

5.1 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการวิจัย.....50

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....50

5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....50

บรรณานุกรม.....52

ภาคผนวก.....57

ประวัติผู้เขียน.....62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง…….....42

4.2 ระดับความแรงของสัญญาณในเฟสออฟไลน์จำนวน 6 จุด…….....44

4.3 ระดับความแรงของสัญญาณในเฟสออนไลน์…….....45

4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธีการระบุตำแหน่งทั้ง 3 การทดลอง.....52

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบของวิธีการประมาณค่าตำแหน่งจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย..... 6

2.2 แกนของมาตรวัดความเร่งบนตัวอุปกรณ์..... 7

2.3 แกนของไจโรสโคปเมื่อวัดค่าในแกน X ,Y และ Z..... 9

2.4 การวัดมุมจากเข็มทิศดิจิตอล..... 10

2.5 ลักษณะการหมุนของมุมออยเลอร์.....11

2.6 การหมุนแกนของตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย.....12

2.7 ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์.....14

2.8 ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบคิมบอล.....15

2.9 แสดงตำแหน่งของจุด P.....16

2.10 การหมุนรอบแกนอ้างอิง..... 17

2.11 วิธีการระบุตำแหน่งโดยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์..... 20

3.1 การวางตัวของมาตราวัดความเร่งและไจโรสโคปติดตั้งบนแกนอ้างอิงเดียวกัน..... 25

3.2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์สำหรับอุปกรณ์ IMU 25

3.3 ภาพรวมของระบบนำร่องความเฉื่อย..... 25

3.4 การประมวลผลของความเร็วเชิงมุมและการวัดค่าความแรง..... 26

3.5 ขั้นตอนการคำนวณของระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์ 29

3.6 ขั้นตอนการทำงานช่วงออฟไลน์..... 31

3.7 การปรับค่าตำแหน่งด้วยเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์..... 34

3.8 ภาพรวมระบบติดตามตำแหน่ง..... 35

4.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย..... 38

4.2 ข้อมูลจากภาพวีดีโอที่บันทึกในการทดลอง..... 37

4.3 เซ็นเซอร์ความเฉื่อยและแผงวงจรควบคุม..... 38

4.4 ส่วนประมวลผลภายในแผงวงจรควบคุมฟายโอ.....39

4.5 โมดูลคำสั่งแบบออปเจ็กส่วนที่ใช้ติดต่อจากคอมพิวเตอร์สู่แผงวงจรควบคุม.....40

4.6 โมดูลการนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยมาประมวลผลหาพิกัดตำแหน่ง.....41

4.7 สภาพแวดล้อมการจำลองสำหรับระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์..... 41

4.8 สภาพแวดล้อมการจำลองเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยโปรแกรม MATLAB.....42

4.9 สภาพแวดล้อมการจำลองเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ในเฟสออนไลน์.....45

4.10 โมดูลการปรับค่าตำแหน่งด้วยข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและฟิงเกอร์ปริ้นท์.....47

4.11 พิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อย.....48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 ค่าความเร็งเชิงมุม ค่าความเร่งและค่ามุมออยเลอร์..... 48
4.13 พิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ตามเส้นทางวงรี.....49
4.14 พิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนเปรียบเทียบจากทั้ง 3 การทดลอง..... 50
4.15 กราฟค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเปรียบเทียบจากทั้ง 3 การทดลอง..... 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวิธีการติดตามตำแหน่ง (Position tracking) ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile robot) ภายในอาคารอย่างแพร่หลาย หลักการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารดังกล่าว จะอาศัยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (Sensor) ในการตรวจจับข้อมูลจากสภาพแวดล้อม จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลด้วยอัลกอริทึม (Algorithm) เพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งและติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยจะแสดงผลบนแผนที่ซึ่งปรากฏอยู่บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ปัจจุบันได้มีการใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการตรวจจับข้อมูลที่หลากหลาย โดยอุปกรณ์เซ็นเซอร์แต่ละประเภทจะมีราคาซึ่งแปรผันตามความละเอียดถูกต้องของข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ซึ่งแตกต่างกันตามเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจจับ เช่น คลื่นโซนาร์ (Sonar) แสงอินฟาเรด (Infrared) กล้องวีดีโอ (Video camera) แสงเลเซอร์ (Laser) และการตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement) เป็นต้น

อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit) หรือ IMU เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก จึงได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่อย่างแพร่หลาย โดยภายใน IMU ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้วัดความเร็วเชิงมุม (Angular rate) และส่วนที่ใช้วัดความเร่งในแนวระนาบ (Acceleration) ของการเคลื่อนที่ ซึ่งติดตั้งอยู่บนแกน 3 แกน (คือ แกน X แกน Y และ แกน Z) อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยสามารถวัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับพื้นผิว โดยจะทำการวัดความเร็วเชิงมุมและวัดความเร่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ทั้งสามแกน เพื่อให้ได้ค่ามุมและค่าระยะทางของหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ก่อนจะนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นทางและติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์ต่อไป อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยมีข้อจำกัด ซึ่งเกิดจากการทำงานของตัวไจโรสโคป (Gyroscope) และมาตรความเร่ง (Accelerometer) ที่ใช้เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ภายในสำหรับตรวจจับสัญญาณซึ่งถูกรบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลความเร็วเชิงมุมและความเร่งในแนวระนาบที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์มาประมวลผลเพื่อหาค่าตำแหน่งและใช้ในการติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสม (Accumulated error) ของตำแหน่งและมุมที่วัดได้ ส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแต่ละจุดที่มีการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีงานวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอแนวคิดและวิธีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลดังกล่าว เพื่อทำให้การติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่มีความถูกต้องมากขึ้น เช่น ใช้ตัวกรองแบบปรับตัว (Adaptive filter) ใช้ตัวกรอง LMS (Least mean square) ใช้ตัวกรอง RMS (Recursive least square) ใช้ตัวกรองคาลแมน (Kalman filter) ใช้การประมาณทิศทาง (Orientation estimation) ใช้การรวมข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์หลายตัว (Sensor fusion) หรือใช้การผสมผสานวิธีการต่าง ๆ ดังกล่าวเข้าด้วยกัน (Hybrid method) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีการดังกล่าวมีความซับซ้อนและให้ผลลัพธ์ความถูกต้องที่แตกต่างกันไป [1][2]

ในงานวิจัยนี้ จึงเสนอแนวทางการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย โดยประยุกต์เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย เพื่อใช้ปรับแก้ความถูกต้องของตำแหน่งสำหรับการติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์จะถูกใช้สำหรับระบุพิกัดตำแหน่งอ้างอิงซึ่งได้จากการเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (Received Signal Strength) หรือ RSS ที่วัดได้ เทียบกับค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในพื้นที่ซึ่งมีการตรวจวัดและบันทึกไว้ล่วงหน้า จากนั้นนำค่าตำแหน่งที่คำนวณได้จากข้อมูลความเร็วเชิงมุมและความเร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยมาเปรียบเทียบ และทำการปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ได้จากทั้งสองเทคนิคด้วยกลไกที่นำเสนอ ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งที่ได้มีความคลาดเคลื่อนลดลงและมีความถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้การติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องน่าเชื่อถือมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ รวมทั้งเทคนิคการระบุตำแหน่งภายในอาคาร
2. เพื่อศึกษาปัญหาและข้อจำกัดของวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU)
3. เพื่อนำเสนอแนวคิดในการพัฒนากลไกการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ร่วมกับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย
4. เพื่อทำการทดลองและประเมินประสิทธิภาพของวิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารด้วยกลไกและเทคนิคที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

วิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) มีข้อจำกัดในเรื่องความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ได้จากข้อมูลความเร็วเชิงมุมและความเร่งในแนวระนาบ ซึ่งตรวจวัดได้จากตัวไจโรสโคป (Gyroscope) และมาตรความเร่ง (Accelerometer) ที่ใช้เป็นเซ็นเซอร์ภายในตัวอุปกรณ์ ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมวลผล และทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมซึ่งแปรผันตามเวลาที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากสามารถหาข้อมูลพิกัดตำแหน่งอ้างอิงเพื่อใช้ในการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของแต่ละตำแหน่งที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย ก็จะช่วยทำให้ลดความคลาดเคลื่อนสะสมลงได้ รวมทั้งช่วยทำให้การระบุตำแหน่งและติดตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีความถูกต้องน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับระบุพิกัดตำแหน่งคอมพิวเตอร์ภายในอาคารซึ่งใช้การตรวจวัดและเปรียบเทียบค่าระดับความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSS) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับหาข้อมูลพิกัดตำแหน่งอ้างอิงในงานวิจัยนี้

1.4 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยใช้หลักการติดตั้งอุปกรณ์ฯ โดยยึดติดกับตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ให้เป็นส่วนเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ตัวไจโรสโคป (Gyroscope) และมาตรความเร่ง (Accelerometer) ที่ใช้เป็นเซ็นเซอร์ภายในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย อยู่ในระบบแกนอ้างอิงเดียวกันกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ จึงทำให้สามารถนำค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์มาทำการประมวลผลด้วยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

ฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งพิกัดอ้างอิงของคอมพิวเตอร์ภายในอาคาร โดยใช้หลักการวัดค่าความเข้มของสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSS) ณ.จุดต่าง ๆ ภายในพื้นที่แล้วทำการบันทึกไว้ในฐานข้อมูล เพื่อใช้เป็นตำแหน่งพิกัดอ้างอิงล่วงหน้า จากนั้นจึงนำค่าความเข้มของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ตรวจวัดได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ขณะใช้งาน ณ. จุดใด ๆ มาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มของสัญญาณที่อยู่ในฐานข้อมูล โดยใช้การคำนวณระยะยูคริเดียน (Euclidian distance) ด้วยอัลกอริทึม KNN (K-Nearest Neighbor) เพื่อระบุตำแหน่งพิกัดของคอมพิวเตอร์ในขณะใช้งาน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษากลไกการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ รวมทั้งปัญหาและข้อจำกัดของอุปกรณ์ดังกล่าวที่ใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตามตำแหน่ง โดยนำเสนอวิธีการปรับปรุงค่าความถูกต้องของการระบุตำแหน่งด้วยการประยุกต์เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อทำให้การติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารเป็นไปอย่างถูกต้องมากขึ้น ซึ่งวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยจะอยู่ในรูปของแบบจำลอง (Model) โดยใช้อัลกอริทึมและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ โดยทำการทดลองและประเมินประสิทธิภาพของวิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร โดยอาศัยข้อมูลที่ตรวจจับได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยซึ่งติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมจริงที่กำหนดขึ้นในการทดลองร่วมกับการจำลอง (Simulation) เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นจึงนำข้อมูลทั้งสองส่วนมาทำการปรับค่าความถูกต้องด้วยอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัย

1.6 ขั้นตอนของการวิจัย

1. ศึกษาผลงานวิจัยที่มีมาก่อน
   - รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า ทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์
2. ศึกษาปัญหาของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง
   - ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย เพื่อทำความเข้าใจถึงคุณลักษณะของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ภายใน
   - ศึกษาทฤษฎีในการหาค่าตำแหน่งและมุมเอียง จากค่าที่อ่านได้จากตัวไจโรสโคป (Gyroscope) มาตรความเร่ง (Accelerometer) และเข็มทิศดิจิตอล (Magnetometer)
   - ศึกษาหาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย
3. ศึกษาวิธีการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์จากค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (Received Signal Strength) หรือ RSS
4. นำเสนอวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร โดยใช้แนวคิดที่ได้จากการศึกษาในข้อ 2. และ 3. โดยสร้างเป็นแบบจำลอง (Model) เพื่อใช้ในการอธิบายกลไกการทำงานและทดลองหาผลลัพธ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. ทำการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัย
   - กำหนดสภาพแวดล้อมในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผล
   - จัดสร้างวงจรและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยเข้ากับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ต้นแบบ
   - ทำการทดลองภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนดโดยใช้อุปกรณ์ที่จัดสร้างร่วมกับแบบจำลองในข้อ 4. รวมทั้งการจำลอง (Simulation) เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์บนคอมพิวเตอร์
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท บทแรกเป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่งภายในอาคาร รวมทั้งการการปรับปรุงความถูกต้องของตำแหน่งจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยด้วยวิธีการต่าง ๆ บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ของงานวิจัยที่นำเสนอ โดยอธิบายสมการทางคณิตศาสตร์ อัลกอริทึม และแบบจำลองที่ใช้ บทที่ 4 กล่าวถึงการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการติดตามตำแหน่งหุนยนต์เคลื่อนที่ฯ ของงานวิจัยที่นำเสนอ ซึ่งประกอบด้วยสภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล บทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยด้วยวิธีการที่นำเสนอ รวมทั้งปัญหาอุปสรรคและข้อเสนอแนะ สำหรับข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยจะถูกรวบรวมไว้ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

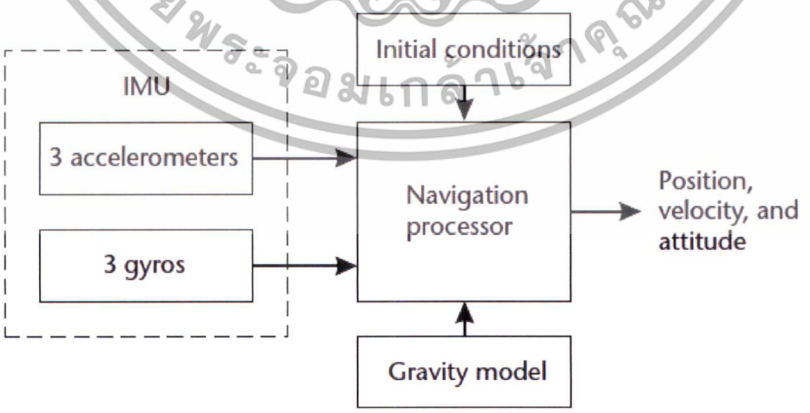
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อให้มีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับโครงสร้างและหลักการทำงานสำหรับวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร การคำนวณหาตำแหน่งจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย รวมถึงวิธีการระบุพิกัดตำแหน่งจากเครือข่ายไร้สายด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารสำหรับงานวิจัยนี้

2.1 หลักการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

โครงสร้างของระบบการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit) หรือ IMU โดยทั่วไปจะประกอบขึ้นจากเซ็นเซอร์ 2 ชนิดภายในตัวอุปกรณ์ IMU คือ ไจโรสโคป (Gyroscope) และมาตรวัดความเร่ง (Accelerometer) ที่จัดเรียงตัวกันทั้งสามแกน โดยกระบวนการในการประมวลผลจะใช้เทคนิคการอินทริเกรต (Integration) เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) และการวางตัว (Attitude) ของเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (ดังรูปที่ 2.1) โดยไจโรสโคปจะเป็นส่วนที่ใช้ในการตรวจวัดความเร็วเชิงมุม และมาตรความเร่งจะใช้ในการตรวจจับความเร่ง เพื่อให้ได้ค่าตำแหน่งมาใช้แสดงผลการติดตามการเคลื่อนที่ [3]



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของวิธีการประมาณค่าตำแหน่งจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย

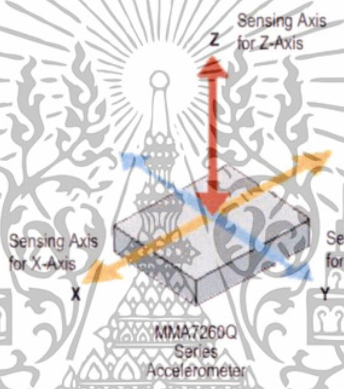
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย

ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยชนิด Razor IMU 9 Degree of Freedom (SEN-10736) ซึ่งประกอบด้วยมาตรวัดความเร่ง ADXL 345 ตัวตรวจวัดมุมเอียง ITG-3200 และเข็มทิศดิจิตอล HMC 5883L [4]

2.2.1 มาตรวัดความเร่ง

มาตรวัดความเร่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร่ง และสามารถใช้ในการวัดความเอียงของมุมได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้มาตรวัดความเร่งที่สามารถวัดได้สามแกน คือ แกน X, Y และ Z โดยแกน Z อยู่ทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แกนของมาตรวัดความเร่งบนตัวอุปกรณ์ [4]

จากสมการจลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัตถุ จะถูกกำหนดโดยตัวแปรของค่าความเร็วและค่าความเร่งที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาระยะทางจากค่าที่วัดได้จากมาตรวัดความเร่ง[1] ดังสมการ (2.1) และ (2.2)

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{2.1}$$

และ

$$a = \frac{dv}{dt} \tag{2.2}$$

โดยที่ a และ v คือ ค่าความเร่งและความเร็ว ตามลำดับ

จากสมการ (2.1) และ (2.2) ข้างต้น สามารถใช้ความรู้ทางแคลคูลัส สร้างสมการจลศาสตร์เมื่อมีความเร่งคงที่ได้ ดังสมการ (2.3) – (2.7)

$$dv = a(dt) \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{v_0}^{v} dv = \int_{0}^{t} a(dt) \quad (2.4)$$

ให้ a เป็นค่าคงที่ จะได้

$$\int_{v_0}^{v} dv = a\int_{0}^{t} dt \quad (2.5)$$

$$v - v_0 = a(t-0) \quad (2.6)$$

$$v = v_0 + at \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของความเร็วขึ้นกับเวลา โดยสามารถเขียนใหม่ได้ในรูป $v_t = v_0 + at$ ซึ่งก็คือสมการจลศาสตร์ที่ความเร็วเป็นฟังก์ชั่นของเวลา ในทำนองเดียวกัน

$$dx = v(dt) \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) จะได้

$$dx = v_0(dt) + at(dt) \quad (2.9)$$

$$\int_{x_0}^{x} dx = \int_{0}^{t} v_0\,dt + \int_{0}^{t} at(dt) \quad (2.10)$$

ในการพิจารณาความเร่งและความเร็วที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น

$$\int_{x_0}^{x} dx = v_0\int_{0}^{t} dt + a\int_{0}^{t} tdt \quad (2.11)$$

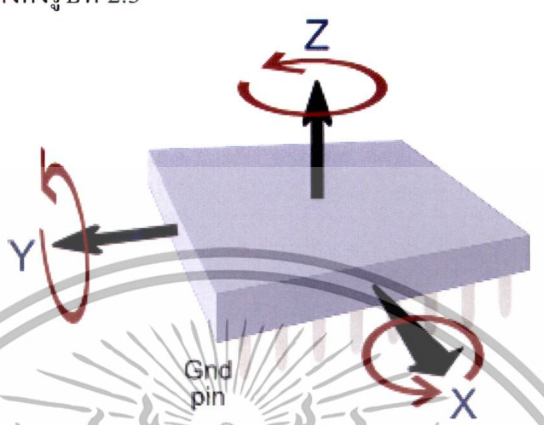
$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \quad (2.12)$$

ผลที่ได้ใน (2.12) เป็นสมการจลศาสตร์เมื่อตำแหน่งเป็นฟังก์ชั่นของเวลา การหาสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุดังกล่าวข้างต้นโดยวิธีการหาอนุพันธ์หรือการอินทิเกรต จะใช้สำหรับการหาค่าระยะทาง (x) จากสมการที่ (2.12) เมื่อความเร่งคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ไจโรสโคป

ไจโรสโคปเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ใช้วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุม ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ไจโรสโคปเพื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมของแกน 3 แกน คือ แกน X, Y และ Z การจัดวางแกนอุปกรณ์ไจโรสโคป แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แกนของไจโรสโคปเมื่อวัดค่าในแกน X ,Y และ Z [4]

คุณสมบัติที่สำคัญของไจโรสโคป ชนิดเซ็นเซอร์วัดมุมเอียง ITG-3200 มีดังนี้

- สามารถทำงานได้ที่แรงดัน 2.1 – 3.6 V
- ช่วงของความเร็วเชิงมุมที่สามารถวัดได้คือ ±2000 °/s
- ความละเอียดของการวัด 3.33 mV/°/s
- ค่าเอาต์พุตที่ออกมาแต่ละแกนจะมีค่า 0-3.3 โวลต์ และเมื่อใช้โมดูลแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D Converter) ที่มีขนาด 10 บิต ใช้แรงดันอ้างอิงเป็น 3.3 โวลต์ เอาต์พุตที่เป็นดิจิตอลจะมีค่าตั้งแต่ 0 - 1023

2.2.2.1 วิธีการแปลค่าเอาต์พุตที่เป็นดิจิตอลให้เป็นมุม

การใช้งานไจโรสโคปสามารถใช้สมการ (2.13) ในการคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุมได้จากค่าเอาต์พุตของอุปกรณ์ดังนี้ [4]

$$Gyro_rate = \left(V_{out} - V_{offset}\right) * \left(\frac{3.3}{1024}\right)/Sensitivity \qquad (2.13)$$

เมื่อ

Gyro_rate = อัตราการเปลี่ยนแปลงของมุม (degree/s)

Vout = ค่าเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ (digital)

Voffset = ค่าเอาต์พุตของเซ็นเซอร์เมื่ออยู่นิ่งในแนวระนาบ (digital)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensitivity = ค่าความละเอียดของไจโคสโคป (V/°/s)

ตัวอย่างการวัดมุมจากสมการ (2.13) เมื่อแทนค่าตัวแปรดังกล่าว Voffset = 512 และ Vout = 600 รวมทั้ง Sensitivity = 3.33 mV/°/s จะได้

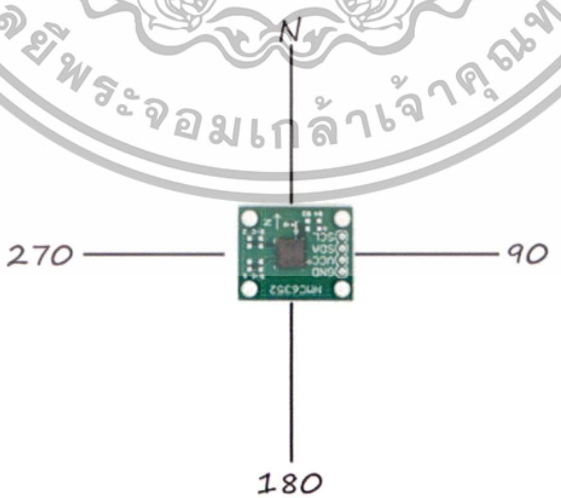
$$Gyro_rate = (600 - 512) * (\frac{3.3}{1024})/0.00333$$

$$= 85.1632\ degree/s$$

เมื่อกำหนดให้ Δtime คือช่วงเวลาที่ใช้ไปในการวัด ดังนั้นถ้าต้องการค่ามุมให้นำ Gyro_rate * Δtime ค่าที่ได้จะเป็นผลต่างของมุม เมื่อใช้เวลา Δtime (s) จากตัวอย่างข้างต้นถ้าใช้เวลา 1 วินาทีมุมที่เปลี่ยนไปในแกนที่สนใจ โดยจะสามารถคำนวณจากค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ คือ 85.1632 องศา

