

การระบุตำแหน่งและนำทางรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี  
อัลตราไวต์แบนด์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2567

# ULTRA WIDEBAND POSITIONING FOR AUTOMATED TRUCK



PAIROJ WAIWANIJCHAKIJ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Doctor of Philosophy in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2024

การระบุตำแหน่งและนำทางรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี  
อัลตราไวต์แบนด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสเภา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สำราญ สันทาลุนย์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ชนเสฏฐ์ ทศติกรพัฒน์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์)

กรรมการ

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ไฟโรจน์ ไวรานิชกิจ: การระบุตำแหน่งและนำทางรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (ULTRA WIDEBAND POSITIONING FOR AUTOMATED TRUCK)  
อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 95 หน้า

คำสำคัญ: เทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (UWB)/ยานพาหนะอัตโนมัติ/เทคโนโลยีการระบุตำแหน่ง/ระบบนำทาง/ระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรม

เทคโนโลยียานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าและยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ เป็นนวัตกรรมที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปัญหาด้านพลังงานน้ำมันและความต้องการใช้พลังงานสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของผู้บริโภค โดยเฉพาะการนำเทคโนโลยียานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมขนส่งและโลจิสติกส์ กำลังได้รับความสนใจและเกิดการวิจัยและพัฒนาการรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและเพิ่มความปลอดภัยด้านงานขนส่ง และลดต้นทุนในระยะยาวสำหรับภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและสร้างเครื่องต้นแบบระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีอัลตราไวด์แบนด์ (Ultra Wideband) สำหรับใช้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งเป็นอีกเทคนิคสำหรับการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง ด้วยการสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ติดตั้งระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และทำการเก็บข้อมูล วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่ง และการนำแบบจำลองที่คำนวณได้มาวิเคราะห์การเพิ่มความเที่ยงตรงของการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี LIDAR และการวิเคราะห์จากภาพ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์การเพิ่มความเที่ยงตรงในการระบุตำแหน่งและขับเคลื่อนยานยนต์พาหนะในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำให้ได้นวัตกรรมที่ช่วยลดภาระให้พนักงานขับรถและสามารถรับหน้าที่ในการวิ่งงานซ้ำ ๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดพัก ช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถขับเคลื่อนธุรกิจและแข่งขันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา   
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

PAIROJ WAIWANIJCHAKIJ: ULTRA WIDEBAND POSITIONING FOR AUTOMATED TRUCK



THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHANCHAI THONGSOPA Ph.D., 95 PP.

Keyword: ULTRA-WIDEBAND (UWB) TECHNOLOGY/AUTONOMOUS VEHICLES/POSITIONING TECHNOLOGY/NAVIGATION SYSTEMS/INDUSTRIAL AUTOMATION

Electric vehicle technology and autonomous vehicles are innovations that are receiving significant attention, partly due to issues related to oil energy and the demand for environmentally friendly clean energy by consumers. Especially the application of autonomous vehicle technology in the transportation and logistics industry is attracting interest, leading to research and development of autonomous trucks to improve efficiency, enhance transportation safety, and continuously reduce long-term costs for the industry. This research aims to study and create a prototype of a positioning system using Ultra Wideband technology for autonomous trucks. This technique provides high efficiency and accuracy in positioning. By creating an autonomous truck equipped with a positioning system using LIDAR technology combined with image analysis, data is collected and analyzed to evaluate the performance of the positioning system. The resulting models are used to analyze the accuracy enhancement of the positioning using LIDAR technology and image analysis. This information is vital for improving positioning accuracy and vehicle navigation in the industrial sector. This research will lead to innovations that reduce the burden on drivers, enabling them to perform repetitive tasks without needing breaks, thus allowing operators to drive their businesses efficiently and competitively.

School of Electronic Engineering  
Academic Year 2024

Student's Signature.....  
Advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ทั้งภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยเฉพาะอย่างยิ่งรองศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเป็นเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิริพัฒน์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำราญ สันทาลุนย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชา วิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการ และให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณ บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด ที่ให้ใช้พื้นที่ปฏิบัติงานภายในโรงงานของบริษัท ณ อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง ให้เป็นที่ปฏิบัติงานจริงของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่สร้างขึ้น ในโครงการนี้ และให้ทำการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband ตามขอบเขตของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมืออุปกรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา บุตร ภรรยา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัย ที่ให้กำลังใจโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา ประโยชน์ใด ๆ ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดา บุตรภรรยา รวมถึงญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบัน จนสำเร็จการศึกษาด้วยดี

ไพโรจน์ ไววานิชกิจ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 บทนำ.....	7
2.2 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่ง.....	7
2.2.1 เทคโนโลยี Ultra Wideband.....	7
2.2.2 เทคโนโลยี Global Positioning System.....	8
2.2.3 เทคโนโลยี Light Detection and Ranging.....	8
2.2.4 เทคโนโลยีการวิเคราะห์จากภาพ.....	9
2.3 หลักการทำงานของเทคโนโลยีระบุตำแหน่ง Ultra Wideband.....	12
2.3.1 การมอดูเลตสัญญาณของเทคโนโลยี Ultra Wideband.....	12
2.3.2 อัลกอริทึมในการระบุตำแหน่งของเทคโนโลยี Ultra Wideband.....	13
2.3.2.1 อัลกอริทึม Angle of Arrival (AOA).....	13
2.3.2.2 อัลกอริทึม Time of Arrival (TOA).....	13
2.3.2.3 อัลกอริทึม Time Different of Arrival (TDOA).....	14
2.3.2.4 อัลกอริทึม Received Signal Strength (RSS).....	14
2.3.2.5 อัลกอริทึมแบบผสมผสาน (Hybrid-Based).....	15

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3 จุดแข็งและจุดอ่อนของเทคโนโลยี Ultra Wideband.....	15
2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า .....	16
2.3.4.1 อุปกรณ์ Ultra Wideband Gateway .....	16
2.3.4.2 อุปกรณ์ Ultra Wideband Tag .....	18
2.3.4.3 เครือข่ายการสื่อสารและการสื่อสารในระบบระบุตำแหน่ง Ultra Wideband.....	19
2.3.5 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายระบบสื่อสารแบบ Ultra Wideband.....	21
2.4 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.4.1 หลักการประมวลผลภาพ.....	22
2.4.1.1 หลักการมองเห็นของมนุษย์กับการประมวลผลภาพดิจิทัล.....	22
2.4.1.2 ขั้นตอนการประมวลผลภาพดิจิทัล.....	22
2.4.1.3 การแปลงภาพดิจิทัล .....	23
2.4.1.4 ลักษณะของแฟ้มการเก็บภาพให้อยู่ในระบบข้อมูลแบบดิจิทัล.....	24
2.4.1.5 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลภาพ.....	25
2.4.1.6 วิธีการกรองแบบ Unsharp Filter .....	25
2.4.1.7 วิธีการแปลงภาพให้เป็นภาพไบนารี.....	25
2.4.1.8 การหาขอบภาพ.....	26
2.4.2 หลักการประมวลผลภาพ.....	28
2.4.2.1 เทคโนโลยี LIDAR สำหรับสร้างแผนที่การสร้างแผนที่ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยี LIDAR.....	28
2.4.2.2 การสร้างแผนที่ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยี LIDAR.....	28
3 การออกแบบระบบเครือข่ายระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband.....	29
3.1 กล่าวนำ.....	29
3.2 การออกแบบและสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ.....	29
3.3 การเตรียมการทดลอง .....	38
3.4 วิธีทดลอง.....	45
3.5 สรุป .....	46
4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 กล่าวนำ .....	47
4.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่ง.....	47
4.2.1 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร.....	47
4.2.2 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร.....	48
4.2.3 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 2.0 เมตร.....	49



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร.....	51
4.2.5 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 10.0 เมตร.....	52
4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งใน สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน .....	53
4.4 ผลการเปรียบเทียบความถี่วิทยุที่ใช้ในการส่งสัญญาณ UWB.....	56
4.5 สรุปและอภิปรายผล .....	57
<b>5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>58</b>
5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	58
5.2 แนวทางพัฒนาในอนาคต .....	58
เอกสารอ้างอิง .....	60
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	67
ภาคผนวก ข รายละเอียดทางเทคนิค.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งวิธีต่าง ๆ..... 11
4.1	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร..... 48
4.2	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร..... 49
4.3	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 2.0 เมตร..... 50
4.4	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร..... 52
4.5	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 10.0 เมตร..... 53
4.6	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี..... 53
4.7	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี..... 54
4.8	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี..... 54
4.9	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี..... 55
4.10	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 10.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี..... 55
4.11	เปรียบเทียบค่า SNR ที่อุปกรณ์เครื่องรับ UWB ที่ติดตั้งบนรถบรรทุก ขับเคลื่อนอัตโนมัติอ่านค่าได้ที่ระยะห่างจากอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ส่งออกมา โดยใช้อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล 6.8 เมกะบิตต่อวินาที และอ่านค่า ที่ระยะห่าง 80 เมตร..... 57

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไร้คนขับบนท้องถนน (ที่มา Business Insider) ..... 3
2.1	เปรียบเทียบรูปแบบการใช้งานกับระดับความแม่นยำของเทคโนโลยี ระบุตำแหน่งประเภท ต่าง ๆ..... 10
2.2	การระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี ToA ..... 14
2.3	อุปกรณ์เกตเวย์และระบบสายอากาศของระบบระบุตำแหน่ง Ultra Wideband..... 17
2.4	อุปกรณ์ Tag แสดงอุปกรณ์หุ้มห่อ และรูปร่างของ Tag กับโครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์.... 18
2.5	อุปกรณ์ Tag แบบที่ติดตั้งกับหมวกวิศวกรสำหรับใช้บอกพิกัดภายในโรงงาน..... 19
2.6	อุปกรณ์เกตเวย์หลัก ทำหน้าที่เป็นโหนดสำหรับติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์เกตเวย์อื่น ๆ..... 20
2.7	ตัวอย่างสถาปัตยกรรมของเครือข่ายระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband ..... 21
2.8	อุปกรณ์พื้นฐานสำหรับระบบประมวลผลภาพ..... 23
2.9	เมตริกซ์ของรูปขนาด 256 x 256 พิกเซล..... 24
2.10	กลไกการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี Unsharp Filter..... 25
2.11	แสดงลักษณะของขอบภาพแบบต่าง ๆ ..... 27
2.12	ขอบภาพชนิดต่าง ๆ ..... 27
2.13	ภาพจำลองสภาพภูมิศาสตร์โดยการใช้อัลกอริทึมประมวลผลข้อมูล ที่ได้จากเซ็นเซอร์ LIDAR ..... 28
3.1	โครงสร้างทางกายภาพของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ..... 30
3.2	แบบร่างของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีการปิดฝาเพื่อใช้สำหรับบรรทุก ภาระ (Loading) ต่าง ๆ..... 31
3.3	รูปแบบของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ติดตั้งกระบะบรรทุก..... 31
3.4	องค์ประกอบทางซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ..... 32
3.5	การเตรียมการและจัดสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ..... 33
3.6	รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติแสดงแผงซังน้ำหนัก และการขนภาระภายในพื้นที่ ของโรงงานบริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด โดยไม่ได้ติดตั้งกระบะ ..... 34
3.7	แสดงเซ็นเซอร์ซึ่งประกอบด้วยกล้องบันทึกภาพจำนวน 12 ตัวและอุปกรณ์ LIDAR 2 ตัว ซึ่งติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งหัวและท้ายของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ..... 35
3.8	แบตเตอรี่ ปั๊มหยุดรถฉุกเฉิน หลอดไฟ LED และลำโพงสำหรับส่งเสียงประกาศที่ ติดตั้งอยู่กับตัวรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ..... 36
3.9	ระบบไฮดรอลิกสำหรับใช้ยกตัวและย่อตัวรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ..... 36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10  กระบะสำหรับบรรทุกภาระ ติดตั้งเข้ากับรถบรรทุกอัตโนมัติโดยการยกตัว และย่อตัวของรถ .....	37
3.11  พื้นที่การปฏิบัติการของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่โรงงาน มิลล์คอน บูรพา จำกัด.....	38
3.12  การติดตั้งโหนด Ultra Wideband จำนวน 4 โหนดในพื้นที่นำร่องที่เป็น สถานที่ปฏิบัติงานจริงที่โรงงาน บริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด.....	39
3.13  รูปร่างของแผงวงจรรุ่น EVB1000 แสดงทั้งด้านหน้าและด้านหลัง .....	40
3.14  แสดงหลอด LED แสดงผล สวิตช์ควบคุมและฟังก์ชันกับจุดเชื่อมต่อใช้งาน ของแผงวงจรรุ่น EVB1000.....	41
3.15  แสดงการเชื่อมต่อภายในแผงวงจร EVB1000.....	42
3.16  อุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ที่ได้รับการสร้างขึ้นจากแผงวงจร EVB1000.....	43
3.17  ตัวอย่างระยะห่างระหว่างโหนด Ultra Wideband ที่โหนดตรวจสอบและคำนวณได้.....	43
3.18  การติดตั้งอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ณ พื้นที่การปฏิบัติการของรถบรรทุก ขับเคลื่อนอัตโนมัติ.....	44
3.19  การทดลองใช้จุด C เป็นจุดอ้างอิงในการระบุตำแหน่ง .....	45
4.1  เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่าง การใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุ ตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 0.5 เมตร.....	48
4.2  เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้ เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวม เทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 1.0 เมตร.....	49
4.3  เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้ เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวม เทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 2.0 เมตร.....	50
4.4  เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้ เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวม เทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 5.0 เมตร.....	51
4.5  เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้ เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวม เทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 10.0 เมตร .....	52

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$B$	=	ภาพไบนารีที่เกิดจากภาพต้นแบบ
$d_0$	=	ระยะทางอ้างอิง
$d$	=	ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับคลื่นวิทยุ
$f_{sharp}$	=	ระดับความคมชัดของภาพ
$f_r$	=	ค่าระดับความสว่าง
$i_{min}$	=	ระดับต่ำสุดของแสงที่มองเห็น
$i_{max}$	=	ระดับสูงสุดของแสงที่มองเห็น
$L_{min}$	=	ระดับความเข้มของแสงต่ำสุด
$L_{max}$	=	ระดับความเข้มของแสงสูงสุด
$n$	=	ค่าเอ็กซ์โปเนนเชียลของการลดทอนจากการแพร่กระจาย
$PL$	=	การลดทอนจากการแพร่กระจายของคลื่นตามระยะทางการแพร่กระจาย
$r_{min}$	=	ระดับต่ำสุดของการสะท้อนแสงจากวัตถุ
$r_{max}$	=	ระดับสูงสุดของการสะท้อนแสงจากวัตถุ
$T$	=	ค่าเทรซโพลต์ของความเข้มแสง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยียานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า และยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ เป็นนวัตกรรมที่กำลังได้รับความสนใจจากทั่วโลก ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากปัญหาด้านพลังงานน้ำมัน และความต้องการใช้พลังงานสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของผู้บริโภค รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า หรือรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Car) หมายถึงรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่สร้างมาจากแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้ารูปแบบอื่น ๆ โดยเทคโนโลยีที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างรถยนต์ไฟฟ้า และรถยนต์ที่ใช้ น้ำมันทั่วไปมีอยู่ 2 ส่วน คือ (1) แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นตัวเก็บพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้า ที่ปัจจุบันใช้แบบ Lithium-Ion ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดเดียวกับที่ใช้ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งยังคงมีราคาสูงอยู่ และต้องได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับการพัฒนาของรถยนต์ไฟฟ้า และ (2) ชิ้นส่วนในระบบส่งกำลัง เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ตัวแปลงกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้ รถยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) รถยนต์ไฮบริดพลังงานไฟฟ้าแบบชาร์จไม่ได้ (Hybrid-electric Vehicles หรือ HEV) เป็นรถยนต์ประเภทที่มีเครื่องยนต์เหมือนกับที่ใช้ในรถยนต์น้ำมันทั่วไป แต่มีขนาดเล็กกว่า และใช้การผสมผสานการสร้างพลังงานจากเครื่องยนต์สันดาป หรือเครื่องยนต์ใช้น้ำมันและการชาร์จกระแสไฟฟ้าในแบตเตอรี่ไฟฟ้า 2) รถยนต์ไฮบริดพลังงานไฟฟ้าแบบชาร์จได้ (Plug-in Hybrid Electric Vehicles หรือ PHEV) เป็นประเภทของรถยนต์ที่ต่างกับ HEV ทั่วไป เพราะมีการใส่มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับชาร์จกระแสไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาทำงานควบคู่ไปกับเครื่องยนต์สันดาป 3) รถยนต์พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่โดยสมบูรณ์ (Battery Electric Vehicles หรือ BEV) เป็นรถยนต์ประเภทที่มีแต่มอเตอร์ไฟฟ้า ไม่มีเครื่องยนต์สันดาปภายใน ตัวมอเตอร์จะชาร์จพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไฟฟ้าและสร้างแรงบิดให้รถยนต์ขับเคลื่อน

ปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้ายังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากยังมีราคาแพงกว่ารถยนต์ที่ใช้น้ำมัน ประกอบกับประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้าเองก็ยังไม่ดีเท่ารถยนต์ที่ใช้น้ำมันทั่วไป แต่ด้วยการลงทุนวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ทำให้เก็บพลังงานได้มากขึ้น ต้นทุนการผลิตลดลง และความตระหนักในเรื่องการลดมลภาวะโดยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผู้บริโภคจึงมีแนวโน้มที่จะหันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous Car หรือ Self-driving Car) หรือรถยนต์ที่สามารถขับเคลื่อนด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยคนควบคุม เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีด้านยานยนต์ที่มีแนวโน้มจะเข้าสู่ตลาดโลกเร็วกว่าที่คาดการณ์ไว้ รถยนต์ขับเคลื่อนด้วยตัวเองอัตโนมัติเป็นการทำงานร่วมกันของเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังนี้ 1) Navigation หรือระบบแผนที่ ซึ่งประกอบด้วยระบบการระบุตำแหน่งของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจากดาวเทียม และระบบแผนที่เสมือนจริงที่เก็บรวบรวมข้อมูลในคลังข้อมูลดิจิทัล ทั้งนี้ข้อมูลที่เก็บคือข้อมูลทุกอย่างที่เกี่ยวข้องกับการวิ่งของรถบนถนน เช่น ตำแหน่งของไฟจราจร ตำแหน่งทางม้าลายป้ายสัญญาณห้ามเลี้ยวขวา ความกว้างของเลนถนน รวมถึงความเร็วสูงสุดที่กฎหมายอนุญาตให้รถวิ่งได้ในถนนแต่ละ

เส้น รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจะใช้ระบบแผนที่ซึ่งประมวลผลร่วมกับระบบ Sensor เพื่อเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำในการตัดสินใจ 2) Computer Vision หรือระบบที่ทำหน้าที่เป็นตาและหูให้กับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเมื่อรถวิ่ง 3) Deep Learning หรือระบบประมวลผลปัญญาประดิษฐ์ ทำหน้าที่เหมือนสมองของรถยนต์ไร้คนขับ เป็นระบบที่ทำให้รถยนต์อัตโนมัติสามารถตัดสินใจได้ด้วยตัวเองจากการประมวลผลข้อมูลที่รับมาจากระบบ Computer Vision และ 4) Robotics หรือระบบที่เชื่อมต่อกับระบบประมวลผลส่วนกลางเข้ากับระบบเครื่องจักรต่าง ๆ ในตัวรถโดยทำหน้าที่เสมือนเส้นประสาทที่เชื่อมต่อสมองของมนุษย์เข้ากับแขนขาและส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย

สมาคมวิศวกรยานยนต์ หรือ Society of Automotive Engineering (SAE) ซึ่งเป็นผู้กำหนดมาตรฐานต่าง ๆ เกี่ยวกับรถยนต์ ได้ทำการแบ่งระดับความเป็นอัตโนมัติในรถยนต์ไร้คนขับ จำแนกตามระดับของการเข้ามามีส่วนยุ่งเกี่ยวของมนุษย์ โดยมีระดับความอัตโนมัติตั้งแต่ระดับ 0 (No Automation) ซึ่งเป็นระดับที่มนุษย์ควบคุมรถยนต์เองทั้งหมด จนถึงระดับ 5 (Full Automation) ซึ่งเป็นรถยนต์ที่สามารถขับเคลื่อนบนท้องถนนได้เองในทุกสภาวะและมีประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนเหมือนมนุษย์ทุกประการ ในปัจจุบัน เทคโนโลยีรถยนต์อัตโนมัติที่ทันสมัยที่สุดของบริษัทที่เป็นผู้นำในด้านเทคโนโลยีส่วนใหญ่อยู่ในระดับ 4 ซึ่งหมายถึงรถยนต์ที่สามารถขับเคลื่อนได้เองในสภาวะที่จำกัด

ระบบอัตโนมัติระดับ 1 บางส่วนของการบังคับเลี้ยวหรือเร่งความเร็วได้เองโดยไม่ต้องอาศัยการแทรกแซงของมนุษย์ แต่ทุกอย่างต้องอยู่ภายใต้การควบคุมของมนุษย์

ระบบอัตโนมัติระดับ 2 เหมือนกับระบบควบคุมความเร็วคงที่แบบล้ำสมัย (Advance Cruise Control) หรือระบบอัตโนมัติแบบดั้งเดิม ที่ติดตั้งในรถยนต์ Tesla บางรุ่น ซึ่งทำให้รถยนต์สามารถดำเนินการด้านความปลอดภัยได้โดยอัตโนมัติ แต่ผู้ขับขี่ต้องคอยระมัดระวังอยู่ที่พวงมาลัยตลอดเวลา

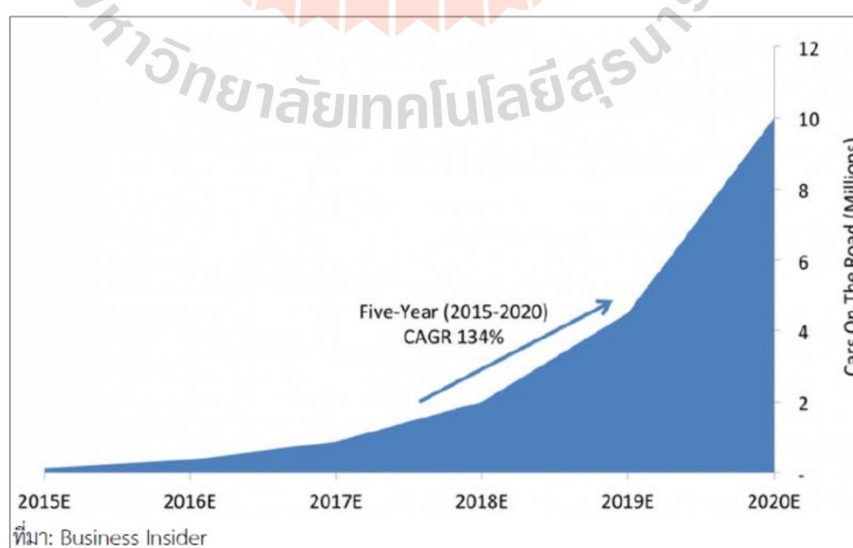
ระบบอัตโนมัติระดับ 3 ยังคงต้องใช้คนขับที่เป็นมนุษย์แต่มนุษย์สามารถใส่ “ฟังก์ชันสำคัญด้านความปลอดภัย” บางอย่างให้กับยานพาหนะได้ ภายใต้สภาพการจราจร หรือสภาพแวดล้อมบางอย่าง สิ่งนี้ก่อให้เกิดอันตรายที่อาจเกิดขึ้น เมื่อมนุษย์สามารถใส่ข้อมูลการขับขี่หลักลงไป หรือไม่กัตัวรถยนต์ได้ใส่เข้าไปเอง นี่อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่บริษัทรถยนต์บางแห่งรวมทั้งฟอร์ด สนใจที่จะกระโดดขึ้นไปทีระดับ 4 โดยตรง

ระบบอัตโนมัติระดับ 4 คือรถยนต์ที่สามารถขับเคลื่อนด้วยตัวเองได้เกือบตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีคนป้อนข้อมูล แต่อาจถูกตั้งโปรแกรมไม่ให้ขับรถในพื้นที่ที่ไม่มีอยู่ในแผนที่การขับขี่หรือในสภาพอากาศที่เลวร้าย เป็นรถที่ผู้ขับขี่สามารถนอนหลับได้ขณะเดินทาง

ระบบอัตโนมัติระดับ 5 หมายถึงระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบในทุกสภาวะ ก่อนที่รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจะสามารถทำงานได้ ระบบคอมพิวเตอร์ที่ทำการควบคุมหรือขับรถแทนมนุษย์จะต้องเลียนแบบการหัดขับรถของมนุษย์ ซึ่งมนุษย์จะต้องตอบคำถาม 4 ข้อนี้ให้ได้จริงจะเริ่มการขับเคลื่อนโดยอัตโนมัติ ข้อ 1 ตำแหน่งปัจจุบัน ก่อนที่รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจะทำงานได้จะต้องทราบว่าคุณอยู่ที่ใดก่อน ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องสร้างแผนที่โดยละเอียดแบบสามมิติขึ้นมาโดยละเอียด เช่น โพรไฟล์ถนน ขอบทาง และทางเท้า เครื่องหมายช่องทางม้าลาย ทางม้าลาย สัญญาณไฟจราจร ป้ายหยุด และคุณลักษณะอื่น ๆ ของถนน เป็นต้น ข้อ 2 รอบ ๆ ข้างตนคืออะไร เช่น เซอร์และซอฟต์แวร์

ของรถยนต์จะต้องสแกนหาวัตถุรอบ ๆ ตัวรถอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นคนเดินเท้า คนขี่จักรยาน ยานพาหนะ งานถนน สิ่งกีดขวางและอ่านการควบคุมการจราจรอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่สี่ของสัญญาณ ไฟจราจร และประตูทางข้ามทางรถไฟไปจนถึงป้ายหยุดชั่วคราว รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจะต้องสามารถมองเห็นได้ไกลในทุกทิศทาง ข้อ 3 จะเกิดอะไรขึ้นต่อไป ซอฟต์แวร์ที่บริหารจัดการรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจะต้องคาดการณ์การเคลื่อนไหวของทุกสิ่งรอบตัว ตามความเร็วและวิถีของรถ พร้อมทั้งเข้าใจด้วยว่ารถยนต์จะเคลื่อนที่แตกต่างจากคนขี่จักรยาน หรือคนเดินเท้า จากนั้นซอฟต์แวร์จะใช้ข้อมูลดังกล่าวเพื่อคาดการณ์เส้นทางที่เป็นไปได้มากที่สุดที่ผู้ใช้รถใช้ถนนคนอื่นอาจใช้ ข้อ 4 จะปฏิบัติกรอย่างไร เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมดแล้ว ซอฟต์แวร์ก็จะประมวลผล กำหนดวิธีการเคลื่อนที่ ความเร็ว เลน การเลี้ยวที่แน่นอน และการเดินทางไปอย่างปลอดภัย

กระทรวงคมนาคมของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดให้รถยนต์หรือยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเองต้องมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมใน 3 ลักษณะด้วยกัน 1) ยานพาหนะกับยานพาหนะ Vehicle to Vehicle (V2V) Interaction ระหว่างรถยนต์หรือยานพาหนะด้วยกันเองต้องสามารถติดต่อกันได้ หรือแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ เช่น ข้อมูลการจราจร ข้อมูลอุบัติเหตุ เพื่อที่จะให้รถยนต์ขับเคลื่อนด้วยตัวเองสามารถที่จะปรับเปลี่ยนเส้นทางหรือหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) ยานพาหนะกับโครงสร้างพื้นฐาน Vehicle to Infrastructure (V2I) รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติต้องสามารถติดต่อหรือมีปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ที่จอดรถอัตโนมัติ ว่าที่จอดรถว่างหรือไม่ เปิดเวลาเท่าไร จอที่จอดได้หรือไม่ มีขนาดและข้อจำกัดอย่างไรบ้าง เป็นต้น 3) ยานพาหนะกับคนเดินเท้า Vehicle to Pedestrian (V2P) การตอบโต้แบบ V2P เป็นการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนของคนเดินถนนกับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยมินนิโซตาให้ทุนสนับสนุนต้นแบบ V2P ที่เรียกว่า Mobile Accessible Pedestrian Signal (MAPS) สำหรับคนเดินถนนที่มีความบกพร่องทางสายตาสามารถใช้ MAPS เพื่อรับ และให้ข้อมูลเกี่ยวกับทางแยก และตำแหน่งของคนเดินเท้า จากนั้นรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยตนเองจะใช้ข้อมูลดังกล่าวนอกเหนือจากที่เซ็นเซอร์ของรถยนต์ และ LIDAR จัดหาให้ เพื่อระบุตำแหน่งคนเดินถนนได้แม่นยำมากยิ่งขึ้นและอาจหลีกเลี่ยงการชนได้



รูปที่ 1.1 แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไร้คนขับบนท้องถนน (ที่มา Business Insider)



รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติมีแนวโน้มเติบโตอย่างรวดเร็วในอนาคต เนื่องจากสามารถช่วยลดอุบัติเหตุ เป็นตัวเลือกในการเดินทางสำหรับคนที่ไม่สามารถขับรถได้ รวมถึงการลดระยะเวลาในการเดินทาง เทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างพลิกผัน (Disruptive Technology) ต่อการคมนาคมและอุตสาหกรรมรถยนต์ทั่วโลกในอนาคตอย่างแน่นอน แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความเร็วในการพัฒนาเทคโนโลยีที่อยู่เบื้องหลัง อัตราการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้บริโภค และนโยบายสนับสนุนจากภาครัฐของแต่ละประเทศ

ในด้านการนำยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติมาใช้งานในอุตสาหกรรมขนส่งและโลจิสติกส์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและเพิ่มความปลอดภัยด้านงานขนส่ง และลดทุนในระยะยาว ปัจจุบันค่ายรถยนต์ใหญ่หลายบริษัทกำลังแข่งขันกันพัฒนารถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแนวโน้มในอนาคตอาจจะมีการผลิตเข้าสู่ตลาดโลกเร็วกว่าที่คาดการณ์ไว้ เป้าหมายของนวัตกรรมดังกล่าว คือ เพื่อให้ผู้ประกอบการธุรกิจในการขนส่งและโลจิสติกส์สามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในปัจจุบันได้ โดยเฉพาะปัญหาราคาพลังงานเชื้อเพลิงและปัญหาการขาดแคลนแรงงานที่ต้องทำงานหนัก ซึ่งนวัตกรรมนี้จะช่วยลดภาระให้พนักงานขับรถและสามารถรับหน้าที่ในการวิ่งงานซ้ำ ๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดพัก ช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถขับเคลื่อนธุรกิจและแข่งขันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการนำเทคโนโลยีระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband เพื่อใช้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม
- 1.2.2 ทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband เปรียบเทียบกับการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพและเทคโนโลยี LIDAR และ GPS

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 ทดสอบการประสิทธิภาพของเทคโนโลยีระบุตำแหน่งของรถบรรทุกอัตโนมัติภายในพื้นที่ปฏิบัติงานจริงในโรงงานของ บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด อำเภอนิคมน้ำพอง จังหวัดระยอง
- 1.3.2 ศึกษาความแม่นยำในการระบุตำแหน่งให้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่จะสร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเปรียบเทียบระหว่างการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband กับเทคโนโลยีผสมผสานระหว่างการวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR และ GPS

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ทบวงการศึกษา รวบรวมข้อมูล รวมทั้งสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 สร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ เพื่อใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ ณ โรงงานของ บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด อำเภอนิคมน้ำพอง จังหวัดระยอง โดยในขั้นแรก

ออกแบบใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งโดยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR และ GPS

- 1.4.3 เก็บผลการปฏิบัติการกิจของรถบรรทุกอัตโนมัติ เพื่อนำมาวิเคราะห์และศึกษาประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งและการนำทางอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR และ GPS
- 1.4.4 จำลองผลการออกแบบระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR และ GPS
- 1.4.5 วิเคราะห์และบันทึกผลการทดสอบ
- 1.4.6 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.5.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

- 1) ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูล สำนวณปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาการทำงานของเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งแต่ละแบบ
- 3) ศึกษาและออกแบบยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ
- 4) ศึกษาและเปรียบเทียบเทคโนโลยีระบบระบุตำแหน่งระหว่างแบบวิเคราะห์จากภาพ, LIDAR, GPS และ Ultra Wideband
- 5) ดำเนินการสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDA การวิเคราะห์จากภาพและ GPS
- 6) นำรถบรรทุกอัตโนมัติไปใช้ปฏิบัติหน้าที่จริง ณ โรงงานของบริษัท มิลล์คอนบุรพา จำกัด อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง และเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่ง
- 7) ทำการทดสอบการทำงานแบบจำลองของการระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband
- 8) เปรียบเทียบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้เทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพ LIDAR และ GPS กับการระบุตำแหน่งโดยการเพิ่มเทคโนโลยี UWB
- 9) สรุปผลการศึกษาและจัดทำข้อเสนอแนะ

### 1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังนี้

- 1) สำนวณปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) สร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติและติดตั้งระบบระบุตำแหน่งแบบ LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จาก และ GPS
- 3) ทดสอบการทำงานแบบจำลองของการระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband

- 4) สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ เพื่อสรุปการเพิ่มความแม่นยำของการระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband ที่เสริมเพิ่มกับเทคโนโลยีแบบ LIDAR การวิเคราะห์จากภาพ และ GPS

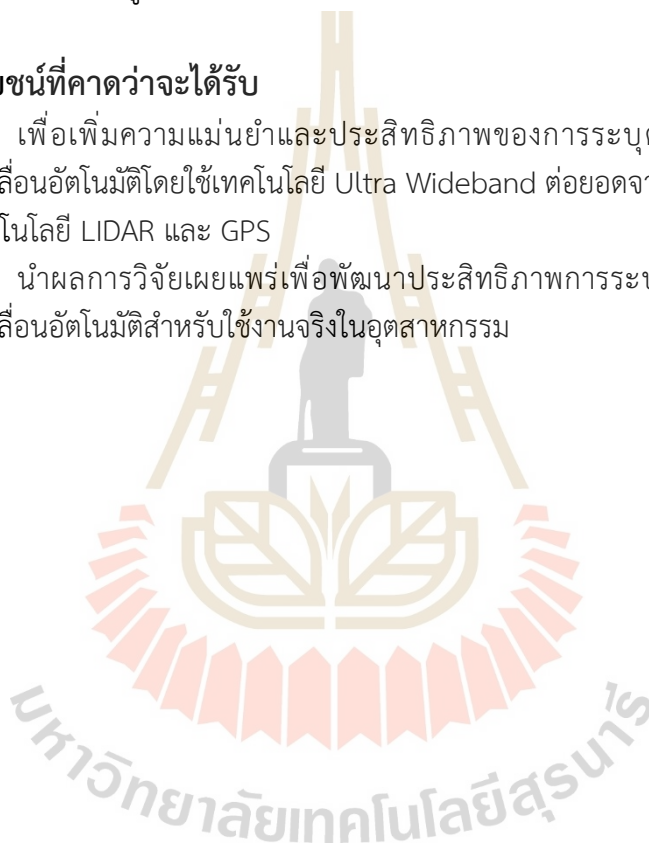
#### 1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

- 1) ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
- 2) บริษัท มิลล์คอน สตีล จำกัด (มหาชน) โรงงาน บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด 99 หมู่ 3 ถนนทางหลวง อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง 21180

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งและขับเคลื่อนรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband ต่อยอดจากเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR และ GPS

1.6.2 นำผลการวิจัยเผยแพร่เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งและขับเคลื่อนรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับใช้งานจริงในอุตสาหกรรม



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการระบุตำแหน่งทั้งภายในและภายนอกอาคาร มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตและการขนส่ง ในการคำนวณและวิเคราะห์หาตำแหน่งของสินค้า โดยเฉพาะการแสดงทิศทางเคลื่อนที่ของสายการผลิตและการขนส่ง การกำหนดเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสมต่อต้นทุนที่สุด และการบริหารจัดการกระบวนการผลิตและขนส่งโดยพิจารณาจากจุดใช้งานปัจจุบันเพื่อให้เกิดความปลอดภัยที่สุด ตัวอย่างของการนำเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งไปใช้งาน เช่น การติดตามพนักงาน (Staff Tracking) ตรวจสอบพนักงานคลังสินค้าแบบเรียลไทม์เพื่อรับภาพรวมของการประสานงานมอบหมายงานโดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของพนักงาน ระบุการเคลื่อนไหวส่วนเกินและปรับปรุงรูปแบบคลังสินค้า พนักงานผู้จัดการคลังสินค้าสามารถสังเกตภาพรวมภาพรวมของการดำเนินงานติดตามเวลา (Dwell Time Tracking) ติดตามเวลาที่ใช้ในสถานที่ต่ำและลดเวลาที่สิ้นเปลืองในการดำเนินงาน เปรียบเทียบเวลารวมทั้งหมดในช่วงเวลาหรือพนักงาน วัดเวลาการเดินทางระหว่างสถานีประกอบเพื่อค้นหาปัญหาคอขวดและระบุแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดในการดำเนินการ การเล่นซ้ำสถานการณ์ (Scenario Replays) ฝ่ายบริหารสามารถเล่นซ้ำการเคลื่อนไหวของรถยกทั้งหมดในช่วงเวลาที่กำหนด เช่น ในนิติวิทยาศาสตร์เพื่อระบุว่าอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์อื่น ๆ เกิดขึ้นได้อย่างไร และเรียนรู้การเกิดเหตุการณ์ การเล่นซ้ำสถานการณ์จำลองยังสามารถช่วยวิเคราะห์ว่าพนักงานจะมีปฏิกริยาตอบสนองต่อปริมาณงานที่สูงผิดปกติได้อย่างไร การจัดการสินทรัพย์ (Asset Management) ติดตามสินทรัพย์ที่เคลื่อนย้ายได้เพื่อลดเวลาที่เสียไปกับการค้นหาชิ้นส่วนของอุปกรณ์ ติดตามสินค้าทุกชิ้นในคลังสินค้า ระบุสินค้าที่เคลื่อนย้ายบ่อยครั้งและสินค้าที่ไม่ได้ใช้งานเป็นเวลานาน ทำให้เกิดองค์ความรู้ที่ชัดเจนต่อการบริหารจัดการและควบคุมสินค้าคงคลังของอุปกรณ์ ทำให้ลดของเสียในโรงงานประกอบหรือคลังสินค้าได้อย่างมาก และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลตำแหน่ง (Reliable Location Data) ข้อมูลตำแหน่งที่มีความเชื่อถือได้สูง (ความแม่นยำมากกว่า 99%) เป็นสิ่งสำคัญและช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในคลังสินค้าขนาดใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรม

#### 2.2 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการระบุตำแหน่ง

เทคโนโลยีการระบุตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย

##### 2.2.1 เทคโนโลยี Ultra Wideband

เทคโนโลยี Ultra Wideband หรือ UWB เป็นการรับส่งคลื่นความถี่วิทยุที่มีความถี่สูงกว่า 500 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นช่องทางการสื่อสาร โดยจะมีแบนด์วิดท์สเปกตรัมของคลื่นความถี่ในการรับส่งออกแบบช่องย่อย ๆ จำนวนมาก และกระจายข้อมูลในการสื่อสารไปตามช่องความถี่ย่อย ๆ นั้น มีผลทำให้การสื่อสารด้วยเทคโนโลยี UWB สามารถส่งข้อมูลที่มีจำนวนมากโดยใช้พลังงานปริมาณไม่

มากป้อนให้กับเครื่องรับส่งสัญญาณ มีการนำเทคโนโลยี Time Difference of Arrival (TDOA) โดยวิเคราะห์การเดินทางของความถี่คลื่นวิทยุระหว่างอุปกรณ์ส่งสัญญาณ UWB กับเครื่องรับสัญญาณที่ติดตั้งในยานพาหนะหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องการทราบตำแหน่งมาใช้ในการคำนวณระยะห่างเพื่อบอกตำแหน่งของยานพาหนะหรืออุปกรณ์นั้น ๆ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของเทคโนโลยี UWB ซึ่งเป็นหัวข้อการวิจัยเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติในหัวข้อ 2.3

## 2.2.2 เทคโนโลยี Global Positioning System

เทคโนโลยี Global Positioning System หรือ GPS เป็นระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก มีการทำงานโดยเครื่องรับบนพื้นโลกรับสัญญาณจากดาวเทียมที่โคจรรอบโลก ดาวเทียมจะทำการส่งข้อมูลที่ระบุตำแหน่งและเวลาขณะส่งสัญญาณ เครื่องรับสัญญาณ GPS จะทำการประมวลผลความแตกต่างของเวลาในการรับสัญญาณเทียบกับเวลาจริง ณ ปัจจุบัน เพื่อแปลงค่าเป็นระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณกับดาวเทียมแต่ละดวง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการค้นหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม เครื่องรับสัญญาณจะต้องอ่านค่าจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง จากจำนวนที่โคจรรอบโลกทั้งสิ้น 24 ดวง เพื่อบอกตำแหน่งบนผิวโลก ซึ่งระยะห่างจากดาวเทียมทั้ง 3 กับเครื่องรับสัญญาณ GPS จะสามารถระบุตำแหน่งบนผิวโลกได้ หากพื้นโลกอยู่ในแนวระนาบแต่ในความเป็นจริงพื้นโลกมีความโค้งเนื่องจากสัณฐานของโลกมีลักษณะกลม ดังนั้นดาวเทียมดวงที่ 4 จะทำให้สามารถคำนวณเรื่องความสูงเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องมากขึ้น การวัดระยะห่างระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับทำได้โดยใช้สูตรคำนวณระยะทางที่หาได้จากความเร็วคูณด้วยระยะเวลา วัดระยะเวลาที่คลื่นวิทยุส่งจากดาวเทียมมายังเครื่องรับ GPS คูณด้วยความเร็วของคลื่นวิทยุจะเท่ากับระยะทางที่เครื่องรับ อยู่ห่างจากดาวเทียม โดยเวลาที่วัดได้มาจากนาฬิกาของดาวเทียมที่มีความแม่นยำสูงมีความละเอียดถึงนาโนวินาที และมีการสอบทวนโดยสม่ำเสมอกับสถานีภาคพื้นดิน

## 2.2.3 เทคโนโลยี Light Detection and Ranging

เทคโนโลยี Light Detection and Ranging หรือ LIDAR เป็นเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลเพื่อการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) โดยใช้เซ็นเซอร์ทำการยิงแสงเลเซอร์ไปกระทบกับพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการทราบตำแหน่ง พร้อมกับวัดระยะทางระหว่างวัตถุนั้น แล้วสะท้อนกลับมาที่เซ็นเซอร์อีกครั้ง เรียกว่า Return แล้วทำการบันทึกข้อมูลมาเป็นลักษณะของตำแหน่ง 3 มิติ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Point Cloud ปัจจุบันมีเทคโนโลยี LiDAR อยู่ 3 ประเภทหลัก ประกอบไปด้วย

**2.2.3.1 ALS (Airborne Laser Scanning)** คือ LIDAR ที่จะติดตั้งอยู่บน UAV ชนิดต่าง ๆ เช่น Multicopter, Fixed-wings หรือไม่ว่าจะเป็นเครื่องบินขนาดเล็ก และเฮลิคอปเตอร์

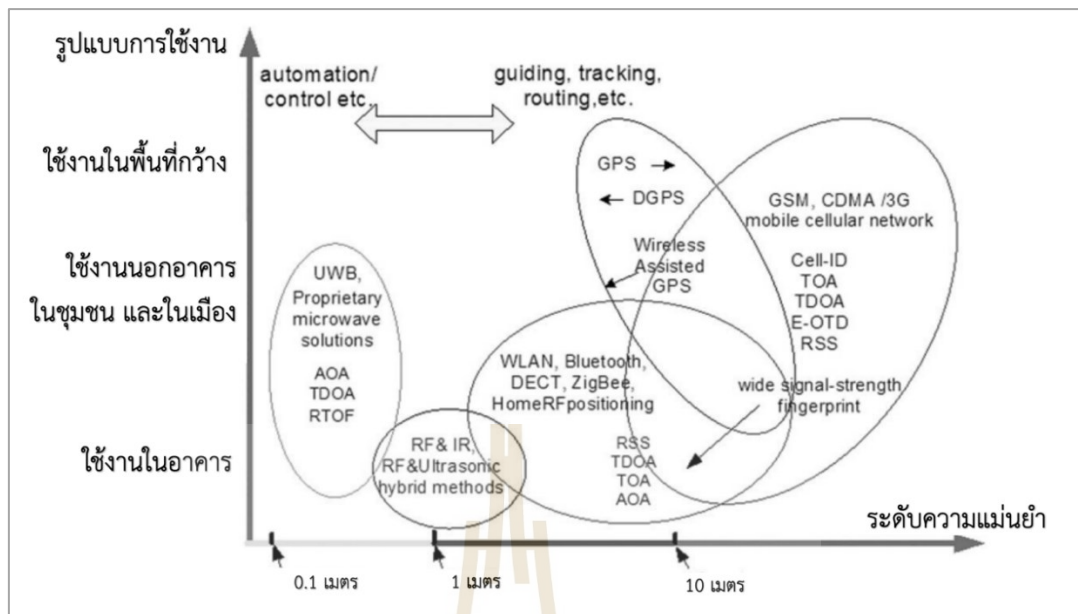
**2.2.3.2 TLS (Terrestrial Laser Scanning)** หรือ LIDAR ภาคพื้นดิน โดยจะติดตั้งอยู่กับ Tripod ซึ่งตั้งอยู่กับที่ และทำการสแกนพื้นผิวของวัตถุที่อยู่รอบ ๆ เป็นมุม 360 องศา

**2.2.3.3 MMS (Mobile Mapping System)** จะมีลักษณะคล้าย ๆ กับ TLS คือเป็น LIDAR ภาคพื้นดิน แต่ลักษณะเด่นที่สำคัญคือ สามารถนำไปติดตั้งอยู่บนยานพาหนะที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่น รถยนต์ เพื่อความสะดวกในการเก็บข้อมูล เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้เทคโนโลยี LIDAR แบบ MMS Point Cloud คือ กลุ่มของชุดข้อมูลที่มีลักษณะเป็นจุด 3 มิติ โดยในแต่ละจุดจะมี Attribute ที่สำคัญ เป็นการระบุข้อมูลเชิงพื้นที่ ระบุเป็นตำแหน่งพิกัด X, Y และ Z ที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างระบบ GPS (Global Positioning System) และระบบ IMU (Inertial Measurement Unit) จำนวนจุดของ Point Cloud นั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของ

เซ็นเซอร์ LIDAR ในแต่ละชนิด บางชนิดสามารถเก็บข้อมูลได้ตั้งแต่ 10,000 จุด จนถึง 1,000,000 จุด ต่อวินาที โดยจำนวนความหนาแน่นของจุดส่งผลโดยตรงกับคุณภาพของผลงาน เช่น การสร้าง 3D Mesh จาก Point Cloud ที่มีความหนาแน่นของจำนวนจุดที่มาก ผลลัพธ์ 3D Model ที่ได้จะมีความเสมือนจริงและถูกต้องแม่นยำในเชิงตำแหน่ง นอกจากนี้ Point Cloud ยังสามารถนำเข้าสู่กระบวนการ Interpolation เพื่อสร้าง Digital Model ประเภทต่าง ๆ ได้อย่างมีความถูกต้องแม่นยำตามเกณฑ์ของหลักวิศวกรรม

#### 2.2.4 เทคโนโลยีการวิเคราะห์จากภาพ

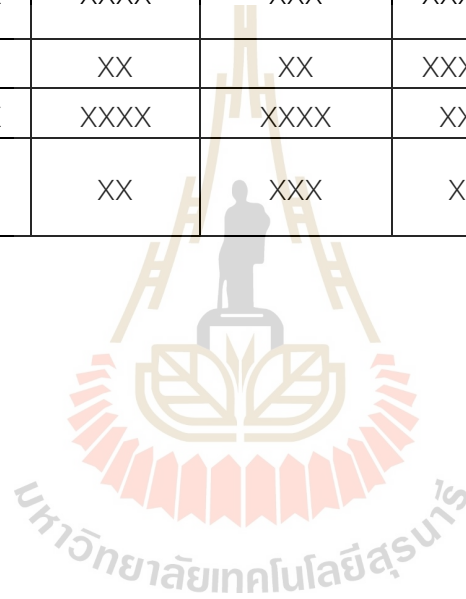
เทคโนโลยีการระบุตำแหน่งโดยวิเคราะห์จากภาพ หรือ Image Based Positioning บางครั้งมีชื่อเรียกว่าเทคโนโลยีการรวมแสง (Optical method) เป็นการใช้การวิเคราะห์ภาพที่เก็บจากกล้องแล้วนำมาประมวลผลในระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการวิทยานิพนธ์นำเทคโนโลยีนี้ร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR ใช้ระบุตำแหน่งและประกอบการนำทางให้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่สร้างขึ้น เพื่อเก็บข้อมูลและพัฒนาเป็นเทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband กล้องที่ใช้บันทึกภาพสามารถเป็นไปได้อีกหลาย เช่น กล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ กล้องรอบทิศทาง และกล้องสามมิติ ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของข้อมูลที่สามารถดึงมาจากภาพจากกล้องต่าง ๆ เหล่านี้ การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์จากภาพจะมีประสิทธิภาพสูงหรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ประการ ได้แก่ การปรับปรุงและย่อขนาดของภาพ เทคโนโลยีการประมวลผลและตรวจรู้ภาพ อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลระหว่างกล้องกับอุปกรณ์ประมวลผล ประสิทธิภาพในการประมวลผลของระบบคอมพิวเตอร์ และพัฒนาการของอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลผลภาพ รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบรูปแบบการใช้งานกับระดับความแม่นยำของเทคโนโลยีระบุตำแหน่งประเภทต่าง ๆ ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของเทคโนโลยีที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDAR ร่วมกับการระบุตำแหน่งด้วยการวิเคราะห์จากภาพ เป็นเทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งเพื่อทำงานร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ในการนำทางของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ที่โรงงานของ บริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด เพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งและประกอบการนำทาง พร้อมกับศึกษาเทคโนโลยีระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งในอนาคตโดยเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติการกิจจริง เหตุผลหลักในการเลือกใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDAR และการวิเคราะห์จากภาพเป็นอุปกรณ์ระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ พิจารณาจากระดับความแม่นยำที่สูงของทั้งสองเทคโนโลยี ประสิทธิภาพต่อการถูกรบกวน ขนาดของอุปกรณ์ที่เล็ก และความเร็วในการส่งข้อมูลเพื่อประมวลผลของระบบคอมพิวเตอร์ภายในรถ และความพร้อมของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่สามารถสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติให้ทันใช้งานตามความต้องการของผู้ว่าจ้าง โดยที่อุปกรณ์ UWB ยังไม่มีแพร่หลาย โดยระหว่างที่สร้างรถบรรทุกอัตโนมัติและรถบรรทุกอัตโนมัติปฏิบัติการกิจจริงทางธุรกิจ รวมถึงมีการเก็บข้อมูลการขับเคลื่อน จะเป็นการศึกษาและสร้างแบบจำลองของการออกแบบระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบรูปแบบการใช้งานกับระดับความแม่นยำของเทคโนโลยีระบุตำแหน่งประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งวิธีต่าง ๆ

เทคโนโลยี	ระยะทาง	ทะลุทะลวง กำแพง	สร้างแบบ แปลนได้	ความ แม่นยำ	วัดข้อมูลตาม เวลาจริง	ทนต่อสัญญาณ รบกวน	ขนาดของ อุปกรณ์	การขึ้นกับ สภาพแวดล้อม	ไม่เกี่ยวข้องกับ เครือข่าย	ทำงานโดย อิสระ
Ultra Wideband	XXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXX	XXXX	X	X	XXXX
GPS	XX	X	XX	X	XX	XX	XXXX	X	XXXX	XXXX
LIDAR	XXXX	X	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XX	X	XXXX	XXXX
วิเคราะห์ จากภาพ	X	X	XXX	XXX	XX	XXX	X	XXXX	X	X





## 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยี Ultra Wideband เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาและใช้งานโดยกระทรวงกลาโหม สหรัฐอเมริกา และได้รับการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ช่วงปลายของทศวรรษ 1990 เทคโนโลยีการสื่อสารทางคลื่นวิทยุของ Ultra Wideband เป็นการบริหารจัดการแถบความถี่คลื่นวิทยุเพื่อให้สามารถสื่อสารได้ด้วยอัตราสูงบนเครือข่ายสื่อสารส่วนบุคคล เทคโนโลยี Ultra Wideband ใช้หลักการส่งพัลส์ข้อมูลในช่วงสั้นมาก ๆ ไปบนแถบความถี่ที่กว้าง ทำให้ความระดับความเข้มของสัญญาณบนช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งมีค่าต่ำมาก การส่งข้อมูลบนแถบความถี่ที่กว้างมาก ๆ ทำให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วที่สูง เทคโนโลยี Ultra Wideband กำหนดให้รับส่งคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่ต่ำ จึงทำให้คลื่นวิทยุสามารถทะลุทำลวงสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ได้ดี มีการนำเทคโนโลยี Ultra Wideband ไปประยุกต์ใช้งานใน 3 ลักษณะ คือ การสื่อสารกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์ การระบุตำแหน่งและติดตามตำแหน่ง และระบบเรดาร์ เทคนิคการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband มีความแม่นยำมากในการใช้งานภายในอาคาร ทำให้มีการนำไปใช้งานในการติดตามสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม และการติดตั้ง Beacon ส่งสัญญาณบอกตำแหน่งสำหรับบริการที่เกี่ยวข้องกับเหตุฉุกเฉิน ใช้ในการนำทางภายในอาคารสำหรับบุคคลตาบอด ใช้ติดตามตัวบุคคลหรือสิ่งของ และใช้ในกิจการทางทหาร การรับส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband มีความแม่นยำในการบอกพิกัดตำแหน่งที่สูงมาก เหมาะสำหรับการใช้งานภายในอาคาร

การรับส่งสัญญาณโดยใช้แถบความถี่วิทยุที่สูงมากร่วมกับการส่งข้อมูลเป็นพัลส์สั้น ๆ ของเทคโนโลยี Ultra Wideband ช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นวิทยุที่สะท้อนไปยังสิ่งกีดขวางต่าง ๆ และมารวมตัวกันที่จุดรับสัญญาณปลายทาง และทำให้ซอฟต์แวร์คำนวณพิกัดที่ประมวลผลการรับส่งข้อมูลพัลส์จากอุปกรณ์เครื่องส่งไปยังอุปกรณ์เครื่องรับมีความแม่นยำ ทำให้เทคโนโลยี Ultra Wideband มีขีดความสามารถในการระบุตำแหน่งภายในอาคารที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ๆ ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband มีความแม่นยำถึงระดับน้อยกว่าหนึ่งเซนติเมตร การระบุตำแหน่งโดยเทคโนโลยี Ultra Wideband ไม่ได้ใช้หลักเกณฑ์การรับส่งแบบเป็นเส้นตรง เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีประเภทอื่น ๆ เช่น อินฟราเรด หรือ Ultrasound และไม่ได้รับผลกระทบจากเทคโนโลยีสื่อสารอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารจากอุปกรณ์สื่อสารอื่น หรือจากสัญญาณรบกวนใด ๆ ในธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะรูปแบบการส่งกระจายสัญญาณในแถบความถี่คลื่นวิทยุที่กว้างมาก ต้นทุนของอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี Ultra Wideband ในปัจจุบันก็มีราคาที่ถูกลงและใช้พลังงานน้อยกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ

### 2.3.1 การมอดูเลตสัญญาณของเทคโนโลยี Ultra Wideband

การมอดูเลตสัญญาณ (Signal Modulation) คือกระบวนการในการส่งข้อมูลข่าวสารดิจิทัลไปบนสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (Carrier Signal) โดยการใช้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบหรือคุณลักษณะของคลื่นความถี่วิทยุ กระบวนการการมอดูเลตสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือการมอดูเลตข้อมูลไบนารี (Binary Modulation) การมอดูเลตแบบ Ternary และการมอดูเลตแบบ M-ary รูปแบบหรือคุณลักษณะของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุสามารถถูกมอดูเลตได้ 4 รูปแบบ คือ มอดูเลตระดับความแรง (Amplitude Modulation) มอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation) มอดูเลตเฟสของสัญญาณ (Phase Modulation) และการมอดูเลตแบบผสมผสานคุณลักษณะข้างต้นมากกว่าหนึ่งประเภทเข้าด้วยกัน (Hybrid Modulation)