2.2.2 เข็มทิศดิจิตอล

เข็มทิศดิจิตอลถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และตรวจสอบทิศแบบอิเล็กทรอนิกส์ (ดังรูปที่ 2.4) โดยอาศัยการตรวจจับสนามแม่เหล็กโลก (Earth magnetic field) และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) มาประมวลผลการวัดทิศทาง โดยวิธีในการวัดจะใช้การบอกทิศทางโดยวัดขนาดของมุมในแนวราบจากแนวทิศเหนือเป็นหลัก เวียนตามเข็มนาฬิกามาบรรจบกับแนวเป้าหมายที่ต้องการ ค่าของมุมจะมีค่าตั้งแต่ 0-360 องศา เมื่อวัดมุมจากเส้นฐานทิศเหนือเป็นหลัก

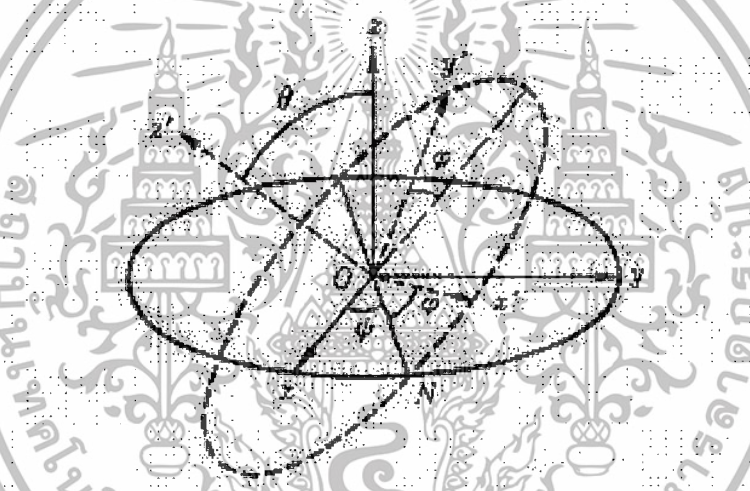


รูปที่ 2.4 การวัดมุมจากเข็มทิศดิจิตอล [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordination)

ค่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยซึ่งประกอบด้วย มาตรวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือความเร่ง (Accelerometers) และไจโรสโคป (Gyroscope) หรือตัววัดมุมเทียบกับพื้นโลก โดยเซ็นเซอร์ดังกล่าวจะติดตั้งอยู่บนแกนทั้ง 3 ของระบบ ค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดความเร่งจะถูกนำไปคำนวณหาค่าความเร็วและระยะทางตามลำดับ ส่วนค่าที่วัดได้จากไจโรสโคปจะนำมาคำนวณหาค่ามุมของตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์เทียบกับพิกัดอ้างอิงในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน โดยจะบอกในรูปของมุมออยเลอร์ (Euler angle) ซึ่งประกอบด้วยมุม roll (ϕ) มุม pitch (θ) และมุม yaw (φ) โดยมุมออยเลอร์นั้นสามารถอธิบายการวางตัวของเซ็นเซอร์ได้ดีกว่าวิธีการบอกมุมแบบ ควอเตอร์เนียน (Quaternion method) หรือวิธีการบอกมุมแบบโคไซน์แมตทริก (Cosine matrix method) [3] ลักษณะการหมุนของมุมออยเลอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5

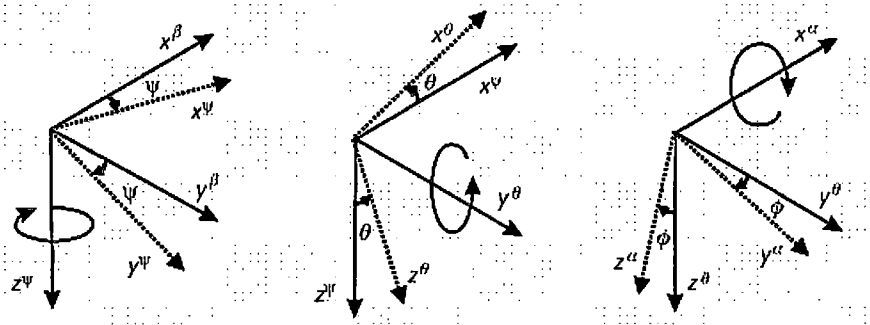


รูปที่ 2.5 ลักษณะการหมุนของมุมออยเลอร์ [3]

ในการกำหนดแกนคู่พิกัดที่ใช้เทียบอ้างอิงกับแกนของระบบจะแบ่งออกเป็น เทียบกับแกนโลก (Earth fixed frame) และเทียบกับแกนของตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (Body fixed frame) ซึ่งมีจุดตั้งต้นที่เดียวกับจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity) หรือ C.G. ของตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย ในการคำนวณจะเขียนระบบสมการเทียบกับแกนโลก จึงต้องทำการแปลงสมการที่กระทำกับแกนของตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย ให้อยู่ในรูปพิกัดแกนโลกด้วยเมตริกซ์การเปลี่ยนรูป (Transformation Matrix) ดังสมการ (2.14)

$$R = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การหมุนแกนของตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย

จากรูปที่ 2.6 การหมุนรอบแกน Z ของแกนอ้างอิง $R_z(\psi)$ โดยปกติจะอ้างอิงเป็นมุม yaw (φ) จะส่งผลถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของเวกเตอร์ X และ Y แต่จะไม่ส่งผลต่อตำแหน่งของเวกเตอร์ z จากการหมุนนี้สามารถเขียนสมการแสดงการหมุนได้ดังนี้

$$x^\psi = xcos\psi + ysin\psi \tag{2.15}$$

$$y^\psi = -xsin\psi + ycos\psi \tag{2.16}$$

$$z^\psi = z \tag{2.17}$$

การหมุนรอบแกน Y ของแกนอ้างอิง $R_y(\theta)$ โดยปกติจะอ้างอิงเป็นมุม pitch (θ) จะส่งผลถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของเวกเตอร์ X และ Z แต่จะไม่ส่งผลต่อตำแหน่งของเวกเตอร์ y จากการหมุนนี้สามารถเขียนสมการแสดงการหมุนได้ดังนี้

$$x^\theta = xcos\theta + zsin\theta \tag{2.18}$$

$$y^\theta = y \tag{2.19}$$

$$z^\theta = xsin\theta + zcos\theta \tag{2.20}$$

และจากการหมุนรอบแกน X ของแกนอ้างอิง $R_x(\phi)$ โดยปกติจะอ้างอิงเป็นมุม roll (ϕ) จะส่งผลถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของเวกเตอร์ Y และ Z แต่จะไม่ส่งผลต่อตำแหน่งของเวกเตอร์ x จากการหมุนนี้สามารถเขียนสมการแสดงการหมุนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x^{\phi} = x \tag{2.21}$$

$$y^{\phi} = ycos\phi + zsin\phi \tag{2.22}$$

$$z^{\phi} = -ysin\phi + zcos\phi \tag{2.23}$$

จากการหมุนทั้งสามแกนในสมการ (2.14) – (2.23) สามารถเขียนสมการในรูปของเมตริกซ์การหมุนได้ดังสมการ

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & cos\theta & -sin\theta \\ 0 & sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} cos\theta & 0 & sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -sin\theta & 0 & cos\theta \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & 0 \\ sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

จากสมการ (2.14) จะทำให้ได้ค่าเมตริกซ์การเปลี่ยนรูป (Transformation Matrix) ดังสมการ (2.27)

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta cos\psi & sin\phi sin\theta cos\psi - cos\phi sin\psi & cos\phi sin\theta cos\psi + sin\phi sin\psi \\ cos\theta sin\psi & cos\phi con\psi + sin\phi sin\theta sin\psi & cos\phi sin\theta sin\psi - sin\phi cos\psi \\ -sin\theta & sin\phi cos\theta & cos\phi cos\theta \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

เมื่อมุมในการหมุนมีขนาดเล็ก สามารถประมาณค่าของเมตริกซ์การเปลี่ยนรูปได้ดังสมการ (2.28)

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \omega_{\psi} & -\omega_{\theta}\omega \\ -\omega_{\psi} & 1 & \omega_{\phi} \\ \omega_{\theta} & -\omega_{\phi}\omega & 1 \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

ซึ่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมออยเลอร์ กับ ค่าสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยซึ่งวัดค่าความเร็วเชิงมุม $(\omega_x\ \omega_y\ \omega_z)$ จากไจโรสโคปในแต่ละแนวแกนของการหมุน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\text{roll}\ (\phi) = \arctan 2(R_{2,3}, R_{3,3}) = \arctan 2(R_{3,2}, R_{3,3}) \tag{2.29}$$

$$\text{pitch}\ (\theta) = -\arcsin(R_{1,3}) = -\arcsin(R_{3,1}) \tag{2.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

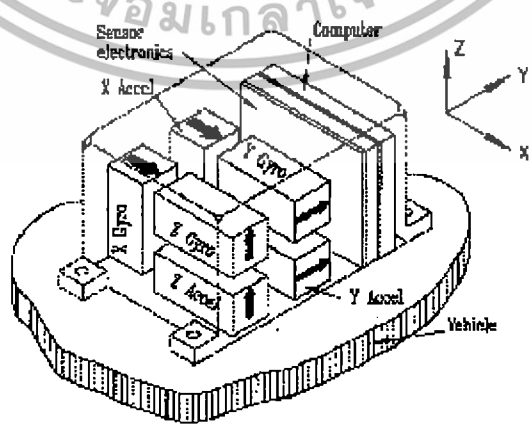
$$\text{yaw } (\varphi) = \arctan 2(R_{1,2}, R_{1,1},) = \arctan 2(R_{2,1}, R_{1,1}) \quad (2.31)$$

2.4 ระบบนำร่องความเฉื่อย (Inertial navigation system)

ระบบนำร่องความเฉื่อยเป็นระบบที่ใช้ในการนำทางโดยอาศัยอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย ซึ่งค่าที่ใช้ในการติดตามจะใช้ค่าของการวางตัว (Orientation) ตำแหน่ง (Position) ของอุปกรณ์ โดยอาศัยการอ้างอิงจากจุดเริ่มต้น (Starting point) จากการศึกษาพบว่าสามารถทำโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อยชนิด 6 มุมหมุนอิสระ (Degree of freedom) หรือ 6-DOFs เพื่อใช้ในการประมาณค่าจุดพิกัด (x, y, z) และค่ามุมทิศทาง ซึ่งค่าจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยชนิด 6 มุมหมุนอิสระ ประกอบด้วยค่าของมาตรวัดความเร่งแบบ 3 แกน (3-axis accelerometer) และอัตราการเปลี่ยนมุมแบบ 3 แกน (3-axis angular rate) ในบางชนิดของ IMU จะมีการเพิ่มส่วนเข็มทิศดิจิตอลแบบ 3 แกน (3-axis magnetic field) เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาค่าทิศทางการเดินคลาดเคลื่อน (Heading error) เข้าไปด้วย ข้อดีของการใช้ IMU ชนิด 6-DOFs คือ ระบบสามารถระบุตำแหน่งได้โดยไม่ต้องอาศัยระบบจากภายนอกมาเพิ่ม (External infrastructure) แต่มีข้อเสียในเรื่องของความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่ง โดยระบบนำร่องความเฉื่อยสามารถ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท [6]

2.4.1 ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์ (Strap down inertial navigation system)

ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์ (ดังรูปที่ 2.7) เป็นระบบที่ประกอบด้วยค่าตัววัดความเร่ง และไจโรสโคปวางเรียงตัวกันใน 3 แกน เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าของตำแหน่งจุดพิกัดของวัตถุที่ต้องการ โดยตัวเซ็นเซอร์จะต้องยึดติดกับวัตถุที่ต้องการวัดค่าและไม่มีการเคลื่อนไหวของตัวเซ็นเซอร์ พร้อมทั้งใช้ซอฟต์แวร์ช่วยในการคำนวณหาค่าของตำแหน่งจุดพิกัดของวัตถุที่ต้องการ

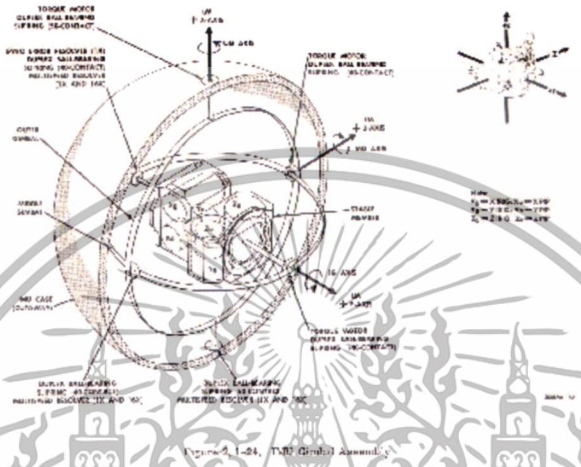


รูปที่ 2.7 ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบกิมบอล (Gimbaled inertial navigation system)

ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบกิมบอล (ดังรูปที่ 2.8) เป็นระบบที่ประกอบด้วยค่าตัววัดความเร่งแบบ 3 แกน และตัววัดอัตราการเปลี่ยนมุมแบบ 3 แกนเช่นกัน แต่จะมีส่วนของกลไกที่สามารถขยับไปมาได้ และมีตัวเซ็นเซอร์ยึดติดอยู่ เพื่อใช้ในการวัดค่าของจุดพิกัดของวัตถุที่ต้องการ



รูปที่ 2.8 ระบบนำร่องความเฉื่อยแบบกิมบอล [6]

องค์ประกอบของเซ็นเซอร์ความเฉื่อย

- ตัวเซ็นเซอร์มาตรวัดความเร่ง คือ ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความเร่งของแกนที่ยึดติดกับเซ็นเซอร์ และอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน F = ma (F คือค่าของแรง, m คือค่าของมวลและ a คือค่าของความเร่ง) โดยลักษณะของความเร่งมีหลายรูปแบบได้แก่ Euler, centripetal acceleration และ gravity
- ตัวเซ็นเซอร์วัดอัตราการเปลี่ยนมุม คือ ตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดค่าของความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) ในแกนที่ยึดติดอยู่กับตัวของตัวเซ็นเซอร์และค่ามุมสามารถทำการคำนวณได้จาก การอินทิเกรต (Integration) ของค่าความเร็วเชิงมุม

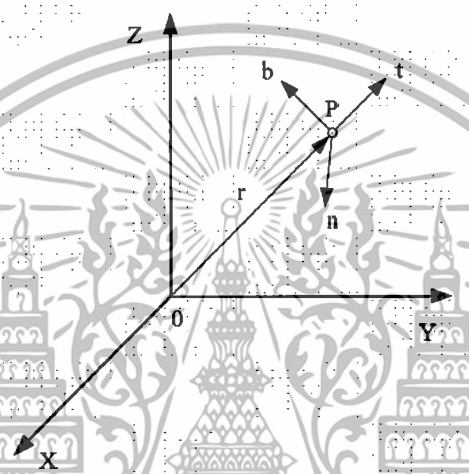
2.5 วิธีการระบุตำแหน่ง (Positioning method)

การระบุตำแหน่งโดยทั่วไปมักจะระบุโดยอ้างอิงกับสิ่งที่ยึดติดอยู่ ซึ่งก็คือเฟรมอ้างอิง (Reference frame) และระยะทางโดยประมาณ การที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปและสามารถที่จะระบุตำแหน่งได้นั้น จะต้องมีการกำหนดจุดพิกัด (Coordinates) เพื่อให้รู้ถึงตำแหน่งของวัตถุโดยต้องมีการกำหนดแกนอ้างอิงด้วย ในงานวิจัยนี้ใช้การระบุพิกัดแบบคาร์ทีเซียน ซึ่งทิศทางของแกน Z มีนิยามจากกฎมือขวา [3] พิจารณาตัวอย่างกรณีหนังสือวางอยู่บนโต๊ะและแต้มสีจุดหนึ่งบนหนังสือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงแล้วเรียกจุดนั้นว่าจุด P สามารถบอกได้ว่าหนังสือเล่มนี้อยู่ที่ตำแหน่งสัมพันธ์กับแกนอ้างอิง ซึ่งอาจจะวางจุดศูนย์กลางของแกนอ้างอิงไว้ที่มุมหนึ่งของโต๊ะและสามารถแสดงพิกัดของจุด P ได้ว่า P = (x,y,z) หรือเขียนเป็นเวกเตอร์คอลัมน์ (Column vector) ขนาด 3×1 ได้ดังสมการ (2.32) โดยจุด P แสดงถึงจุดบนวัตถุ (ดังรูปที่ 2.9) และ r คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) จากจุด 0 ถึง P

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{2.32}$$



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของจุด P

2.6 เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix)

เมตริกซ์การหมุนใช้สัญลักษณ์ R ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ระบุว่า วัตถุนั้นมีการหมุนเปลี่ยนไปจากแกนอ้างอิงเท่าใด โดยสามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย 3 ทิศทาง คือ เวกเตอร์ n, t, b ดังแสดงบนจุด P ในรูปที่ 2.9 โดยที่ n, t, b เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ดังสมการ

$$R = \begin{bmatrix} n_x & t_x & b_x \\ n_y & t_y & b_y \\ n_z & t_z & b_z \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

เมตริกซ์การหมุน R แสดงถึงการหมุนของวัตถุสัมพันธ์กับแกนอ้างอิงที่ติดอยู่กับที่ สังเกตว่าในเวกเตอร์คอลัมน์ของเมตริกซ์การหมุน R ประกอบด้วยเวกเตอร์ n, t, b ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน (Perpendicular) ในกรณีเมตริกซ์การหมุน R มีคุณสมบัติออทอร์นอร์มัล (Orthonormal) ซึ่งมีคุณสมบัติที่เวกเตอร์ทั้ง 3 ตั้งฉากกันและมีขนาดหนึ่งหน่วย สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$n \cdot t = \mathrm{t} \cdot b = b \cdot n = 0 \tag{2.34}$$

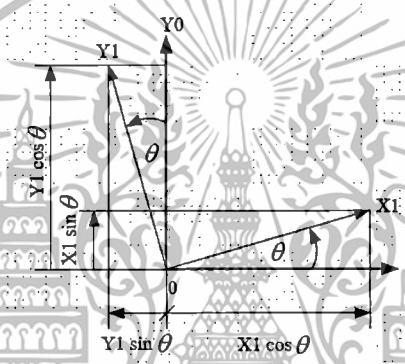
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากคุณสมบัติออทอร์นอร์มัลของเวกเตอร์ทั้ง 3 สามารถพิสูจน์การหาค่าอินเวอร์สของเมตริกซ์การหมุนได้ดังสมการ

$$R^T R = \begin{bmatrix} n^T n & n^T t & n^T b \\ t^T n & t^T t & t^T b \\ b^T n & b^T t & b^T b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I \qquad (2.35)$$

ดังนั้นสรุปได้ว่า การทรานสโฟสของเมตริกซ์การหมุนคือ การอินเวอร์สการคูณของเมตริกซ์การหมุนนั้นเอง หากต้องการหาเมตริกซ์การหมุนรอบแกน Z (ดังรูปที่ 2.10) แกนอ้างอิงที่ 1 หมุนไปจากแกนอ้างอิงที่ 0 รอบแกน Z เป็นมุม θ



รูปที่ 2.10 การหมุนรอบแกนอ้างอิง

โดยสามารถแสดงเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงที่ 1 ซึ่งนำเสนอในแกนอ้างอิงที่ 0 ได้ดังสมการ

$$x_0 = x_1 cos\theta - y_1 sin\theta \qquad (2.36)$$

$$y_0 = x_1 sin\theta - y_1 cos\theta \qquad (2.37)$$

$$z_0 = z_1 \qquad (2.48)$$

2.7 หลักการระบุพิกัดตำแหน่งภายในอาคาร

โครงสร้างพื้นฐานของระบบระบุพิกัดตำแหน่งภายในอาคารในแบบทั่วไป จะมีอุปกรณ์พื้นฐานอยู่ 2 ชนิดคือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิง และอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งที่ต้องการระบุตำแหน่ง [7]

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงจะถูกติดตั้งให้อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการวัดค่าความแรงของสัญญาณ โดยอาจเรียกชื่อต่างกันไป เช่น โหนดสมอเรือ (Anchor node) เซ็นเซอร์อ้างอิง (Reference sensors) สถานีฐาน (Base Station) หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
132917

แอคเซสพอยท์ (Access Point) เป็นต้น ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งที่ต้องการระบุตำแหน่ง จะเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีคุณสมบัติในการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยวิธีการระบุตำแหน่งชนิดต่าง ๆ ในส่วนของการคำนวณหาผลลัพธ์และแสดงผลตำแหน่งวัตถุ สามารถดำเนินการได้ที่ตัววัตถุโดยตรง หรืออาจส่งข้อมูลพารามิเตอร์ที่วัดได้ไปดำเนินการที่ส่วนควบคุมกลาง ซึ่งวิธีการเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบระบบและอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานระบุพิกัดตำแหน่ง

ปัจจุบันวิธีการพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ในการระบุพิกัดตำแหน่งภายในอาคารสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี [8] คือ ไตรแอนกูเรชั่น (Triangulation) ซีนแอนาไลซิส (Scene Analysis) และ พรอกซิมิตี้ (Proximity)

2.7.1 ไตรแอนกูเรชั่น (Triangulation)

ไตรแอนกูเรชั่นเป็นวิธีการระบุพิกัดตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติของสัญญาณที่รับได้ เพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย ซึ่งใช้คุณสมบัติของระยะทาง และค่ามุมในการระบุพิกัดตำแหน่ง โดยวิธีการระบุพิกัดตำแหน่งของวัตถุจะใช้หลักการของรูปทรงสามเหลี่ยม ซึ่งจะใช้จุดอ้างอิงตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปในการระบุพิกัดตำแหน่ง โดยจะอาศัยวิธีการวัดมุมระหว่างจุดที่ต้องการหาพิกัดและจุดอ้างอิงทั้งสองจุด เมื่อรู้มุม 2 มุมและระยะทางของด้านหนึ่งด้านก็จะสามารถนำทฤษฎีทางตรีโกณมาคำนวณหาตำแหน่งที่ถูกต้องได้ โดยประสิทธิภาพในการระบุพิกัดตำแหน่งจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อจุดอ้างอิงเพิ่มขึ้นเป็น 3 จุด

2.7.2 ซีนแอนาไลซิส (Scene Analysis)

ซีนแอนาไลซิส เป็นวิธีการระบุพิกัดตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติการวิเคราะห์สถานที่ที่พิจารณา โดยจะมีการเก็บรวบรวมคุณสมบัติของสถานที่ในช่วงออฟไลน์ (Offline phase) เพื่อนำมาสร้างเป็นฐานข้อมูลแผนที่เรียกว่า ข้อมูลลายพิมพ์นิ้วมือ หรือฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) โดยที่ข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์สามารถเก็บบันทึกในรูปของค่าความแรงของสัญญาณ (Receive signal strength) หรือ RSS ที่ตรวจวัดได้ ณ. จุดต่าง ๆ ของสถานที่ภายในอาคาร จากนั้นในช่วงออนไลน์ (Online phase) ระบบระบุพิกัดตำแหน่งจะทำการจับคู่แพทเทิร์น (Patten matching) ข้อมูลความแรงของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ ณ. ตำแหน่งปัจจุบันของวัตถุกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อเลือกพิกัดที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งวัตถุมากที่สุด วิธีการวิเคราะห์สถานที่ดังกล่าวเรียกว่า เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 พรอกซิมิตี้ (Proximity)

พรอกซิมิตี้ เป็นวิธีการระบุพิกัดตำแหน่งโดยอาศัยคุณสมบัติของสัญลักษณ์ (Symbolic) ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลตำแหน่ง เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เข้าไปใกล้กับตำแหน่งอ้างอิง ตัววัตถุจะสามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากตำแหน่งอ้างอิงได้ จากนั้นจะทำการระบุพิกัดตำแหน่งวัตถุจากพิกัดของตำแหน่งอ้างอิง สำหรับกรณีที่วัตถุสามารถรับค่าสัญญาณจากตำแหน่งอ้างอิงได้มากกว่าสองตำแหน่ง จะใช้วิธีการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากตำแหน่งอ้างอิงที่แรงที่สุดและพิกัดของตำแหน่งอ้างอิงดังกล่าว จะถูกกำหนดให้เป็นพิกัดของวัตถุ

2.8 เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในวิธีการระบุตำแหน่งแบบซีนแอนาไลซิส (Scene Analysis) เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์เป็นการหาตำแหน่งโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้จากวัตถุเป้าหมายกับพารามิเตอร์ของสัญญาณที่รับได้จากตำแหน่งอ้างอิง โดยตำแหน่งอ้างอิงที่มีสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณของวัตถุเป้าหมายมากที่สุด จะถูกประมาณว่าเป็นตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย [9] วิธีการเปรียบเทียบด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์นี้ เรียกว่า การจับคู่แพทเทิร์น (Patten matching) ซึ่งจะมีความแม่นยำมากกว่าเทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานของการหาระยะทางและมุม เนื่องจากสัญญาณที่รับได้จากวัตถุเป้าหมายและจากตำแหน่งอ้างอิงนั้น ได้รวมผลกระทบของการแพร่กระจายคลื่นหรือสัญญาณรบกวนไว้แล้ว ดังนั้นการเปรียบเทียบสัญญาณที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน จะทำให้การประมาณค่าหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า ในขณะที่เทคนิคการหาตำแหน่งที่ใช้พื้นฐานการหาระยะทางและมุมนั้น การประมาณค่าหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายได้ถูกต้องแม่นยำ จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของความแรงของสัญญาณที่รับได้ (สัญญาณที่รับได้อาจคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็น) จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อการหาพิกัดตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายตามมา อย่างไรก็ตาม เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์จะมีกระบวนการในการวิเคราะห์และประมวลผลที่ซับซ้อนกว่าและใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า

เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งภายในอาคาร มีขั้นตอนการทำงานแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนออฟไลน์ (Offline phase) และขั้นตอนออนไลน์ (Online phase)

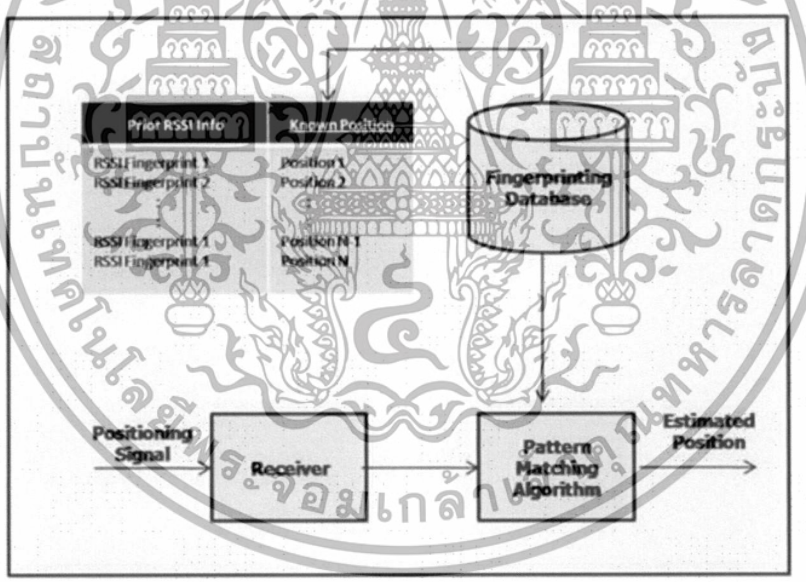
ขั้นตอนออฟไลน์ เป็นขั้นตอนในการเก็บค่าข้อมูลความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSS) ณ ตำแหน่งที่ทราบพิกัด โดยจะทำการเก็บค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จากอุปกรณ์อ้างอิง เช่น แอคเซสพอยท์ เป็นต้น ในตำแหน่งต่าง ๆ และทำการจัดเรียงเป็นฐานข้อมูลที่สัมพันธ์กันระหว่างตำแหน่งที่ทราบพิกัดและความแรงของสัญญาณที่ทำการเก็บค่า ข้อมูลความแรงของสัญญาณ ณ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งที่ทราบพิกัดต่าง ๆ ซึ่งถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลจะเรียกว่า ฐานข้อมูลแผนที่ความแรงของสัญญาณ หรือลายพิมพ์นิ้วมือ (Fingerprint)

ขั้นตอนออนไลน์ เป็นขั้นตอนการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย โดยทำการวัดค่าข้อมูลความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุจากวัตถุเป้าหมาย แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความแรงของสัญญาณในฐานข้อมูลที่บันทึกไว้ในขั้นตอนออฟไลน์ โดยใช้การจับคู่แพทเทิร์น (Pattern matching) ด้วยอัลกอริทึม KNN (K-Nearest Neighbor) ซึ่งจะหาจากระยะยูคริเดียน (Euclidian distance) ของความแรงของสัญญาณ หากค่าความแรงของสัญญาณของวัตถุเป้าหมายมีค่าใกล้เคียงกับ ฟิงเกอร์ปริ้นท์ใดมากที่สุด ก็จะประมาณตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายว่าเป็นตำแหน่งของฟิงเกอร์ปริ้นท์นั้นๆ

วิธีการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งโดยทั่วไปค่าข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ที่ใช้ จะได้จากการวัดค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (Receive Signal Strength) หรือ RSS ที่ตรวจวัดได้



รูปที่ 2.11 วิธีการระบุตำแหน่งโดยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

2.8.1 การวัดค่าความแรงของสัญญาณ

ค่าความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength) หรือ RSS มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณจะแปรผกผันกับระยะทางกำลังสอง นั่นคือ ถ้าค่า RSS มีค่ามากแสดงว่าความแรงของสัญญาณที่รับได้มีค่าสูง หรือตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณนั้นอยู่ใกล้กัน ในทางกลับกัน ถ้าหากค่า RSS มีค่าน้อย แสดงว่าความแรงของสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำ หรือตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณอยู่ไกลกัน สำหรับการวัดค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาระยะทางโดยตรง ในทางปฏิบัติมักจะไม่ถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดแม่นยำสูง เนื่องจากมีความแปรปรวนของสัญญาณคลื่นวิทยุตามสภาพแวดล้อมสูง โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การสื่อสารที่ไม่เป็นเส้นตรง สัญญาณถูกรบกวนจากอุปกรณ์ที่ทำงานในย่านความถี่เดียวกัน คลื่นที่แพร่กระจายอยู่อาจจะถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น เมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น

ในการวัดค่าหาความแรงของสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ไร้สาย มีความสัมพันธ์กันตามสมการ (2.39)

$$RSS = -(10nlog_{10}d + A) \tag{2.39}$$

เมื่อ RSS คือ ค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (dBm)

n คือ ค่าคงที่การกระจายสัญญาณ

d คือ ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ไร้สาย มีหน่วยเป็นเมตร (m)

A คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในระยะ 1 เมตร (dBm)

จากสมการ (2.39) ถ้าค่าระยะทาง (d) เพิ่มมากขึ้น ก็จะส่งผลให้ค่า RSS ลดลง และค่าระยะทาง d สามารถหาค่าได้จากการนำค่า RSSI ที่วัดได้ เมื่อรับจากเครื่องส่งเครื่องหนึ่งๆ มาคำนวณหาค่า และค่า A และค่า n ซึ่งเป็นค่าคงที่ แทนค่าในสมการที่ (2.39) เพื่อใช้ในการคำนวณระยะห่างของวัตถุเป้าหมาย ในการคำนวณนี้ควรมีตำแหน่งอ้างอิง (หรือภาคส่ง) อย่างน้อย 2 ตัวขึ้นไป จึงจะทำให้สามารถหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายได้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากหลักการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) ในหัวข้อ 2.1 – 2.4 จะพบว่ามีปัญหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสม อันเนื่องจากข้อจำกัดของเซ็นเซอร์ภายในที่ใช้ในการตรวจวัด ทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยในการระบุตำแหน่ง ได้ทำการศึกษาและเสนอแนวทางในการปรับแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนี้

งานวิจัยของ T. Chin-Woo, P. Sungsu,M.Kirill and V.Pravin. [10] เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งของวัตถุ โดยใช้เพียงค่าที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์มาตรวัดความเร่งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่ามุมของการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนไปภายใต้เงื่อนไขของความเป็นเชิงเส้นของค่าความเร่ง แต่ภายใต้ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นกลับได้ผลที่ไม่น่าพอใจ ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอใช้ตัวเซ็นเซอร์ใจโรสโคป ประกอบกันด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

งานวิจัยของ Match Bryson and Salah Sukkarieh. [11] เป็นงานวิจัยที่พัฒนาเทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (IMU) ที่ใช้ในระบบจีพีเอสในการระบุตำแหน่ง โดยนำเสนอแบบจำลองของระบบสองแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะคำนึงถึงการปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย โดยแบบจำลองแรก นำเสนอการปรับปรุงของค่าที่คำนวณได้จากระบบสมการนำร่องเฉื่อย (Inertial Navigation System) หรือ INS และแบบจำลองที่สอง ปรับปรุงของค่าที่อ่านได้จากตัวเซ็นเซอร์ก่อนการคำนวณหาค่าตำแหน่ง โดยมีการใช้เทคนิคตัวกรองคาลมานมา (Kalman filter) ซึ่งใช้ในการแก้ไขค่าความผิดพลาดของระบบ จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการปรับปรุงค่าที่อ่านได้จากตัวเซ็นเซอร์โดยการปรับปรุงค่าความผิดพลาดของค่าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย และการปรับปรุงที่ที่คำนวณได้จากระบบสมการนำร่องความเฉื่อย

งานวิจัยของ David S.C, John N. and Peter H. [12] เป็นงานวิจัยที่ใช้ตัวเซ็นเซอร์ความเฉื่อย มาประมาณค่าของการก้าวเดิน เพื่อใช้ในการติดตามตำแหน่งของการเดิน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Smoothing Zero Velocity Update เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยในแต่ละก้าวของการเดิน จากแนวคิดที่ว่า ท่าทางเดินของแต่ละคนแต่ละพื้นที่มีความไม่สม่ำเสมอของขนาดก้าว จึงได้นำวิธีดังกล่าวมาใช้ในงานวิจัย ปรับปรุงค่าของตำแหน่งทุกๆ การก้าวหรือทุกรอบเวลา เพื่อให้ได้มาถึงค่าการประมาณตำแหน่งที่ถูกต้องมากขึ้น

งานวิจัยของ Kodippili, N.S. and Dias, D. [13] เป็นงานวิจัยที่พัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งแบบผสมซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) และ เทคนิคตรีโกณมิติ (Trilateration) ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุในบริเวณระนาบเดียว โดยได้นำเสนอเทคนิคแบบผสมซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ และเทคนิคที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติ โดยในช่วงออฟไลน์เฟสจะมีการเก็บรวบรวมค่าความแรงสัญญาณที่อยู่ภายในอาคาร เพื่อสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ จากนั้นในช่วงออนไลน์เฟสจะคำนวณหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด 3 ตำแหน่ง และใช้พื้นฐานการทำงานของกลุ่มเทคนิคไตรแอนกูเลชั่น (Triangulation) โดยจะพิจารณาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด 3 ตำแหน่งแทนการพิจารณาตำแหน่งของจุดอ้างอิง 3 จุก ถัดมาจะใช้คุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความแรงของสัญญาณเพื่อคำนวณหาระยะห่างของตำแหน่งวัตถุกับตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดทั้ง 3 ตำแหน่ง และสุดท้ายจะระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้จุดตัดของวงกลมทั้งสามวง จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการรวมข้อดีของกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งเข้าด้วยกัน ซึ่งเทคนิคแบบผสมดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่มีความซับซ้อน อีกทั้งยังมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีกว่าการใช้เทคนิคระบุตำแหน่งเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจะสังเกตได้ว่า วิธีการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุหรือหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร จะอาศัยการประมาณค่าตำแหน่งจากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย การใช้ข้อมูลดังกล่าวเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมแปรผันตามเวลา ดังนั้นในงานวิจัยส่วนมากจึงมุ่งเน้นในการหาวิธีการลดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมนี้ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการรวมข้อมูล (Data fusion) โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกชนิดอื่นเข้ามาใช้ร่วมเพื่อช่วยเพิ่มความถูกต้อง โดยงานวิจัยที่ผู้วิจัยนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ก็ใช้แนวคิดการรวมข้อมูลเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารเช่นกัน โดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์เข้ามาช่วยปรับปรุงค่าตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย ณ จุดต่าง ๆ ที่มีการเคลื่อนที่ตามเวลา ซึ่งรายละเอียดของวิธีการที่นำเสนอดังกล่าวจะอธิบายในบทที่ 3 ถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

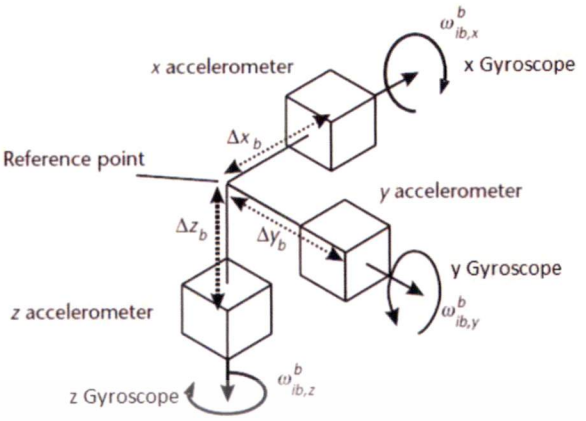
บทที่ 3
การปรับค่าตำแหน่งจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย ด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

จากปัญหาการติดตามตำแหน่งภายในอาคารของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยใช้เซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยซึ่งทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสมตามเวลา ส่งผลทำให้การระบุตำแหน่งและติดตามหุ่นยนต์เคลื่อนที่มีความผิดพลาดเพิ่มขึ้นในทุกจุดที่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้น เพื่อปรับแก้ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น และทำให้สามารถบอกตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งสามารถติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายแนวคิดของวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคแบบผสม ซึ่งอาศัยการรวมข้อมูล (Data fusion) จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) ร่วมกับค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSS) จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) ซึ่งใช้เป็นค่าพิกัดตำแหน่งอ้างอิงสำหรับนำไปปรับค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ได้ในแต่ละจุดที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อลดค่าความความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดขึ้นดังกล่าว และสามารถปรับปรุงความถูกต้องของตำแหน่งจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อยได้ต่อไป

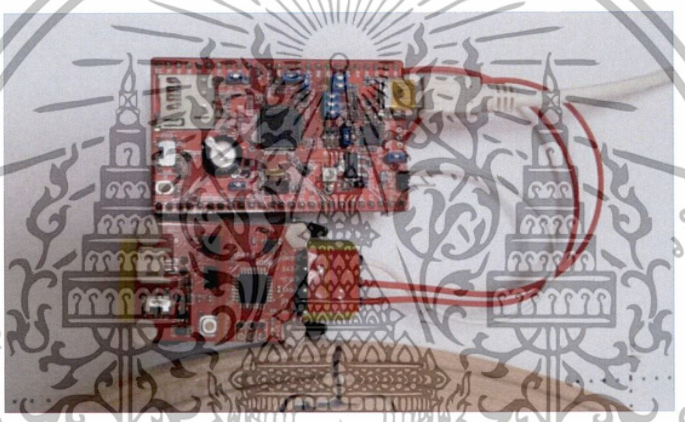
3.1 การติดตามตำแหน่งด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU)

การติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย ในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการในการหาตำแหน่งด้วยระบบนำร่องความเฉื่อย (Inertial navigation systems) หรือ INS กล่าวคือ ระบบนำร่องความเฉื่อย จะประกอบขึ้นจากเซ็นเซอร์ 2 ชนิด คือ ตัววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือมาตรวัดความเร่ง (Accelerometers) และตัววัดมุมเทียบกับพื้นโลก หรือไจโรสโคป (Gyroscope) ตัววัดทั้งสองจะถูกติดตั้งอยู่บนแกนทั้งสามแกน (แกน X, Y และ Z) ของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (ดังรูปที่ 3.1) ซึ่งเรียกรวมกันว่า อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit) หรือ IMU สำหรับโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ IMU ที่ถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยบอร์ดประมวลผลเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางสาย USB และเชื่อมต่อกับบอร์ดอุปกรณ์ IMU ที่มีเซ็นเซอร์มาตรวัดความเร่งและไจโรสโคปภายใน โดยเซ็นเซอร์ดังกล่าวมีหลักการทำงาน คือ จะทำงานด้วยการวัดความเร่งและวัดความเร็วเชิงมุมของทั้งสามแกน เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเร็วและตำแหน่งการวางตัว โดยใช้หลักการอินทิเกรตของค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ โดยมีโครงสร้างของการทำงานดังบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) ในรูปที่ 3.3

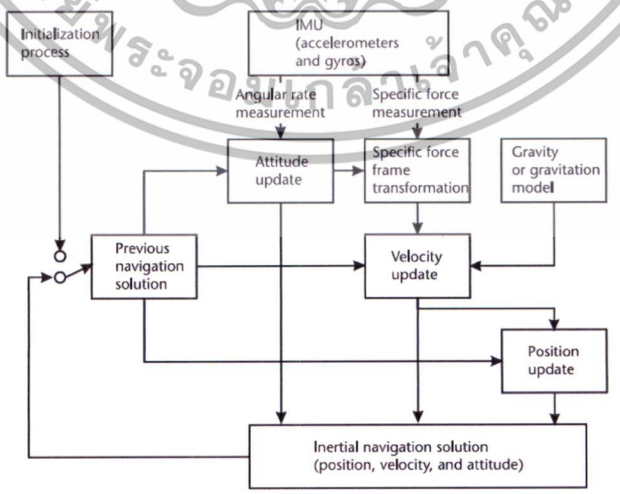
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การวางตัวของมาตราวัดความเร่งและไจโรสโคปติดตั้งบนแกนอ้างอิงเดียวกัน



รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์สำหรับอุปกรณ์ IMU

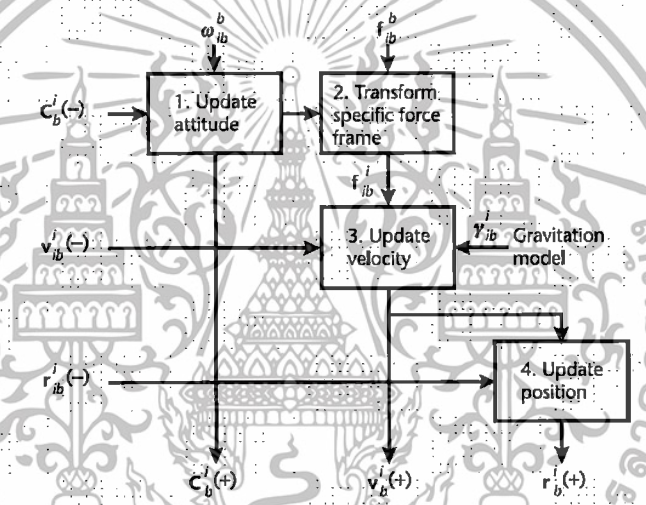


รูปที่ 3.3 ภาพรวมของระบบนำร่องความเฉื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 แสดงถึงกระบวนการประมวลผลของระบบนำร่องความเฉื่อย เพื่อให้ได้มาของค่าตำแหน่ง ความเร็ว และมุมการวางตัว โดยกระบวนการของระบบนำร่องความเฉื่อยจะประกอบด้วยสี่ขั้นตอนคือ การปรับการวางตัว (Attitude update) การเปลี่ยนแกนอ้างอิงของแรง (Specific force frame transformation) การเปลี่ยนความเร็ว (Velocity update) และการปรับตำแหน่ง (Position update) โดยการประมวลผลของระบบ จะเป็นลักษณะของการประมวลผลซ้ำแบบวงรอบ (Iteration) ใช้ค่าที่ได้จากรอบประมวลผลก่อนหน้า แล้วนำมาคำนวณผลต่อในรอบปัจจุบัน

ในการวัดความเร็วเชิงมุม (Angular rate) และการวัดค่าความแรง (Specific force) ในช่วงเวลา t ถึงช่วงเวลา $t+\tau_i$ (ดังรูปที่ 3.4) เพื่อนำมาคำนวณหาค่ามุมการวางตัว ความเร็ว และตำแหน่ง โดยเครื่องหมาย (-) และ (+) แสดงถึงค่าในการคำนวณเริ่มต้นในช่วงเวลา t และค่าที่ได้จากการคำนวณหลังจากช่วงเวลา $t+\tau_i$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การประมวลผลของความเร็วเชิงมุมและการวัดค่าความแรง