การมอดูเลตเป็นกระบวนการสำคัญที่สุดในการส่งข้อมูลข่าวสารระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง โดยความสำคัญคือการเพิ่มคุณภาพในการส่งข้อมูลข่าวสารไปในระยะทางไกล ๆ ภายใต้เงื่อนไขข้อกำหนดต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไปตามประเภทของการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ สำหรับการสื่อสารแบบ Ultra Wideband ข้อมูลข่าวสารจะถูกส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุไปพร้อมกับข้อมูลข่าวสารจากแหล่งอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง และต้องมีความต้านทานต่อการรบกวนของคลื่นความถี่วิทยุจากแหล่งเดียวกันที่สะท้อนผ่านสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ดังนั้นการมอดูเลตสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบ Ultra Wideband จึงต้องมีประสิทธิภาพที่สูงมาก เพื่อให้ข้อมูลข่าวสารที่ส่งผ่านอากาศไม่ถูกรบกวนและได้รับการถอดรหัสได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนต่าง ๆ มากมาย

เทคโนโลยี Ultra Wideband ใช้เทคนิคการมอดูเลตหลายประเภท เช่น การมอดูเลตแบบ Pulse Position Modulation (PPM) on-off Keying (OOK) Pulse Amplitude Modulation (PAM) และ Pulse Width Modulation (PWM) มีการใช้เทคโนโลยีมอดูเลตสัญญาณเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการบอกตำแหน่งให้กับการสื่อสารด้วย Ultra Wideband เทคโนโลยี Time-Hopping Spread Spectrum (TH-SS) ที่ใช้ในการส่งสัญญาณพัลส์ผ่านคลื่นความถี่วิทยุทำหน้าที่แก้ปัญหาการรบกวนของสัญญาณจากปรากฏการณ์สะท้อนของสัญญาณผ่านสิ่งกีดขวาง และทำให้ต้นทุนในการผลิตอุปกรณ์สื่อสาร Ultra Wideband มีราคาถูกลง นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคโนโลยีมอดูเลชันชนิดอื่น ๆ เช่น Pseudo Random Time Modulation (PRTM) Binary Phase Shift Keying (BPSK) Time-Hopping Binary Phase Shift Keying (TH-BPSK) Time-Hopping Pulse Position Modulation (TH-PPM) และ Minimum-Shift Keying (MSK) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งให้มีความแม่นยำสูง

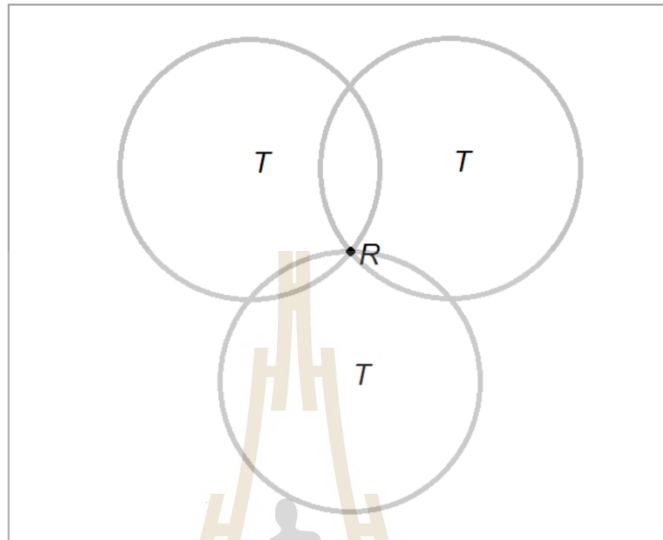
### 2.3.2 อัลกอริทึมในการระบุตำแหน่งของเทคโนโลยี Ultra Wideband

เทคโนโลยีการระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband เหมาะสำหรับการนำใช้งานภายในอาคาร มีการออกแบบอัลกอริทึมที่แตกต่างกันเพื่อนำข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งคลื่นความถี่วิทยุจากโหนดอ้างอิงและโหนดปลายทาง (ยานพาหนะหรือวัตถุต่าง ๆ ที่ต้องการทราบตำแหน่ง) โดยสามารถจำแนกอัลกอริทึมที่ใช้ในการระบุตำแหน่งได้เป็น 5 ประเภทดังนี้

**2.3.2.1 อัลกอริทึม Angle of Arrival (AOA)** อัลกอริทึมระบุตำแหน่งแบบ AOA นำสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องรับได้รับจากโหนดส่งสัญญาณอย่างน้อย 2 ชุดมาทำการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณหรือเฟสของสัญญาณผ่านทางชุดสายอากาศหลาย ๆ ชุด เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของอุปกรณ์เครื่องรับโดยคำนวณจากจุดตัดเชิงมุมของสัญญาณคลื่นวิทยุจากแหล่งส่งสัญญาณต้นทางแต่ละชุด การระบุตำแหน่งโดยอัลกอริทึม AOA มีความอ่อนไหวต่อปัจจัยทางกายภาพของคลื่นวิทยุอยู่หลาย ๆ ประการ ทำให้การนำไปใช้ระบุตำแหน่งมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริง นอกจากนี้อัลกอริทึม AOA มีความซับซ้อนมากกว่าอัลกอริทึมแบบอื่น ๆ โดยเฉพาะความจำเป็นที่ต้องมีการติดตั้งชุดสายอากาศจำนวนมากที่อุปกรณ์เครื่องรับ หากระยะห่างระหว่างโหนดเครื่องส่งและเครื่องรับมีมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งลดลง

**2.3.2.2 อัลกอริทึม Time of Arrival (TOA)** เป็นอัลกอริทึมที่ใช้การตัดกันของสัญญาณคลื่นวิทยุจากแหล่งกำเนิดสัญญาณหลายแหล่ง เป็นไปตามรูปที่ 2.2 รัศมีของวงกลมแต่ละวงกลมคือระยะทางระหว่างเครื่องรับที่ยานพาหนะและโหนดส่งสัญญาณ โดยคำนวณจากการ

แพร่กระจายของคลื่นวิทยุในทิศทางเดียวจากโหนดส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณ โหนดเครื่องส่งแต่ละแห่งจะต้องมีฐานเวลาที่เข้าจังหวะกัน (Synchronization) แต่เครื่องรับไม่จำเป็นต้องมีฐานเวลาที่เข้าจังหวะกับเครื่องส่ง



รูปที่ 2.2 การระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี ToA

**2.3.2.3 อัลกอริทึม Time Different of Arrival (TDOA)** เป็นการวัดค่าความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณจากโหนดส่งสัญญาณและไปถึงยังเครื่องรับที่มีการติดตั้งตั้งแต่ 3 เครื่องขึ้นไป ซึ่งในกรณีนี้เป็นการติดตั้งโหนดส่งสัญญาณที่ยานพาหนะที่มีการเคลื่อนไหว และติดตั้งเครื่องรับสัญญาณประจำที่เป็นจำนวนหลาย ๆ จุด ตำแหน่งที่อยู่ของโหนดส่งสัญญาณจะถูกคำนวณจากค่าความแตกต่างของเวลาของสัญญาณ เทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยอัลกอริทึม TDOA ต้องการแถบความถี่คลื่นวิทยุในการสื่อสารมากกว่าอัลกอริทึมแบบอื่น ๆ

**2.3.2.4 อัลกอริทึม Received Signal Strength (RSS)** เป้าหมายจะทำการวัดระดับความแรงของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ส่งมาจากโหนดส่งสัญญาณหลายๆ จุด และนำระดับความแรงที่วัดได้คำนวณหาระยะห่างระหว่างเครื่องรับและโหนดส่งสัญญาณ ซึ่งทำให้เครื่องรับสามารถประมาณตำแหน่งที่อยู่โดยอ้างอิงกับตำแหน่งของโหนดส่งสัญญาณหลาย ๆ โหนดในพื้นที่ใช้งานได้ อัลกอริทึม RSS มีความอ่อนไหวต่อการรบกวนของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณจากโหนดส่งสัญญาณที่กระทบกับสิ่งกีดขวางต่าง ๆ และสะท้อนกลับมายังเครื่องรับสัญญาณ และยังมี ความอ่อนไหวต่อผลกระทบใด ๆ ที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณแถบความถี่วิทยุ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งที่อยู่ จึงเป็นอัลกอริทึมที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานระบุตำแหน่งภายในอาคาร อย่างไรก็ตามในบางสถานการณ์อัลกอริทึม RSS มีจุดเด่นมากกว่าอัลกอริทึมชนิดอื่น ๆ การระบุตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึม RSS ใช้ปริมาณข้อมูลส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึม 3 ประเภทข้างต้น ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการบริหารจัดการย่านความถี่ในพื้นที่ใช้งาน และทำให้ไม่ต้องใช้ Tag ติดตั้งเป็นจำนวนมาก เพราะต้องการเพียงติดตั้ง Tag ที่ยานพาหนะหรือวัตถุที่ต้องการทราบตำแหน่งเท่านั้น

**2.3.2.5 อัลกอริทึมแบบผสมผสาน (Hybrid-Based)** การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband ในทางปฏิบัติจะใช้อัลกอริทึมหลายแบบทำงานร่วมกัน เพื่อเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกันของแต่ละวิธี เป็นการเพิ่มความแม่นยำ แต่ก็เพิ่มต้นทุนและความซับซ้อนของเทคโนโลยีในทางปฏิบัติเช่นเดียวกัน ในการระบุตำแหน่งแบบสองแกน (แนบราบและแนวตั้ง) อัลกอริทึมแบบ TDOA ต้องการใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณ ซึ่งในทางปฏิบัติเรียกว่า Gateway อย่างน้อย 2-3 ตำแหน่งติดตั้งในพื้นที่ปฏิบัติงาน สำหรับอัลกอริทึมแบบ AOA ต้องการใช้เกตเวย์เพียง 2 ตำแหน่ง เพื่อประมาณการณระบุตำแหน่งของเป้าหมาย การวัดองศาระหว่างเกตเวย์กับตำแหน่งเป้าหมายที่ผิดพลาดเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งหากเป้าหมายอยู่ห่างจากเกตเวย์มากขึ้น ปัจจุบันสามารถรวมอัลกอริทึม TDOA และ AOA เป็นอัลกอริทึมเดียวกันและสามารถทำงานเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกันได้ ทำให้เพิ่มความแม่นยำสูงมากขึ้น

สำหรับอัลกอริทึม TOA และ TDOA ทั้งสองเทคโนโลยีมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งสูงเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมแบบอื่น ๆ เนื่องจากใช้การวัดค่าความละเอียดของฐานเวลาที่มีการรับส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุที่มีการส่งผ่านเทคโนโลยี Ultra Wideband ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของอัลกอริทึม TOA คือการเข้าจังหวะของฐานเวลาและการแปรผันของฐานเวลา (Clock Jitter) ระหว่างโหนดส่งสัญญาณแต่ละแห่ง เพราะระบบประมวลผลต้องประเมินเวลาที่สัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเดินทางไปถึงเป้าหมาย อัลกอริทึม TDOA มีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งที่เหนือกว่า เพราะต้องการการเข้าจังหวะของฐานเวลาระหว่างโหนดส่งสัญญาณกับโหนดอ้างอิงเฉพาะในเวลาเริ่มต้นทำงานเท่านั้น

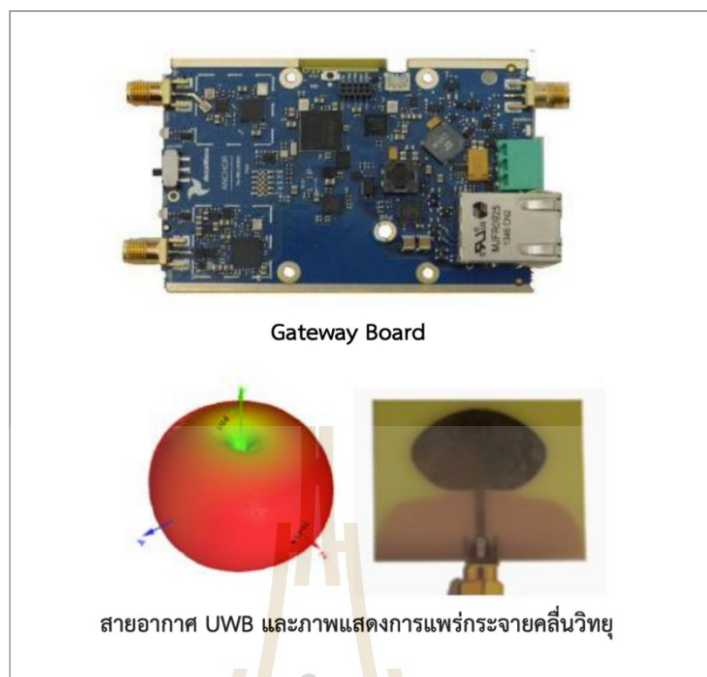
### 2.3.3 จุดแข็งและจุดอ่อนของเทคโนโลยี Ultra Wideband

เนื่องจากเทคโนโลยี Ultra Wideband เป็นการส่งสัญญาณข้อมูลผ่านความถี่คลื่นวิทยุด้วยกำลังส่งที่ต่ำมาก ทำให้สามารถใช้งานในย่านความถี่ที่ไม่ต้องใช้อใบอนุญาต อุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่เป็นมาตรฐาน Ultra Wideband ไม่ได้รับการกำหนดบังคับให้เป็นอุปกรณ์รับส่งคลื่นวิทยุสื่อสารตามกฎหมายสื่อสารโทรคมนาคมสากล เพราะกำลังส่งที่ต่ำและไม่สร้างปัญหาสัญญาณรบกวนกับระบบสื่อสารวิทยุต่าง ๆ ที่ใช้งานทั่วไป เครื่องส่งสัญญาณ Ultra Wideband ใช้พลังงานต่ำเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ระบุตำแหน่งพิกัดด้วยเทคโนโลยีชนิดอื่น ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ภายในโหนดเครื่องส่งหรือเกตเวย์ส่งสัญญาณ โดยข้อกำหนดของมาตรฐาน Ultra Wideband กำหนดระยะเวลาในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดพลังงานให้น้อยที่สุด ทำให้อุปกรณ์โหนดและเซ็นเซอร์ที่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับแหล่งพลังงานได้ และต้องอาศัยเฉพาะพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาดเล็ก สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลาานการส่งข้อมูลในแถบความถี่คลื่นวิทยุที่กว้าง และการส่งสัญญาณในรูปแบบของพัลส์สั้น ๆ ทำให้การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband มีความสามารถในการแยกผลกระทบจากการคลื่นวิทยุแทรกสอดที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่นจากโหนดต้นทางไปยังสิ่งกีดขวางก่อนที่สะท้อนกลับมาแทรกสอดกับคลื่นในแนวสายตาที่อุปกรณ์ปลายทางได้ดี ทำให้การระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมต่าง ๆ ข้อด้อยของเทคโนโลยี Ultra Wideband คืออุปกรณ์ภาครับต้องมีความสามารถในการทำงานหลาย ๆ ประการพร้อมกัน คือการตรวจจับ (Acquisition) สัญญาณคลื่นวิทยุ Ultra Wideband แล้วแยกออกจากสภาพแวดล้อมที่มีความถี่คลื่นวิทยุหลากหลาย เมื่อตรวจจับได้แล้วก็ต้องทำการเข้าจังหวะฐานเวลา (Time

Synchronization) และติดตามข้อมูล (Track) เพื่อส่งข้อมูลไปประมวลผล โดยให้สัมพันธ์พัลส์ข้อมูลที่มีการส่งมาจากโหนดส่งสัญญาณหรือเกตเวย์ กระบวนการทั้งหมดนี้ใช้เวลาในการดำเนินการค่อนข้างมาก ทำให้มีการพัฒนาวิธีการเพิ่มเติมเพื่อลดเวลาในการดำเนินการดังกล่าว อาทิ เช่น การสร้างลำดับข้อมูลมาตรฐาน (Preamble Sequence) ของข้อมูลที่มีการรับส่งผ่านความถี่คลื่นวิทยุเพื่อให้เครื่องรับสัญญาณสามารถตรวจจับสัญญาณ Ultra Wideband ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้การออกแบบระบบสายอากาศสำหรับใช้งานในระบบนิเวศน์การใช้งาน Ultra Wideband ในการระบุตำแหน่งก็มีความซับซ้อน สายอากาศมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้เทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดทางกายภาพมากกว่าเทคโนโลยีอยู่ โดยทั่วไปขนาดของสายอากาศ (Tag Antenna) ที่ใช้ในการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband มีขนาดพื้นที่ประมาณ 0.5 ตารางเซ็นติเมตร

### 2.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband

**2.3.4.1 อุปกรณ์ Ultra Wideband Gateway เกตเวย์ หรือโหนดส่งสัญญาณ**  
เป็นอุปกรณ์ที่ต้องได้รับการติดตั้งรอบพื้นที่ใช้งานสำหรับส่งสัญญาณ Ultra Wideband เพื่อส่งสัญญาณไปที่เครื่องรับหรืออุปกรณ์เป้าหมายใช้ในการคำนวณระบุตำแหน่ง โดยเป้าหมายจะต้องอยู่ภายในพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุที่เกตเวย์อย่างน้อย 3 ชั้นส่งสัญญาณ Ultra Wideband ออกไป อุปกรณ์เกตเวย์แต่ละชนิดมีขีดความสามารถพื้นฐานเหมือนกัน คือ ตรวจจับและรับข้อมูลจากตัวรับสัญญาณหรือเป้าหมาย ซึ่งในทางปฏิบัติจะเรียกว่า Tag สิ่งที่เกตเวย์แต่ละรุ่นมีความแตกต่างกันก็คือประเภทของอัลกอริทึมที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง รูปที่ 2-3 แสดงถึงลักษณะของวงจรรีเลย์ทรานซิสก์ของเกตเวย์โดยทั่วไป กับระบบสายอากาศที่ติดตั้งเชื่อมต่อออกจากเกตเวย์ และรูปแบบการแพร่กระจายความถี่คลื่นวิทยุออกจากเกตเวย์ อุปกรณ์เกตเวย์ทั้งหมดที่มีการติดตั้งใช้งาน จะทำการติดต่อสื่อสารกับเกตเวย์หลัก (Master Gateway) ผ่านทางความถี่คลื่นวิทยุโดยใช้เทคโนโลยี Ultra Wideband เช่นเดียวกัน และจะทำหน้าที่ในการประมวลผลเพื่อคำนวณระบุตำแหน่งของเป้าหมาย เกตเวย์หลักเชื่อมต่อโดยตรงกับโครงข่ายหลัก (Backhaul) ผ่านการเชื่อมต่อเช่นเครือข่ายอีเธอร์เน็ต เพื่อส่งข้อมูลดิบทั้งหมดที่ได้จากเกตเวย์ย่อยในพื้นที่การทำงาน ในเครือข่ายระบุตำแหน่งหนึ่ง ๆ สามารถได้รับการออกแบบให้มีเกตเวย์หลักได้หลายชุด ข้อมูลดิบสำหรับใช้คำนวณพิกัดจากเกตเวย์ย่อยสามารถส่งผ่านเกตเวย์หลักได้ โดยมีกลไกการตรวจสอบข้อมูลดิบเพื่อป้องกันข้อมูลซ้ำซ้อนกัน



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์เกตเวย์และระบบสายอากาศของระบบระบุตำแหน่ง Ultra Wideband

#### ตัวอย่างขีดความสามารถของอุปกรณ์เกตเวย์หลัก

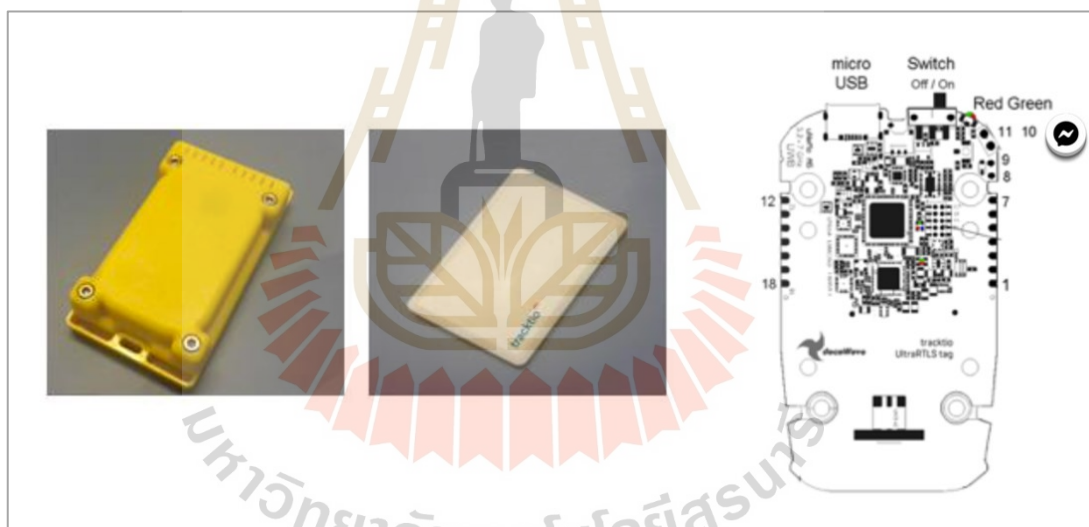
- 1) สนับสนุนอัลกอริทึม TDOA โดยใช้อ่านค่าจากเกตเวย์ย่อยอย่างน้อย 3 จุด
- 2) สามารถเชื่อมต่อกับเกตเวย์ย่อยได้สูงสุด 20 จุด
- 3) รองรับพื้นที่ครอบคลุมของความถี่คลื่นวิทยุได้ 5,000 ตารางเมตรสำหรับการใช้งานภายในอาคาร และ 20,000 ตารางเมตรสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร
- 4) ผู้ควบคุมสามารถปรับแก้ค่าตัวแปรการทำงาน (Configuration Management) ได้จากระยะไกล
- 5) สามารถปรับเปลี่ยนและพัฒนาเฟิร์มแวร์ได้
- 6) มีระบบปรับตั้งค่าตำแหน่งและฐานเวลาโดยอัตโนมัติ (Position and Timing Auto-Calibration)

#### ตัวอย่างข้อกำหนดมาตรฐานทางเทคนิคของอุปกรณ์เกตเวย์หลัก

- 1) กำหนดค่าอ้างอิงสำหรับการระบุตำแหน่ง ทั้งแบบ 2 มิติ (แนวราบ) และ 3 มิติ (แนวราบและแนวตั้ง)
- 2) เชื่อมต่อกับเครือข่ายอีเธอร์เน็ตด้วยเทคโนโลยี PoE (Power over Ethernet) มีระบบแบตเตอรี่สำรองไฟภายในตัว
- 3) สายอากาศแบบ Ultra Wideband
- 4) รองรับการป้อนไฟเลี้ยง 9.30 Volt DC
- 5) ใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 2.4 กิกะเฮิรตซ์
- 6) ใช้งานได้ทั้งในอาคาร หรือนอกอาคาร (หากเป็นกรณีนอกอาคารต้องผ่านการรับรองมาตรฐาน IP65)

วงจรรีเลย์ทรอนิกส์ภายในอุปกรณ์เกตเวย์จะต้องมีประสิทธิภาพอย่างน้อยในระดับใช้งานในอุตสาหกรรม คือทำงานได้เป็นปกติในอุณหภูมิสภาพแวดล้อม -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส และมีอุปกรณ์หุ้มห่อตามมาตรฐาน IP67 สำหรับการใช้งานนอกอาคารและป้องกันการซึมของน้ำเข้าไป อุปกรณ์หุ้มห่อ โดยภายในอุปกรณ์หุ้มห่อต้องมีพื้นที่ว่างเพียงพอสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มต่าง ๆ เช่น แบตเตอรี่สำรองฉุกเฉิน สายอากาศเพิ่มเติม หรือระบบแปลงพลังงาน และต้องได้รับการออกแบบให้มีขั้วต่อไฟฟ้าที่มีความทนทาน ป้องกันแสงอุลตราไวโอเล็ตและทนต่อการแรงกระแทกจากการใช้งาน สามารถติดตั้งใช้งานได้ทั้งกับเสาส่งสัญญาณ ติดกำแพง หรือยึดกับหน้าสัมผัส

**2.3.4.2 อุปกรณ์ Ultra Wideband Tag** เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งอยู่กับยานพาหนะ วัตถุ หรือทรัพย์สินที่ต้องการทราบตำแหน่ง ภายใน Tag อาจมีการติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับส่งข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งที่อยู่ โดย Tag มีการส่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ระยะห่าง ตำแหน่ง สถานะของเซ็นเซอร์ การอัปเดตเฟิร์มแวร์ และข้อมูลการใช้งานอื่น ๆ ผ่านเครือข่าย Ultra Wideband อาจมีการติดตั้งอุปกรณ์รับอื่น ๆ เช่น ปุ่มสั่งการ แผงแสดงผลข้อมูล หลอด LED หรือเครื่องกำเนิดเสียงไว้กับ Tag ตามความต้องการใช้งาน ทั้งนี้อุปกรณ์ Tag จะต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IP67 และมีขนาดไม่ใหญ่ เพื่อให้มนุษย์สามารถสวมใส่ ติดตั้งกับทรัพย์สินหรือยานพาหนะได้โดยสะดวก



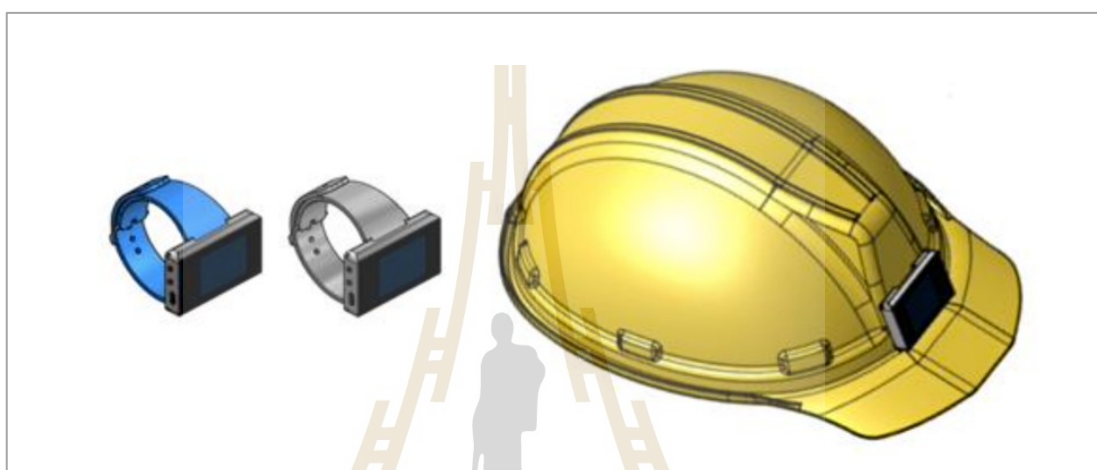
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ Tag แสดงอุปกรณ์หุ้มห่อ และรูปร่างของ Tag กับโครงสร้างวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

#### ตัวอย่างข้อกำหนดมาตรฐานทางเทคนิคของ Tag

- 1) มีอุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ
- 2) รองรับมาตรฐาน IEEE 802.15.4-2011 UWB
- 3) ระยะความแม่นยำ 10 เซนติเมตรสำหรับการใช้งานในอาคาร และวัตถุที่ติดตั้ง Tag เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 เมตรต่อวินาที
- 4) รองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราเร็วถึง 6.8 เมกะบิตต่อวินาทีผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สาย
- 5) ปุ่มสำหรับผู้ใช้งาน
- 6) หลอดแสดงผลสัญญาณ LED

- 7) แบตเตอรี่
- 8) เครื่องรับส่ง Ultra Wideband และสายอากาศ
- 9) อุปกรณ์เพิ่มอื่น ๆ เช่น IMU (Gyro) Bluetooth Low Energy หน่วยความจำเพิ่ม Buzzer กำเนิดเสียง ชาร์จเจอร์ไร้สาย (Qi) เซ็นเซอร์วัดความดัน เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