ขั้นตอนการประมวลผลของการวางตัวในระบบนำร่องความเฉื่อย จะใช้ค่าความเร็วเชิงมุมวัดได้จากตัวไจโรสโคป (ω_{ib}^{b}) และใช้วิธีการเปลี่ยนแกนอ้างอิง (Coordinate transformation) หรือ C_b^i เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแกนของลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไปสู่ค่าแกนระบบติดตามตำแหน่งที่สนใจ ดังสมการ (3.1)

$$\dot{C}_b^i = C_b^i \Omega_{ib}^b \tag{3.1}$$

เมื่อ $\Omega_{ib}^b = [\omega_{ib}^b \wedge]$ เป็น Skew-symmetric matrix ของความเร็วเชิงมุมที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะได้ผลลัพธ์ดังสมการ (3.2) ที่เวลาช่วงเวลา $t+\tau_i$

$$\dot{C}_b^i(t+\tau_i) = C_b^i(t) exp\left(\int_t^{t+\tau_i} \Omega_{ib}^b \, dt\right) \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.2) สามารถแปลงในรูปของการเปลี่ยนความเร็งเชิงมุมตามช่วงเวลาได้ดังสมการ (3.3) และ (3.4)

$$\dot{C}_b^i(t+\tau_i) = C_b^i(t)exp\left(\left[\alpha_{ib}^b \wedge\right]\right) \tag{3.3}$$

$$\dot{C}_b^i(t+\tau_i) = C_b^i(t)\sum_{r=0}^{\infty}\frac{\left[\alpha_{ib}^b \wedge\right]^r}{r!} \tag{3.4}$$

สำหรับการหมุนด้วยมุมที่มีขนาดเล็ก เราสามารถประมาณค่า C_b^i ได้จากสมการ (3.5) และสมการ (3.6)

$$C_b^i(+) \approx C_b^i(-)(I_3 + \left[\alpha_{ib}^b \wedge\right]) \tag{3.5}$$

$$C_b^i(+) \approx C_b^i(-)(I_3 + \Omega_{ib}^b\tau) \tag{3.6}$$

เมื่อค่าของ $I_3 + \Omega_{ib}^b\tau_i$ คือ เมทริกซ์ที่ประกอบขึ้นจากค่าความเร็วเชิงมุมทั้งสามแกนอ้างอิง จะได้ C_b^i ในรูปของแมตทริกซ์ดังสมการ (3.7)

$$C_b^i = I_3 + \Omega_{ib}^b\tau_i = \begin{bmatrix} 1 & -\omega_{ib}^b, z^{\tau_i} & \omega_{ib}^b, y^{\tau_i} \\ \omega_{ib}^b, z^{\tau_i} & 1 & -\omega_{ib}^b, x^{\tau_i} \\ -\omega_{ib}^b, y^{\tau_i} & \omega_{ib}^b, x^{\tau_i} & 1 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

ในขั้นตอนการประมวลผลของค่าแรง (f_{ib}^i) ที่วัดได้ในระบบนำร่องความเฉื่อย ในการเปลี่ยนแกนอ้างอิงของค่าแรงที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์สู่แกนอ้างอิงของระบบติดตามตำแหน่งสามารถคำนวณ ได้จากสมการ (3.8)

$$f_{ib}^i(t) = C_b^i(t)f_{ib}^b(t) \tag{3.8}$$

โดยค่าของแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t ถึงเวลา $t+\tau_i$ สามารถหาค่าที่เกิดขึ้นได้จากการเฉลี่ยค่าเปลี่ยนแกนอ้างอิงในช่วงเวลาดังกล่าวได้ ดังสมการ (3.9)

$$f_{ib}^i \approx \frac{1}{2}\left(C_b^i(-) + C_b^i(+)\right)f_{ib}^b \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความเร่ง (a_{ib}^{i}) ที่ได้จากการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) สามารถประมวลผลได้ในทำนองเดียวกันดังสมการ (3.10) โดยอาศัยกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Law) แรงลัพธ์ที่มากระทำและขนาดของความเร่ง จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ ($F = ma$) ซึ่งสามารถนำมาหาค่าความเร่งที่เกิดขึ้นได้ด้วยความสัมพันธ์ดังกล่าว

$$a_{ib}^{i} = \bar{C}_{b}^{i} a_{ib}^{b} \tag{3.10}$$

$$a_{ib}^{i} \approx \frac{1}{2}\left(C_{b}^{i}(-) + C_{b}^{i}(+)\right)a_{ib}^{b} \tag{3.11}$$

ขั้นตอนการประมวลผลของความเร็ว (v_{ib}^{i}) ที่คำนวณได้ในระบบนำร่องความเฉื่อย ซึ่งสามารถนำมาหาค่าได้จากค่าความเร่งที่เกิดขึ้น ดังสมการ (3.12) โดยค่า γ_{ib}^{i} เป็นค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่เพิ่มขึ้นมา สำหรับค่าความเร็วที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t ถึงเวลา $t + \tau_i$ สามารถหาค่าที่เกิดขึ้นได้จากการเฉลี่ยค่าความเร่งในช่วงเวลาดังกล่าว ได้ดังสมการ (3.15)

$$a_{ib}^{i} = f_{ib}^{i} + \gamma_{ib}^{i}\left(r_{ib}^{i}\right) \tag{3.12}$$

$$\dot{v}_{ib}^{i} = a_{ib}^{i} \tag{3.13}$$

$$v_{ib}^{i}(+) = v_{ib}^{i}(-) + a_{ib}^{i}\tau_i \tag{3.14}$$

$$v_{ib}^{i}(+) = v_{ib}^{i}(-) + v_{ib}^{b} + \tau_{ib}^{b}\tau_i \tag{3.15}$$

ขั้นตอนการประมวลผลของตำแหน่ง (r_{ib}^{i}) ที่คำนวณได้ในระบบนำร่องความเฉื่อย ซึ่งแสดงดังสมการ (3.16) โดยค่าระยะทางเป็นอนุพันธ์ของความเร็วกับเวลา โดยค่าความเร็วที่นำคิดจะเป็นค่าเชิงเส้นในช่วง t ถึงเวลา $t + \tau_i$ สามารถนำมาคำนวณหาระยะทางที่เปลี่ยนไปตามเวลาได้ดังแสดงในสมการ (3.17) – (3.19)

$$\dot{r}_{ib}^{i} = v_{ib}^{i} \tag{3.16}$$

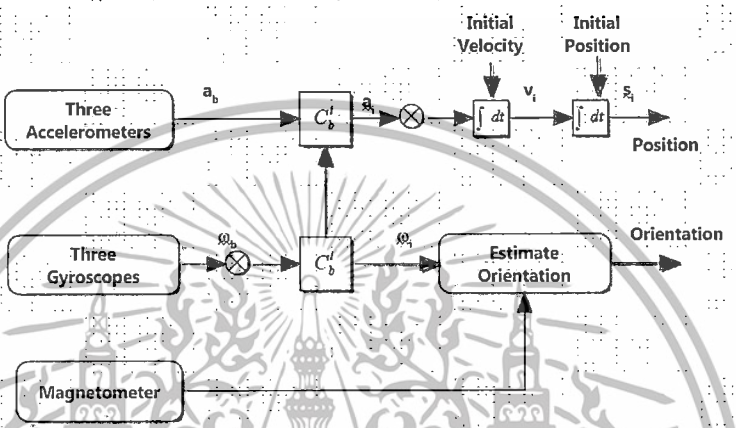
$$r_{ib}^{i}(+) = r_{ib}^{i}(-) + \left(v_{ib}^{i}(-) + v_{ib}^{i}(+)\right)\frac{\tau_i}{2} \tag{3.17}$$

$$= r_{ib}^{i}(-) + v_{ib}^{i}(-)\gamma_{\text{s}} + a_{ib}^{i}\frac{\tau_i^2}{2} \tag{3.18}$$

$$= r_{ib}^{i}(-) + v_{ib}^{i}(+)\gamma_{\text{s}} - a_{ib}^{i}\frac{\tau_i^2}{2} \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการประมวลผลที่ได้กล่าวมา สามารถนำไปอธิบายการทำงานของระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์ (Strapdown inertial navigation algorithm) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.4.1 ซึ่งมีการนำอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อยมายึดติดเข้ากับหุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อใช้ในการระบุพิกัดตำแหน่งโดยใช้แกนอ้างอิงเดียวกัน สำหรับการคำนวณหาทิศทางของการเคลื่อนที่จากค่าความเร็วเชิงมุม ความเร็ว และระยะทางของการเคลื่อนที่จากค่าความเร่งนั้นแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณของระบบนำร่องความเฉื่อยแบบสแตรปดาวน์ (Strapdown inertial navigation algorithm)

การหาลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อย ที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งนั้นจะใช้วิธีการหาประมาณค่าจากเมตริกซ์เปลี่ยนแกนอ้างอิงจากค่าความเร็วเชิงมุม $\omega_b(t) = [\omega_{bx}(t), \omega_{by}(t), \omega_{bz}(t)]^T$ ที่ได้ค่ามาจากไจโรสโคป โดยในการแสดงผลลักษณะการวางตัวสามารถทำได้ 3 วิธี คือ วิธี Direction Cosine Matrix วิธี Euler Angle และวิธี Quaternion ดังอธิบายในหัวข้อ 2.3 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี Direction Cosine Matrix (DCM) ในการอธิบายลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อย ซึ่งค่า DCM คือ เมตริกซ์เปลี่ยนแกนอ้างอิงจากแกนของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อยมาเป็นแกนของระบบติดตามตำแหน่งโดยการทรานสโพสของเมตริกซ์ DCM ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (3.20)

$$C_i^b = [C_b^i]^T \tag{3.20}$$

ในการหาค่าตำแหน่งของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อย โดยพิจารณาค่าความเร่งของ $a_b(t) = [a_{bx}(t), a_{by}(t), a_{bz}(t)]^T$ ที่ได้มาจากมาตรวัดความเร่ง โดยทำการเปลี่ยนแกนอ้างอิงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่วัดได้จากแกนของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อยสู่แกนอ้างอิงของระบบติดตามตำแหน่ง ดังความสัมพันธ์ในสมการ (3.21)

$$a_i(t) = C(t)a_b(t) \tag{3.21}$$

โดยค่าความเร่งที่วัดได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อยจะมีผลจากแรงโน้มถ่วง ในการประมวลผลจะทำการหักค่าผลจากแรงโน้มถ่องออกก่อน แล้วทำการอินทิเกรตค่าที่วัดได้สองครั้งเพื่อให้ได้ค่าความเร็ว และค่าตำแหน่งตามลำดับ ดังสมการ (3.22) – (3.23)

$$v_i(t) = v_i(0) + \int_0^t a_{i(t)} - g_g \, dt(t) \tag{3.22}$$

$$s_i(t) = s_i(0) + \int_0^t v_i \, dt(t) \tag{3.23}$$

เมื่อ $v_i(0)$ คือค่าความเร็วตั้งต้น $s_i(0)$ คือค่าตำแหน่งตั้งต้น และค่า g_g เป็นค่าความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก

3.2 การระบุพิกัดอ้างอิงด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

จากวิธีการหาค่าพิกัดแบบซีนแอนาไลซิส (Scene Analysis) ด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.7 - 2.8 จะเริ่มจากขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ในช่วงออฟไลน์ (Offline phase) ซึ่งเป็นขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลก่อนจะระบุค่าพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยจะทำการเก็บรวมรวมข้อมูลของค่าความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSS) เพื่อนำไปสร้างเป็นฐานข้อมูลแผนที่ลายนิ้วมือ หรือฟิงเกอร์ปริ้นท์ สำหรับการเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN (Wireless Local Area Network) ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และเมื่อได้ฐานข้อมูลแผนที่ฟิงเกอร์ปริ้นท์แล้ว การระบุค่าพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในพื้นที่ก็จะดำเนินการในช่วงออนไลน์ (Online phase)

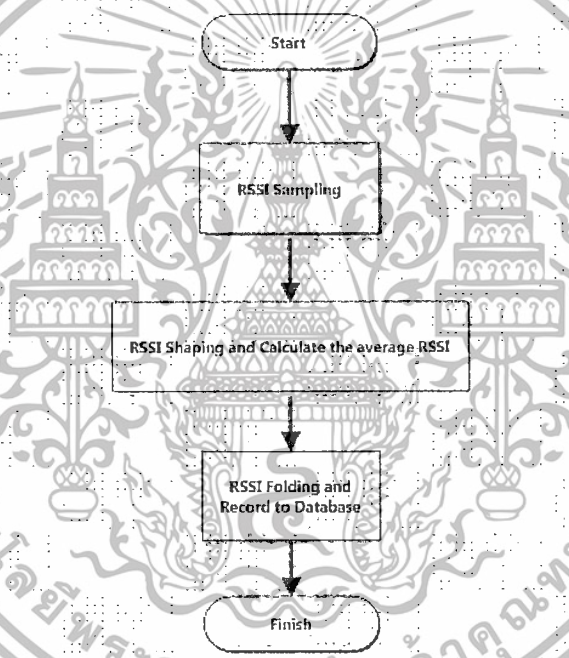
3.2.1 การทำงานในขั้นตอนออฟไลน์

ในขั้นตอนออฟไลน์จะมีการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณคลื่นวิทยุ (RSS) ที่รับได้ในแต่ละจุดพิกัดอ้างอิง เพื่อนำไปสร้างเป็นฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ ซึ่งในกระบวนนี้จะมีการกำหนดตำแหน่งพิกัดอ้างอิง หรือฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Location fingerprint) ณ จุดต่าง ๆ ในรูปของพื้นที่กริด (Grid space) โดยพิกัดหรือตำแหน่งอ้างอิง จะถูกกำหนดให้มีระยะห่างที่เท่า ๆ กันในแต่ละจุด เรียกระยะดังกล่าวว่า ระยะห่างของตำแหน่งกริด (Grid spacing) โดยระยะห่างของตำแหน่งกริดที่เหมาะสม จะทำให้การระบุค่าพิกัดตำแหน่งภายในอาคารมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตำแหน่งกริดมีค่าห่างหรือมากเกินไป ก็อาจจะทำให้ความถูกต้องของการระบุค่าพิกัดตำแหน่งลดลง

ขั้นตอนถัดมาในกระบวนออฟไลน์คือ การกรองข้อมูล (Data filter) เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลนั้น ๆ ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ในการกรองข้อมูลความแรงของสัญญาณอาจใช้วิธีเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) เพื่อกำจัดค่าผิดปกติ (Outliers) ของข้อมูลสำหรับ ซึ่งอาจกำหนดค่าที่ 90 เปอร์เซ็นต์ไทล์ (90-percentile) เป็นขอบเขตสูงสุดของชุดข้อมูล และ 10 เปอร์เซ็นต์ไทล์ (10-percentile) เป็นขอบเขตต่ำสุดของชุดข้อมูล ซึ่งจะช่วยทำให้ข้อมูลที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จากนั้นจะนำข้อมูลที่ผ่านกระบวนการกรองข้อมูลไปเก็บบันทึกลงในฐานข้อมูลตำแหน่งฟิงเกอร์ปริ้นท์ (ดังรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการทำงานช่วงออฟไลน์

3.2.2 การทำงานในขั้นตอนออนไลน์

ในขั้นตอนออนไลน์จะเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการระบุค่าพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ภายในอาคารจากค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ โดยการทำงานในช่วงออนไลน์จะมีขั้นตอนตรวจจับค่าความแรงของสัญญาณ (RSS) จากอุปกรณ์แอคเซสพอยท์ในพื้นที่และขั้นตอนการระบุค่าพิกัดตำแหน่ง (x, y) ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Positioning system) ดังที่อธิบายในหัวข้อ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 การตรวจจับค่าความแรงของสัญญาณ

ขั้นตอนแรกในช่วงออนไลน์ของระบบระบุค่าพิกัดตำแหน่ง จะทำการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลของตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยข้อมูลความเข้มสัญญาณที่รับได้จากตำแหน่งอ้างอิง จะนำไปดำเนินการในกระบวนการกรองข้อมูล โดยใช้ 90 เปอร์เซ็นต์ไทล์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ไทล์ เพื่อกำจัดค่าผิดปรกติของข้อมูลออก เช่นเดียวกับการทำงานในขั้นตอนออฟไลน์ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ผ่านกระบวนการกรองข้อมูลไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลต่อไป

3.2.2.2 ขั้นตอนการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

ขั้นตอนสุดท้ายในช่วงออนไลน์ของระบบระบุค่าพิกัดตำแหน่ง ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่มีหน้าที่ระบุตำแหน่งพิกัด x และพิกัด y ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยใช้การคำนวณจากการวัดระยะห่างแบบยูคลีเดียน (Euclidian distance) ด้วยอัลกอริทึม KNN (K-Nearest Neighbor) [8] ดังสมการ (3.24) – (3.25)

$$l(s) = \arg\min_{l_i} ED(xy_i) \tag{3.24}$$

$$ED(xy_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(AP_j e - AP_j s)^2} \tag{3.25}$$

โดยที่ n คือ จำนวนของแอคเซสพอยท์ (AP)

$ED\ (xy_i)$ คือ ระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance)

$l(s)$ คือ ตำแหน่งพิกัดของหุ่นยนต์ที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

$AP_j e$ คือ ค่า RSS ที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล (หรือค่า RSS จาก AP ตัวที่ j)

$AP_j s$ คือ ค่า RSS ที่วัดได้จากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (หรือค่า RSS จาก AP ตัวที่ j)

กระบวนการคำนวณวัดระยะห่างยูคลีเดียน จะทำการคำนวณหาผลต่างของค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่รับได้ ระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่กับฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ดังสมการ (3.25) โดยจะทำการเลือกพิกัดตำแหน่งฟิงเกอร์ปริ้นท์ที่ตำแหน่งที่มีค่าระยะห่างยูคลีเดียนน้อยที่สุดดังสมการ (3.24)

สำหรับการหาค่าระยะยูคลีเดียนที่น้อยที่สุดด้วยอัลกอริทึม KNN นั้น จะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่า ED (xy_i) ในสมการ (3.25) กับตำแหน่งทั้งหมดในฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ เช่น มีการเก็บค่า RSS จำนวน 50 จุด (นั่นคือ K = 50) ก็จะทำการเปรียบเทียบค่ากับจำนวน 50 จุดดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น โดยจะเลือกค่าระยะห่างยูคลิเดียนที่มีค่าต่ำสุดมาใช้ในการกำหนดเป็นจุดพิกัด ED (xy_i) ตามสมการ (3.24)

3.3 การรวมข้อมูลและปรับแก้ข้อผิดพลาดในการติดตามตำแหน่ง

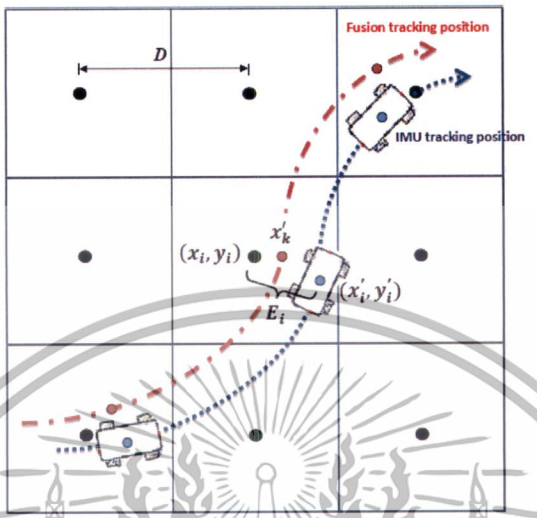
จากข้อมูลตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยในหัวข้อ 3.1 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสะสมเกิดขึ้น ทำให้ต้องสร้างกลไกในการปรับแก้ความผิดพลาดดังกล่าว ซึ่งในงานวิจัยจะใช้การรวมข้อมูลพิกัดตำแหน่งอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ในหัวข้อ 3.2 เพื่อนำมาปรับแก้ข้อผิดพลาดในการติดตามตำแหน่ง

แนวทางการปรับแก้ข้อผิดพลาดที่นำเสนอในงานวิจัย จัดเป็นแบบผสม (Hybrid) โดยใช้การรวมข้อมูล (Data fusion) จากเซนเซอร์หลายประเภท ซึ่งในที่นี้คือ ข้อมูลจากเซ็นเซอร์มาตรวัดความเร่งและไจโรสโคปในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย และข้อมูตำแหน่งพิกัดอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ สาเหตุที่ต้องมีการใช้ข้อมูลทั้งสองชนิดร่วมกัน เนื่องจากข้อมูลจากเซนเซอร์ในอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยโดยเฉพาะส่วนของไจโรสโคป เมื่อมีการใช้งานจะเกิดการดริฟท์ (Drift) หรือค่าที่อ่านได้ ณ จุดเดียวกันจะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อเวลาผ่านไปในระยะหนึ่ง ก็จะทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่ถูกต้องและเกิดเป็นความคลาดเคลื่อนสะสม ซึ่งในที่นี้ค่าที่อ่านได้จากไจโรสโคป จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุม (Gyroscope rate) แต่สามารถนำมาตรความเร่งมาช่วยในการประมาณค่ามุมได้ สาเหตุที่ไม่ใช้มาตรความเร่งเพียงตัวเดียวในการวัดมุมเนื่องจาก มาตรความเร่งเป็นเซนเซอร์วัดความเร่งดังนั้นค่าเอาต์พุตที่อ่านได้จะไม่นิ่ง เนื่องจากจะมีความเร่งเกิดขึ้นจากค่าความโน้มถ่วงของโลกแต่ไม่เกิดการดริฟท์ การนำเซ็นเซอร์ทั้งสองมาใช้งานร่วมกันจะช่วยปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนของเซนเซอร์ความเฉื่อยได้ แต่ยังไม่ดีพอในการระบุตำแหน่ง ดังนั้นเพื่อทำให้ลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความถูกต้องของการระบุตำแหน่ง เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์จะถูกนำมาใช้ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ความเฉื่อยในงานวิจัยนี้ โดยค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากเซนเซอร์ในอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยแม้จะมีความคลาดเคลื่อนแปรผันตามเวลา แต่มีข้อดีที่ให้อัตราข้อมูลจากตัวเซนเซอร์สูงและมีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมน้อย ตรงข้ามกับการระบุพิกัดตำแหน่งเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ที่ให้อัตราข้อมูลจากตัวเซนเซอร์ต่ำกว่าแต่ค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่สามารถจำกัดขอบเขตได้ ด้วยข้อดีและข้อเสียของทั้งสองวิธีนี้ ทำให้แนวคิดในการรวมข้อมูลเพื่อการปรับปรุงค่าตำแหน่งสามารถทำได้ โดยค่าพิกัดของทั้งสองวิธีจะถูกนำมาเฉลี่ยให้กับการระบุตำแหน่ง เพื่อทำการแก้ไขค่าการระบุตำแหน่งที่ผิดพลาดสะสมนั่นเอง

วิธีการปรับปรุงข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์เพื่อระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร (ดังรูปที่ 3.7) จะใช้ค่าตำแหน่ง (x_i, y_i) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการระบุตำแหน่งด้วยค่าความแรงของสัญญาณในเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ และค่าตำแหน่ง (x_i', y_i') เป็นค่าที่ได้จากการระบุตำแหน่งด้วยเซ็นเซอร์ความเฉื่อย โดยระยะห่างยูคลิเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(E_i) ของค่าตำแหน่งทั้งสองนี้ จะถูกนำมาเฉลี่ยให้กับการระบุตำแหน่ง เพื่อทำการปรับแก้ค่าการระบุตำแหน่งที่ผิดพลาดสะสมที่เกิดจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยในแต่ละจุดที่มีการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.7 การปรับค่าตำแหน่งด้วยเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

ในการหาค่าระยะห่างยูคลิเดียน (E_i) ระหว่างค่าตำแหน่ง (x_i, y_i) และ (x'_i, y'_i) เป็นไปดังสมการ (3.26)

$$E_i = \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \tag{3.26}$$

เมื่อได้ค่า E_i แล้ว ค่าดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ปรับค่าตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย ซึ่งจะทำให้ได้ตำแหน่ง T_i ซึ่งเป็นตำแหน่งใหม่ที่ได้รับการปรับแก้ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงในแต่ละจุดดังสมการ (3.27) โดยอิงกับค่าตำแหน่งพิกัดอ้างอิงจากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์นั่นเอง

$$T_i = (x'_i, y'_i) + \frac{E_i}{2} = x'_k \tag{3.27}$$

ค่าตำแหน่งพิกัด T_i ที่ได้คือ ค่าตำแหน่งจากการรวมข้อมูล (Fusion tracking position) เพื่อใช้ในการติดตามหุ่นยนต์ภายใต้แนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ ซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปของเมตทริกซ์ของตำแหน่ง x'_k ดังสมการ (3.28) สำหรับใช้กับตัวกรองคาลแมน (Kalman filter) เพื่อ

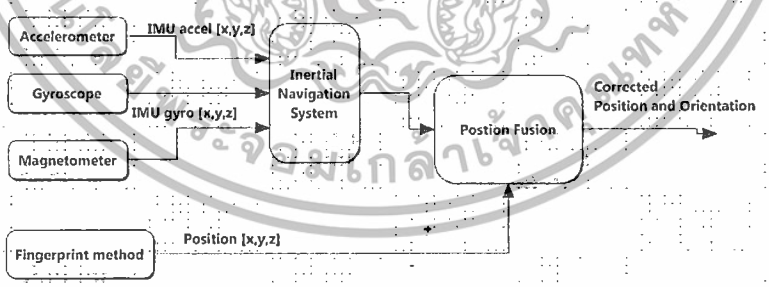
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงค่าในอนาคต โดยค่าตำแหน่ง x_{kx} ตำแหน่ง x_{ky} และตำแหน่ง x_{kz} สามารถหาได้จากสมการ (3.29)

$$x_k^{'} = \begin{bmatrix} x_{kx} \\ x_{ky} \\ x_{kz} \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

$$x_{kx} = \frac{x_i + x_i'}{2} \ , \ x_{ky} = \frac{y_i + y_i'}{2} \ , \ x_{kz} = \frac{z_i + z_i'}{2} \tag{3.29}$$

แบบจำลอง (Model) ของกลไกการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนในการติดตามตำแหน่งจากเซ็นเซอร์ในอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย โดยใช้การรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ที่นำเสนอ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งประกอบด้วย ส่วนเซนเซอร์มาตรวัดความเร่ง (Accelerometer) และไจโรสโคป (Gyroscope) ในอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) ซึ่งให้ค่าเอ๊าพุท (Output) ไปยังส่วนประมวลผลของระบบนำร่องความเฉื่อย (Inertial navigation system) เพื่อให้ค่าตำแหน่งออกมา โดยค่าตำแหน่งดังกล่าวจะถูกนำมาปรับแก้ด้วยการรวมข้อมูล (Data fusion) กับค่าตำแหน่งพิกัดอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ซึ่งค่าทั้งสองจะถูกนำมาปรับแก้เพื่อหาพิกัดที่มีความคลาดเคลื่อนลดลงและเพื่อเป็นการปรับปรุงผลลัพธ์ให้ถูกต้องมากขึ้นดังที่ได้อธิบายข้างต้น



รูปที่ 3.8 แสดงภาพรวมระบบติดตามตำแหน่ง

การพิสูจน์แนวคิดการปรับค่าพิกัดตำแหน่งของงานวิจัยที่นำเสนอ จะใช้การทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบ โดยจะอธิบายในรายละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การประเมินประสิทธิภาพ

จากเนื้อหาในบทที่ 3 ซึ่งได้กล่าวถึงแนวคิดของงานวิจัยในการพัฒนาวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ภายในอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดของตำแหน่งสะสม และปรับปรุงประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งด้วยเซ็นเซอร์ภายในอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว โดยได้อธิบายแบบจำลองของระบบและสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะเป็นการอธิบายถึงการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารตามแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ โดยใช้การทดลองที่กำหนดขึ้นซึ่งประกอบด้วยสภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง ผลการทดลอง รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการฯ ของงานวิจัยที่นำเสนอ

4.1 สภาพแวดล้อมและวิธีการทดลอง

ผู้วิจัยได้กำหนดการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว ส่วนที่สองเป็นการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยวิธีการจำลอง (Simulation) และส่วนที่สามเป็นการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเฉื่อยมาทำการปรับค่าด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตามแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ เพื่อเปรียบเทียบและชี้ให้เห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้สามารถช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งได้อย่างไร

4.1.1 การระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย

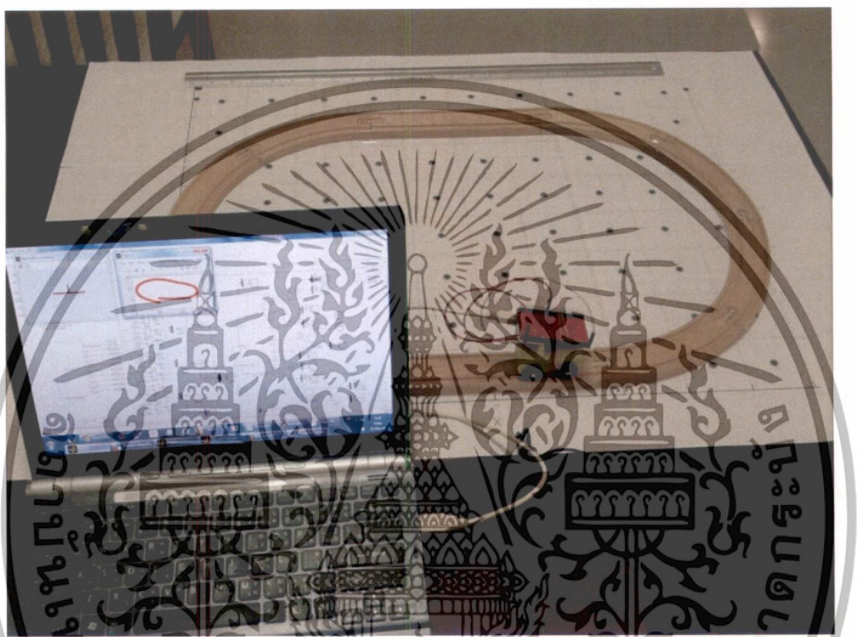
สภาพแวดล้อมในการทดลองสำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นวงรีแบบคงที่ (Fixed) เพื่อใช้กำหนดเป็นตำแหน่งอ้างอิงที่แน่นอนและใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

ในการทดลอง ได้ทำการติดตั้งฮาร์ดแวร์อุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเฉื่อย (ดังที่อธิบายในหัวข้อ 3.1) เข้ากับหุ่นยนต์เคลื่อนที่จำลอง (รถรางไม้) และกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางวงรีที่กำหนด โดยขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางวงรี จะกำหนดให้มีการอ่านค่าข้อมูลจาก

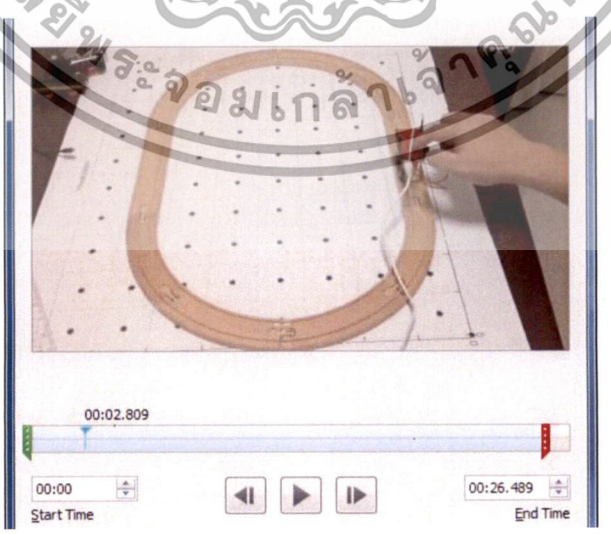
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์ความเฉื่อยและทำการส่งค่าข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาตำแหน่งพิกัด (x, y) ในแต่ละจุด

ในขณะทำการทดลองได้บันทึกวีดีโอ (Video) ดังรูปที่ 4.2 เพื่อใช้ข้อมูลเวลาและตำแหน่งในการเคลื่อนที่สำหรับอ้างอิงกับค่าข้อมูลที่แซมปลิ้ง (Sampling) ได้จาก IMU เทียบกับค่าข้อมูลจากเทคนิคฟิงเกอร์ปรินท์ในการทดลองที่ 4.1.2 เพื่อทำให้มีฐานเวลาและตำแหน่งที่ตรงกัน (Synchronous)



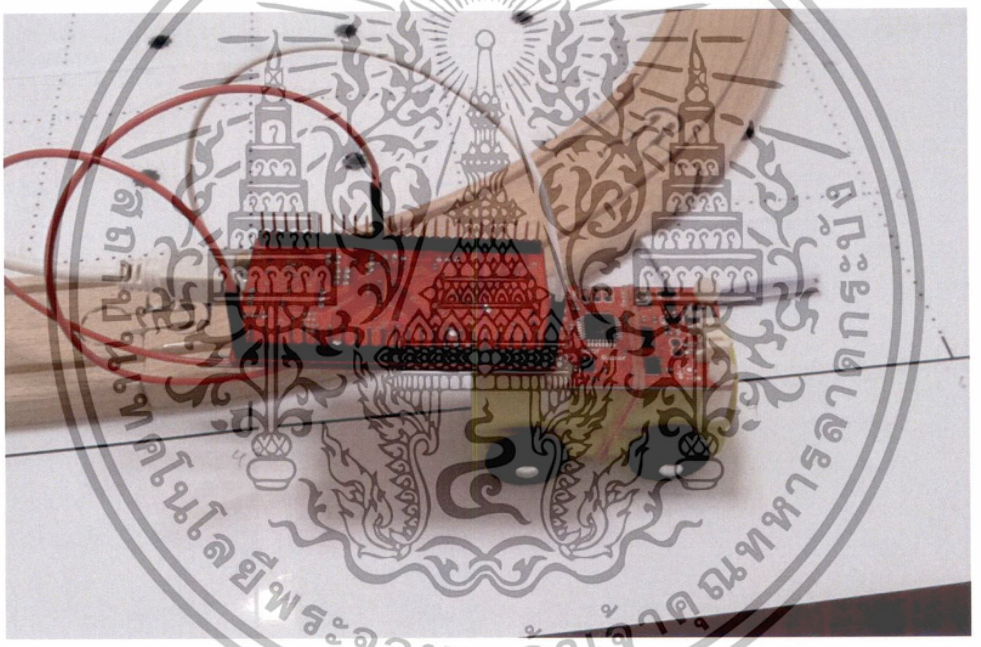
รูปที่ 4.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย



รูปที่ 4.2 ข้อมูลจากภาพวีดีโอที่บันทึกในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

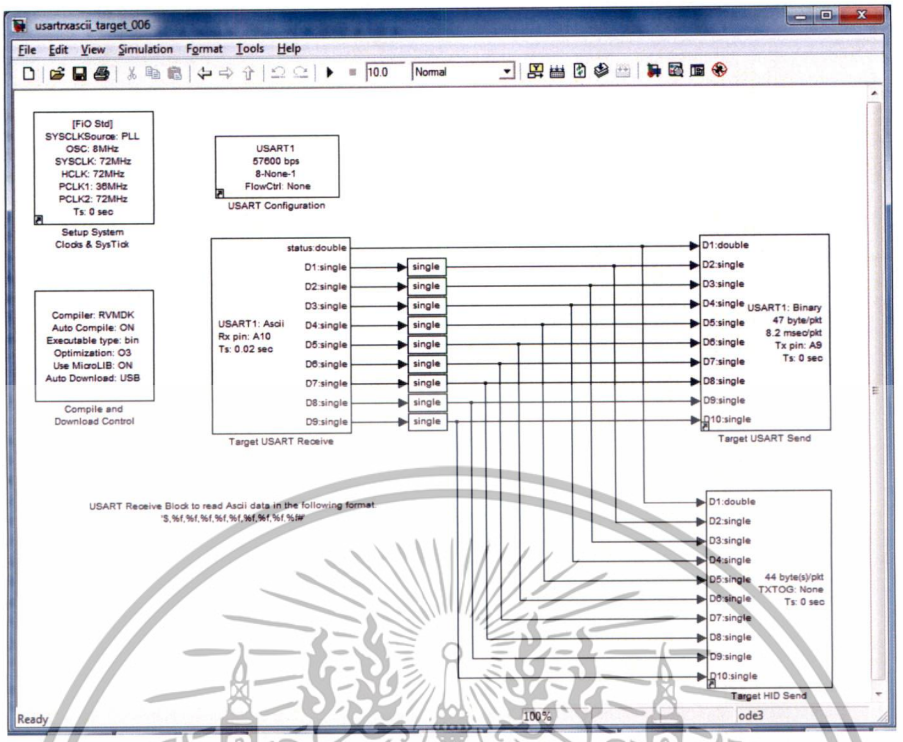
อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด Razor IMU 9 Degree of Freedom (SEN-10736) โดยทำการเชื่อมต่อเข้ากับแผงวงจรควบคุมฟายโอ (FiO controller board) ซึ่งเป็นบอร์ดประมวลผล ดังรูปที่ 4.3 ส่วนของเซ็นเซอร์ความเฉื่อยประกอบด้วยมาตรวัดความเร่ง ไจโรสโคป และเข็มทิศดิจิตอล ภายในอุปกรณ์ IMU ซึ่งจะทำการตรวจวัดค่าและส่งข้อมูลไปยังบอร์ดประมวลผล (แผงวงจรควบคุมฟายโอ) แล้วส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB โดยแผงวงจรควบคุมฟายโอเป็นชุดทดลองระบบสมองกลฝังตัว ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ (Microcontroller) ตระกูล STM32 มีสถาปัตยกรรมแบบ ARM Cortex-M3 ขนาด 32-bits ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อใช้ร่วมกับ Rapid STM32 Blockset ซึ่งเป็นชุดกล่องคำสั่งแบบออปเจ็ก (Object) ที่สามารถใช้งานร่วมกับ MATLAB/Simulink และกลไกการสร้างโค๊ด ทำให้สามารถแปลงโปรแกรมแบบกราฟิกเป็นระบบสมองกลฝังตัวที่ใช้งานได้



รูปที่ 4.3 เซ็นเซอร์ความเฉื่อยและแผงวงจรควบคุม

ส่วนประมวลผลภายในแผงวงจรควบคุมซึ่งเป็นชุดกล่องคำสั่งแบบออปเจ็ก (Object) แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งช่วยทำให้สามารถโปรแกรมร่วมกับ MATLAB/Simulink บนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้

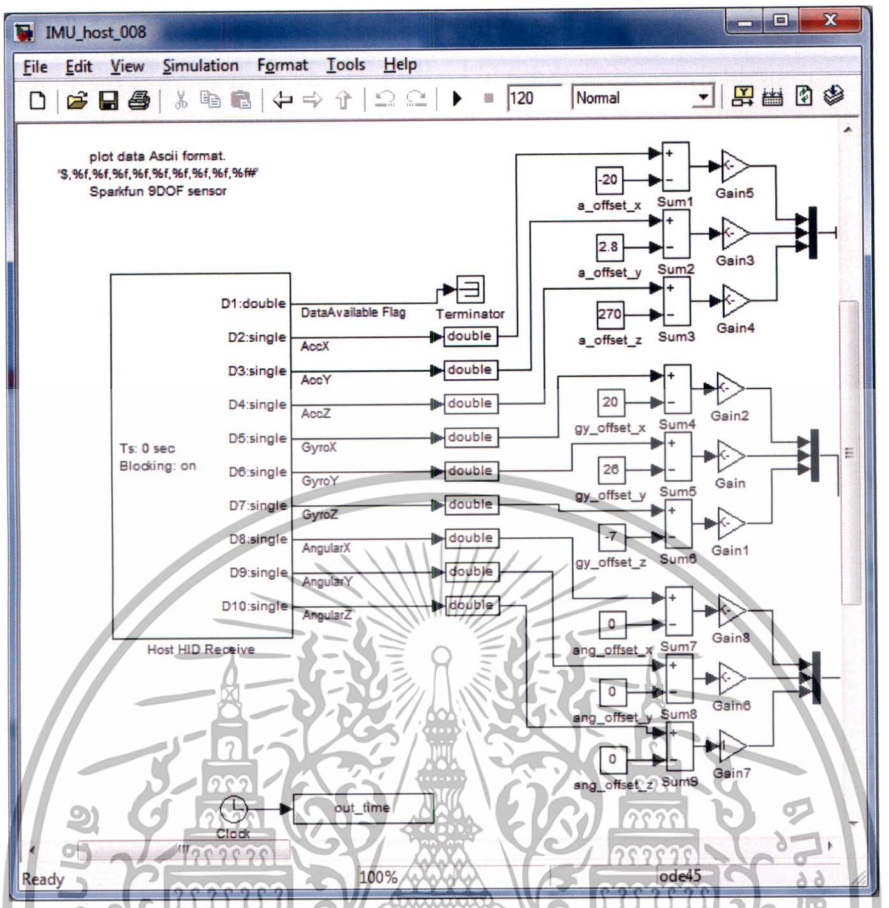
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ส่วนประมวลผลภายในแผงวงจรควบคุมฟายโอ

ในขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด เซ็นเซอร์ความเฉื่อยจะทำการตรวจจับข้อมูลในแต่ละจุดที่มีการเคลื่อนที่ตามช่วงเวลา และส่งมาค่ายังคอมพิวเตอร์ผ่านทางแผงวงจรควบคุมฟายโอ ซึ่งถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโปรแกรมคำสั่งแบบออปเจ็ก ส่วนที่ใช้ในการติดต่อจากแผงวงจรควบคุมเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต USB ดังรูปที่ 4.5

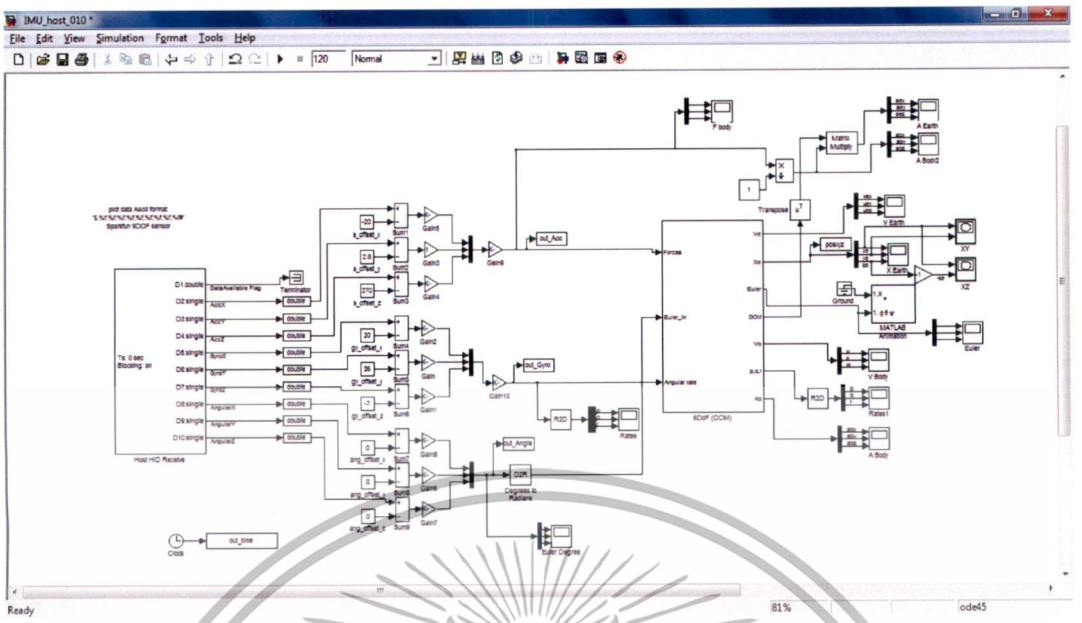
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 โมดูลคำสั่งแบบออปเจ็กส่วนที่ใช้ติดต่อจากคอมพิวเตอร์สู่แผงวงจรควบคุม

ค่าที่อ่านจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยผ่านทางแผงวงจรควบคุมฟายโอสู่คอมพิวเตอร์นี้ จะถูกนำมาทำการประมวลผลหาค่าตำแหน่ง (ดังโมดูลของโปรแกรมในรูปที่ 4.6) โดยค่าที่ได้จะถูกปรับค่าให้เหมาะสมและใกล้เคียงกับความเป็นจริงด้วยค่ากำลังขยายของเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (Scalar factor) โดยค่าตำแหน่งพิกัด (x, y) ในแต่ละจุด จะหาได้จากภายในชุดคำสั่ง 6-DOFs ของโปรแกรม MATLAB/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โมดูลการนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยมาประมวลผลหาพิกัดตำแหน่ง

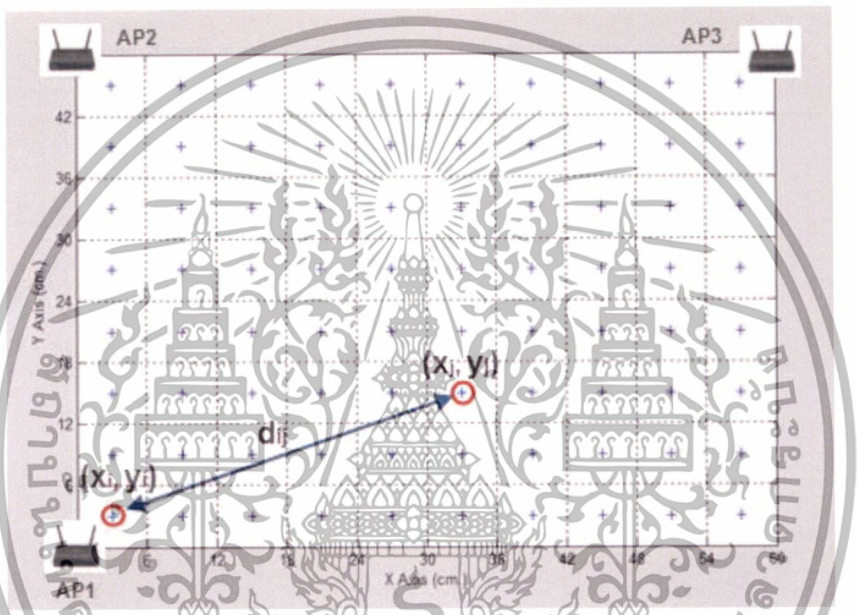
4.1.2 การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