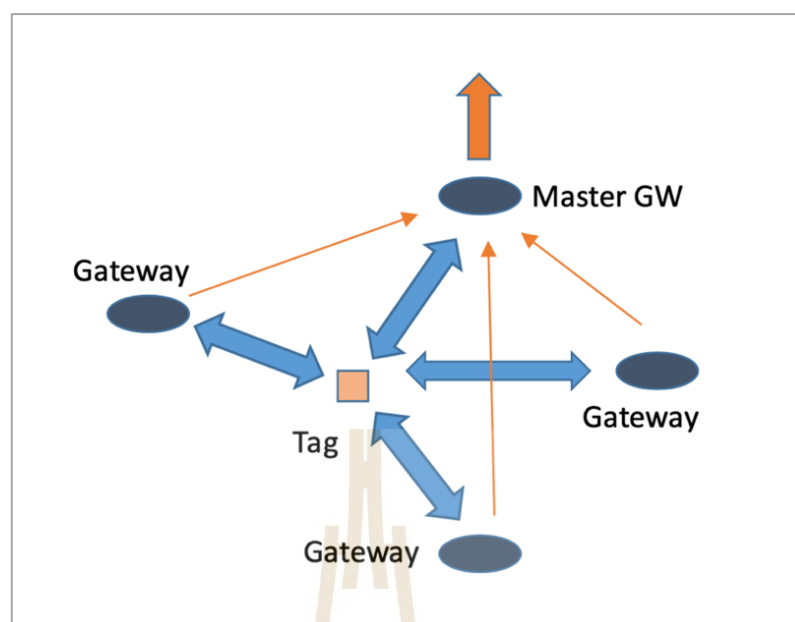
โดยมีข้อกำหนดว่าอุปกรณ์ที่บรรจุ Tag สำหรับใช้งานโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีความแข็งแรงและสามารถป้องกันฝุ่นและการรั่วไหลของน้ำตามมาตรฐาน IP67



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์ Tag แบบที่ติดตั้งกับหมวกวิศวกรสำหรับใช้บอกพิกัดภายในโรงงาน

**2.3.4.3 เครือข่ายการสื่อสารและการสื่อสารในระบบระบุตำแหน่ง Ultra Wideband** ในการทำงานของเครือข่ายสื่อสารแบบ Ultra Wideband อุปกรณ์ Tag จะมีการลงทะเบียนกับอุปกรณ์เกตเวย์อย่างอัตโนมัติ การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์เกตเวย์ และ Tag สามารถใช้การสื่อสารได้ทั้งแบบ TDMA (Time Division Multiple Access) และ CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance) สำหรับการสื่อสารแบบ TDMA อุปกรณ์ Tag แต่ละชิ้นจะได้รับการจัดสรรช่องเวลาสำหรับการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์เกตเวย์ โดยมีช่วงเวลาทีลงตัวเป็นจังหวะ และมีการกำหนดหมายเลขตัวตนของอุปกรณ์เกตเวย์ที่ต้องการจะสื่อสารเป็นการป้องกันมิให้อุปกรณ์ Tag หลาย ๆ ชิ้นส่งข้อมูลออกมาพร้อมกันและเกิดการชนกันของข้อมูลบนคลื่นความถี่วิทยุ





รูปที่ 2.6 อุปกรณ์เกตเวย์หลัก ทำหน้าที่เป็นโหนดสำหรับติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์เกตเวย์อื่น ๆ

อุปกรณ์เกตเวย์แต่ละตัวในเครือข่าย Ultra Wideband จะทำการคำนวณระยะห่างกับอุปกรณ์ Tag และส่งค่าระยะทางผ่านคลื่นความถี่วิทยุไปยังอุปกรณ์เกตเวย์หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อุปกรณ์เกตเวย์หลักจะนำข้อมูลระยะห่างจากเกตเวย์แต่ละตัวไปทำการคำนวณโดยใช้อัลกอริทึมสำหรับคำนวณตำแหน่งที่อยู่ของอุปกรณ์ Tag ที่ต้องการทราบตำแหน่ง และข้อมูลตำแหน่งที่อยู่นั้นไปยังอุปกรณ์เซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ห่างออกไปผ่านทางเครือข่ายสื่อสาร เช่น เครือข่ายอินเทอร์เน็ต

ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของเครือข่าย Ultra Wideband เป็นดังนี้

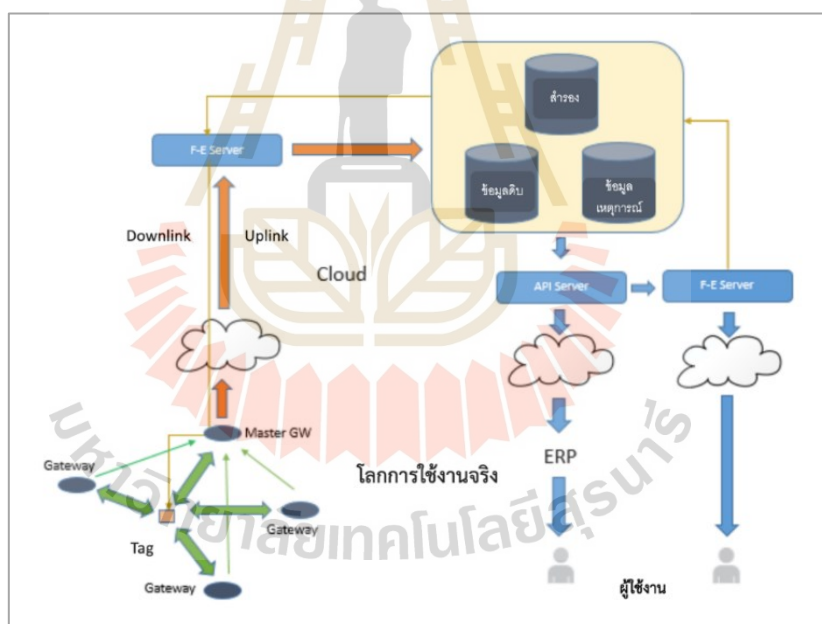
- 1) ความแม่นยำในระดับ 1 เซนติเมตร
- 2) ตรวจจับตำแหน่งของอุปกรณ์ Tag ได้ในระยะ 30 เมตร สำหรับการส่งคลื่นวิทยุแบบมีสิ่งกีดขวาง (Non Line of Sight) และ 300 เมตร สำหรับการส่งคลื่นวิทยุแบบไม่มีสิ่งกีดขวาง
- 3) สามารถตรวจจับอุปกรณ์ Tag ได้มากถึง 11,000 ชิ้นในรัศมีทำการ 20 เมตร
- 4) มีความเชื่อถือของการวัดได้สูง ตอบสนองแจ้งข้อมูลได้ในเวลาที่เที่ยงตรงและคงที่ทุก ๆ การตรวจจับตำแหน่ง
- 5) ใช้พลังงานต่ำ อุปกรณ์ Tag ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 100 นาโนแอมแปร์ในสถานะจำศีล (Sleep Mode) ทำให้สามารถใช้งาน Tag ได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานอย่างน้อย 3 ปี โดยจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่แบบ CR พลังงานไฟฟ้า 600 มิลลิแอมแปร์ชั่วโมง
- 6) การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ Tag กับเกตเวย์ และเกตเวย์กับเกตเวย์หลักผ่านการสื่อสารทางคลื่นวิทยุโดยสมบูรณ์แบบ ไม่ต้องเดินสายหรือวางเครือข่ายสื่อสารทางสายสนับสนุนใด
- 7) มีความต้านทานต่อการแทรกสอดของสัญญาณคลื่นวิทยุที่สะท้อนกับสิ่งกีดขวางต่าง ๆ (Multipath Fading) ได้ดีมาก ทำให้สามารถติดตั้งใช้งานเกตเวย์ได้โดยไม่ต้องมีการวางแผนออกแบบและตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้งอย่างไร้

8) สามารถกำหนดความถี่คลื่นวิทยุสำหรับใช้งานได้โดยไม่ต้องอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial, Scientific and Medical) band ทำให้สามารถออกแบบวางเครือข่ายได้โดยไม่ต้องกังวลการเกิดสัญญาณรบกวนหรือถูกรบกวนจากสัญญาณคลื่นวิทยุอื่น ๆ ได้

9) สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์แบบ MEM (Micro Electro Mechanical Sensors) เพิ่มเข้าไปในอุปกรณ์ Tag เพื่อเพิ่มความแม่นยำและเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับตำแหน่งให้สูงขึ้น

### 2.3.5 สถาปัตยกรรมของเครือข่ายระบบระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband

เครือข่าย Ultra Wideband ทำหน้าที่ในการตรวจสอบและระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ Tag อย่างแม่นยำและส่งข้อมูลดิบ TDOA (Time Difference of Arrival) ที่อุปกรณ์เกตเวย์ แต่ละตัวในเครือข่ายคำนวณระยะห่างจากอุปกรณ์ Tag แต่ละชิ้น และถูกส่งมารวมกันที่อุปกรณ์เกตเวย์หลัก ในเครือข่ายระบบระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นการวางระบบประมวลผลเพื่อทำหน้าที่แปรค่าข้อมูลและเก็บบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ไว้ในระบบคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ประมวลผลตามภาระหน้าที่และความต้องการของการใช้งานในแต่ละภาคอุตสาหกรรม องค์กรประกอบของเครือข่ายประกอบด้วย



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสถาปัตยกรรมของเครือข่ายระบบระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband

เครือข่าย Ultra Wideband (UWB) ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพสูง โดยในระบบนี้มีการใช้เครือข่ายสื่อสารเพื่อเชื่อมโยงเครือข่าย UWB เข้ากับเครือข่ายประมวลผล ข้อมูลตำแหน่งที่ได้จากเครือข่าย UWB จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ Front-End เซิร์ฟเวอร์ ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลเหล่านี้ได้อย่างแม่นยำ กระบวนการประมวลผลนี้จะช่วยในการคำนวณและสร้างข้อมูลเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการจัดทำรายงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการปฏิบัติงานทางธุรกิจที่ต้องการ การนำข้อมูลที่ได้ไปใช้งานสามารถทำได้ผ่าน API (Application Program Interface)

ที่เปิดให้ซอฟต์แวร์หรือแอปพลิเคชันต่าง ๆ สามารถเข้าถึงและใช้งานข้อมูลได้ เช่น ระบบบริหารจัดการโรงงาน (WMS) หรือระบบการจัดการทรัพยากรองค์กร (ERP) นอกจากนี้ ข้อมูลที่ถูกประมวลผลยังสามารถส่งกลับไปยังระบบ Front-End เพื่อแสดงภาพรวมของการดำเนินการบน Operation Dashboard ทำให้สามารถติดตามและตรวจสอบการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.4 ปรัชญาบรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 หลักการประมวลผลภาพ

#### 2.4.1.1 หลักการมองเห็นของมนุษย์กับการประมวลผลภาพดิจิทัล

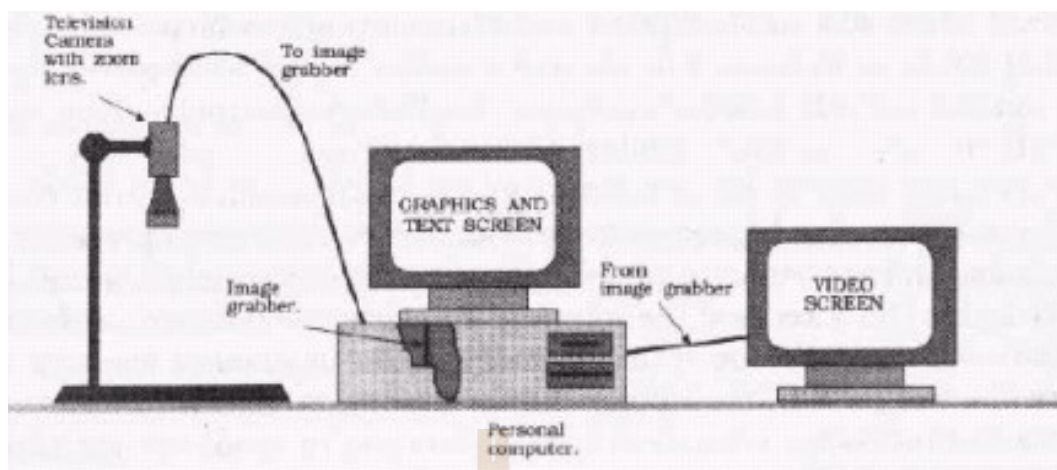
ระบบการมองเห็นของมนุษย์ หากเปรียบเทียบกับปัจจุบันก็คือกล้องถ่ายภาพดิจิทัลและกล้องวิดีโอ อุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูลภาพให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ในการประมวลผลภาพดิจิทัลนิยมใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลหรือกล้องวิดีโอ เนื่องจากให้ภาพที่คมชัดและเหมือนจริง จากนั้นนำข้อมูลภาพที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อไป

2.4.1.2 ขั้นตอนการประมวลผลภาพดิจิทัล ขั้นตอนการประมวลผลภาพจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน

- 1) ขั้นตอนการนำข้อมูลภาพเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์
- 2) ขั้นตอนการนำคอมพิวเตอร์มาพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อประมวลผลภาพ
- 3) ขั้นตอนการแสดงผลภาพ

โดยทั่วไป อุปกรณ์พื้นฐานในการประมวลผลภาพตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นจะประกอบด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่มีอุปกรณ์ตรวจจับภาพ (Frame Grabber Card) ซึ่งจะต่อกับกล้องวิดีโอตัวจับภาพดังรูปที่ 1-2 ขั้นตอนการนำภาพเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นการแปลงสัญญาณภาพทั่วไปซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณภาพดิจิทัลเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถประมวลผลภาพได้ ทั้งนี้สามารถทำได้นำข้อมูลภาพจากตัวจับภาพ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วภาพดิจิทัลที่ได้จากการแปลงสัญญาณจะถูกเก็บในหน่วยความจำที่มีอยู่ในอุปกรณ์ตัวจับภาพ และสามารถนำมาประมวลผลได้โดยการเขียนโปรแกรมภาษาระดับสูงอาทิเช่นภาษา C อุปกรณ์ตัวจับภาพที่นิยมใช้จะสามารถเก็บภาพขนาด 512 x 512 จุดภาพ (Pixel) แต่ละจุดภาพสามารถแสดงระดับเทาได้อย่างน้อย 256 ระดับ ส่วนกล้องวิดีโอที่ใช้ในการเก็บภาพมักจะเป็นกล้อง CCD (Charged Coupled Device Camera) ก่อนการประมวลผลภาพต้องเตรียมข้อมูลภาพซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ปรับปรุงข้อมูลภาพในส่วนที่ไม่คมชัด
- 2) กำจัดสัญญาณรบกวน
- 3) การปรับ Contrast หรือปรับปรุงคุณสมบัติของการมองเห็น เช่น การปรับค่าความเข้มของจุดภาพการกลับข้อมูลภาพ เป็นต้น
- 4) การแบ่งแยกข้อมูลภาพออกจากสีพื้นโดยใช้ค่า threshold
- 5) การแปลงข้อมูลภาพในทางเรขาคณิต เช่น การหมุนภาพ การเปลี่ยนแปลงขนาดภาพ และการแก้ไขตำแหน่งของจุดภาพ
- 6) การแก้ไขข้อมูลภาพในส่วนที่มีการผิดเพี้ยน



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์พื้นฐานสำหรับระบบประมวลผลภาพ

#### 2.4.1.3 การแปลงภาพดิจิทัล

สิ่งมองเห็นที่เป็นภาพทั่วไปจะเป็นลักษณะสัญญาณแบบอนาล็อก ซึ่งจะสามารถกำหนดให้เป็นฟังก์ชันความเข้ม 2 มิติ (Two-dimensional light intensity function)  $f(x, y)$  โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นตำแหน่งพิกัดของภาพ ส่วนค่าของ  $f$  ที่ตำแหน่ง  $(x, y)$  นั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มหรือระดับเทาของภาพที่ตำแหน่งนั้น ซึ่งค่า  $f(x, y)$  จะมีค่ามากกว่า 0 กล่าวคือ

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (1.1)$$

โดยทั่วไปค่าระดับความเข้มของแสง  $f(x, y)$  จะขึ้นกับองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ 1) ค่า Illumination ซึ่งเป็นค่าระดับแสงที่มองเห็นและ 2) ค่า Reflection ซึ่งเป็นค่าระดับที่สะท้อนมาจากวัตถุ ค่าทั้งสองนี้อาจกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน  $i(x, y)$  และ  $r(x, y)$  ตามลำดับและค่า  $f(x, y)$  จะเป็นผลคูณของค่าทั้งสอง

$$f(x, y) = i(x, y) r(x, y) \quad (1.2)$$

โดยที่

$$0 < i(x, y) < \infty \quad (1.3)$$

และ

$$0 < r(x, y) < \infty \quad (1.4)$$

ค่าโดยเฉลี่ยสำหรับสภาพสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ  $i(x, y)$  และ  $r(x, y)$  สำหรับวัตถุ (วัสดุ) ต่าง ๆ จะเป็นดังนี้

$$r(x, y) = \begin{cases} 0.01 & \text{black velvet} \\ 0.65 & \text{stainless steel} \\ 0.80 & \text{flat white paint} \\ 0.90 & \text{silver plated metal} \\ 0.93 & \text{snow} \end{cases} \quad (1.5)$$

และ

$$i(x, y) = \begin{cases} 9000 & \text{clear sunny day} \\ 1000 & \text{cloudy day} \\ 0.01 & \text{full moon night} \\ 100 & \text{inside office} \end{cases} \quad (1.6)$$

โดยทั่วไป จะกำหนดค่าระดับความเข้มของแสงในกรณีของภาพโมนอโครม  $f$  ที่พิกัด  $(x, y)$  เป็นค่าระดับเทา  $L$  ซึ่งมีค่าดังนี้

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} \quad (1.7)$$

โดยที่  $L_{min}$  จะมีค่าเป็น  $L_{min} = i_{min} r_{min} \approx 0.005$  และ  $L_{max}$  จะมีค่าเป็น  $L_{max} = i_{max} r_{max} \approx 100$

#### 2.4.1.4 ลักษณะของแฟ้มการเก็บภาพให้อยู่ในระบบข้อมูลแบบดิจิทัล

ลักษณะของแฟ้มข้อมูลภาพจะมีการกำหนดตำแหน่งเหมือนกับเมทริกซ์โดยที่จำนวนคอลัมน์ (Column) และแถว (Row) จะแทนจำนวนจุดภาพของภาพเช่นภาพขนาด  $256 \times 256$  หมายถึงแฟ้มข้อมูลของภาพดังกล่าวมีขนาด 256 คอลัมน์ และ 256 แถว จากรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าแฟ้มข้อมูลภาพประกอบไปด้วยสมาชิกของเมทริกซ์ทั้งหมด  $i \times j$  ตัวและที่ตำแหน่งในเมทริกซ์ต่างๆ ก็จะมี  $f(i, j)$  ซึ่งเป็นค่าระดับความเข้ม (Gray Level) ของภาพที่จุดนั้น

$$A = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & f(1,3) & \dots & f(1,256) \\ f(2,1) & f(2,2) & f(2,3) & \dots & f(2,256) \\ f(3,1) & f(3,2) & f(3,3) & \dots & f(3,256) \\ - & - & - & & - \\ f(256,1) & f(256,2) & f(256,3) & \dots & f(256,256) \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2.9 เมทริกซ์ของรูปขนาด  $256 \times 256$  พิกเซล

### 2.4.1.5 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลภาพ

การเตรียมภาพเป็นขั้นตอนก่อนการแปลงภาพให้เป็นภาพไบนารี ส่วนใหญ่จะเป็นการกรองภาพเพื่อกำจัดการรบกวน (Noise) หรือทำให้ภาพมีคุณภาพที่ดีขึ้นเมื่อได้รับการแปลงไปเป็นภาพไบนารี

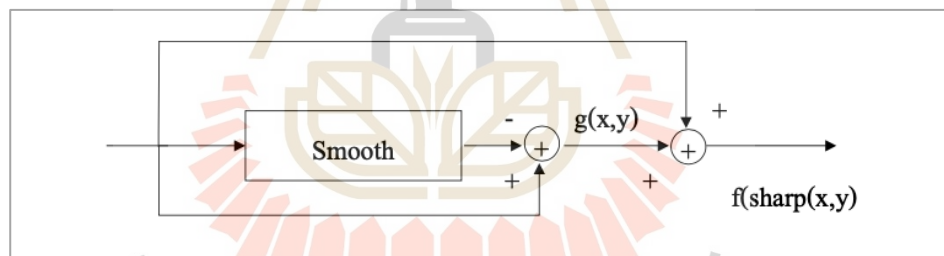
1) การเปลี่ยนแปลงฮิสโตแกรม (Histogram Equalize) เป็นการแปลงฮิสโตแกรมของภาพให้มีค่ากว้างขึ้น ผลของการแปลงทำให้ภาพมีความเข้มที่ดีขึ้น เทคนิคเช่น นี้นิยมมาใช้กับภาพที่ต้องการดูรายละเอียดของภาพที่ซ่อนอยู่โดยไม่คำนึงถึงสีของภาพ

2) การเปลี่ยนแปลงคุณภาพอัตโนมัติ (Auto Level) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอดนิยมมาก เทคนิคดังกล่าวนี้เป็นการเพิ่มความสว่างและความเข้มแสงของภาพโดยไม่มีผลกระทบต่อสีของภาพ นิยมนำมาใช้กับภาพที่ถ่ายแล้วมืด

3) การกรองภาพ (Filtering) การกรองภาพมีอยู่หลายวิธี เช่น Average, Gaussian, Laplacian, LoG, Prewitt Sobel, Unsharp ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการกรองภาพแบบ Unsharp Filter

### 2.4.1.6 วิธีการกรองแบบ Unsharp Filter

วิธีการกรองแบบนี้เป็นการเตรียมภาพก่อนการประมวลผลภาพอีกวิธีหนึ่ง โดยการเพิ่มความคมชัดให้กับภาพ ความเร็วในประมวลผลภาพรวดเร็วเนื่องจากอัลกอริทึมการทำงานที่ไม่ซับซ้อน ลักษณะการทำงานแสดงดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี Unsharp Filter

จากรูปที่ 2.10 เมื่อข้อมูลภาพที่ต้องการปรับปรุงโดยวิธีการนี้ต้องผ่านฟังก์ชันการปรับภาพให้เรียบ จากนั้นนำข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับมาบวกกับข้อมูลภาพเดิมก็จะทำให้ได้ภาพที่คมชัดขึ้นตามสมการ

$$f \text{ sharp} = i(x, y) r(x, y) \quad (1.8)$$

เมื่อค่า  $k$  เป็นค่าในการปรับความคมชัดมีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 0.7 ในกรณีค่า  $k$  มีค่ามากจะถือได้ว่าการกรองจะมีความคมชัดขึ้น

### 2.4.1.7 วิธีการแปลงภาพให้เป็นภาพไบนารี

การแปลงภาพให้เป็นไบนารีเพื่อแปลงค่าภาพก่อนนำไปสู่กระบวนการประมวลผลภาพแบบดิจิทัล (Digital Image Processing) ที่ใช้ในการวิจัยคือการใช้ค่าเทรชโฮลด์

(Threshold) การที่ภาพมีทั้งสีและลำดับชั้นของสี (Shade) ทำให้เกิดลวดลาย ซึ่งระดับความเข้มที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดลวดลายได้คือความเข้ม 2 ระดับหรือที่เรียกว่าไบนารี ส่วนใหญ่คือสีชาวดำ และระดับความเข้มของสีชาวดำที่สามารถเก็บรายละเอียดของภาพได้ทั้งหมดคือ 256 ระดับ ดังนั้นการสร้างอัลกอริทึมจะสามารถจำแนกลวดลายได้รวดเร็วต้องมีการแปลงภาพให้มีระดับความเข้ม 2 ระดับ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลภาพได้ วิธีการที่ใช้กันทั่วไปคือการแปลงภาพโดยใช้ค่า Face Hold ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

สมมติให้  $B[i, j]$  คือภาพไบนารีที่เกิดจากภาพต้นแบบ  $f[i, j]$  ดังนั้น

$$f_T = \begin{cases} 1 & \text{if } f(i, j) > T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.9)$$

โดยที่  $f_T[i, j]$  = ค่าระดับความสว่างที่ตำแหน่ง  $(i, j)$

$T$  = ค่าเทรชโฮลด์

จากสมการข้างต้น ภาพวัตถุ (Object) จะเป็นระดับความเข้มที่สว่าง ส่วนที่มีมืดกว่าจะเป็นพื้นฉาก (Background) แต่ถ้าวัตถุมีความเข้มอยู่ในระดับกลาง ๆ จะหาภาพไบนารีได้จากสมการ

$$f_T[i, j] = \begin{cases} 1 & \text{if } T1 \leq f[i, j] \leq T2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.10)$$

โดยที่  $T1$  = ค่าเทรชโฮลด์ของความเข้มระดับที่ 1

$T2$  = ค่าเทรชโฮลด์ของความเข้มระดับที่ 2

จากสมการจะได้ภาพที่มีความเข้มในระดับกลาง ๆ เป็น 1 ส่วนนอกจากนั้นจะเป็น 0 กรณีที่ในภาพเดียวกันมีส่วนภาพแต่ละส่วนไม่เท่ากัน อาจจะทำให้การแบ่งภาพออกเป็น ส่วน ๆ แล้วใช้ค่าเทรชโฮลด์อัตโนมัติ (Automatic Threshold)

#### 2.4.1.8 การหาขอบภาพ

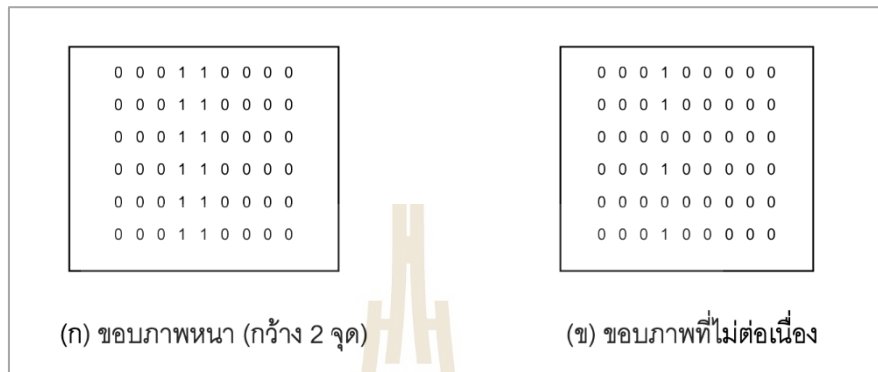
การหาขอบภาพเป็นการหาขอบเขตของวัตถุภายในภาพ ซึ่งขอบเขตของวัตถุจะเป็นที่เด่นและมีความสำคัญมากที่สุดที่จะนำไปสู่การรู้จักวัตถุนั้น ๆ โดยคอมพิวเตอร์จะเห็นได้ว่าการหาขอบเป็นการหาจุดเด่นของวัตถุนั่นเอง ลักษณะที่เด่นของของวัตถุที่มองเห็นโดยทั่วไปก็คือส่วนที่เป็นสัน หรือส่วนที่เป็นขอบของวัตถุ เมื่อมีแสงมากระทบก็จะมีแสงสว่างมากกว่าส่วนอื่น โดยทั่วไปลักษณะของขอบภาพที่ดีจะเป็นดังนี้

1) มีความบาง คือจุดที่เป็นขอบภาพจะต้องมีความกว้างเพียงจุดเดียวเท่านั้น

2) มีความต่อเนื่อง โดยจุดของขอบภาพในวัตถุเดียวกันมีความต่อเนื่องกัน ถ้าจุดที่เป็นขอบภาพมีอยู่เพียงจุดเดียวโดยไม่ต่อเนื่องกับจุดใดในย่านใกล้เคียงเลย อาจจะเป็นขอบภาพที่ไม่สมบูรณ์หรืออาจจะเป็นสัญญาณรบกวนได้