ในการทดลองเพื่อระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ จะใช้วิธีการจำลอง (Simulation) เพื่อลดข้อจำกัดจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการกระจายของคลื่นวิทยุ เช่น สัญญาณรบกวน การดูดซับ การสะท้อน การหักเห และการกระเจิง เป็นต้น โดยสภาพแวดล้อมในการจำลองจะกำหนดพื้นที่การทดลองซึ่งมีขนาดกว้าง 0.6 เมตร ยาว 0.6 เมตร ซึ่งมีขนาดคลอบคลุมเส้นทางวงรีแบบคงที่ โดยจะทำการกำหนดพื้นที่กริด (Grid) ขนาดกว้าง 0.06 เมตร ยาว 0.06 เมตร ที่มีจุดศูนย์กลาง (x_i, y_i) จำนวน 80 จุด ซึ่งใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง ดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 สภาพแวดล้อมการจำลองสำหรับระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตำแหน่งกริดในรูปที่ 4.6 จะถูกแปลง (Mapping) เข้าสู่โปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.8 โดยใช้การวัดขนาดของพื้นที่ในการทดลองจริงและกำหนดพิกัดตำแหน่งเท่ากับสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากนั้นทำการสร้างสภาพแวดล้อมพื้นที่เพื่อใช้ในการจำลอง (Simulation) โปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้มีแอคเซสพอยท์ (Access point) จำนวน 3 ตัว คือ AP_1 AP_2 และ AP_3 ซึ่งวางอยู่ที่จุดพิกัดตำแหน่ง (x_0, y_0) ตำแหน่ง (x_0, y_{48}) และตำแหน่ง (x_{60}, y_{48}) ตามลำดับ สำหรับใช้เป็นภาคส่งเพื่อนำมาคำนวณค่าระดับความแรงของสัญญาณ หรือ RSS ที่รับได้ในแต่ละจุด



รูปที่ 4.8 สภาพแวดล้อมการจำลองเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
รัศมีพื้นที่บริการของแอคเซสพอยท์	0.6 m
ความถี่ในการส่งผ่าน (*f*)	2.4 GHz
อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล	11 Mbps
กำลังส่งของแอคเซสพอยท์ (*Pt*)	1 W
เกณฑ์เสาอากาศของแอคเซสพอยท์ (*Gt*)	1 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
เกณฑ์เสาอากาศของการ์เครือข่ายไร้สาย (*Gr*)	1 dB

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีการจำลอง แสดงในตารางที่ 4.1 โดยสมมุติให้อุปกรณ์การ์ดเครือข่ายไร้สาย (WLAN card) ซึ่งติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการรับสัญญาณและอุปกรณ์แอคเซสพอยท์ทั้ง 3 ตัวทำงานภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11b ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz โดยพื้นที่ให้บริการของแอคเซสพอยท์มีรัศมีครอบคลุม 0.6 m รองรับอัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูลที่ 11 Mbps กำลังส่งของแอคเซสพอยท์อยู่ที่ 1 W เกณฑ์การขยายของเสาอากาศสำหรับแอคเซสพอยท์และการ์ดเครือข่ายไร้สายเท่ากับ 1 dB

ค่าระดับความแรงของสัญญาณ (RSS) ที่รับได้จากแอคเซสพอยท์ในแต่ละจุดพิกัด (x, y) ในการทดลองจะใช้สมการ (4.1) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณกำลังของสัญญาณที่ภาครับ [17] โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในตารางที่ 4.1

$$P_r = 10\log P_t + G_t + G_r - 20\log\left(\frac{4\pi fd}{c}\right) \tag{4.1}$$

โดยที่

P_r คือ กำลังของสัญญาณที่รับได้จากแอคเซสพอยท์ หรือ RSS (dB)

P_t คือ กำลังส่งของแอคเซสพอยท์ (W)

G_t คือ เกณฑ์ของเสาอากาศของภาคส่ง หรือแอคเซสพอยท์ (dB)

G_r คือ เกณฑ์ของเสาอากาศของภาครับ หรือการ์ดเครือข่ายไร้สาย (dB)

c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

f คือ ความถี่ที่ใช้ในการส่งผ่านตามมาตรฐาน IEEE802.11b (Hz)

d คือ ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่ง (m)

สำหรับระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่ง (d_{ij}) หรือระยะห่างระหว่างแอคเซสพอยท์และจุดศูนย์กลางกริดของตำแหน่งอ้างอิงในการทดลองด้วยการจำลอง จะคำนวณโดยใช้ระยะทางยูคลิเดียน ตามสมการ (4.2)

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

(x_i, y_i) คือ จุดศูนย์กลางของภาคส่งที่ตำแหน่ง i (โดยที่ i = 1, 2, 3, …, n)

(x_j, y_j) คือ จุดศูนย์กลางของภาครับที่ตำแหน่ง j (โดยที่ j = 1, 2, 3, …, n)

ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 3.2 เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ประกอบด้วยเฟสออฟไลน์ (Offline phase) และเฟสออนไลน์ (Online phase) โดยการทดลองในเฟสออฟไลน์จะกำหนดให้การ์ดเครือข่ายไร้สายซึ่งติดตั้งที่ตัวหุ่นยนต์ ทำการเก็บค่าความแรงของสัญญาณ หรือ RSS ที่รับได้จากแอคเซสพอยท์ (Access point) จำนวน 3 ตัว ณ. จุดศูนย์กลางของพื้นที่กริดซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิง (Coordinate) แต่ละตำแหน่งภายใต้พื้นที่ที่กำหนดจำนวน 80 จุด (หรือ K = 80) ด้วยสมการ (4.1)

ค่าความแรงของสัญญาณที่คำนวณได้จากแอคเซสพอยท์ทั้ง 3 ตัวในแต่ละจุด จะถูกบันทึกในฐานข้อมูลเพื่อใช้เป็นแผนที่ความแรงของสัญญาณ หรือฟิงเกอร์ปริ้นท์ ดังตัวอย่างในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ระดับความแรงของสัญญาณในเฟสออฟไลน์จำนวน 6 จุด

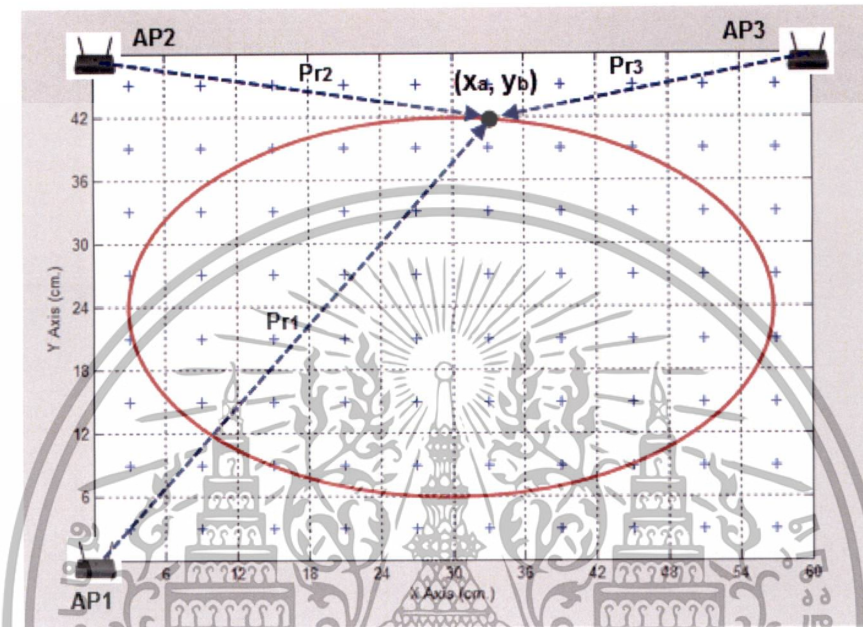
i	จุดศูนย์กลางกริด หรือ พิกัด (x_i, y_i)	ความแรงของสัญญาณ (Pr) จากแอคเซสพอยท์ $(AP_1 - AP_3)$		
		Pr_1 (dB)	Pr_2 (dB)	Pr_3 (dB)
1	(3, 3)	-27.01	-74.28	-83.81
2	(9, 3)	-43.10	-74.63	-82.50
3	(15, 39)	-72.76	-55.34	-74.63
4	(21, 39)	-73.92	-60.68	-71.90
5	(33, 3)	-68.12	-78.54	-77.31
6	(51, 33)	-80.24	-77.57	-55.34

การทดลองในเฟสออนไลน์ จะกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ซึ่งติดตั้งการ์ดเครือข่ายไร้สายเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางวงรีที่กำหนด (ดังรูปที่ 4.9) จากนั้นทำการเก็บค่าความแรงของสัญญาณในแต่ละจุดที่เคลื่อนที่เช่นเดียวกับในเฟสออฟไลน์ โดยใช้สมการ (4.1) รวมทั้งระยะ d_{ij} ด้วยสมการ (4.2) ซึ่งค่าที่ได้จะถูกนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับค่าฟิงเกอร์ปริ้นท์ซึ่งเก็บในฐานข้อมูล (ดังตัวอย่างในตาราง 4.2) โดยใช้สมการ (3.24) – (3.25) ตามที่อธิบายในหัวข้อ 3.2.2.2 โดยตำแหน่งที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแต่ละจุด จะอาศัยเวลาและตำแหน่งที่ตรงกับภาพที่จับได้ (Capture) จากกล้องวีดีโอในการทดลองที่ 4.1.1 (ดังรูปที่ 4.2) เพื่อให้ข้อมูลเวลาและตำแหน่งที่ตรงกัน (Synchronous)

ตารางที่ 4.3 แสดงตัวอย่างผลการทดลองที่ได้จากการจำลองด้วยสมการ (3.24) – (3.25) ซึ่งใช้ระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในเฟสออนไลน์ที่ตำแหน่งพิกัด (x_a, y_b) โดยค่าความแรงของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่รับได้จาก AP_1 - AP_3 จากสมการ (4.1) จะได้เป็น (Pr_1, Pr_2, Pr_3) = (-78.54,-68.11,-64.14) dB ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าในฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยสมการ (3.24) – (3.25) แล้วจะได้ค่า ED (x_a, y_b) เท่ากับ 0.01 ซึ่งมีค่าน้อยสุดในตาราง 4.3 ดังนั้น ค่าพิกัด (x_a, y_b) ซึ่งเป็นตำแหน่งของหุ่นยนต์ ณ. จุดดังกล่าวมีค่าประมาณเท่ากับ (x_i, y_i) = (33, 45)



รูปที่ 4.9 สภาพแวดล้อมการจำลองเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ในเฟสออนไลน์ (Online phase)

ตารางที่ 4.3 ระดับความแรงของสัญญาณในเฟสออนไลน์

i	พิกัด (x_i, y_i)	ความแรงของสัญญาณ (Pr) จากแอคเซสพอยท์ (AP)			Min ED (x_a, y_b)
		Pr_1 (dB)	Pr_2 (dB)	Pr_3 (dB)	
1	(3,3)	-27.01	-74.28	-83.81	55.50
2	(3,9)	-43.10	-71.44	-82.81	40.19
3	(3,15)	-52.66	-68.12	-81.86	31.36
4	(3,21)	-59.20	-64.15	-80.99	25.96
5	(3,27)	-64.15	-59.20	-80.24	23.36
6	(3,33)	-68.12	-52.66	-79.64	24.24
7	(3,39)	-71.44	-43.10	-79.21	30.05
⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ระดับความแรงของสัญญาณในเฟสออนไลน์

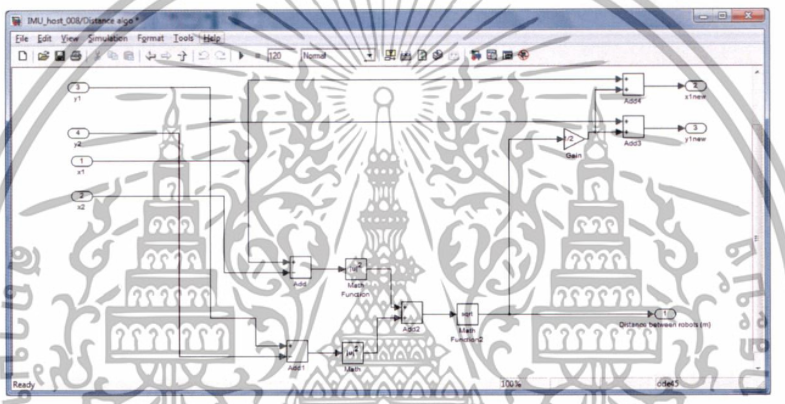
i	พิกัด (x_i, y_i)	ความแรงของสัญญาณ (Pr) จากแอคเซสพอยท์ (AP)			Min ED (x_a, y_b)
		Pr_1 (dB)	Pr_2 (dB)	Pr_3 (dB)	
20	(15,21)	-63.12	-66.71	-77.31	20.33
21	(15,27)	-66.71	-63.12	-76.21	17.62
22	(15,33)	-69.91	-59.20	-75.29	16.68
23	(15,39)	-72.76	-55.34	-74.63	17.51
24	(15,45)	-75.29	-52.66	-74.28	18.77
25	(21,3)	-59.20	-76.21	-79.84	26.20
⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮
40	(27,39)	-75.29	-65.08	-68.75	6.41
41	(27,45)	-77.31	-64.15	-68.12	5.75
42	(33,3)	-68.12	-78.54	-77.31	19.77
43	(33,9)	-68.75	-76.78	-75.29	17.18
44	(33,15)	-69.91	-74.97	-73.16	14.24
45	(33,21)	-71.44	-73.16	-70.95	11.06
46	(33,27)	-73.16	-71.44	-68.75	7.83
47	(33,33)	-74.97	-69.91	-66.71	4.76
48	(33,39)	-76.78	-68.75	-65.08	2.10
49	(33,45)	-78.54	-68.12	-64.15	0.01
50	(39,3)	-71.44	-79.84	-76.21	18.27
⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮	⋮ ⋮
73	(57,3)	-78.99	-83.81	-74.28	18.70
74	(57,9)	-79.21	-82.81	-71.44	16.42
75	(57,15)	-79.64	-81.86	-68.12	14.35
76	(57,21)	-80.24	-80.99	-64.15	12.99
77	(57,27)	-80.99	-80.24	-59.20	13.33
78	(57,33)	-81.86	-79.64	-52.66	16.60
79	(57,39)	-82.81	-79.21	-43.10	24.17
80	(57,45)	-83.81	-78.99	-27.01	39.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อยรวมกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

ในการทดลองเพื่อระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยมาทำการปรับค่าด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตามแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 มาทำการรวมกัน หรือฟิวชัน (Fusion) เพื่อปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นตามที่อธิบายในหัวข้อ 3.3

ในการทดลองจะทำการจำลองโดยใช้การคำนวณตามสมการ (3.26) – (3.28) และใช้โมเดลซึ่งพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB/Simulink ดังรูปที่ 4.10 โดยนำเข้าค่าข้อมูลตำแหน่งจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและข้อมูลตำแหน่งพิกัดอ้างอิงจากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ มาทำการคำนวณเพื่อปรับหาค่าตำแหน่งใหม่



รูปที่ 4.10 โมดูลการปรับค่าตำแหน่งด้วยข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและฟิงเกอร์ปริ้นท์

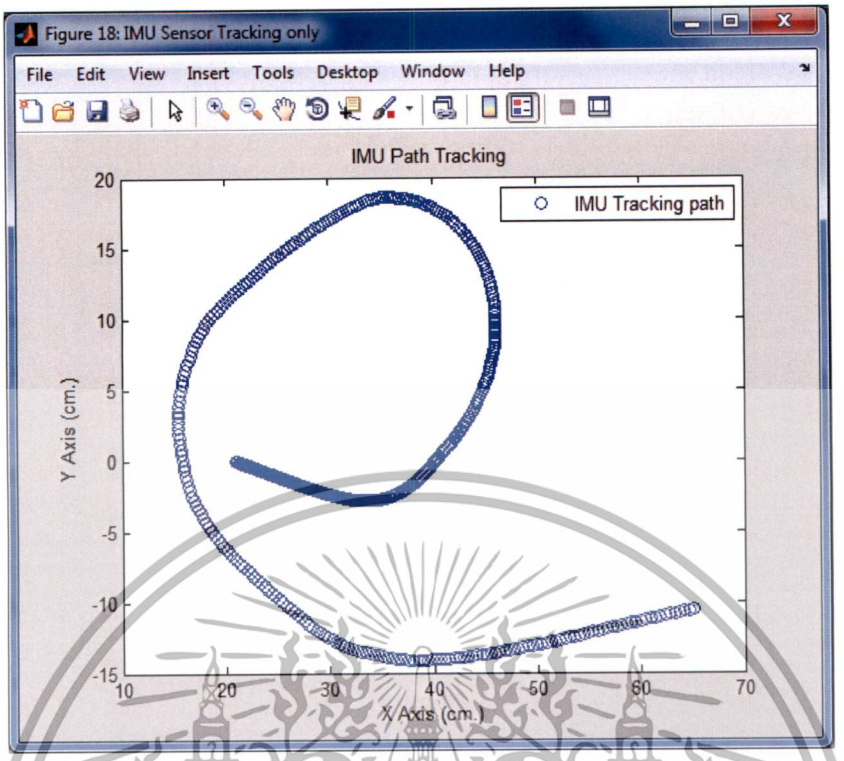
4.2 ผลการทดลอง

จากสภาพแวดล้อมและวิธีการทดลองดังที่อธิบายในหัวข้อ 4.1 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองและปรากฏผลการทดลองในแต่ละส่วนดังนี้

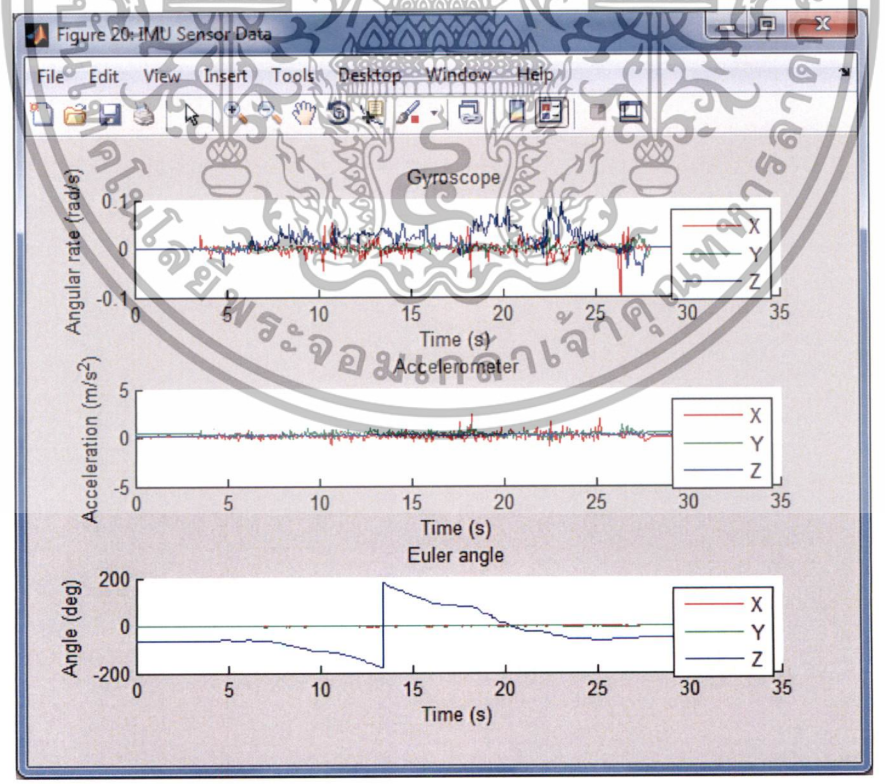
4.2.1 ผลการทดลองระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย

ผลการทดลองระบุตำแหน่งจากข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อย ได้ผลดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงค่าตำแหน่งที่ได้จากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยตามเส้นทางวงรีที่เคลื่อนที่ไปในแต่ละจุด ทำการทดลองวิ่งวนรอบ จากค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นทางการวิ่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไม่เป็นวงรี โดยสามารถพิจารณาค่าของความเร่ง และความเร็วเชิงมุมที่เกิดขึ้นด้วยดังรูปที่ 4.12 ทำให้เห็นได้ว่า การระบุตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนนี้ เป็นผลมาจากค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยสะสมมากขึ้นตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 พิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อย

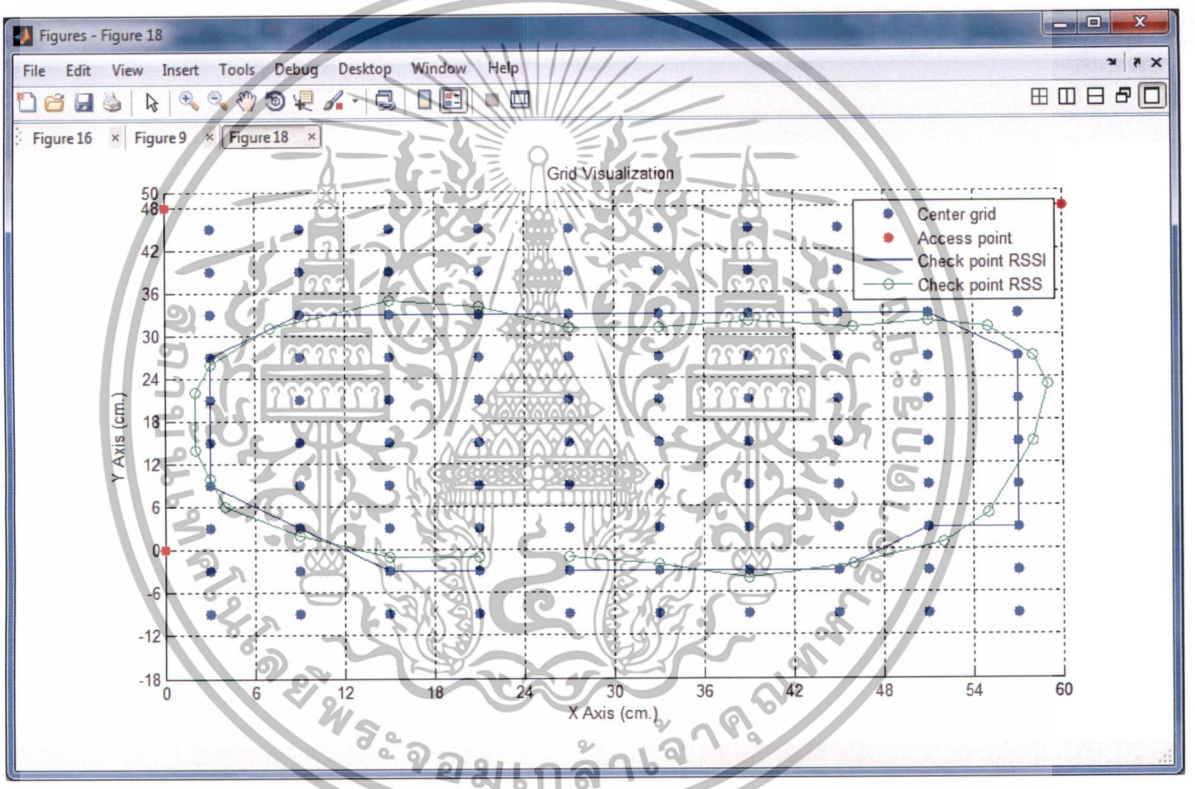


รูปที่ 4.12 ค่าความเร็งเชิงมุม ค่าความเร่งและค่ามุมออยเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการทดลองระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