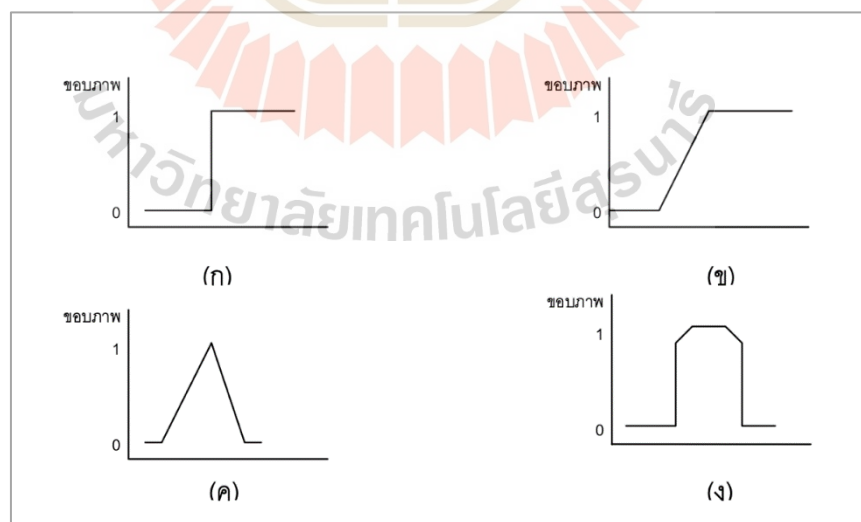
3) ตำแหน่งของจุดที่เป็นขอบภาพควรมีความถูกต้อง โดยขอบที่มีความถูกต้องนั้นจะต้อง อยู่ในส่วนที่มีความความเข้มของจุดภาพที่สูงกว่า

รูปที่ 2.11 แสดงขอบภาพโดยใช้ตัวเลขในลักษณะต่าง ๆ รูปที่ 2.11(ก) แสดงขอบภาพที่มีความหนา และรูปที่ 2.11(ข) เป็นขอบภาพที่ไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของขอบภาพแบบต่าง ๆ

รูปแบบของขอบภาพที่ปรากฏในรูปภาพโดยทั่วไป ประกอบไปด้วยขอบภาพหลายชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย 2.12(ก) เป็นขอบภาพที่เปลี่ยนแปลงทันที ขอบภาพชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นภาพที่มนุษย์จำลองขึ้น ส่วนภาพโดยทั่วไปเป็นขอบภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มทีละน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) รูปที่ 2.12(ค) เป็นขอบภาพที่ค่าความเข้มค่อย ๆ เพิ่มขึ้นหรือลดลงทีละน้อย ในลักษณะของรูปหน้าจั่ว และรูป 2.12(ง) แสดงขอบภาพที่เป็นสัน



รูปที่ 2.12 ขอบภาพชนิดต่าง ๆ



การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงมีผลต่อการหาขอบภาพหรือลักษณะทางกายภาพของตัววัตถุ เช่น ลักษณะของพื้นผิวและรูปร่าง คุณสมบัติเหล่านี้เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของรูปภาพที่จะบอกขอบเขตและลักษณะทางกายภาพของวัตถุที่อยู่ในภาพ

## 2.4.2 เทคโนโลยี LIDAR สำหรับสร้างแผนที่

### 2.4.2.1 เทคโนโลยี LIDAR

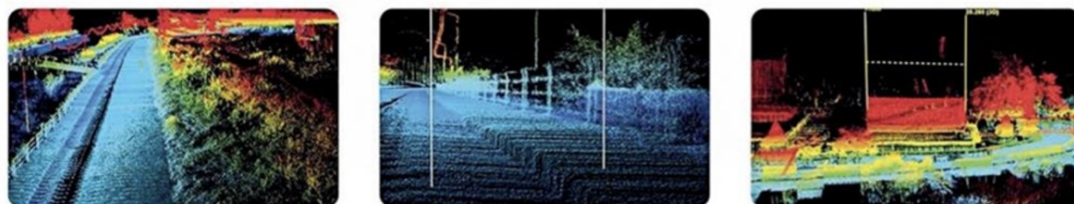
LIDAR ย่อมาจากคำว่า Light Detection And Ranging เป็นเทคโนโลยีการสำรวจที่ใช้วิธีการยิงแสงเลเซอร์ในช่วงคลื่นสั้นกว่าให้ไปตกกระทบกับพื้นผิวภูมิประเทศหรือวัตถุบนพื้นผิวภูมิประเทศที่อุปกรณ์สำรวจผ่านพื้นที่นั้น ซึ่งลำแสงเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกจากเครื่องส่งสัญญาณจะกระทบกับพื้นผิวของวัตถุหรือภูมิประเทศ จากนั้นจึงสะท้อนกลับเข้าสู่เครื่องรับและส่งสัญญาณ ผลที่ได้คือความแตกต่างของระยะเวลาที่ลำแสงเลเซอร์ถูกส่งไปแล้วกระทบกลับมา ทำให้สามารถคำนวณหาระยะทาง ระดับความสูงต่ำของพื้นที่ที่ทำการสำรวจได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ องค์ประกอบในการทำงานของ LIDAR ประกอบด้วยเทคโนโลยี 3 ชนิดคือ

1. การวัดระยะทางด้วยเลเซอร์
2. ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกเพื่อหาตำแหน่งและความสูงของเครื่องรับสัญญาณ
3. เครื่องวัดอาศัยหลักความเฉื่อย (Inertia Measurement Unit หรือ IMU) สำหรับกำหนดการตัวของเครื่องบิน รถ หรือยานพาหนะใด ๆ ได้อย่างแม่นยำ

เทคโนโลยีทั้ง 3 ระบบของ LIDAR ที่ทำงานร่วมกัน ทำให้ได้ข้อมูลบนพื้นที่ภูมิประเทศที่ทำการสำรวจในลักษณะของระยะทางและค่าความสูงของจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวภูมิประเทศ ซึ่งความถูกต้องของการรังวัดด้วย LIDAR ให้ความถูกต้องในแนบราบเท่ากับ 0.5-1.0 เมตร และความถูกต้องในแนวตั้งเท่ากับ 0.15-0.185 เมตร ขึ้นอยู่กับระยะห่างของจุดที่ทำการสำรวจในการสแกนลำแสงด้วยเลเซอร์และความถี่ของการกวาดภาพบนพื้นภูมิประเทศ ถ้าจำนวนจุดมีความหนาแน่นมากก็จะมีจุดที่สำรวจห่างกันเท่ากับ 0.70 เมตร โดยทั่วไปจุดที่ถูกสแกนจากการกวาดภาพบนพื้นภูมิประเทศจะมีระยะห่างกัน 1.40 เมตร

### 2.4.2.2 การสร้างแผนที่ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยี LIDAR

เทคโนโลยีการสร้างแผนที่ 3 มิติด้วยเทคโนโลยี LIDAR มีชื่อเรียกเป็นทางการว่า LI-MA (LIDAR 3D Mapping) เป็นระบบการสร้างแผนที่ 3 มิติ ที่มีพิกัดทางภูมิศาสตร์ได้ ใช้ข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ LIDAR รูปที่ 2.13 เป็นตัวอย่างของการแสดงผลจำลองสภาพทางภูมิศาสตร์โดยการใช้อัลกอริทึมประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ LIDAR



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองสภาพภูมิศาสตร์โดยการใช้อัลกอริทึมประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ LIDAR

## บทที่ 3

### การวางแผนรูปแบบการทดสอบ

#### 3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพและเทคโนโลยี LIDAR ตั้งแต่การออกแบบการทำงาน การสร้างตัวรถ และการนำไปใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ก่อนที่จะพัฒนาเครือข่ายระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง จากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบเครือข่ายระบุตำแหน่งแบบ Ultra Wideband โดยใช้เทคโนโลยี TDOA สำหรับเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งสำหรับการขับเคลื่อนอัตโนมัติของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

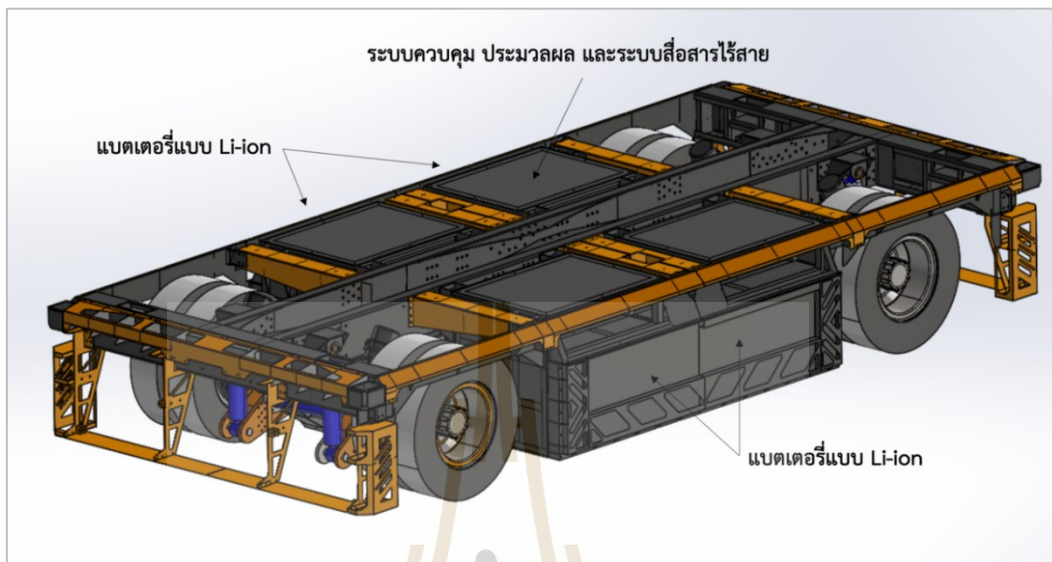
#### 3.2 การออกแบบและสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติได้รับจัดสร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ ณ โรงงานโรงงาน บริษัท มิลล์คอน บูรพา อ่าเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง โดยมีภารกิจในการขนเหล็กเส้นและขยะอุตสาหกรรมจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งภายในโรงงาน ซึ่งผู้สั่งการสามารถกำหนดจุดต้นทางและปลายทางในการขนส่ง ทั้งนี้จะต้องสามารถทำงานได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน กับจะต้องทำงานได้ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร มีการติดตั้งระบบพร้อมระบบสำหรับต้นล้มภาระที่บรรทุกมาได้ สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 30 ตัน ใช้พลังงานไฟฟ้าและสามารถปฏิบัติการได้ต่อเนื่อง 20 ชั่วโมง โดยใช้การประจุไฟฟ้าจนเต็มภายในเวลา 4 ชั่วโมง ผู้ใช้งานสามารถกำหนดจุดต้นทาง ปลายทาง และเส้นทางการขับเคลื่อนของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ผ่านทางแอปพลิเคชันบริหารจัดการ โดยรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถตรวจจับ และทำการตัดสินใจหยุดหรือหลบหลีกสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ด้วยตนเอง ไม่ว่าจะเป็นบุคคล ยานพาหนะทั้งที่จอดนิ่งหรือกำลังเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ โดยใช้เทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR

รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงสุด 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เชื่อมต่อกับศูนย์บริหารจัดการส่วนกลางผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G/4G/5G สำหรับการสั่ง Remote Login จากศูนย์เพื่อตรวจสอบการทำงาน และส่งข้อมูลการปฏิบัติงานสำหรับนำไปประมวลผลและวิเคราะห์ ทั้งนี้ในการเริ่มต้นปฏิบัติการเป็นครั้งแรก จะมีการสั่งการให้รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเดินทางไปในพื้นที่ต่าง ๆ ของโรงงาน และนำข้อมูลที่ได้จากการระบุตำแหน่งทั้งจากเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพและเทคโนโลยี LIDAR ไปประมวลผลสร้างเป็นแผนที่ 3 มิติ (3D Mapping) ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง

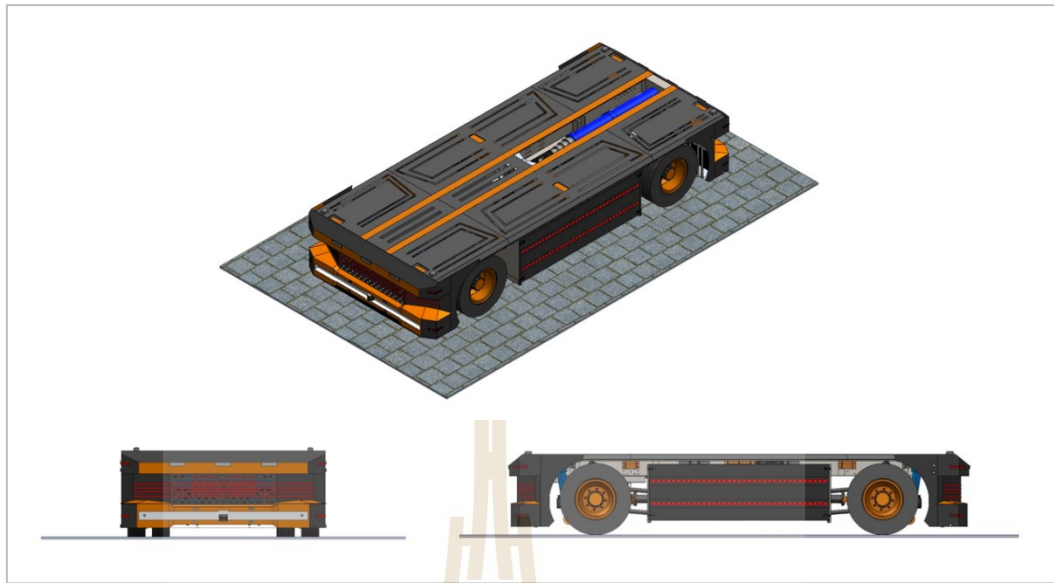
รูปที่ 3.1 เป็นแบบโครงสร้างทางกายภาพของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้พลังงานไฟฟ้า โดยมีการติดตั้งกล้องจำนวน 12 ตัวรอบคันรถเพื่อบันทึกภาพและประมวลผล เป็นการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพ และมีอุปกรณ์รับส่ง LIDAR ที่ด้านหน้าและด้านหลังของรถ ซึ่งในการทำงานจริง รถสามารถขับเคลื่อนไปได้ทั้งสองทิศทาง โดยมีแบตเตอรี่สำหรับจ่ายพลังงาน

ให้กับตัวรถอยู่ที่โครงตัวรถ สำหรับแผงควบคุมการทำงานของรถซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบประมวลผล และระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ ก็จะได้รับติดตั้งอยู่บนแบตเตอรี่

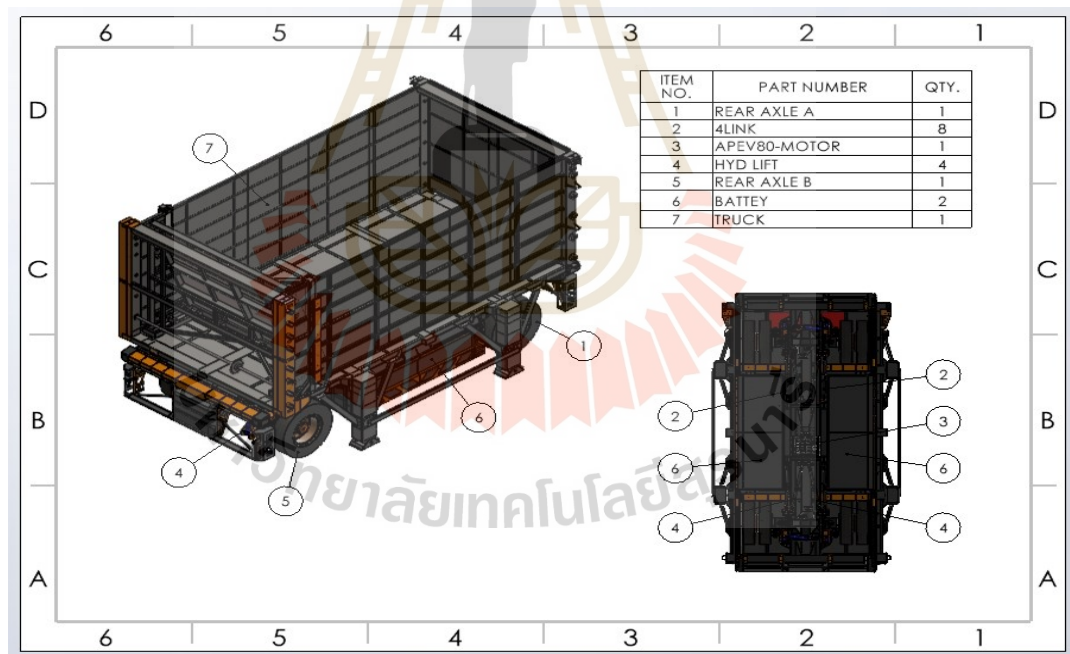


รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางกายภาพของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

รูปที่ 3.2 เป็นแบบร่างของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีการปิดฝาเพื่อใช้สำหรับบรรทุกภาระ (Loading) ต่าง ๆ แสดงมุมมองทั้งด้านหน้า/หลัง และด้านข้างของตัวรถ และรูปที่ 3.3 เป็นการแสดง กระบะบรรทุกของรถ ซึ่งรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติได้รับการออกแบบให้สามารถยกตัวและย่อตัว เพื่อซ้อนรับและประกบกับกระบะบรรทุกเพื่อให้สามารถขนและปล่อยกระบะไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ได้โดยผู้ควบคุมการขนส่งสามารถใช้อุปกรณ์แทปเล็ตที่ติดตั้งแอปพลิเคชันการสั่งการทำงานของรถให้สามารถบรรทุกกระบะขึ้นหนึ่งจากตำแหน่งต้นทางตามที่จะมีการกำหนดไปส่งยังตำแหน่งปลายทาง และให้รถย่อตัวลงเพื่อวางกระบะยังตำแหน่งปลายทาง ซึ่งรถสามารถเดินทางไปยังตัวรับกระบะขึ้นใหม่ ณ อีกตำแหน่งหนึ่งเพื่อไปปล่อยยังตำแหน่งปลายทางอื่น ๆ ได้ตามต้องการ นอกจากนั้นในการปฏิบัติงานจริง ผู้ควบคุมกระบวนการทำงานยังสามารถสั่งการให้รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติสั่งการให้กลไกภายในกระบะทำการดันภาระที่บรรทุกมาลงสู่พื้นที่เป้าหมายได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้รถตักมาทำการตักภาระออกจากกระบะอีกด้วย

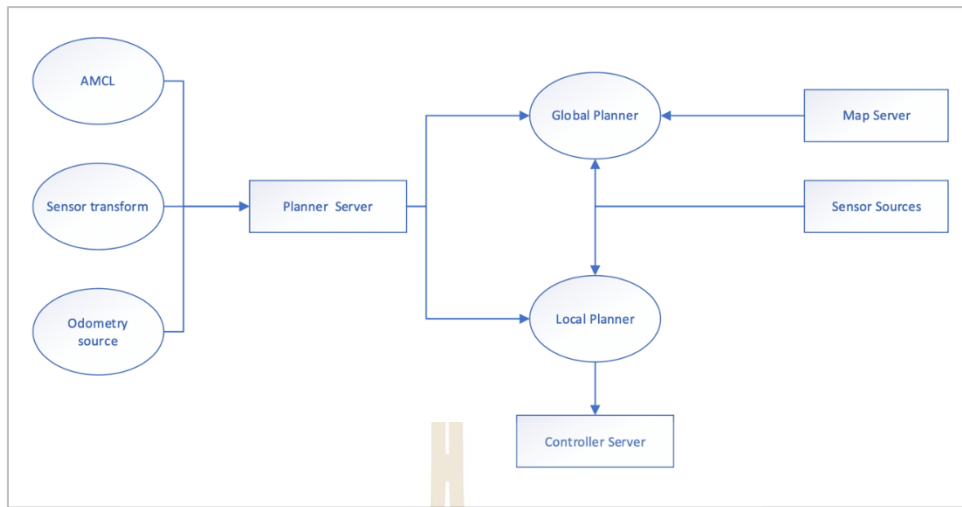


รูปที่ 3.2 แบบร่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีการปิดฝาเพื่อใช้สำหรับบรรทุกภาระ (Loading) ต่าง ๆ



รูปที่ 3.3 รูปแบบของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ติดตั้งกระบะบรรทุก

รูปที่ 3.4 เป็นการแสดงระบบซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยแบ่งหน้าที่การทำงานของซอฟต์แวร์ออกเป็นระบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบทางซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

จากรูปที่ 3.4 เป็นการแสดงองค์ประกอบทางซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยเริ่มจากระบบ AMCL (Adaptive Monte-Carlo Localizer) ซึ่งใช้เทคนิคความน่าจะเป็นในการระบุตำแหน่งของรถในแกน 2 มิติ ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งของรถในพื้นที่ได้อย่างถูกต้อง ระบบ Sensor Transform จะทำการคำนวณค่าอ้างอิงจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนตัวรถ ไม่ว่าจะเป็นกล้องบันทึกภาพจำนวนมากถึง 12 ตัวและอุปกรณ์ LIDAR ที่ติดตั้งด้านหน้าและท้ายรถ ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณตำแหน่งที่แม่นยำของรถบรรทุก ส่วน Odometry Source มีบทบาทในการประมวลผลข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ เช่น Encoder, IMU, GPS, กล้องบันทึกภาพ และ LIDAR เพื่อระบุว่ารถอยู่ที่ตำแหน่งใดเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้นของการเดินทาง Planner Server จะทำหน้าที่ในการประมวลผลและคำนวณเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด เพื่อให้รถบรรทุกเดินทางไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด Global Planner จะเข้ามาช่วยวางแผนเส้นทางหลัก (Global Path) โดยอ้างอิงจากแผนที่ 3 มิติที่ได้ถูกสร้างขึ้นล่วงหน้าและจัดเก็บไว้ใน Map Server ซึ่งเป็นฐานข้อมูลแผนที่ของพื้นที่ที่รถจะเดินทาง ในขณะเดียวกัน Local Planner จะทำงานในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถให้เป็นไปตามเส้นทางหลักที่วางแผนไว้โดย Global Planner โดยจะใช้ข้อมูลจากระบบ odometry และเซ็นเซอร์ LIDAR รวมถึงการวิเคราะห์ภาพในการประมวลผล เพื่อช่วยให้รถสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและปรับความเร็วได้อย่างเหมาะสมตามสภาพแวดล้อม Sensor Sources จะรวบรวมข้อมูลจาก GPS, กล้องบันทึกภาพ และ LIDAR เพื่อสร้างแผนที่ 3 มิติ (3D Mapping) และระบุตำแหน่งของรถ ข้อมูลเหล่านี้จัดเก็บในรูปแบบของ Point Cloud และถูกนำมาใช้โดย Local Planner เพื่อการวางแผนการหลบหลีกและการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน Controller Server จะรับหน้าที่ในการควบคุมระบบเครื่องยนต์ของรถบรรทุก รวมถึงการควบคุมความเร็ว การเลี้ยว และการห้ามล้อ เพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ โดยมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ เมื่อมีการติดตั้งระบบเครือข่าย Ultra Wideband จะทำให้ความแม่นยำในการตอบสนองกับสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้นจากการใช้เซ็นเซอร์มาตรฐานอย่าง GPS, กล้อง และ LIDAR เพียงอย่างเดียว

รูปที่ 3.5 เป็นภาพการเตรียมการและจัดสร้างรถบรรทุกทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ได้รับการจัดสร้างขึ้นและนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ที่โรงงาน บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด อำเภอพัฒนานิคม จังหวัดระยอง โดยมีการดำเนินการศึกษาการทำงานและเทคโนโลยีระบบตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพและเทคโนโลยี LIDAR ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2564 ถึง ธันวาคม 2564 ศึกษาและออกแบบรถบรรทุกทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2564 ถึง ตุลาคม 2564 และเริ่มต้นสร้างรถบรรทุกทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2564 เสร็จสิ้นในเดือนกุมภาพันธ์ 2565 เนื่องจากบริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด มีความจำเป็นเร่งด่วนในการใช้งาน จึงเร่งติดตั้งระบบตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการใช้งานเทคโนโลยี GPS โดยมีการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์จุดด้อยของการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับ LIDAR และ GPS ในช่วงการปฏิบัติงานในระหว่างเดือนมีนาคม 2565 ถึง กันยายน 2565



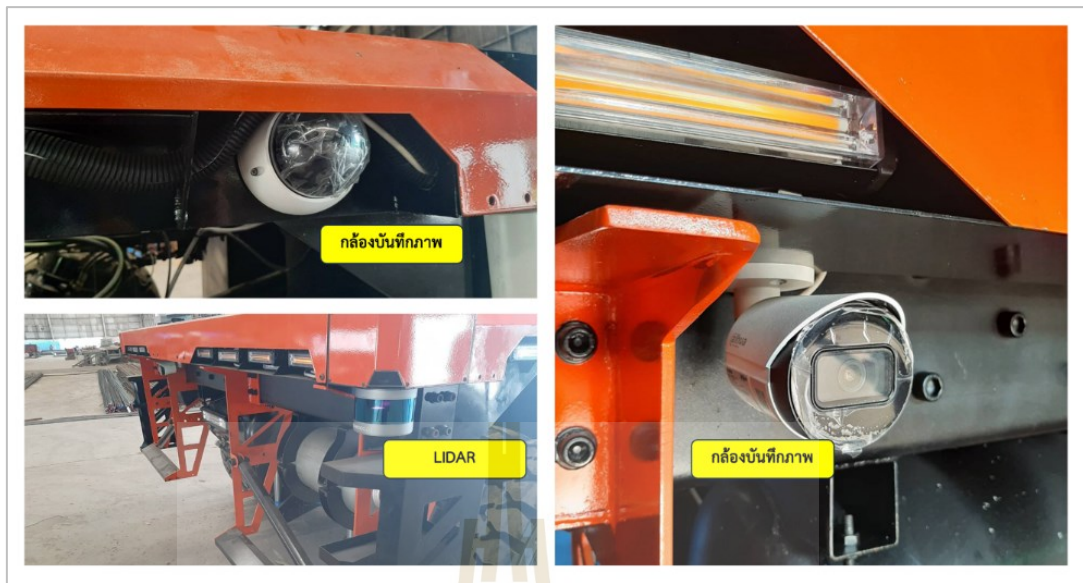
รูปที่ 3.5 การเตรียมการและจัดสร้างรถบรรทุกทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

รูปที่ 3.6 แสดงภาพของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ เป็นการใช้งานในรูปแบบที่มีได้ติดตั้ง กระบะ ใช้สำหรับกรณีการบรรทุกภาระประเภทเหล็กเส้น โดยแผงวางภาระที่เป็นเหล็กสี่เทาซึ่งติดตั้งอยู่บนโครงรถที่ทาสีส้มนั้น จะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับชั่งน้ำหนักการบรรทุกไว้ด้วย ทำให้สามารถบันทึกน้ำหนักบรรทุกต่อรอบ ซึ่งข้อมูลน้ำหนักที่สัมพันธ์กับการบรรทุกในแต่ละเที่ยวจะได้รับการเก็บบันทึกไว้ในระบบควบคุมของรถ ซึ่งผู้ควบคุมสามารถลือคอินผ่านการเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สาย (3G, 4G, 5G) เพื่อดึงข้อมูลต่าง ๆ ตามต้องการ



รูปที่ 3.6 รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติแสดงแผงชั่งน้ำหนัก และการขนภาระภายในพื้นที่ของโรงงาน บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด โดยไม่ได้ติดตั้งกระบะ

รูปที่ 3.7 แสดงเซ็นเซอร์สำหรับใช้ในการสร้างข้อมูลเพื่อระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยประกอบด้วยกล้องบันทึกภาพซึ่งมีติดตั้งอยู่รอบรถเป็นจำนวนทั้งสิ้น 12 กล้อง และอุปกรณ์ LIDAR ที่ด้านหน้าและด้านหลังของรถ นอกจากนี้ภายในแผงควบคุมรถก็มีการติดตั้งอุปกรณ์ GPS เกรตูดอุตสาหกรรม ซึ่งเท่ากับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติมีการนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์ 3 ประเภทคือ GPS กล้องบันทึกภาพรอบรถ และอุปกรณ์ LIDAR ไปสร้างเป็นข้อมูลเพื่อส่งไปให้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Sensor Sources ทำการประมวลผลเพื่อส่งข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลนี้ไปให้กับซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Global Planner และ Local Planner ใช้ สำหรับการกำหนดเส้นทาง และการวางแผนการเดินทางให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลการกำหนดการเดินทางไปให้กับซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Controller Server ในท้ายที่สุด



รูปที่ 3.7 แสดงเซ็นเซอร์ซึ่งประกอบด้วยกล้องบันทึกภาพจำนวน 12 ตัวและอุปกรณ์ LIDAR 2 ตัว ซึ่งติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งหัวและท้ายของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

รูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงแบตเตอรี่แบบ Li-Ion ซึ่งได้รับการออกแบบให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขับเคลื่อนและปฏิบัติหน้าที่ต่อเนื่องได้เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และใช้เวลาในการประจุพลังงานไฟฟ้าจนเต็มภายใน 4 ชั่วโมง นอกจากนี้ที่บริเวณด้านข้างของรถก็มีปั๊มสำหรับให้กดเพื่อหยุดการทำงานของรถในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉิน โดยมีการติดตั้งปั๊มหยุดฉุกเฉินไว้ที่ด้านข้างแต่ละด้านของรถ ซึ่งเป็นพื้นที่ปลอดภัยที่เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมพื้นที่จะสามารถเข้าไปกดปั๊มฉุกเฉินได้ นอกจากนี้รอบตัวรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติยังมีการติดตั้งหลอดไฟ LED เมื่อรถกำลังปฏิบัติภารกิจอยู่ หลอดไฟที่ติดตั้งจะมีการกะพริบ ซึ่งเป็นการสร้างความปลอดภัยสำหรับการปฏิบัติงานขับเคลื่อนอัตโนมัติในยามค่ำคืน หรือภายในพื้นที่ในอาคารที่มีแสงน้อย เพื่อให้ยานพาหนะที่มีผู้ขับขี่เข้าไปในพื้นที่โรงงาน รวมถึงเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานภายในโรงงานได้สังเกตเห็นการเคลื่อนที่ของรถ ซึ่งแม้ว่าซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Local Planner ของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติจะหยุดการเคลื่อนที่ของรถ หรือเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของรถหากพบว่ามีคน ยานพาหนะ หรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถก็ตาม แต่การใช้แสงกะพริบของหลอดไฟ LED ก็จะเป็นการเพิ่มความปลอดภัยของการปฏิบัติงานภายในโรงงานได้มากขึ้น นอกจากนี้เจ้าหน้าที่ที่ทำหน้าที่บริหารจัดการเส้นทางและการทำงานของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติยังสามารถส่งเสียงประกาศออกทางลำโพงที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าและด้านท้ายของรถ สำหรับแจ้งเตือนต่าง ๆ ได้ตามต้องการ





รูปที่ 3.8 แบตเตอรี่ ปั๊มหยุดฉุกเฉิน หลอดไฟ LED และลำโพงสำหรับส่งเสียงประกาศที่ติดตั้งอยู่กับตัวรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ



รูปที่ 3.9 ระบบไฮดรอลิกสำหรับใช้ยกตัวและย่อตัวรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

รูปที่ 3.9 แสดงถึงระบบไฮดรอลิกสำหรับควบคุมการยกตัวขึ้น-ลงของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งใช้สำหรับการยกตัวและย่อตัวเพื่อรองรับภาระที่ได้รับการสร้างขึ้นสำหรับใช้บรรทุกภาระประเภทขยะอุตสาหกรรม และยังใช้สำหรับการยกตัวรถขึ้นในกรณีในพื้นที่ปฏิบัติการเป็นหลุมเป็นบ่อ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุผิวนครูดกับท้องรถซึ่งเป็นจุดที่มีการติดตั้งแบตเตอรี่ และรูปที่ 3.10 เป็นการแสดงการติดตั้งกระบอกสำหรับบรรทุกภาระเข้ากับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยมีจุดเชื่อมต่อระหว่างแผงบรรทุกของรถกับตัวกระบอก โดยกระบอกจะใช้ไฟฟ้าจากรถบรรทุกขับเคลื่อน

อัตโนมัติในการสั่งดำเนินการที่บรรทุกให้ออกจากตัวกระบะไปยังจุดหมาย ซึ่งรถสามารถย่อตัวเพื่อวางกระบะลงในจุดหมายปลายทางได้



รูปที่ 3.10 กระบะสำหรับบรรทุกภาระ ติดตั้งเข้ากับรถบรรทุกอัตโนมัติโดยการยกตัวและย่อตัวของรถ

สำหรับพื้นที่ของการปฏิบัติการในเชิงพาณิชย์ของรถบรรทุกอัตโนมัติ ณ โรงงานของบริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด 99 หมู่ 3 ถนนทางหลวง อำเภอนิคมน้ำจืด จังหวัดระยอง มุ่งเน้นไปที่การติดตั้งกระบะเพื่อขนย้ายขยะอุตสาหกรรมที่โรงงานรับซื้อจากต่างประเทศ โดยจะมีรถบรรทุกจากภายนอกขนขยะอุตสาหกรรมมากอง ณ จุดกองวัสดุ ซึ่งมีอยู่ทั้งสิ้น 6 จุด ดังแสดงด้วยหมายเลข 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 3.12 โดยรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติมีภารกิจในการขนย้ายขยะอุตสาหกรรมจากกองวัสดุทั้งหมดไปส่งยังจุดรวมขยะก่อนการนำไปหลอมที่ตำแหน่งหมายเลข 0 โดยมีเส้นทางในการวิ่งตามแนวทางวิ่งที่ไปยังกองวัสดุหมายเลข 1 ถึง 6 ไปยังตำแหน่งหมายเลข 0 เพื่อขนขยะไปวาง และวิ่งกลับไปเพื่อรับขยะใหม่ โดยตัวอย่างเส้นทางวิ่งเริ่มจากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B และตำแหน่ง C หลังจากนั้นก็ขึ้นอยู่กับคำสั่งการของผู้ควบคุมว่าในแต่ละวันหรือแต่ละรอบจะให้เดินทางไปกลับระหว่างตำแหน่งหมายเลข 0 กับจุดใดบ้าง ทั้งนี้ในการปฏิบัติการขนขยะอุตสาหกรรมในพื้นที่ของโรงงานนั้นยังคงมีการว่าจ้างรถบรรทุกที่ใช้คนบังคับวิ่งขนขยะไปพร้อม ๆ กับการใช้รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ การตรวจสอบสิ่งกีดขวางโดยเฉพาะรถยนต์ที่มีคนบังคับ ซึ่งมีการวิ่งอยู่บนเส้นทางการปฏิบัติการเดียวกัน พร้อมกับการตัดสินใจหยุดหรือเปลี่ยนเส้นทางของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยคำนึงถึงความปลอดภัยอย่างสูงสุดเป็นสำคัญ



รูปที่ 3.11 พื้นที่การปฏิบัติการของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่โรงงาน มิลล์คอน บุรพา จำกัด

นอกจากนั้น รถบรรทุกอัตโนมัติจะต้องรับหน้าที่ในการขนเหล็กเส้นจากโรงงานเหล็กซึ่งเป็นอาคารที่อยู่ภายในโรงงาน ซึ่งจำเป็นจะต้องย่อตัวเพื่อปลดกระบะออก สำหรับให้เหล็กสามารถวางบนตัวรถได้โดยตรง ดังนั้นในขั้นแรกก่อนที่จะให้รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติปฏิบัติหน้าที่ในพื้นที่ของโรงงาน มิลล์คอน บุรพา จำกัด จึงจำเป็นจะต้องให้รถขับเคลื่อนไปทั่วพื้นที่โรงงาน ทั้งภายในอาคารและนอกอาคาร เพื่อทำการสร้างแผนที่ 3 มิติ ครอบคลุมเส้นทางวิ่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด และให้รถได้สร้างแผนที่ในรูปแบบ Point Cloud เพื่อเป็นฐานข้อมูลหลักก่อนที่จะให้รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติปฏิบัติการ โดยกลไกการทำงานของรถจะเป็นไปตามรูปที่ 3.4

### 3.3 การเตรียมการทดลอง

หลังจากนำรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติปฏิบัติหน้าที่ตามภารกิจในการจัดสร้างที่โรงงาน บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด พร้อมกับทำการเก็บข้อมูลแสดงความแม่นยำาระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีวิเคราะห์จากภาพร่วมกับเทคโนโลยี LIDAR และ GPS ในช่วงการปฏิบัติงานในระหว่างเดือนมีนาคม 2565 ถึงกันยายน 2565 แล้วก็ได้เริ่มทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เพิ่มเติมภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อให้ทำงานได้กับอุปกรณ์โหนดเครือข่าย Ultra Wideband สำหรับการปฏิบัติงานตามภารกิจจริงในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม 2565 จนถึง กันยายน 2565 และได้ติดตั้งอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ในพื้นที่ปฏิบัติงานจริง ณ โรงงาน บริษัทในเดือนตุลาคม 2565 กับทั้งทดสอบการทำงานของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติพร้อมกับปรับแต่งการทำงานของซอฟต์แวร์ภายในรถ เพื่อให้เพิ่มประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

จนกระทั่งสามารถเก็บผลทดลองได้สำเร็จ โดยดำเนินการตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2565 จนถึง กุมภาพันธ์ 2566



รูปที่ 3.12 การติดตั้งโหนด Ultra Wideband จำนวน 4 โหนดในพื้นที่นำร่องที่เป็นสถานที่ปฏิบัติงานจริงที่โรงงาน บริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด

ในการพัฒนาและปรับแต่งขีดความสามารถในการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ได้มีการกำหนดพื้นที่การทดสอบเป็นพื้นที่นำร่องเป็นพื้นที่ระหว่างจุด A และ B ซึ่งเป็นเส้นทางของการปฏิบัติงานจริงของรถตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband จำนวน 4 จุด ณ พื้นที่ปฏิบัติงานจริงดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 3.12 โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ผลิตภัณฑ์โหนด Ultra Wideband รุ่น EVB1000 ที่ผลิตจากบริษัท DecaWAVE ซึ่งมีขีดความสามารถทางเทคนิคดังนี้

1) แผงวงจรมีการติดตั้งหน่วยประมวลผลที่ทำหน้าที่รับส่งคลื่นวิทยุรุ่น DW1000 ของ DecaWave ซึ่งทำงานตามข้อกำหนดมาตรฐานการสื่อสารไร้ IEEE802.15.4-2100 UWB ใช้หน่วยประมวลผล STM32F105 ARM Cortex M3 มีพอร์ตเชื่อมต่อแบบ USB มีหน้าจอแสดงผลแบบ LCD และจุดสำหรับเชื่อมต่อสายอากาศภายนอก

2) ภายในแผงวงจรรุ่น EVB1000 มีการติดตั้งซอฟต์แวร์ การตรวจสอบระยะทางสองทิศทาง ชื่อ “DecaRanging” ซึ่งพัฒนาโดยบริษัท DecaWave เป็นการติดตั้งมาตั้งแต่โรงงาน (Pre-installed)

3) มีไลบรารีสำหรับไดรเวอร์ภาษา C ที่สร้างขึ้นโดยบริษัท DecaWave เพื่อสนับสนุนการพัฒนาซอฟต์แวร์ให้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในการเชื่อมต่อและสื่อสารกับหน่วยประมวลผล ARM

4) มีข้อมูลขาเชื่อมต่อไปยังหน่วยประมวลผล ARM ตามมาตรฐาน JTAG (Joint Test Action Group) เพื่อให้ นักพัฒนาสามารถเข้าถึงขาเชื่อมต่อได้

5) แผงวงจรของโหนด Ultra Wideband มีหน้าจอแสดงผลแบบ LCD สำหรับแจ้งการวัดระยะห่างโดยการควบคุมของซอฟต์แวร์ DecaRanging และนักพัฒนาสามารถเขียนซอฟต์แวร์สั่งการเพิ่มได้เพื่อให้หน้าจอ LCD แสดงรายละเอียดของฟังก์ชันการทำงานอื่น ๆ ได้ตามต้องการ

6) มีการติดตั้งหลอด LED อยู่บนแผงวงจร เพื่อแสดงสถานการณ์ส่งและรับสัญญาณคลื่นวิทยุ และสถานะของข้อมูลข่าวสารอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารของโหนด

7) นักพัฒนาสามารถเชื่อมต่อพอร์ตแบบ USB ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ภายนอกได้เมื่อต้องการ สำหรับใช้สร้างหน้าจอในการรับคำสั่งและแสดงผลที่แสดงรายละเอียดมากขึ้นให้กับผู้ใช้งาน

8) นักพัฒนาสามารถเขียนซอฟต์แวร์ที่หลากหลายเพื่อกำหนดค่าตัวแปรในการสื่อสารไร้สายให้กับหน่วยประมวลผล DW1000 ได้โดยตรง

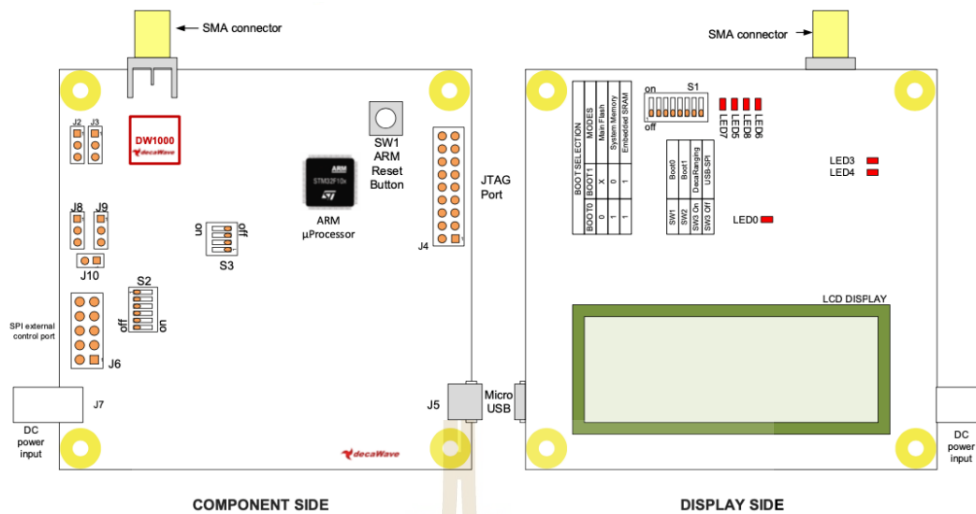
9) จุดสำหรับเชื่อมต่อกับสายอากาศภายนอก ทำให้สามารถทดสอบประสิทธิภาพของเสาอากาศแบบต่าง ๆ เพื่อการปรับใช้งานให้มีประสิทธิภาพในการสื่อสารได้อย่างสูงสุด

10) ภายในแผงวงจรมีการวางจอร์ที่ออกแบบไว้เพื่อให้ นักพัฒนาวัดปริมาณการใช้พลังงานของหน่วยประมวลผล DW1000 ได้โดยตรง

รูปที่ 3.13 แสดงรูปร่างของแผงวงจรรุ่น EVB1000 ที่มีการติดตั้งส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แผงวงจรรุ่น EVB1000 เป็นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยให้นักพัฒนาสามารถเขียนซอฟต์แวร์สั่งการเพื่อประยุกต์ใช้งานการกำหนดระบุตำแหน่ง (RTLS) พร้อมกับการสร้างเครือข่ายเชื่อมต่อไร้สายระหว่างโหนด (WSN หรือ Wireless Sensor Network) จำนวนมากเข้าด้วยกัน ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการระบุตำแหน่งเพื่อการใช้งานในธุรกิจด้านการเกษตร การควบคุมและบริหารจัดการอัตโนมัติภายในอาคาร การบริหารจัดการอัตโนมัติภายในโรงงาน ด้านสุขภาพ ด้านการรักษาความปลอดภัย การบริหารจัดการอาคารคลังสินค้าและโลจิสติกส์ เป็นต้น รูปที่ 3.15 แสดงหลอด LED แสดงผล สวิตช์ควบคุมและฟังก์ชันกับจุดเชื่อมต่อใช้งานของแผงวงจรรุ่น EVB1000 โดยมีการแสดงตำแหน่งของหน่วยประมวลผล DW1000 ที่ทำหน้าที่ในการบริหารจัดการการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ



รูปที่ 3.13 รูปร่างของแผงวงจรรุ่น EVB1000 แสดงทั้งด้านหน้าและด้านหลัง



รูปที่ 3.14 แสดงหลอด LED แสดงผล สวิตช์ควบคุมและฟังก์ชันกับจุดเชื่อมต่อใช้งานของแผงวงจรรุ่น EVB1000

### 3.3.1 รายละเอียดทางเทคนิคของแผงวงจรรุ่น EVB1000

#### 3.3.1.1 สนับสนุนความสามารถการทำงานทั้งหมดของหน่วยประมวลผล DW1000 ประกอบไปด้วย

- 1) แถบความถี่คลื่นวิทยุในการแพร่กระจายทั้งหมด 6 ย่าน โดยมีค่าความถี่กลาง (Center Frequency) ตั้งแต่ 3.5 GHz จนถึง 6.5 GHz
- 2) กำลังส่งของภาคส่งตั้งแต่ -14 dBm จนถึง -10 dBm
- 3) ความหนาแน่นของกำลังส่ง -41.3 dBm/MHz
- 4) ความยาวของข้อมูลส่วน preamble ตั้งแต่ 64  $\mu$ s ถึง 4 ms
- 5) ขนาดของแพ็คเกจข้อมูลขยายได้สูงสุดถึง 1024 ไบต์
- 6) รูปแบบการสื่อสารข้อมูลเป็นไปตามมาตรฐาน SPI (Serial Peripheral Interface)

#### 3.3.1.2 ตัวเลือกในการป้อนพลังงานไฟฟ้า

- 1) จ่ายไฟผ่านทางพอร์ต USB ด้วยแรงดัน 5 โวลต์
- 2) จ่ายไฟผ่านทางขั้วต่อไฟแบบ 2 ขาด้วยแรงดัน 3.3 โวลต์

#### 3.3.1.3 สามารถวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉพาะส่วนของหน่วยประมวลผล DW1000 ได้โดยอิสระ

#### 3.3.1.4 หน่วยประมวลผล STM32F102 ARM Cortex M3

- 1) ความถี่ภายนอก 12 เมกะเฮิร์ตซ์
- 2) ความถี่ RTC 32.768 กิโลเฮิร์ตซ์
- 3) มีจุดเชื่อมต่อแบบ USB และจุดเชื่อมต่อแบบ SPI ไปยังหน่วยประมวลผล DW1000

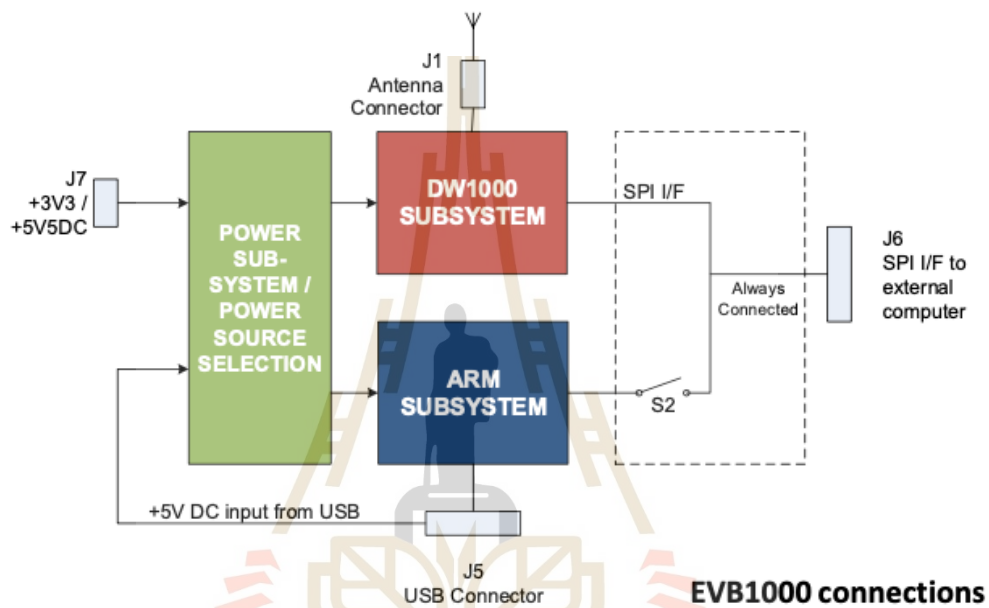
#### 3.3.1.5 ขนาดของแผงวงจร 70 x 30 มิลลิเมตร

### 3.3.1.6 จอแสดงผลแบบ LCD แสดงผลได้ 2 บรรทัด

1) แสดงระยะทางที่วัดได้จากการใช้ซอฟต์แวร์ “DecaRanging” ของ DecaWave

2) สามารถเขียนซอฟต์แวร์สั่งการและควบคุมได้ตามความต้องการของนักพัฒนา

### 3.3.1.7 DecaWave มีตัวเลือกแอปพลิเคชันเพิ่มเติมทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์



รูปที่ 3.15 แสดงการเชื่อมต่อภายในแผงวงจร EVB1000

รูปที่ 3.17 เป็นอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ที่ได้รับการสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีแผงวงจร EVB1000 ซึ่งนำไปติดตั้งที่ลานขนส่งภายในโรงงานของ บริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด โดยติดตั้งอยู่ระหว่างทางวิ่งระหว่างจุด A ไปยังจุด B ตามรูปที่ 3.12 ซึ่งมีการสร้างโหนดขึ้นมาเป็นจำนวนทั้งสิ้น 4 โหนด และติดตั้งตามตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 3.13 โดยกำหนดชื่อทั้งในการเรียกขานทางกายภาพ และการอ้างอิงในระบบซอฟต์แวร์ของเครือข่าย Ultra Wideband ที่ติดตั้งในการวิจัยนี้ว่า A1, A2, A3 และ A4 ทั้งนี้ในการติดตั้งอุปกรณ์เกตเวย์ Ultra Wideband ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า โหนด ในการใช้งานจริงไม่จำเป็นจะต้องกำหนดระยะระหว่างอุปกรณ์โหนดใด ๆ หรือวางตำแหน่งอุปกรณ์โหนดใด ๆ ให้เป็นไปตามการทดสอบครั้งนี้ เพราะเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์โหนดและเริ่มส่งการให้โหนดทำงานแล้ว โหนดแต่ละจุดจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและจะตรวจพบสัญญาณจากโหนดจุดอื่น ๆ และจะคำนวณระยะห่างระหว่างแต่ละโหนดขึ้นมาเอง รูปที่ 3.18 เป็นการระยะห่างระหว่างโหนดแต่ละจุดซึ่งซอฟต์แวร์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นคำนวณค่าได้จากการประมวลผลของหน่วยประมวลผล DW1000 ที่เป็นส่วนประกอบภายในแผงวงจร EVB1000 โดยตัวอย่างระยะห่างระหว่างโหนดที่ซอฟต์แวร์ตรวจสอบได้จะเป็นดังนี้



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ที่ได้รับการสร้างขึ้นจากแผงวงจร EVB1000



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างระยะห่างระหว่างโหนด Ultra Wideband ที่โหนดตรวจสอบและคำนวณได้

ระยะห่างในแนวเส้นตรงระหว่างโหนดต่าง ๆ ถูกกำหนดไว้ดังนี้: โหนด A1 กับ A2 มีระยะห่าง 23.61 เมตร, โหนด A1 กับ A3 มีระยะห่าง 53.80 เมตร, และโหนด A1 กับ A4 มีระยะห่าง 81.81 เมตร ในขณะที่ระยะห่างระหว่างโหนด A2 กับ A3 คือ 38.35 เมตร และระยะห่างระหว่างโหนด A2 กับ A4 คือ 67.37 เมตร



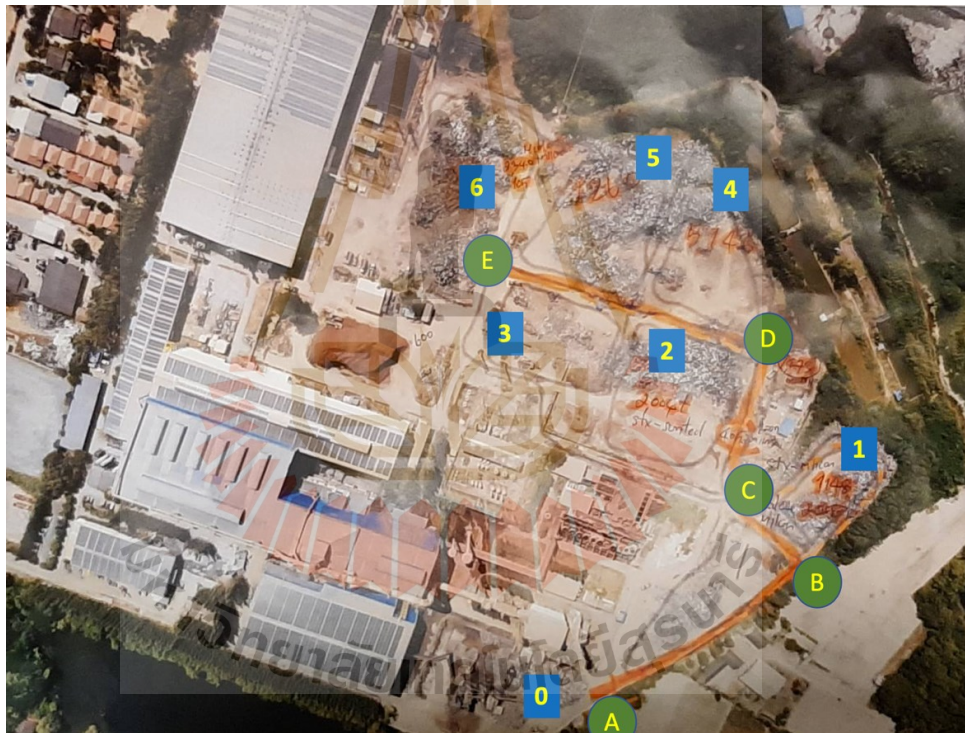


รูปที่ 3.18 การติดตั้งอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ณ พื้นที่การปฏิบัติการของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ

รูปที่ 3.19 เป็นการติดตั้งอุปกรณ์โหนดทั้ง 4 จุด ณ พื้นที่ปฏิบัติการขนส่งภายในโรงงาน อุปกรณ์โหนดได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน IP67 และซึ่งสามารถทำงานได้โดยมีความทนทานต่อสภาพความชื้นและการเกิดฝนตก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแผงวงจร EVB1000 เพื่อทำหน้าที่เป็น Tag โดยโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์และสถาปัตยกรรมของอุปกรณ์ Tag ที่ติดตั้งเพิ่มไปในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติก็จะมีลักษณะเดียวกับอุปกรณ์โหนดทั้ง 4 ชุดที่มีการติดตั้ง ณ ตำแหน่ง A1, A2, A3 และ A4 ดังนั้นในการปฏิบัติการกิจจริงของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีการเพิ่มขีดความสามารถการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี Ultra Wideband ในงานวิจัยนี้มีอุปกรณ์โหนดอยู่ทั้งสิ้น 5 จุด

### 3.4 วิธีทดลอง

การอ่านค่าระยะทางระหว่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ AMCL และ Sensor Transform ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยเปรียบเทียบระหว่างการเปิดใช้งานเทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและเทคโนโลยี GPS ซึ่งได้รับการออกแบบให้ใช้งานในการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกอัตโนมัติสำหรับการปฏิบัติการในเชิงพาณิชย์ของรถบรรทุกอัตโนมัติ ณ โรงงานของบริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด กับการทำงานร่วมระหว่างเทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และเทคโนโลยี UWB ทั้งนี้การเปรียบเทียบความแม่นยำของทั้งสองกรณีจะเทียบกับระยะห่างจริงระหว่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติกับระยะทาง โดยใช้ตำแหน่ง C ในรูปที่ 3.20 เป็นจุดอ้างอิง และทำการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณระยะทางระหว่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติทั้ง 2 ประเภท โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.19 การทดลองใช้จุด C เป็นจุดอ้างอิงในการระบุตำแหน่ง

เก็บค่าระยะห่างระหว่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยให้ขับเคลื่อนจากตำแหน่ง B ไปที่ตำแหน่ง C และบันทึกค่าระยะห่างที่รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติคำนวณได้กับตำแหน่ง C ที่ระยะห่างอ้างอิง 0.5 เมตร 1.0 เมตร 2.0 เมตร 5.0 เมตร และ 10.0 เมตร โดยอ่านค่าระยะห่างของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ระยะห่างจริงทั้ง 5 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ระบุตำแหน่งกับจุด C ทั้งนี้กรณีของการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่ยังไม่ได้รับรวมเทคโนโลยี UWB กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB เข้าไป

เก็บบันทึกค่าระยะห่างของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ระยะต่าง ๆ ทั้ง 5 ระยะ ของการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่ยังไม่ได้อ่านเทคโนโลยี UWB กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB เข้าไป โดยในแต่ละระยะและแต่ละกรณี มีการสั่งการให้รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ไปยังตำแหน่ง C และอ่านค่าที่แต่ละระยะซ้ำ 50 ครั้งต่อกรณี

นำข้อมูลที่บันทึกจากการอ่านค่าในแต่ละระยะ (0.5 เมตร 1.0 เมตร 2.0 เมตร 5.0 เมตร และ 10.0 เมตร) พล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมกระจายตัวของค่าจากซอฟต์แวร์เปรียบเทียบกับระหว่างการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่ยังไม่ได้อ่านเทคโนโลยี UWB กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB

นำข้อมูลที่บันทึกจากการอ่านค่าในแต่ละระยะ (0.5 เมตร 1.0 เมตร 2.0 เมตร 5.0 เมตร และ 10.0 เมตร) เพื่อสร้างตารางทางสถิติแสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเก็บค่า 50 ครั้ง เปรียบเทียบระหว่างการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่ยังไม่ได้อ่านเทคโนโลยี UWB กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB

สรุปผลและอภิปรายถึงความแม่นยำของการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเมื่อเทียบกับระยะห่างอ้างอิง เปรียบเทียบระหว่างการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่ยังไม่ได้อ่านเทคโนโลยี UWB กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB

### 3.5 สรุป

ในบทนี้เราได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์อย่างละเอียดเกี่ยวกับระบบตัวปล่อยความถี่สนามไฟฟ้าความถี่สูง (RF) โดยในกระบวนการนี้ เราได้มุ่งเน้นที่การออกแบบและการวิเคราะห์ของกระบวนการในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกอย่างมีประสิทธิภาพที่สุดในกระบวนการวิเคราะห์ที่ละเอียดนี้ เราได้พิจารณาคูณสมบัติต่าง ๆ ของไดอิเล็กตริกและทำการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ เพื่อเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบตัวปล่อยความถี่สนามไฟฟ้าความถี่สูงแบบแผ่นเพลาการวิเคราะห์และออกแบบนี้ไม่เพียงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตอบสนองต่อการให้ความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังเน้นไปที่การวางแผนและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความถี่สนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อการกำจัดสารปนเปื้อนตะกั่วในดินสำหรับการเพาะปลูกพืช ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบนี้จะถูกนำมาใช้ในการทดลองในบทต่อไป เพื่อหาผลลัพธ์และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงระบบตัวปล่อยความถี่สนามไฟฟ้าความถี่สูงต่อไป การวิเคราะห์และออกแบบนี้ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนในการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กตริกในระบบตัวปล่อยความถี่สนามไฟฟ้าความถี่สูง

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

#### 4.1. กล่าวนำ

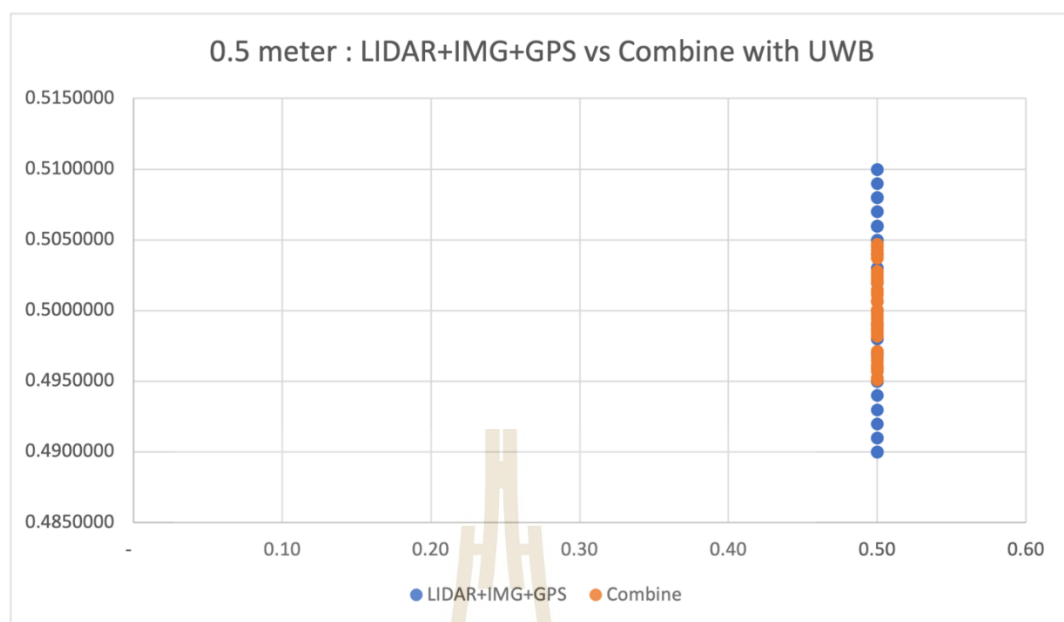
ผลการทดลองเปรียบเทียบการกระจายตัวของการบินที่ค่าระยะห่างระหว่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ภายใต้กรอบการทดลองของการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ไปที่ตำแหน่ง C ที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร 1.0 เมตร 2.0 เมตร 5.0 เมตร และ 10 เมตร เปรียบเทียบระหว่างการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งระหว่างกลุ่มที่หนึ่ง ซึ่งใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งกลุ่มที่สองซึ่งใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB โดยมีการทดสอบซ้ำ 50 ครั้งในแต่ละระยะทางและแต่ละกลุ่มเทคโนโลยี ทั้งนี้ได้ดำเนินการทดลองและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ภายในพื้นที่ปฏิบัติการ ณ โรงงานของบริษัท มิลล์คอน บุรพา จำกัด อำเภอนิคมน้ำอ้น จังหวัดระยอง ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2565 จนถึง กุมภาพันธ์ 2566 ช่วงเวลาปฏิบัติการ 8.00–17.00 น.

#### 4.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่ง

##### 4.2.1 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของการบินที่ค่าที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร การกระจายตัวของข้อมูลที่ทดลองซ้ำ 50 ครั้ง สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีการกระจายของข้อมูลมากกว่าการกระจายตัวของการบินที่ระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะอ้างอิง 0.5 เมตร ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีค่าเท่ากับ 0.500042 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00612152 ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB มีค่าเท่ากับ 0.500170 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00294114 สำหรับผลการทดสอบระบบตัวปล่อยความเข้มสนามไฟฟ้าความถี่สูงโดยการวัดสัญญาณผ่านวงจรลดทอนสัญญาณแบบลดทอนเหนี่ยวนำที่ต่ออยู่กับเครื่องมือออสซิลโลสโคปเพื่อวัดระดับของคลื่นสัญญาณไฟฟ้าของความถี่ที่เกิดจากการส่งผ่านพลังงานไปยังโหลด ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่กระแสลับชั่วขณะที่เกิดขึ้นจากการเรโซแนนซ์กับโหลดจากระบบที่ความเข้มสนามไฟฟ้า เครื่องมือจะแสดงกราฟรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่แตกต่างกัน ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 450, 225, 150 และ 112.5 กิโลโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 0.5 เมตร

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร

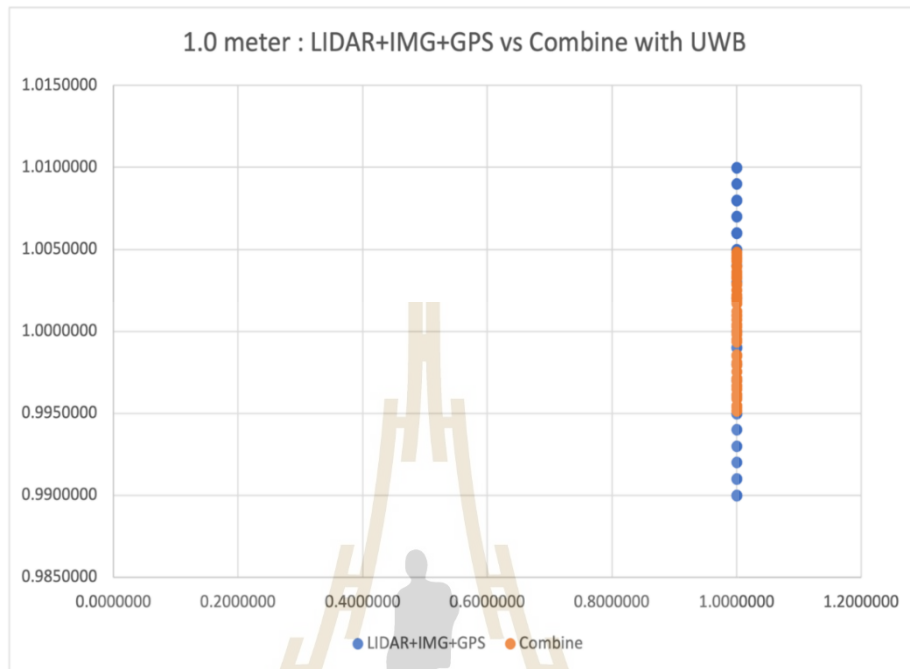
ระยะทางอ้างอิง (เมตร)	เทคโนโลยีการระบุตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยของการวัดระยะ 50 ครั้ง (เมตร)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.5	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ +GPS	0.50042	0.00612152
0.5	LIDAR+การวิเคราะห์จาก ภาพ+GPS+UWB	0.50017	0.00294114

#### 4.2.2 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร

รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของการบันทึกค่าที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร การกระจายตัวของข้อมูลที่ทดลองซ้ำ 50 ครั้ง สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีการกระจายของข้อมูลมากกว่าการกระจายตัวของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะอ้างอิง 1.0 เมตร ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีค่าเท่ากับ 1.00042 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00612152 ค่าเฉลี่ยของ

การคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB มีค่าเท่ากับ 1.00024 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00304835



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 1.0 เมตร

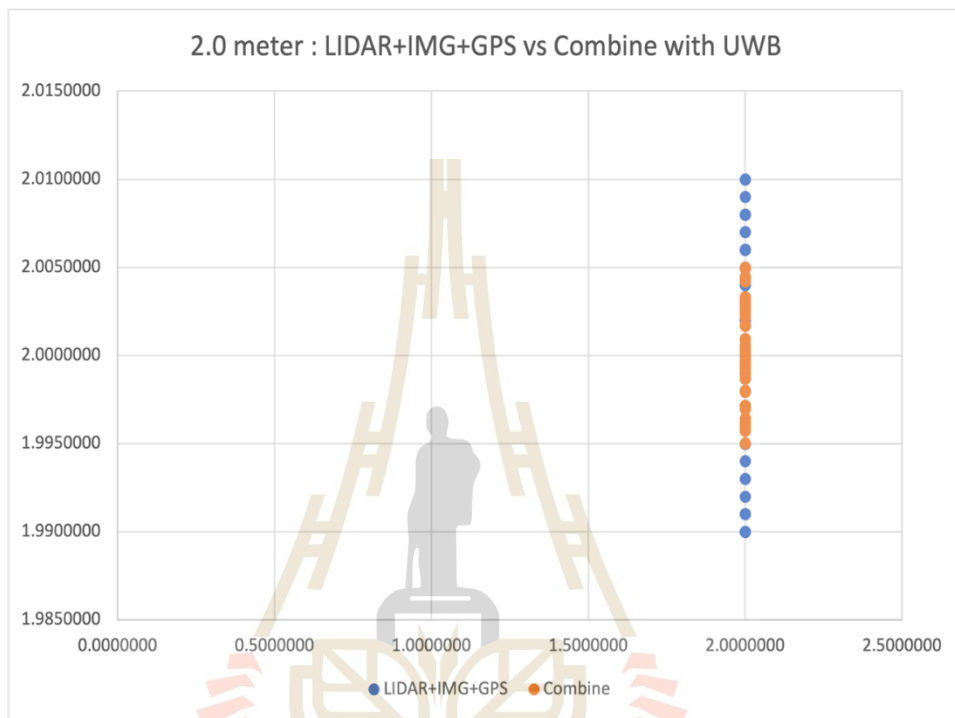
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร

ระยะทางอ้างอิง (เมตร)	เทคโนโลยีการระบุตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยของการวัดระยะซ้ำ 50 ครั้ง (เมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.0	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	1.00042	0.00612152
1.0	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS+UWB	1.00024	0.00304835

#### 4.2.3 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 2.0 เมตร

รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของการบันทึกค่าที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่ระยะทางอ้างอิง 2.0 เมตร การกระจายตัวของข้อมูลที่ทดลองซ้ำ 50 ครั้ง สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีการกระจายของข้อมูลมากกว่าการกระจายตัวของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะอ้างอิง 2.0 เมตร ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และ เทคโนโลยี GPS มีค่าเท่ากับ 2.00042 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00612152 ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB มีค่าเท่ากับ 2.00012 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00278237



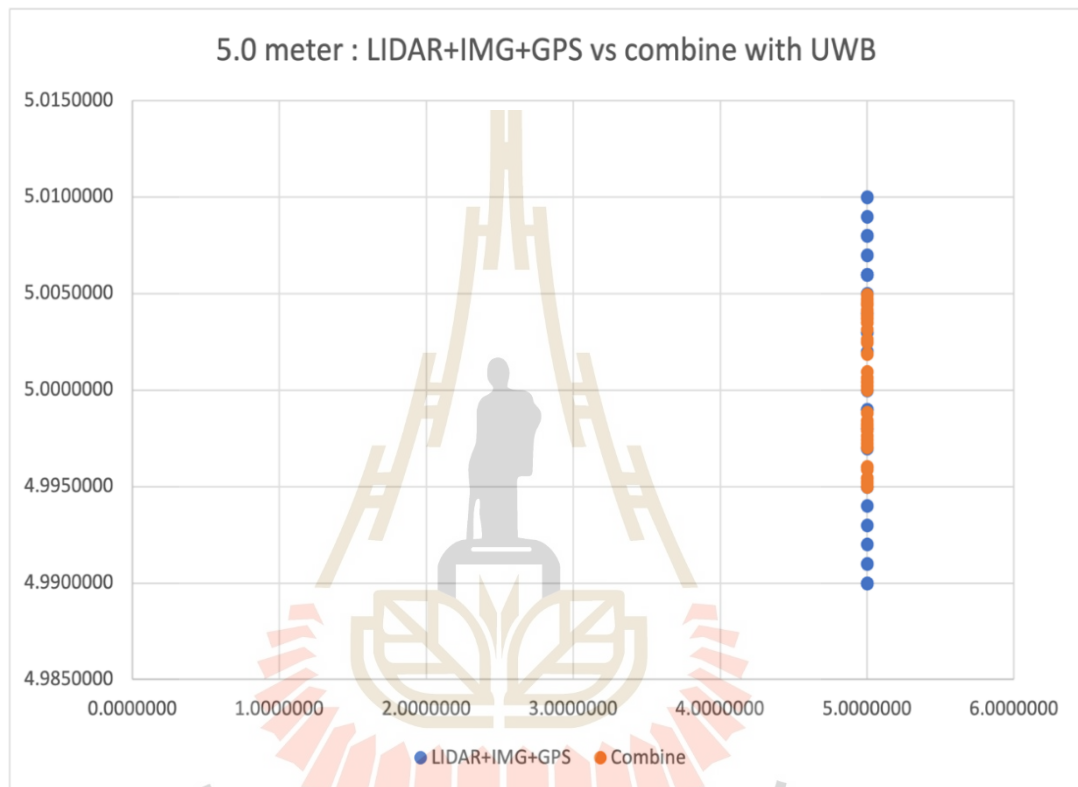
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 2.0 เมตร

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 2.0 เมตร

ระยะทางอ้างอิง (เมตร)	เทคโนโลยีการระบุตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยของการวัดระยะซ้ำ 50 ครั้ง (เมตร)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2.0	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	2.00042	0.00612152
2.0	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS+UWB	2.00012	0.00278237

#### 4.2.4 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร

รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของการบันทึกค่าที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร การกระจายตัวของข้อมูลที่ทดลองซ้ำ 50 ครั้ง สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีการกระจายของข้อมูลมากกว่าการกระจายตัวของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะทางในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 5.0 เมตร

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะอ้างอิง 5.0 เมตร ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีค่าเท่ากับ 5.00042 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00612152 ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB มีค่าเท่ากับ 5.00017 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00334398



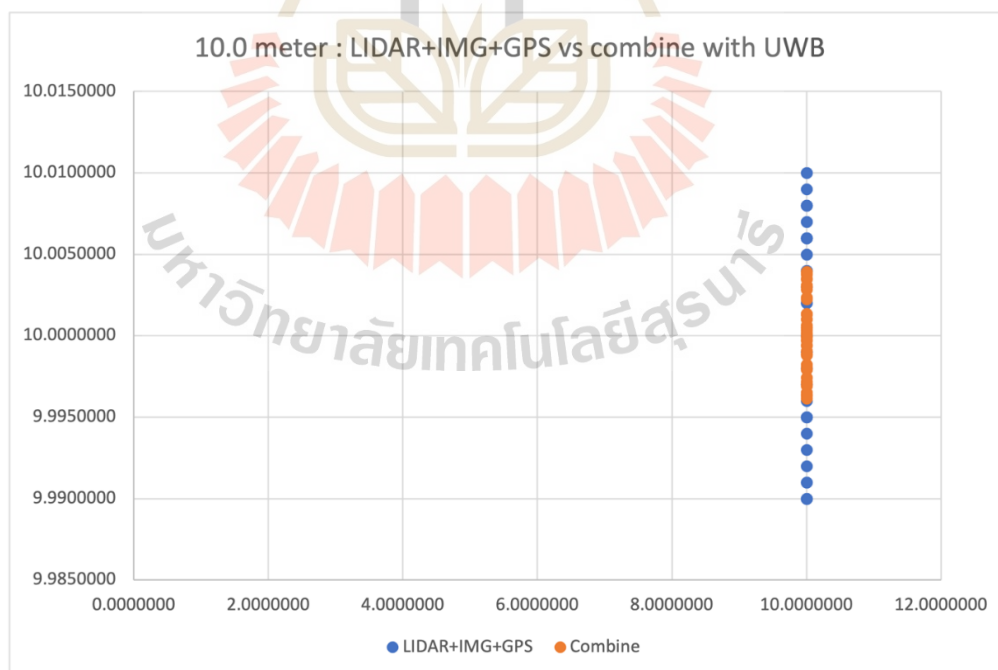
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร

ระยะทางอ้างอิง (เมตร)	เทคโนโลยีการระบุตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยของการวัดระยะ ซ้ำ 50 ครั้ง (เมตร)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5.0	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	5.00042	0.00612152
5.0	LIDAR+การวิเคราะห์จาก ภาพ+GPS+UWB	5.00017	0.00334398

#### 4.2.5 ผลการทดลองที่ระยะทางอ้างอิง 10.0 เมตร

รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายตัวของการบันทึกค่าที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร การกระจายตัวของข้อมูลที่ทดลองซ้ำ 50 ครั้ง สำหรับการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีการกระจายของข้อมูลมากกว่าการกระจายตัวของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะอ้างอิง 10.0 เมตร ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS มีค่าเท่ากับ 10.00042 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00612152 ค่าเฉลี่ยของการคำนวณค่าระยะทางโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB มีค่าเท่ากับ 10.00000 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.00235599



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าระยะห่างในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้อุปกรณ์เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS กับการระบุตำแหน่งที่รวมเทคโนโลยี UWB ที่ระยะอ้างอิง 10.0 เมตร

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 10.0 เมตร

ระยะทางอ้างอิง (เมตร)	เทคโนโลยีการระบุตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยของการวัดระยะ ซ้ำ 50 ครั้ง (เมตร)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
10.0	LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	10.00042	0.00612152
10.0	LIDAR+การวิเคราะห์จาก ภาพ+GPS+UWB	10.00000	0.00235599

#### 4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

เนื่องจากรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติมีช่วงเวลาในการปฏิบัติการกิจวันละ 16 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 6.00 น. ถึง 24.00 น. และใช้เวลาช่วง 24.00 น. ถึง 6.00 น. ในการประจุพลังงานสำหรับการปฏิบัติหน้าที่ในวันถัดไป นอกจากนี้บางช่วงเวลาในระหว่างวัน โรงงานของบริษัทมีลิฟต์คอนกรีตบรรทุก จะมีการปฏิบัติการในการหลอมเหล็ก ซึ่งใช้พลังงานความร้อนสูง และมีผลทำให้เกิดฝุ่นออกไซด์จากกระบวนการหลอมเหล็กกระจายในอากาศรอบ ๆ พื้นที่ ซึ่งมีผลกระทบต่อการกระจายตัวของคลื่นแสงที่ใช้ในระบบเซ็นเซอร์ LiDAR กับคลื่นความถี่วิทยุ การวิจัยนี้จึงมีการวัดค่าเพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของการบันทึกค่าระยะห่างระหว่างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ จากตำแหน่ง B ไปที่ตำแหน่ง C ที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร 1.0 เมตร 2.0 เมตร 5.0 เมตร และ 10 เมตร เปรียบเทียบระหว่างการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งระหว่างกลุ่มที่หนึ่ง กับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งกลุ่มที่สอง ซ้ำ 50 ครั้ง เทียบกับการวัดค่าในกรณีของการปฏิบัติการกิจในเวลากลางวัน (ช่วงเวลาทดสอบคือ 19.00–23.00 น.)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 0.5 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี

เทคโนโลยีระบุ ตำแหน่ง	เวลากลางวัน		เวลากลางคืน		เวลากลางวันที่มีกิจกรรม หลอมเหล็ก	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
LIDAR+การ วิเคราะห์จาก ภาพ+GPS	0.50042	0.00612152	0.50075	0.00611685	0.51254	0.01213822
ความแตกต่าง				-0.08%		98.29%
LIDAR+การ วิเคราะห์จาก ภาพ+GPS+UWB	0.50017	0.00294114	0.50013	0.00278697	0.50249	0.00445609
ความแตกต่าง				-5.24%		51.51%

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 1.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี

เทคโนโลยีระบุตำแหน่ง	เวลากลางวัน		เวลากลางคืน		เวลากลางวันที่มีกิจกรรมหลอมเหล็ก	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	1.00042	0.00612152	1.00050	0.00607106	1.01336	0.01314612
ความแตกต่าง				-0.82%		114.75%
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS+UWB	1.00024	0.00304835	0.99970	0.00293201	1.00224	0.00423582
ความแตกต่าง				-3.82%		38.95%

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 2.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี

เทคโนโลยีระบุตำแหน่ง	เวลากลางวัน		เวลากลางคืน		เวลากลางวันที่มีกิจกรรมหลอมเหล็ก	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	2.00042	0.00612152	2.00273	0.00608789	2.01638	0.01309847
ความแตกต่าง				-0.55%		113.97%
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS+UWB	2.00012	0.00278237	1.99920	0.00262845	2.00265	0.00419555
ความแตกต่าง				-5.53%		50.79%

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 5.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี

เทคโนโลยีระบุตำแหน่ง	เวลากลางวัน		เวลากลางคืน		เวลากลางวันที่มีกิจกรรมหลอมเหล็ก	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	5.00042	0.00612152	5.00050	0.00615736	5.01472	0.01338885
ความแตกต่าง				0.59%		118.72%
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS+UWB	5.00017	0.00334398	4.99467	0.00319550	4.99974	0.00488665
ความแตกต่าง				-4.44%		46.13%

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระยะทางอ้างอิง 10.0 เมตร ในสภาพแวดล้อม 3 กรณี

เทคโนโลยีระบุตำแหน่ง	เวลากลางวัน		เวลากลางคืน		เวลากลางวันที่มีกิจกรรมหลอมเหล็ก	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS	10.00042	0.00612152	10.00101	0.00616093	10.01231	0.01507458
ความแตกต่าง				0.64%		146.26%
LIDAR+การวิเคราะห์จากภาพ+GPS+UWB	10.00000	0.00235599	10.00045	0.00222330	9.99561	0.00329605
ความแตกต่าง				-5.63%		39.90%

ผลการวิจัยเปรียบเทียบที่ระยะอ้างอิง 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 และ 10.0 เมตร ตามที่แสดงในตารางที่ 4.6-4.10 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ปฏิบัติการกิจในเวลากลางคืน ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS ไม่มีความแตกต่างจากการปฏิบัติหน้าที่ในเวลากลางวันโดยมีนัยสำคัญ และการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB ยังมีผลทำให้ความแม่นยำของการระบุตำแหน่งเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย (ความเบี่ยงเบนของข้อมูลลดลงในช่วง 3.82% ถึง 5.63%) ทั้งนี้มีความเป็นไปได้

ที่เกิดจากสภาพสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมที่มีต่อคลื่นความถี่วิทยุสำหรับการส่งสัญญาณ UWB ในเวลากลางคืน อันเกิดจากการเปิดใช้งานเครื่องจักรภายในโรงงานถูกปิดลง

สำหรับการเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ปฏิบัติการกิจในเวลากลางวัน กับการปฏิบัติหน้าที่ในเวลากลางวันในช่วงที่โรงงานมีกิจกรรมหลอมเหล็กซึ่งทำให้เกิดฝุ่นออกไซด์ในสภาพอากาศรอบด้าน ค่าเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS ในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นออกไซด์จะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าการปฏิบัติหน้าที่ในเวลากลางวันที่ไม่มีการหลอมเหล็ก นอกนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และเทคโนโลยี GPS ในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นออกไซด์ก็จะมีค่าสูงกว่าในเวลากลางวันที่ไม่มีการหลอมเหล็ก (ความเบี่ยงเบนของเพิ่มมูลเพิ่มขึ้นในช่วง 98.29% ถึง 146.26%) นอกจากนี้ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS และ UWB จะทำให้ค่าเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นออกไซด์ดีขึ้นและกลับมามีค่าใกล้เคียงกับการปฏิบัติการในช่วงเวลากลางวันที่ไม่มีฝุ่นออกไซด์ และยังทำให้ค่าเบี่ยงเบนของข้อมูลดีขึ้นกว่าการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ เทคโนโลยี GPS (ความเบี่ยงเบนของเพิ่มมูลเพิ่มขึ้นในช่วง 38.95% ถึง 51.51%)

#### 4.4 ผลการเปรียบเทียบความถี่วิทยุที่ใช้ในการส่งสัญญาณ UWB

ในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์ชิปเซ็ต EVB1000 ของบริษัท Decawave ซึ่งสามารถรับและส่งสัญญาณคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ 3.244 กิกะเฮิรตซ์ ถึง 6.999 กิกะเฮิรตซ์ โดยมีการแบ่งช่องความถี่ (Frequency Channel) แต่ละช่องมีความกว้างของแถบความถี่ 500 เมกะเฮิรตซ์ และรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 6.8 เมกะบิตต่อวินาที ทั้งนี้ได้มีการทดลองเลือกช่องความถี่ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการปฏิบัติการของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติภายในโรงงานของบริษัทมีลล์คอนบูร์พา จำกัด โดยพิจารณาจากค่า SNR (Signal-to-Noise Ratio) ที่วัดจากการรับสัญญาณที่ถูกส่งจากอุปกรณ์โหมด Ultra Wideband โดยวัดจากอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณที่ติดตั้งอยู่ภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่อยู่ห่างจากอุปกรณ์โหมด Ultra Wideband เป็นระยะทาง 80 เมตร และพบว่าช่องความถี่ที่ใช้ความถี่กลาง 4 กิกะเฮิรตซ์ มีค่า SNR ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับช่องความถี่อื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่า SNR ที่อุปกรณ์เครื่องรับ UWB ที่ติดตั้งบนรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติอ่านค่าได้ที่ระยะห่างจากอุปกรณ์โหนด Ultra Wideband ส่งออกมา โดยใช้ อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล 6.8 เมกะบิตต่อวินาที และอ่านค่าที่ระยะห่าง 80 เมตร

ความถี่ (kHz)	ค่า SNR ที่เครื่องรับ UWB ของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติอ่านค่าได้ที่ (dBm)
3.5	-83
4	-78
4.5	-92
5.0	-104
5.5	-106
6.0	-103
6.5	-108