จากการทดลองด้วยการจำลองเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ตามที่อธิบายในหัวข้อ 4.1.2 ได้ผลการทดลองซึ่งเป็นตำแหน่งพิกัดของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางวงรีในขั้นตอนออนไลน์ ดังรูปที่ 4.13 จากรูปจะสังเกตุเห็นว่า ตำแหน่งที่ได้รับค่าความแรงของสัญญาณในเฟสออนไลน์ ณ. จุดต่าง ๆ ซึ่งคำนวณได้ดังเส้นสีเขียว (Est. Position) ส่วนเส้นสีน้ำเงิน (Check point RSS) คือตำแหน่งที่ได้จากการคำนวนระยะยูคลิเดียนด้วยอัลกอริทึม KNN ดังสมการ (3.24) – (3.25) ซึ่งเป็นค่าที่มีระยะยูคลิเดียนต่ำสุดในแต่ละจุดที่มีการเคลื่อนที่ หรือตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ได้จากการเคลื่อนที่จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์



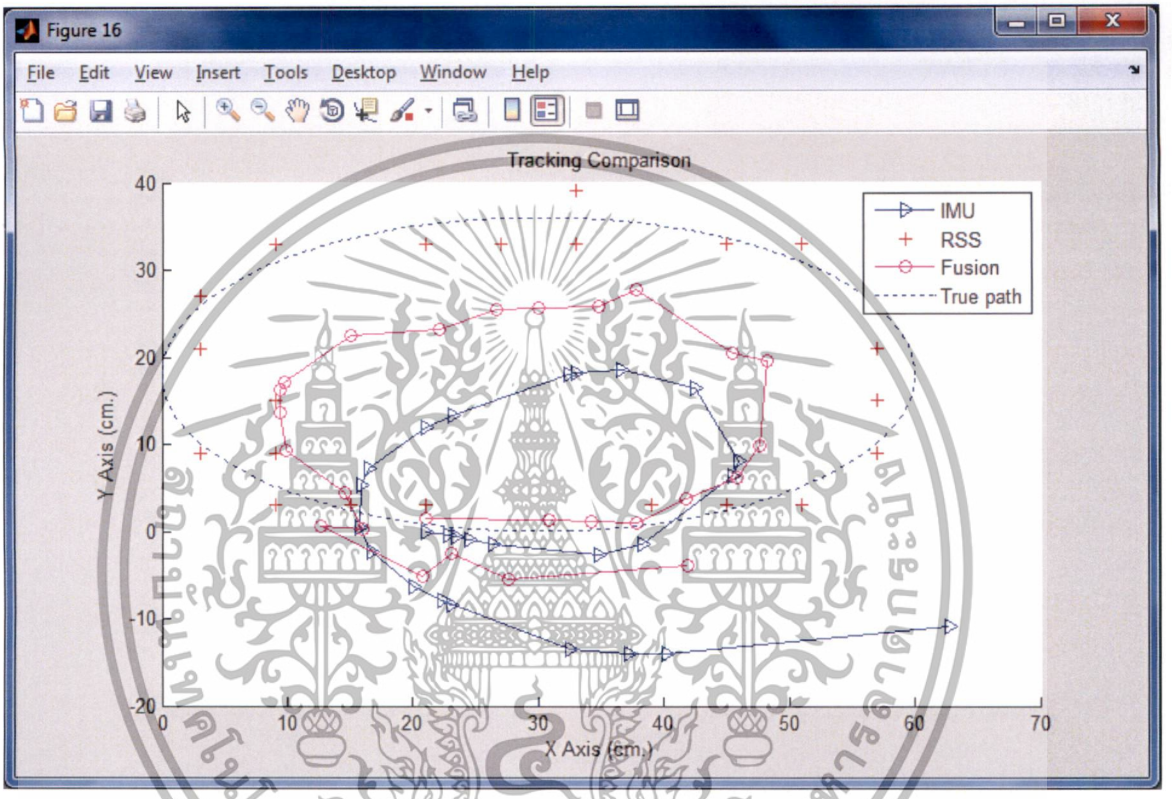
รูปที่ 4.13 พิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ตามเส้นทางวงรี

4.2.3 ผลการทดลองระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อยร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการรวมข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อยและเทคนิคฟิงก์เกอร์ปริ้นท์ในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 โดยใช้การแซมปลิ้ง (Sampling) จำนวนจุดพิกัดตำแหน่งของข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนจุดพิกัดอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อให้ได้ค่าตำแหน่งเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะได้เส้นสีเหลืองคือ ตำแหน่งของเส้นทางวงรีที่ใช้ในการทดลอง เส้นสีแดงคือ ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ได้จากข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อย เส้นสีน้ำเงินคือ ตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ และเส้นสีเขียวคือ ตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ได้จากการรวมข้อมูล (Fusion) เซ็นเซอร์ความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ตามแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ



รูปที่ 4.14 พิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนเปรียบเทียบจากทั้ง 3 การทดลอง

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

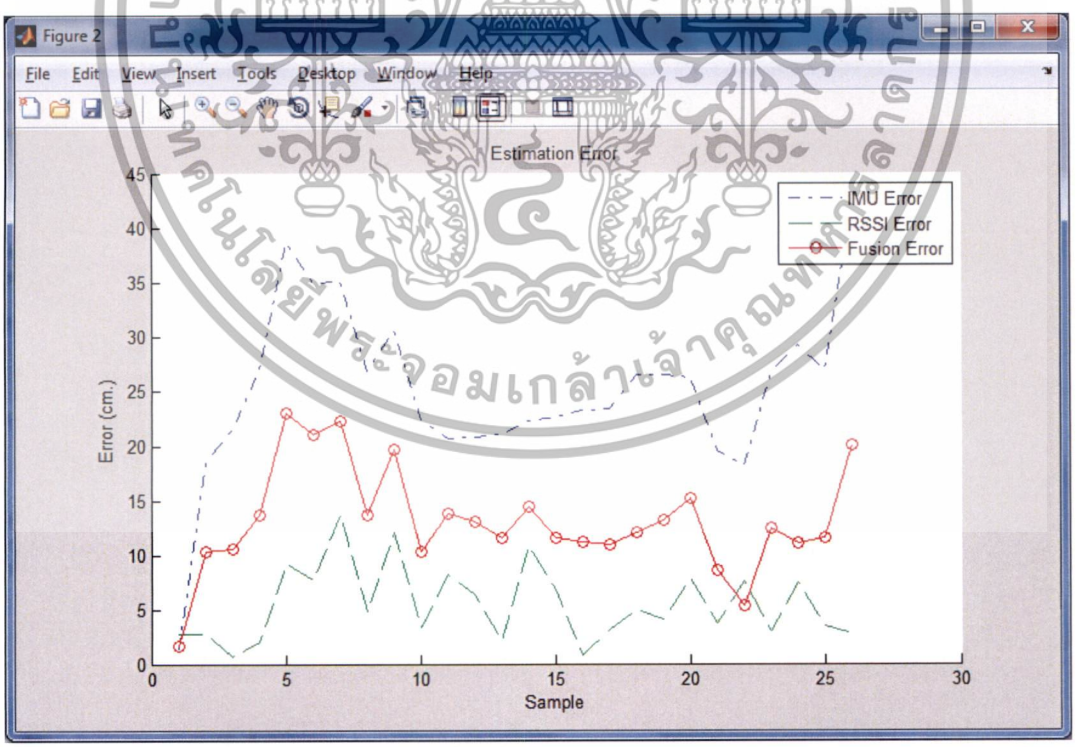
จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 – 4.2.3 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ได้จากทั้ง 3 วิธีเปรียบเทียบ ซึ่งได้ผลค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละจุดของหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ ดังแสดงในกราฟตามรูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณาผลค่าความคลาดเคลื่อนจากกราฟจะสังเกตได้ว่า ช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) สูง หมายถึงช่วงที่จุดพิกัดตำแหน่งของเส้นทางจริงกับตำแหน่งพิกัดที่ได้จากวิธีการทดลองแต่ละแบบนั้นมีระยะห่างกันมาก เช่น ค่าที่ได้จากวิธีการระบุตำแหน่งโดยเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (IMU error) จะมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ตำแหน่งแซมปลิ้ง (Sampling point) 5 ด้วยค่าประมาณ 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ.ม. สำหรับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (RSS error) จะอยู่ที่ตำแหน่งแซมปลิ้ง 5 ด้วยค่าประมาณ 23 ซ.ม. และวิธีการของงานวิจัยที่นำเสนอ (Fusion error) ค่าตำแหน่งคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่จะอยู่ที่ตำแหน่งแซมปลิ้ง 6 ด้วยค่าประมาณ 12 ซ.ม. เป็นต้น ส่วนช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำหมายถึงจุดพิกัดตำแหน่งของเส้นทางจริงกับตำแหน่งที่ได้จากวิธีการทดลองแต่ละแบบมีระยะห่างใกล้เคียงกัน เช่น ค่าที่ได้จากวิธีการระบุตำแหน่งโดยเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (IMU error) จะมีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ตำแหน่งแซมปลิ้ง (Sampling point) 23 ด้วยค่าประมาณ 17 ซ.ม. สำหรับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (RSS error) จะอยู่ที่ตำแหน่งแซมปลิ้ง 17 ด้วยค่าประมาณ 5 ซ.ม. และวิธีการของงานวิจัยที่นำเสนอ (Fusion error) ค่าตำแหน่งคลาดเคลื่อนต่ำสุดอยู่ที่จะอยู่ที่ตำแหน่งแซมปลิ้ง 16 ด้วยค่าประมาณ 2 ซ.ม. เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มค่าความคลาดเคลื่อนจากกราฟโดยวิธีการระบุตำแหน่งทั้ง 3 วิธี จะสังเกตุได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อย (IMU error) จะมีแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสูงสุด ส่วนจากวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (RSS error) จะมีแนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด สำหรับวิธีการของงานวิจัยที่นำเสนอ (Fusion error) จะมีแนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งดีกว่าวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อย



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเปรียบเทียบจากทั้ง 3 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.4 เป็นข้อมูลสรุปค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean) ความแปรปรวน (Variance) และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error) หรือ MSE จากข้อมูลในกราฟรูปที่ 4.14 ซึ่งมาจากวิธีการระบุตำแหน่งในการทดลองทั้ง 3 วิธี โดยค่า MSE ที่ใช้ในการคำนวณได้จากสมการ (4.3)

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{Y}_i - Y_i)^2 \qquad (4.3)$$

โดยที่ $(\hat{Y}_i - Y_i)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่ได้จากการทดลอง ส่วน n คือจำนวนจุดแซมปลิ้งที่พิจารณา

จากผลการทดลองในตาราง 4.4 หากพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) จากระยะขจัดเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี จะสังเกตได้ว่า วิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อย (IMU error) มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยสูงสุดที่ 690.42 ส่วนเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (RSS error) มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดที่ 42.19 ส่วนวิธีการของงานวิจัยที่นำเสนอ (Fusion error) มีค่า 197.67 ซึ่งดีกว่าวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ความเฉื่อย (IMU error) นั่นคือ วิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลเซ็นเซอร์จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยและเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโดยสามารถลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสมจากวิธีการระบุตำแหน่งโดยเซ็นเซอร์ความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากวิธีการระบุตำแหน่งทั้ง 3 การทดลอง

วิธีการระบุตำแหน่ง	ตำแหน่งแกน X			ตำแหน่งแกน Y			ระยะขจัด		
	Mean	Varian	MSE	Mean	Varian	MSE	Mean	Varian	MSE
IMU error	16.79	72.96	352.20	16.75	59.88	338.22	25.14	60.36	690.42
RSS error	3.78	10.75	24.65	3.31	6.81	17.53	5.53	1205	42.19
Fusion error	9.20	19.99	103.95	8.32	25.30	93.71	13.21	23.89	197.67

เมื่อพิจารณาวิธีการระบุตำแหน่งของงานวิจัยที่นำเสนอเปรียบเทียบกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ จะสังเกตได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์นั้นมีค่าต่ำสุด นั่นคือ เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ให้ผลลัพธ์ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 2 วิธี ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ใช้การจำลอง (Simulation) โดยการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎี และไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการกระจายของคลื่นวิทยุ เช่น สัญญาณรบกวน การดูดซับ การสะท้อน การหักเห และการกระเจิง เป็นต้น จึงทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับค่าพิกัดตำแหน่งจริงมากที่สุด ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติ ค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ การประยุกต์เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ส่วนใหญ่ จะใช้กับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้งานแบบไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งมีลักษณะของช่องสัญญาณแบบคงที่ ทำให้ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณอันเนื่องจากการเคลื่อนที่ ส่งผลให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น แต่หากนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ซึ่งในขณะใช้งานจะมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาภายใต้สภาพแวดล้อม ก็จะทำให้ช่องสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่อาจเกิดขึ้นได้

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาแนวคิดของงานวิจัยที่เสนอแนวทางการแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสมจากข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อย โดยใช้การปรับค่าตำแหน่งจากพิกัดอ้างอิง ซึ่งจะช่วยทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงนั้น ก็สามารถสรุปได้ว่า วิธีการปรับปรุงตำแหน่งเพื่อใช้ในการติดตามหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารของงานวิจัยที่นำเสนอนั้น ประสบผลสำเร็จในแง่ของประสิทธิภาพตามผลการทดลองที่ได้อธิบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร โดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ความเฉื่อย (IMU) ร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ (Fingerprint) เพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสมอันเนื่องจากข้อจำกัดของเซ็นเซอร์ความเฉื่อยในตัวอุปกรณ์ที่ให้ค่าที่ไม่ถูกต้องในแต่ละจุดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ ใช้ข้อมูลตำแหน่งจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อย ซึ่งประกอบด้วยมาตรวัดความเร่ง (Accelerometer) และไจโรสโคป (Gyroscope) ที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดของการเคลื่อนที่มาทำการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ตำแหน่งพิกัดอ้างอิงจากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ซึ่งตำแหน่งพิกัดอ้างอิงดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลแผนที่คลื่นความถี่วิทยุ (หรือแผนที่ฟิงเกอร์ปริ้นท์) จากความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (RSS) ในเฟสออฟไลน์ (Offline phase) จากนั้นทำการนำข้อมูลความแรงของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุด ณ. ตัวหุ่นยนต์ขณะที่มีการเคลื่อนที่ในเฟสออนไลน์ (Online phase) มาทำการเปรียบเทียบกับค่ากับแผนที่ฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อทำการสร้างตำแหน่งอ้างอิงสำหรับนำไปใช้ในการปรับค่าความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อยข้างต้น ด้วยอัลกอริทึมที่งานวิจัยได้นำเสนอ

งานวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยกำหนดการทดลองขึ้น 3 วิธี คือ การระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยการจำลอง (Simulation) และการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเฉื่อยมาทำการปรับค่าด้วยเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตามแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ โดยนำผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบและชี้ให้เห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้สามารถช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งให้ผลแตกต่างกันอย่างไร โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error) หรือ MSE ของตำแหน่งเป็นตัวชี้วัด ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า วิธีการติดตามตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุด โดยมีค่า MSE เท่ากับ 690.42 ส่วนวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยการจำลอง (Simulation) จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยมีค่า MSE เท่ากับ 42.19 สำหรับวิธีการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลเซ็นเซอร์ความเฉื่อยร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ของงานวิจัยที่นำเสนอ ให้ค่าความคลาดเคลื่อน โดยมีค่า MSE เท่ากับ 197.67 ซึ่งให้ค่าตำแหน่งที่ดีกว่าวิธีการแรกซึ่งใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองสามารถพิสูจน์ให้เห็นว่า วิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคารของงานวิจัยที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการระบุตำแหน่งโดยเซ็นเซอร์ความเฉื่อยเพียงอย่างเดียว โดยสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสะสมที่เกิดขึ้นและให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่า ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานและแนวคิดของงานวิจัยที่นำเสนอ อย่างไรก็ตาม วิธีการติดตามตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ของงานวิจัยที่นำเสนออาจมีประสิทธิภาพที่ด้อยกว่าเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองไม่ได้พิจารณาผลจากสภาพแวดล้อมและคุณลักษณะของช่องสัญญาณคลื่นวิทยุในขณะเคลื่อนที่ จึงทำให้ค่าตำแหน่งที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับค่าพิกัดตำแหน่งจริงมากที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวอาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์

5.1 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยได้พบปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน โดยผู้วิจัยได้แก้ไขปัญหาด้วยแนวทางดังนี้

- อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อย (IMU) ที่ใช้ให้ค่าออกมาเป็นแบบดิจิตอล ต้องทำการปรับค่าด้วยค่าเฉพาะตัว (Scalar factor) ของแต่ละเซ็นเซอร์ ซึ่งควรมีการเทียบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดจริง เพื่อเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ โดยในงานวิจัยนี้ทำการหาค่าโดยเทียบกับเอกสารอ้างอิงของอุปกรณ์เซ็นเซอร์และทำการเปรียบเทียบกับมาตรวัดเบื้องต้น

- การเชื่อมต่อเพื่อส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล ทำการเชื่อมต่อด้วยสาย USB ซึ่งสามารถใช้งานได้แต่มีข้อจำกัดเรื่องระยะทาง อาจทำการเชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย เพื่อเพิ่มความคล่องตัวในการทดลอง ซึ่งควรคำนึงถึงสัญญาณรบกวนของข้อมูลด้วย

- สภาพแวดล้อมในการทดลองกำหนดพื้นที่ที่มีขนาดจำกัด เนื่องจากความยาวของสาย USB และหุ่นยนต์เคลื่อนที่จำลองที่ใช้ ทำให้มีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ที่อาจจะไม่คงที่ ซึ่งทำให้ค่าข้อมูลที่แซมปลิ้ง (Sampling) ได้ในแต่ละเวลา มีค่าไม่ต่อเนื่องและไม่ตรง (Synchronous) กับข้อมูลจากการจำลอง โดยผู้วิจัยได้แก้ปัญหาโดยใช้การจับภาพ (Capture) วีดีโอ (Video) ที่บันทึกไว้ในขณะทำการทดลอง และนำค่าเวลาและตำแหน่งจากภาพที่บันทึกในแต่ละจุดของการเคลื่อนที่มาใช้อ้างอิงกับข้อมูลที่ได้จากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ด้วยการจำลองดังกล่าว จึงทำให้ได้ฐานเวลาและตำแหน่งที่ตรงกัน

- ข้อจำกัดของพื้นที่และขนาดของตัวหุ่นยนต์จำลอง ทำให้ไม่สามารถติดตั้งการ์ดเครือข่ายไร้สายและใช้แอคเซสพอยท์ในการเก็บข้อมูลได้จริง ผู้วิจัยจึงได้แปลงข้อมูลสภาพแวดล้อมเข้ามาทำการทดลองด้วยการจำลอง (Simulation) บนเครื่องคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

- พิจารณาผลจากสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อ RSS ในเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ โดยพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจากเทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ที่ได้ว่าแตกต่างจากการจำลองอย่างไร

- เพิ่มจำนวนกริด (Grid) ของตำแหน่งอ้างอิงบนแผนที่ฟิงเกอร์ปริ้นท์ เพื่อเปรียบเทียบผลความถูกต้องของพิกัดตำแหน่งที่ได้จากวิธีการติดตามตำแหน่งของงานวิจัยที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Liu H., Darabi H., Banerjee P., Liu J, "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems", Man, and Cybernetics, IEEE Transactions on, vol.37, no.6, Nov. 2007

[2] Kaemarungsi K., Krishnamurthy P., "Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting", INFOCOM 2004. 23th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol.2, p. 1012- 1022, 7-11 March 2004

[3] Paul D. Groves, 2008, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems , Artech-House, Boston, Mass, USA

[4] 9 Degrees of Freedom Razor IMU, 25 May 2014, http://www.sparkfun.com/products/10736

[5] Taheri A., Singh A., Agu E., "Location fingerprinting on infrastructure 802.11 wireless local area networks (WLANs) using Locus", Fourth International IEEE Workshop on Wireless Local Networks, Nov 2004

[6] Bahl P. and Padmanabhan V.N. "in-building RF-based user location and tracking system" Proceedings of the IEEE 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000), pp.775-784.

[7] Li B., Salter J., Dempster A.G. and Rizos C. (2006) "Indoor positioning techniques based on wireless LAN" Proceedings of 1st IEEE International Conference on Wireless Broadband & Ultra Wideband, 2006

[8] Pechac P. and Klepal M. "Effective Indoor Propagation Prediction". Proceedings of 54th IEEE Vehicular Technology Conference VTC, Atlantic City, 2001, pp.1-4.

[9] John C. and Stein. K, Indoor Radio WLAN Performance Part II: Range Performance in a Dense Office Environment Harris Semiconductor, 2401 Palm Bay, Florida 32905, 2007

[10] Chin-Woo Tan, Sungsu Park, Kirill Mostov and Pravin Varaiya. "Design of gyroscope-free navigation systems" IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, August 2001.

[11] Bryson M.T. & Sukkarieh S., "Vehicle Model Aided Inertial Navigation for a UAV using Low-cost Sensors" Australasian Conference on Robotics and Automation, December 2004.

[12] David S.C, John N. and Peter H. "Smoothing for ZUPT-aided INSs", International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, November 2012.

[13] Kodippili, N.S., Dias, D. "Integration of Fingerprinting and Trilateration Techniques for Improved Indoor Localization" 7th International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Olarn Wongwirat and Chutchai Chaiyarat, "A Position Tracking Experiment of Mobile Robot with Inertial Measurement Unit (IMU)" International Conference on Control, Automation and Systems 2010, pp. 304-308

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Conference on Control, Automation and Systems 2010
Oct. 27-30, 2010 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea

A Position Tracking Experiment of Mobile Robot with Inertial Measurement Unit (IMU)

Olarn Wongwirat and Chutchai Chaiyarat

Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
(Tel : +662-723-4900; E-mail: olarn@it.kmitl.ac.th, s2660736@kmitl.ac.th)

Abstract: Currently, a position tracking of mobile robot becomes increasingly important. It can be not only used to track the moving path of mobile robot for searching and identifying its current position, but also to support the operation control of mobile robot remotely. The challenge in position tracking of mobile robot is to find its location related to environment. There are several tracking techniques using x, y coordinate and heading direction to locate the position in global coordinate system. However, these techniques lack the position information in z dimension. This paper proposes the method to track the position of mobile robot by using the Inertial Measurement Unit (IMU) that can provide the x, y and z coordination. The experiments were set in this work to verify the results of IMU signal while tracking the position of mobile robot. The results express some limitation characteristics of low-cost IMU sensor to provide accurate information. Therefore, some methodology is required to improve the accuracy of tracking position as suggested in the future work.

Keywords: Localization, position tracking, mobile robot, inertial measurement unit (IMU)

1. INTRODUCTION

Localization of mobile robot is a method to identify the robot position while moving or changing its location in the environment. The method can track the moving path of mobile robot by verifying the changed position over time. There are several methods to determine the position and velocity of mobile robot with respect to a known reference in navigation computing. The common reference used is the Earth coordinate frame.

Recently, various approaches in position estimation of mobile robot have been developed. They could provide different results depending on the environment. For instance, a wheel encoder has been used widely for tracking the position of mobile robot, but the wheel slip or uneven surface causes poor estimation in case of wheel revolution [1]. The localization based on Sonar, or GPS signal, typically requires mobile robot capability to receive signal in the environments, which is its restriction [2]. The use of inertial sensor to provide acceleration and heading for position and orientation estimation is another good method that can be applicable to mobile robot arena. The method can be found in various applications, e.g., aircraft, ship, automobiles, game consoles and virtual reality applications. Basically, the method estimates the position based on a know starting-point.

There were research works based on inertial navigation with gyroscopes and accelerators employed to estimate the position of robot in general. In [3], Barshan and Durrant Whyte used twice acceleration integration for estimating the position and integrated the angular velocity for determining the moving direction of mobile robot body. However, the integration of signals received from the inertial sensor with noise, results in error accumulation over time, e.g., increased drift and bias of signal. It causes the mobile robot to have the accurate position in a short period of time.

This paper proposes the initiative work that employs the inertial sensor for tracking the position of mobile robot. The aim of this work is to verify a possibility in applying the inertial sensor with its noise restriction to estimate the tracking position of mobile robot. The IMU (Inertial Measurement Unit) is used as the sensor in this work. It is a low-cost and small size sensor suitable to attach to the body of mobile robot. The IMU comprises three orthogonal accelerometers and three gyroscopes aligned on the three axes to estimate the position, velocity, and attitude with respect to the environment.

The paper is organized as follows: Section 2 describes a background of tracking methodology. The experimental set to determine the tracking result of mobile robot is exposed in section 3, including its analysis and discussion. Section 4 provides the conclusion.

2. TRACKING METHODOLOGY

This section describes the background of tracking methodology used in this work. It includes the IMU sensor deployed to the mobile robot, the methods used to calculate the acceleration and the angular rate, and the model used for navigation.

978-89-93215-02-1 98560/10/$15 ©ICROS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Inertial measurement unit (IMU)

In this work, the IMU sensor from Sparkfun Electronics [4], which is the 6-DOF (degree of freedom) IMU version 2.0, is used for the experiment, as shown in Fig. 1. It composes of three axes accelerometers using the MMA7260Q chip from Freescale and three gyroscopes using the ADXRS300 chip with ±300 degree/second from Analog. Thus, it could provide acceleration measurements in three dimensions and angular rate about the three axes, respectively. The IMU sensor will be attached on the body of mobile robot to measure the acceleration and angular rate. The output signals from IMU sensor are converted by 10-bit A/D (Analog to Digital converter) into a raw value and transferred via the Bluetooth.

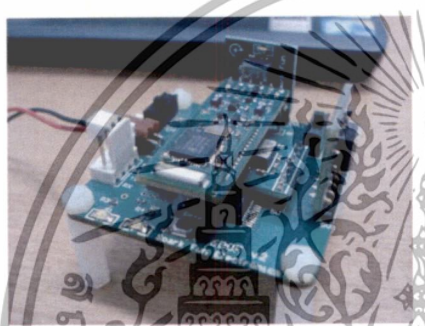


Fig. 1 Sparkfun 6-DOF IMU ver. 2.0

2.2 Instantaneous acceleration

The constant acceleration is a mean rate of velocity changed in a short time interval. The changed of velocity can be derived from the time integral of acceleration a, as in (1).

$$v_2 - v_1 = \int_{v_1}^{v_2} dv = \int_{t_1}^{t_2} a\,dt \qquad (1)$$

The total displacement position Δx during the small time interval is given by (2). It can be described by the change of position x as the time integral of velocity.

$$x_2 - x_1 = \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{t_1}^{t_2} v\,dt \qquad (2)$$

The velocity and position can be calculated from the initial time at $t_1 = 0$ to t_2. If x_0 and v_0 are the initial position and velocity at $t = 0$ respectively, the velocity and position can be combined as in (3).

$$\begin{aligned} v &= v_0 + \int_0^t a\,dt = v_0 + at \\ x &= x_0 + \int_0^t v\,dt = x_0 + v_0\int_0^t dt + a\int_0^t t\,dt \\ x &= x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \end{aligned} \qquad (3)$$

2.3 Coordinate transformation

The coordinate transformation is used to transform acceleration vectors from the body of mobile robot frame down to the navigation frame [5]. By this transformation, the rotation of sensors on each axis can be tracked. The coordination rotation matrix related to the accelerations in the navigation frame can be built by the three-rotation matrix using Euler angles (roll, pitch and yaw). In three-dimension space rotation, the coordinate transformation matrix C about the x, y, and z axes can be achieved by using the rotation matrix, as in (4).

$$C = R_x R_y R_z \qquad (4)$$

where R is the rotation matrix on each axis. It can be expressed in term of DCM (Direction cosine matrix) by using equation (5).

$$C_b^n = \begin{pmatrix} \theta\psi_c & -\phi\psi_c + \phi\theta s_\psi & \phi s_\psi + \phi\theta s_\psi \\ \theta s_\psi & \phi\psi_c + \phi\theta s_\psi & -\phi s_\psi + \phi\theta s_\psi \\ -\theta_s & \phi\theta & \phi\theta \end{pmatrix} \qquad (5)$$

The 's' and 'c' subscript notations in (5) refer to sine and cosine, respectively. The ϕ, θ, and ψ notations are the roll, pitch, and yaw angles that describe the relative orientation of two coordinate frames, as well. Typically, to avoid duplicate sets of Euler angles representing the same attitude, the pitch angle θ is limited to the range of $-90 \le \theta \le 90$ degrees.

The IMU sensor measures specific force along the body frame axes. However, to apply in the velocity integration of navigation equations, it must be resolved about the same axes as the velocity. The axes are transformed by applying the coordinate transformation matrix as in (6).

$$f_b^n(t) = C_b^n(t)\, f_b^b(t) \qquad (6)$$

The $f_b^n(t)$ in (6) is the acceleration in navigation frame, and the $f_b^b(t)$ is measured by the accelerometer of mobile robot body. To update the orientation of mobile robot, the C_b^n matrix in (7) rotates vectors from the body frame to the navigation frame. It can be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

obtained by using a cross product of skew matrix $[\omega_{nb}]$ that obtains from angular rates in (8). This derivation is used as a small angle approximation to lower its computation.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n [\omega_{nb}] \tag{7}$$

$$[\omega_{nb}] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

The ω_x, ω_y, and ω_z are the approximated angular rates measured by the gyroscope, where the earth rotation velocity was neglected.

2.4 Inertial navigation system (INS)

The experiment being considered in this paper is a dead reckoning solution, based on the measurement of inertial acceleration. It is also known as the INS (Inertial Navigation System). The INS technique uses the IMU that consists of accelerometer and gyroscope to estimate the attitude, velocity, and position. The INS comprises four steps, i.e., attitude update, transformation of specific-force resolving axes, and velocity and position updates. A brief summary of navigation equations used in the system can be expressed by using a block diagram of INS [6], as shown in Fig. 2. As in the figure, the attitude is updated by integrating the angular rate measurement. The velocity is updated by integrating the acceleration, and the position is updated by integrating the velocity. The suffixes (-) and (+) are applied to the values at the beginning and at the end of processing cycle of navigation equations, respectively.

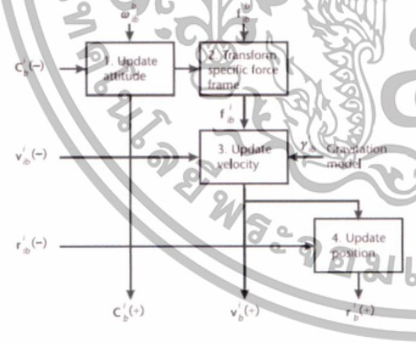


Fig. 2 Diagram of Inertial Navigation System [6].

3. EXPERIMENT AND RESULT ANALYSIS

The experiments were set to estimate the position of mobile robot with the IMU sensor. The mobile robot used in the experiment was the prototype of ET (Embedded Technology) rescue robot obtained in the laboratory [7]. The IMU mounted onto the mobile robot was aligned with the x, y and z axes, respectively. The mobile robot was being moved along the square path with turning angles of around 90 degree. The measurement data from the IMU was transferred to a PC (Personal Computer) via Bluetooth for data logging. Then, it was post processed by converting and reformatting before being processed to get the angular rate and acceleration at the PC. By acquiring the tracking mechanism as described in section 2, the MATLAB was employed to find and to analysis the results. Fig. 3 expresses the experimental environment of mobile robot in this work.

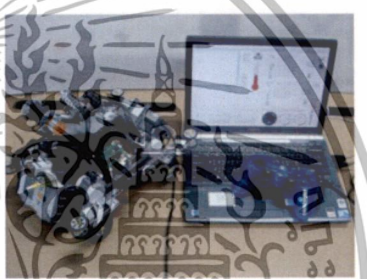


Fig. 3 The IMU sensor installed on the mobile robot.

The acceleration measurement from IMU sensors attached on the mobile robot was scaled by a standard gravitational constant (g). The received data from IMU contained much noise and some bias. Thus, the low-pass filter from MATLAB toolbox was applied. This process ensured that the data was suitable for the navigation equations. The results of acceleration measurement are shown in Fig. 4.

To measure the angular rate from gyroscopes around the coordinate axes of sensors, the low-pass filter was applied in similar fashion as the acceleration data. It resulted from not only the limitation performance of inside commercial gyroscopes that the measured data included much noise, but also the gyro drift affected the angle error that was varied in time. The plotting results of angular rate of the mobile robot in coordinate system are expressed in Fig. 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Another factor affecting the results might come from the adjustment of angular rate data by the scaling factor before being processed. If the calibration of scaling factor was not precise enough, it caused some errors in navigation algorithm. In addition, the gyroscope bias might be required to compensate the error, based on its correlation with the internal temperature.

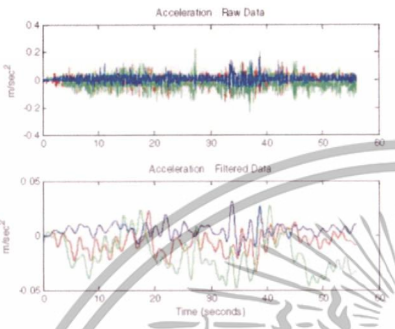


Fig. 4 Raw acceleration data (top) and filtered data (bottom).

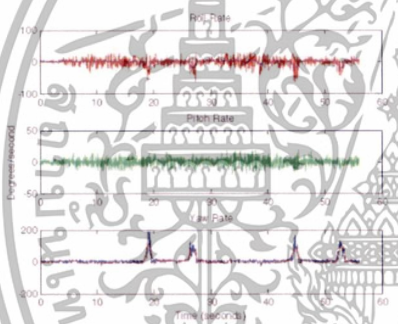


Fig. 5 Raw data and filter data of angular rate from the IMU sensor.

Fig. 6 shows the results of Euler angles estimated by the DCM approach, and Fig. 7 depicts the results of estimated velocity on each axis. The experimental results did not use any compensation to the measurement data, as the intention to observe the behavior of IMU sensor. As the consequence, the errors were increased unbound. Fig 8 shows the plots of estimated position on each axis. As can be observed, due to the accumulated error results from previous estimations, the position errors are increased rapidly.

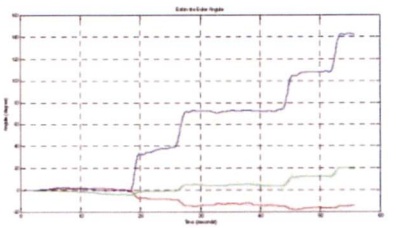


Fig. 6 The estimated roll, pitch, and yaw by the DCM.

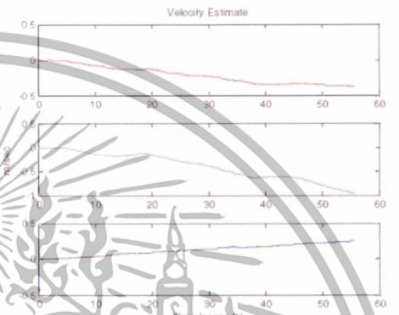


Fig. 7 The estimated velocity on x, y, z axes.

Fig. 8 The estimated position on x, y, z axes.

Fig 9 expresses the plot of estimated tracking path of mobile robot deriving from the experiment. The plotting result reflects the robot movement along the square path with turning angles of around 90 degree, as in the experiment. As can be seen, the moving path is not straight on each direction along the square path as it should. It results from the accumulated errors as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mentioned. The error is increased along the moving path as robot movement. Thus, it is not applicable to track the robot position precisely as expected.

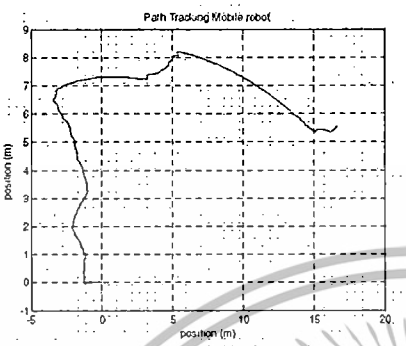


Fig. 9 The estimated tracking path of mobile robot.

4. CONCLUSIONS

This paper described the experiment to verify the characteristics and feasibility of IMU sensor applied to the position tracking mechanism of mobile robot. The coordination transform using DCM and the INS were employed to estimate the tracking position by using MATLAB. The results of experiment expressed that applying the IMU to track the mobile robot position directly yielded inaccurate outcomes in terms of position and attitude estimation errors. The errors might be resulted from some parameters that were neglected during data processing, e.g., earth parameter, sensor bias, noise, and temperature compensation scaling factor. We are currently working to overcome the errors by investigating the appropriate methods, e.g., deploying our implemented Kalman filter to estimate some of the random errors, using the Zero velocity update (ZUPT) for ideal stopping the mobile robot time to time, and applying a realistic method to model the navigation characteristics. They will be reported in our future work.

REFERENCES

[1] J. Yi, J. Zhang, D. Song, and S. Jayasuriya, "IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots", *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Nov 2007, pp. 2845-2850.

[2] M. A. Zmuda, A. Elesev, and Y. Morton, "Robot localization using RF and inertial sensors", *Proceedings of the Aerospace and Electronics Conference*, Jul 2008, pp. 343-348.

[3] B. Barshan and H. F. Durrant Whyte, "An inertial navigation for a mobile robot", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 3, pp. 328-342, 1995.

[4] Spark Fun Electronics, IMU 6-DOF v2, Inertial sensor, http://www.robotshop.com/PDF/sparkfun-6dof-v21-inertia-unit-manual.pdf, access on Oct 2010.

[5] N. Phuong, H. Kang, Y. Suh, and Y. Ro, "A DCM base orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass", *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 859-876, 2009.

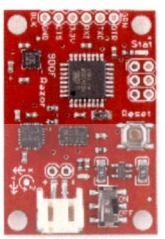
[6] P. D. Groves, "*Principle of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation System*", Artech House, Boston, London, 2008.

[7] O. Wongwirat, S. Paelaong, and S. Homchoo, "ET rescue robot," *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Sep 2009, p. 226.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

2. อุปกรณ์ตรวจวัดความเฉื่อยที่ใช้ในงานวิจัย



) images are CC BY-NC-SA 3.0

9 Degrees of Freedom - Razor IMU

SEN-10736 RoHS✔

SHARE

Description: The 9DOF Razor IMU incorporates three sensors - an ITG-3200 (MEMS triple-axis gyro), ADXL345 (triple-axis accelerometer), and HMC5883L (triple-axis magnetometer) - to give you nine degrees of inertial measurement. The outputs of all sensors are processed by an on-board ATmega328 and output over a serial interface. This enables the 9DOF Razor to be used as a very powerful control mechanism for UAVs, autonomous vehicles and image stabilization systems.

The board comes programmed with the 8MHz Arduino bootloader (stk500v1) and some example firmware that demos the outputs of all the sensors. Simply connect to the serial TX and RX pins with a 3.3V FTDI Basic Breakout, open a terminal program to 57600bps and a menu will guide you through testing the sensors. You can use the Arduino IDE to program your code onto the 9DOF, just select the 'Arduino Pro or Pro Mini (3.3v, 8mhz) w/ATmega328' as your board.

The 9DOF operates at 3.3VDC, any power supplied to the white JST connector will be regulated down to this operating voltage - our LiPo batteries are an excellent power supply choice. The output header is designed to mate with our 3.3V FTDI Basic Breakout board, so you can easily connect the board to a computer's USB port. Or, for a wireless solution, it can be connected to the Bluetooth Mate or an XBee Explorer.

Having a hard time picking an IMU? Our Accelerometer, Gyro, and IMU Buying Guide might help!

Note: This product is a collaboration with Jordi Munoz of 3d Robotics. A portion of each sales goes back to them for product support and continued development.

Features:

- 9 Degrees of Freedom on a single, flat board:
  - ITG-3200 - triple-axis digital-output gyroscope
  - ADXL345 - 13-bit resolution, ±16g, triple-axis accelerometer
  - HMC5883L - triple-axis, digital magnetometer
- Outputs of all sensors processed by on-board ATmega328 and sent out via a serial stream
- Autorun feature and help menu integrated into the example firmware
- Output pins match up with FTDI Basic Breakout, Bluetooth Mate, XBee Explorer
- 3.5-16VDC input
- ON-OFF control switch and reset switch

Dimensions: 1.1" x 1.6" (28 x 41mm)

Documents:

- Schematic
- Eagle Files
- Datasheet (ITG-3200)
- Datasheet (ADXL345)
- Datasheet (HMC5883L)
- Python Graphic interface
- AHRS Code
- AHRS/Head-tracker Tutorial (Thanks Peter!)
- GitHub

Replaces: SEN-10125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์แผงวงจรควบคุมฟายโอ (FiO controller board) ที่ใช้ในงานวิจัย

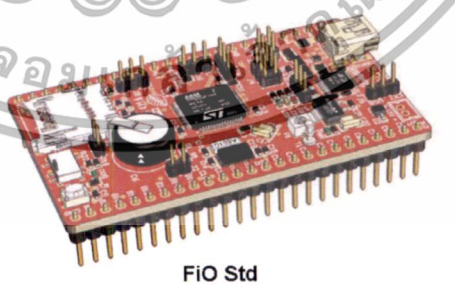
FiO Std Datasheet

FEATURES

- Built-in RapidSTM32 native-support bootloader.
- ARM 32-bits Cortex™ – M3 Processor (STM32F103RET6)
  - 90MIPS maximum speed
  - 64 KBytes SRAM
  - 51 GPIO
  - 16 channels 12-bit, 1µs ADC
  - 5 USART, 3 SPI, 2 I²C, 1 CAN
  - On-chip temperature sensor
  - 4 General purpose 16-bits timers with 4 IC/OC/PWM per timer
  - 2 16-bits Advanced control timers
  - 2 Watchdog timer
  - 2 channels 12-bit DAC
  - USB 2.0 full speed interface
- Two onboard crystals
  - 32 kHz (for real-time clock)
  - 8 MHz (for MCU clock)
- Power supply management
  - Reverse supply voltage protection
  - USB or External (up to 15VDC) supply input selection via jumper settings
  - 3.3V (up to 800mA) LDO regulator for internal and external circuitries
- Flash programming
  - 496K bytes available flash memory
  - In-Application Programming via either USB HID or serial (RS232) interfaces directly from Matlab™ or MS Windows™.
  - Automatic compile and download directly from Matlab™.
- Other onboard peripherals
  - 3 user LED (red, yellow, green)
  - 2 user logic (H/L) input jumpers
  - 10K potentiometer
  - High capacitance (0.33F) capacitor as RTC backup battery
  - RS232 (3232-series) level converter
  - Micro SD card socket
- Four built-in operating modes selectable via jumper settings
  - USB Mass Storage Device (micro SD card reader)
  - In-application programming via USB HID interface
  - In-application programming via serial (RS232/USART) interface
  - Stand-alone custom user application
- RoSH compliant

SAMPLE APPLICATIONS

- Affordable Rapid Prototyping training tools (especially for Automatic Control and Digital Signal Processing studies) when used together with RapidSTM32 blockset, example features include:
  - Support C code generation of a custom user program for STM32 from a Simulink™ model (see minimum requirements).
  - Support various Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation configurations, e.g. data acquisition in to, signal generation from Matlab™/Simulink™, and closed-loop control HIL simulation design and analysis.
- Create a data logger to micro SD card (FAT32) program directly from a Simulink model.
- Use in a laboratory as embedded system training kits or in-the-field for any student projects.
- Generic microcontroller evaluation board.



FiO Std

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายฉัตรชัย ไชยรัตน์
วันเกิด	12 ธันวาคม 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดนครพนม
การศึกษาระดับประถมศึกษา	โรงเรียนอนุบาลนครพนม
การศึกษาระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย
การศึกษาระดับอุดมศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	บริษัท ไทย-เอ็มซี จำกัด
	(พ.ศ. 2543-ปัจจุบัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้