#### 4.5 สรุปและอภิปรายผล

ผลการทดลองเปรียบเทียบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ แสดงให้เห็นการใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ UWB มีผลทำให้ความเชื่อมั่นได้ของการระบุตำแหน่งเพิ่มขึ้น โดยเห็นจากการกระจายตัวของข้อมูลแสดงตำแหน่งซึ่งคำนวณจากซอฟต์แวร์ภายในรถบรรทุกอัตโนมัติที่น้อยกว่า และมาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยกว่าการกระจายของข้อมูลแสดงตำแหน่งในกรณีที่ใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งเฉพาะ LIDAR การวิเคราะห์จากภาพ และ GPS ซึ่งผลการทดลองที่ระยะห่างอ้างอิงแต่ละระยะก็แสดงข้อมูลการกระจายตัวเปรียบเทียบในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของระยะห่างจากจุดอ้างอิง C ที่คำนวณได้จากซอฟต์แวร์ระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติในทุกระยะทางทดสอบ แสดงผลว่าการใช้เทคโนโลยีตำแหน่งแบบ UWB ร่วมกับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDAR การวิเคราะห์จากภาพ และ GPS ทำให้ความแม่นยำในการคำนวณระยะห่างจากระยะอ้างอิงสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้กระทำขึ้นในพื้นที่ปฏิบัติการเชิงพาณิชย์ของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่บริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด ซึ่งมีระเบียบและข้อบังคับในการจำกัดความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถบรรทุกทุกประเภท ไม่ให้เกิน 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดลองนี้จึงมิได้ครอบคลุมถึงการเปรียบเทียบความแม่นยำในกรณีที่รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติมีการปฏิบัติงานในพื้นที่อื่นซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้การทดลองนี้เกิดขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาความแม่นยำของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีข้อกำหนดทางเทคนิคที่สอดคล้องกับการปฏิบัติการกิจจริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งทำให้ออกแบบระบบประมวลผลที่มีขีดความสามารถสูงเพื่อตอบสนองความต้องการในการทำงาน อันประกอบด้วยความสามารถในการส่งภาพจริงผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สายไปศูนย์ควบคุม การประมวลผลของระบบควบคุมส่วนกลางภายในรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อรักษาความปลอดภัยต่อรถ บุคคลในพื้นที่ทำงาน และหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติหน้าที่โดยอัตโนมัติ ซึ่งทำให้มีการออกแบบระบบไมโครโพรเซสเซอร์และหน่วยความจำของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพสูงมาก ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงไม่ได้เป็นการรับประกันถึงการนำไปใช้อ้างอิงและใช้งานกับยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติอื่น ๆ ที่ได้รับการออกแบบให้ระบบไมโครโพรเซสเซอร์และหน่วยความจำที่มีขีดความสามารถต่ำกว่ารถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติในการทดลองนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ใช้งานในเชิงพาณิชย์ ระหว่างการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และ GPS กับ การระบุตำแหน่งโดยเพิ่มเทคโนโลยี UWB โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบและสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ภายใต้ข้อกำหนดและความต้องการในการใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์ของโรงงาน บริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด ออกแบบและสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ ออกแบบและติดตั้งเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งซึ่งประกอบด้วย LIDAR การวิเคราะห์จากภาพ และ GPS ให้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ จากนั้นจึงนำรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติไปใช้ปฏิบัติหน้าที่จริง ณ โรงงานของบริษัท มิลล์คอน บูรพา และเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์จุดด้อยของการระบุตำแหน่งแบบวิเคราะห์จากภาพ จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบการระบุตำแหน่งแบบ UWB และพัฒนาระบบซอฟต์แวร์วิเคราะห์และแสดงระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี UWB ให้กับรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติ และเริ่มต้นการทดลองเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งระหว่างการใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ และ GPS กับ การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพ GPS และ UWB ณ สถานที่ปฏิบัติงานภายในโรงงานของบริษัท มิลล์คอน บูรพา จำกัด โดยทดลองที่ระยะทางอ้างอิงต่าง ๆ กัน 5 ระยะ และในการทดลองแต่ละประเภทมีการทดลองซ้ำประเภทละ 50 ครั้ง ผลการทดลองเป็นการนำข้อมูลการกระจายตัวของการแสดงระบุตำแหน่ง และค่าเฉลี่ยจากการทดลองทำการเปรียบเทียบระหว่างการระบุตำแหน่งโดยใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งชนิดที่ไม่ใช้ UWB กับ การใช้เทคโนโลยี UWB ร่วมด้วย ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่าการเพิ่มเทคโนโลยี UWB เข้าในระบบระบุตำแหน่งของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเพิ่มความเที่ยงตรงและความน่าเชื่อถือในการระบุตำแหน่งมากกว่าการระบุตำแหน่งโดยใช้เฉพาะเทคโนโลยี LIDAR ร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพและ GPS

#### 5.2 แนวทางพัฒนาในอนาคต

แนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคตก็คือ การทดลองใช้งานกับยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ใช้ความเร็วมากกว่า 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นทั้งรถยนต์โดยสารขับเคลื่อนอัตโนมัติส่วนบุคคล รถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีภารกิจการปฏิบัติงานบนถนนให้ใช้เทคโนโลยี UWB ร่วมกับเทคโนโลยีระบุตำแหน่งแบบ LIDAR การวิเคราะห์จากภาพและ GPS และการออกแบบสร้างรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อทำงานพร้อมกันในพื้นที่เดียวกันจำนวนหลายคัน และพัฒนาระบบกระบวนรถบรรทุกให้สามารถถอดเพื่อวางและยกขึ้น เพื่อวางกระจายตัวตลอดพื้นที่การปฏิบัติงาน และพัฒนาระบบซอฟต์แวร์ของรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ปฏิบัติหน้าที่พร้อมกันหลายคัน เพื่อใช้

ประโยชน์จากความเที่ยงตรงที่เพิ่มขึ้นจากเทคโนโลยี UWB ในการสร้างระบบนิเวศน์การทำงานแบบ Multi-Autonomous Truck, Multi-Autonomous Carrier ซึ่งรถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติแต่ละคันภายในพื้นที่ปฏิบัติ สามารถสื่อสารระหว่างกันและกับระบบบรรทุกที่วางกระจายตัวในพื้นที่ปฏิบัติงาน เพื่อกระจายหน้าที่ในการยกกระบะและวางกระบะ ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน





## รายการอ้างอิง

- Smith, J.A.; Brown, B.C. Ultra-Wideband Positioning Systems for Industrial Environments. *Ind. J. Nav. Tech.* 2021, 15, 24-45.
- Johnson, L.; Lee, M.K. Challenges of GPS Navigation in Urban and Indoor Settings. *J. Geo. Res.* 2020, 112, 334-350.
- Thompson, H.; Walters, T.Y. An Overview of LiDAR Technology and Its Automotive Applications. *Automot. Innov. Rev.* 2019, 8, 77-89.
- Wang, X.; Zhang, Y. Improving Accuracy in Positioning Systems Using Ultra-Wideband Technology. *Sensors Tech. J.* 2018, 14, 1012-1029.
- White, P.R.; Green, D.F. Integration Challenges of UWB in Autonomous Vehicles. *J. Auto. Eng.* 2022, 16, 230-245.
- Davis, K.; Murphy, S. UWB vs. Traditional Positioning Technologies in Industrial Autonomous Vehicles. *Ind. Auto. J.* 2019, 9, 88-107.
- Anderson, G.; Thompson, J. The Economic Implications of Implementing Ultra-Wideband Technology in Industrial Settings. *Econ. Ind. Tech. Rev.* 2020, 5, 59-73.
- Patel, A.; Singh, S. A Comparative Study of RF Interference Effects on UWB and GPS Technologies. *J. Commun. Tech.* 2021, 22, 196-213.
- Robertson, T.; Carter, H. Operational Efficiency Enhancements with UWB in Autonomous Industrial Trucks. *Ind. Log. Rev.* 2020, 12, 142-155.
- O'Neil, M.; Jacobs, L. System Integration Strategies for UWB in Industrial Autonomous Systems. *Sys. Eng. J.* 2019, 13, 21-37.
- Kim, Y.; Cho, J. The Role of UWB Technology in the Future of Industrial Automation. *Future Ind. Tech. J.* 2021, 7, 200-218.
- Lee, A.; Johnson, R. Testing and Analysis of UWB Systems Under Various Industrial Conditions. *J. Ind. Tests.* 2022, 10, 50-65.
- Morgan, C.; Patel, R. Safety Implications of Autonomous Vehicles: The Potential of UWB Technology. *Saf. Sci. J.* 2020, 18, 45-60.
- Nash, B.; Kramer, F. High Data Transmission Rates with UWB: Benefits for Industrial Applications. *Comm. Tech. Mag.* 2019, 11, 156-172.
- Edwards, S.; Lin, T. Power Management in UWB Systems for Efficient Industrial Applications. *Energy Manag. J.* 2018, 9, 98-111.

- Greene, J.H.; Matthews, P.L. Real-world Application of UWB in Industrial AV: A Case Study. *Case Stud. Ind. App.* 2022, 4, 134-145.
- Black, T.; White, S. Advances in UWB Technology for Precise Positioning in Industrial Environments. *Adv. Tech. J.* 2021, 19, 84-99.
- Adler, G.; Marks, R. Environmental Challenges in LIDAR and UWB Operations. *Env. Res. J.* 2019, 15, 27-42.
- Tate, K.; Lew, H. Cost Analysis of Deploying UWB Technologies in Existing Industrial Infrastructures. *Fin. Rev. Ind. Tech.* 2020, 6, 170-188.
- Daniels, M.; Harlow, C. Performance Metrics of UWB Technology in Industrial Settings. *Perf. Metrics J.* 2021, 8, 62-78.
- Shi, D.; Mi, H.; Collins, E.G.; Wu, J. An indoor low-cost and high-accuracy localization approach for AGVs. *IEEE Access* 2020, 8, 50085–50090.
- Jiang, J.; Guo, Y.; Liao, W. Research on AGV guided by real-time locating system (RTLS) for material distribution. *Int. J. Control Autom.* 2015, 8, 213–226.
- Kirsch, C.; Röhrig, C. Global localization and position tracking of an automated guided vehicle. *IFAC Proc. Vol.* 2011, 44, 14036–14041.
- Kirsch, C.; Künemund, F.; He, D.; Röhrig, C. Comparison of localization algorithms for AGVs in industrial environments. In *Proceedings of the 7th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, Munich, Germany, January 2012; pp. 183–188.
- Pérez-Rubio, M.C.; Losada-Gutiérrez, C.; Espinosa, F.; Macias-Guarasa, J.; Tiemann, J.; Eckermann, F.; Wietfeld, C.; Katkov, M.; Huba, S.; Ureña, J.M.; Villadangos, J.M.; Gualda, D.; Díaz, E.; Nieto, R.; Santiso, E.; del Portillo, P.; Martínez, M. A realistic evaluation of indoor robot position tracking systems: The IPIN 2016 competition experience. *Measurement* 2019, 135, 151–162.
- Santos, E.R.S.; Azpurua, H.; Rezeck, P.A.F.; Corrêa, M.F.S.; Vieira, M.A.M.; Freitas, G.M.; Macharet, D.G. Localization using ultra wideband and IEEE 802.15.4 radios with nonlinear Bayesian filters: A comparative study. *J. Intell. Robot. Syst.* 2020, 99, 571–587.
- Zhu, X.; Yi, J.; Cheng, J.; He, L. Adapted error map-based mobile robot UWB indoor positioning. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2020, 69, 6336–6350.
- Luo, C.; Li, W.; Fan, X.; Yang, H.; Ni, J.; Zhang, X.; Xin, G.; Shi, P. Positioning technology of mobile vehicle using self-repairing heterogeneous sensor networks. *J. Netw. Comput. Appl.* 2017, 93, 110–122.
- Vasilyev, P.; Pearson, S.; El-Gohary, M.; Aboy, M.; McNames, J. Inertial and time-of-arrival ranging sensor fusion. *Gait Posture.* 2017, 54, 1–7.

- Ding, G.; Lu, H.; Bai, J.; Qin, X. Development of a high precision UWB/vision-based AGV and control system. In Proceedings of the 5th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Nanjing, China, April 2020; pp. 99–103.
- Benini, A.; Mancini, A.; Longhi, S. An IMU/UWB/vision-based extended Kalman filter for mini-UAV localization in indoor environment using 802.15.4a wireless sensor network. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), San Antonio, TX, USA, October 2019; pp. 100–105.
- An, X.; Zhao, S.; Cui, X.; Shi, Q.; Lu, M. Distributed multi-antenna positioning for automatic-guided vehicle. *Sensors* 2020, 20, 1155.
- Wiebking, L.; Vossiek, M.; Reindl, L.; Christmann, M.; Mastela, D. Precise local positioning radar with implemented extended Kalman filter. In Proceedings of the European Conference on Wireless Technology, Munich, Germany, October 2003; pp. 459–462.
- Chu, Y.; Ganz, A. A UWB-based 3D location system for indoor environments. In Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks, Boston, MA, USA, October 2005; vol. 2, pp. 1147–1155.
- Mastela, D.; Reindl, L.; Wiebking, L.; Kawalkiewicz, M.; Zander, T. Angle tracking using FMCW radar-based localization system. In Proceedings of the International Radar Symposium, Krakow, Poland, May 2006; pp. 1–4.
- Tragas, P.; Kalis, A.; Papadias, C.; Ellinger, F.; Eickhoff, R.; Ussmuller, T.; Mosshammer, M.; Huemer, A.; Dabek, D.; Doumenis, A.; Kounoudes, A. RESOLUTION: Reconfigurable systems for mobile local communication and positioning. In Proceedings of the 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Budapest, Hungary, July 2007; pp. 216–220.
- Ellinger, F.; Eickhoff, R.; Ziroff, A.; Hütner, J.; Gierlich, R.; Carls, J.; Böck, G. European project RESOLUTION-local positioning systems based on novel FMCW radar. In IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Honolulu, HI, USA, October 2007; pp. 499–502.
- Röhrig, C.; Spieker, S. Tracking of transport vehicles for warehouse management using a wireless sensor network. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, USA, October 2008; pp. 3260–3265.
- Liu, L.; Manli, E.; Wang, Z.; Zhou, M. A 3D self-positioning method for wireless sensor nodes based on linear FMCW and TFDA. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, TX, USA, October 2009; pp. 2990–2995.
- Cho, H.; Lee, C.-W.; Ban, S.-J.; Kim, S.-W. An enhanced positioning scheme for chirp spread spectrum ranging. *Expert Syst. Appl.* 2010, 37, 5278–5735.

- Liu, L.; Manli, E. Improve the positioning accuracy for wireless sensor nodes based on TFDA and TFOA using data fusion. In Proceedings of the International Conference on Network, Sensor and Control (ICNSC), Chicago, IL, USA, April 2010; pp. 32–37.
- Zhou, Y.; Law, C.L.; Chin, F. Construction of local anchor map for indoor position measurement system. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010, 59, 1986–1988.
- Kang, D.; Namgoong, Y.; Yang, S.; Choi, S.; Shin, Y. A simple asynchronous UWB position location algorithm based on single round-trip transmission. In Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Communication Technology, Phoenix Park, South Korea, February 2006; vol. 3, pp. 1458–1461.
- Nam, Y.; Lee, H.; Kim, J.; Park, K. Two-way ranging algorithms using estimated frequency offsets in WPAN and WBAN. In Proceedings of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, Busan, South Korea, November 2008; vol. 1, pp. 842–847.
- Arrue, N.; Losada, M.; Zamora-Cadenas, L.; Jimenez-Irastorza, A.; Velez, I. Design of an IR-UWB indoor localization system based on a novel RTT ranging estimator. In Proceedings of the 1st International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, Venice, Italy, July 2010; pp. 52–57.
- D'Amico, A.A.; Taponecco, L.; Mengali, U. Ultra-wideband TOA estimation in the presence of clock frequency offset. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 2013, 12, 1606–1616.
- Sharma, S.; Bhatia, V.; Gupta, A. Joint symbol and ToA estimation for iterative transmitted reference pulse cluster UWB system. *IEEE Syst. J.* 2019, 13, 2629–2640.
- Joung, J.; Jung, S.; Chung, S.; Jeong, E. CNN-based TxRx distance estimation for UWB system localization. *Electron. Lett.* 2019, 55, 938–940.
- Karapistoli, E.; Pavlidou, F.; Gragopoulos, I.; Tsetsinas, I. An overview of the IEEE 802.15.4a Standard. *IEEE Commun. Mag.* 2010, 48, 47–53.
- Alari, A.; Al-Salman, A.; Alsaleh, M.; Alnafessah, A.; Al-Hadhrami, S.; Al-Ammar, M.; Al-Khalifa, H. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors* 2016, 16, 707.
- Muthukrishnan, K.; Hazas, M. Position estimation from UWB pseudorange and angle-of-arrival: A comparison of non-linear regression and Kalman filtering. In Proceedings of the 4th International Symposium on Location and Context Awareness (LoCA), Berlin, Germany, May 2009; pp. 222–239.
- Chen, Y.-Y.; Huang, S.-P.; Wu, T.-W.; Tsai, W.-T.; Liou, C.-Y.; Mao, S.-G. UWB System for Indoor Positioning and Tracking with Arbitrary Target Orientation, Optimal

- Anchor Location, and Adaptive NLOS Mitigation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, 69, 9304–9314.
- Yang, K.; An, J.; Bu, X.; Sun, G. Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2010, 59, 1558–1562.
- Li, A.; Luan, F. An Improved Localization Algorithm Based on CHAN with High Positioning Accuracy in NLOS-WGN Environment. In *Proceedings of the 2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China, August 2018; Volume 1, pp. 332–335.
- Cheng, Y.; Zhou, T. UWB Indoor Positioning Algorithm Based on TDOA Technology. In *Proceedings of the 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, Qingdao, China, August 2019; pp. 777–782.
- Li, L.; Liu, Z. Analysis of TDOA Algorithm about Rapid Moving Target with UWB Tag. In *Proceedings of the 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China, August 2017; Volume 1, pp. 406–409.
- Baidoo-Williams, H.E.; Dasgupta, S.; Mudumbai, R.; Bai, E. On the Gradient Descent Localization of Radioactive Sources. *IEEE Signal Process. Lett.* 2013, 20, 1046–1049.
- Yağmur, N.; Alagöz, B.B. Comparison of Solutions of Numerical Gradient Descent Method and Continuous Time Gradient Descent Dynamics and Lyapunov Stability. In *Proceedings of the 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Sivas, Turkey, April 2019; pp. 1–4.
- Zhang, A.; Lipton, Z.; Li, M.; Smola, A. Dive Into Deep Learning. Available online: <http://www.d2l.ai> (accessed on 31 July 2021).
- Smith, G.L.; Schmidt, S.F.; McGee, L.A. Application of statistical filter theory to the optimal estimation of position and velocity on board a circumlunar vehicle. 1962.
- Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME* 1960; pp. 35–45.
- Welch, G.; Bishop, G. An introduction to the Kalman filter. 1995.
- Odelson, B.J.; Rajamani, M.R.; Rawlings, J.B. A new autocovariance least-squares method for estimating noise covariances. *Automatica* 2006, 42, 303–308.
- Decawave. DW1000 User Manual Version 2.18. Available online: <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual/> (accessed on 30 Oct. 2023).

Ridol, M.; Van De Velde, S.; Steendam, H.; De Poorter, E. Analysis of the scalability of UWB indoor localization solutions for high user densities. *Sensors* 2018, 18, 1875. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1875>





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Waiwanijchakij, P.; Chotsiri, T.; Janpangngern, P.; Thongsopa, C.; Thosdeekoraphat, T.; Santalunai, N.; Santalunai, S. Enhancing Autonomous Truck Navigation with Ultra-Wideband Technology in Industrial Environments. *Sensors* 2024, 24, 4988. <https://doi.org/10.3390/s24154988>



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Article

# Enhancing Autonomous Truck Navigation with Ultra-Wideband Technology in Industrial Environments

Pairroj Waiwanijchakij <sup>1</sup>, Thanapat Chotsiri <sup>1</sup>, Pisit Janpangern <sup>1</sup>, Chanchai Thongsopa <sup>1</sup>,  
Thanaset Thosdeekoraphat <sup>1</sup>, Nuchanart Santalunai <sup>2,\*</sup> and Samran Santalunai <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; d6300265@g.sut.ac.th (P.W.); thanapat.c@groupmaker.co.th (T.C.); pisit.janpangern@gmail.com (P.J.); chan@sut.ac.th (C.T.); thanaset@sut.ac.th (T.T.)

<sup>2</sup> Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

\* Correspondence: nuchanart.fa@muti.ac.th (N.S.); samran.sa@sut.ac.th (S.S.)

**Abstract:** The integration of autonomous vehicles in industrial settings necessitates advanced positioning and navigation systems to ensure operational safety and efficiency. This study rigorously evaluates the application of Ultra-Wideband (UWB) technology in autonomous industrial trucks and compares its effectiveness with conventional systems such as Light Detection and Ranging (LiDAR), Global Positioning System (GPS), and cameras. Through comprehensive experiments conducted in a real factory environment, this study meticulously assesses the accuracy and reliability of UWB technology across various reference distances and under diverse environmental conditions. The findings reveal that UWB technology consistently achieves positioning accuracy within 0.2 cm 99% of the time, significantly surpassing the 10 cm and 5 cm accuracies of GPS and LiDAR, respectively. The exceptional performance of UWB, especially in environments afflicted by high metallic interference and non-line-of-sight conditions—where GPS and LiDAR's efficacy decreased by 40% and 25%, respectively—highlights its potential to revolutionize the operational capabilities of autonomous trucks in industrial applications. This study underscores the robustness of UWB in maintaining high accuracy even in adverse conditions and illustrates its low power consumption and efficiency in multi-user scenarios without signal interference. This study not only confirms the superior capabilities of UWB technology but also contributes to the broader field of autonomous vehicle technology by highlighting the practical benefits and integration potential of UWB systems in complex and dynamic environments.

**Keywords:** ultra-wideband (UWB) technology; autonomous vehicles; positioning technology; navigation systems; industrial automation



**Citation:** Waiwanijchakij, P.; Chotsiri, T.; Janpangern, P.; Thongsopa, C.; Thosdeekoraphat, T.; Santalunai, N.; Santalunai, S. Enhancing Autonomous Truck Navigation with Ultra-Wideband Technology in Industrial Environments. *Sensors* **2024**, *24*, 4988. <https://doi.org/10.3390/s24154988>

Academic Editor: Arturo de la Escalera Hueso

Received: 23 May 2024  
Revised: 27 June 2024  
Accepted: 30 July 2024  
Published: 1 August 2024



**Copyright:** © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

The deployment of Autonomous Guided Vehicles (AGVs) across various sectors promises to revolutionize not only transportation but also industrial operations, offering unprecedented improvements in efficiency, safety, and cost reduction. As these technologies become increasingly prevalent, especially in high-stakes environments such as industrial logistics, the demand for precise and reliable navigation systems has become paramount. These systems must not only ensure the safety of operations but also enhance the efficacy and speed of tasks traditionally handled by human operators [1–4].

Among the array of positioning technologies, Ultra-Wideband (UWB) has emerged as a standout for its precision and resilience. UWB is a radio technology that uses very short-duration pulses covering a large portion of the radio spectrum. This attribute allows UWB to provide highly accurate location tracking, making it ideally suited for environments with complex layouts and multiple obstructions where traditional technologies often fail [5,6].

Traditional navigation technologies, such as Global Positioning System (GPS) and Light Detection and Ranging (LiDAR), although effective in many scenarios, exhibit significant limitations under certain conditions. GPS, for example, is susceptible to signal degradation in indoor or urban environments due to its reliance on satellite signals, which can be obstructed or reflected [7–9]. LiDAR, while offering high-resolution environmental mapping, is hindered by its high operational costs and reduced effectiveness in varying light conditions or in environments with airborne particulates, which are typical in many industrial settings [10–12].

In contrast, UWB technology offers substantial advantages in terms of both accuracy and reliability. It is known for its ability to maintain high levels of performance in environments with physical and radio frequency interference, which are common in industrial applications. The technology's high data transmission rates and low power requirements further enhance its suitability for industrial applications where efficiency and power management are critical [13–16]. However, despite these advantages, UWB is not without its limitations:

1. **Scalability:** Expanding UWB systems to cover large industrial areas can be costly and complex. The need for numerous base stations and infrastructure can limit its scalability in extensive operations [17,18].
2. **Initial Setup Cost:** The initial cost of implementing UWB technology is high, which can be a barrier to widespread adoption, especially for smaller enterprises or those with limited budgets [19].
3. **Multipath Interference:** In environments with many reflective surfaces, UWB signals can experience multipath interference, which can affect the accuracy of location tracking [7,20].
4. **Signal Attenuation:** UWB signals can be attenuated by obstacles and materials commonly found in industrial settings, such as metal structures, which can impact performance [21,22].
5. **Synchronization Requirements:** Accurate synchronization between UWB devices is crucial for maintaining precision, and achieving this synchronization can be technically challenging [23,24].

Despite these challenges, UWB technology remains a promising solution for enhancing the positioning and navigation capabilities of AGVs in industrial environments. This research aims to thoroughly investigate the application of UWB technology for precise positioning and navigation of autonomous industrial trucks. By conducting a detailed comparative analysis using GPS and LiDAR within a controlled industrial environment, this study evaluates UWB's effectiveness under a variety of operational conditions. Specifically, we address the challenges of positioning accuracy, reliability under diverse environmental conditions, and operational efficiency. The objective is to provide a robust empirical basis for recommending UWB's broader adoption in industrial AGV applications [20,21,25,26].

Furthermore, this study addresses a notable gap in the existing literature, which often neglects the practical aspects of implementing advanced positioning technologies in real-world settings. Through empirical testing and systematic analysis, this work explores not only the technical feasibility but also the operational, economic, and safety implications of UWB technology in industrial settings [22,27,28]. We highlight the innovative use of UWB technology to overcome the limitations of existing systems, providing insights into its practical benefits and integration potential [23,24].

The methodology of this study involves comprehensive testing across multiple scenarios to assess the accuracy, reliability, and efficiency of UWB compared to traditional positioning technologies. This approach is underpinned by a solid theoretical foundation and draws on data collected from extensive field trials in industrial environments [29–31]. We also discuss the scalability and cost considerations, providing strategic recommendations for UWB's implementation in industrial settings [32].

The expected outcomes of this research include a detailed assessment of UWB technology's performance metrics, insights into its practical benefits, and strategic recommen-

dations for its implementation. These findings are intended to contribute significantly to the field of AGV technology, supporting the advancement of UWB systems as a superior choice for industrial autonomous vehicle applications [33–35].

In conclusion, this introduction provides an extensive overview of the research context, elucidating the transformative potential of UWB technology in industrial automation. The following sections will delve deeper into the experimental design, and data analysis, and discuss the broader implications of the findings, aiming to provide a comprehensive resource for advancing the field of AGV technology in complex and dynamic industrial environments [36–39].

## 2. Traditional RTLS-BASED AGV Truck Navigation Systems

Real-Time Location Systems (RTLSs) greatly bolster the navigation capabilities of AGVs both indoors and outdoors. A substantial body of research supports the integration of RTLSs to refine AGV navigation, highlighted by numerous studies referenced in [3,4,6,9,11,12,15,16,18–21]. This section will offer an in-depth examination of the principal characteristics of RTLS-based safety protocols currently utilized in AGV systems.

### 2.1. Sensor Fusion of LiDAR, GPS, Image-Based Positioning, and UWB

Autonomous vehicles rely on a combination of technologies to navigate complex environments effectively. Each technology—LiDAR, GPS, image-based positioning, and Ultra-Wideband (UWB)—brings unique strengths to this multifaceted challenge.

**LiDAR** offers high-resolution distance measurements in a 3D format, essential for precise navigation and real-time obstacle detection. However, it can be expensive and performs poorly in adverse weather conditions such as fog or heavy rain, which scatter its laser beams.

**GPS** provides crucial geographical positioning over long distances but suffers from signal obstruction in urban canyons or densely covered natural environments, leading to significant positioning errors.

**Image-based positioning** leverages cameras to capture detailed visual information from the vehicle's surroundings. Cameras are particularly useful for recognizing road signs, lane markings, and traffic signals, integrating visual context that LiDAR and GPS cannot provide. However, the main limitation of cameras is their inability to perceive depth accurately from a single image and their performance dependency on lighting conditions.

Integrating these technologies with UWB can significantly enhance the overall positioning system. UWB is known for its high accuracy and low latency in distance measurements, making it ideal for precise, close-range positioning tasks. Unlike GPS, it does not rely on external signals from satellites, which makes it highly reliable and secure. UWB's ability to penetrate obstacles allows for effective operation even in environments where other signals might be obstructed.

The fusion of LiDAR, GPS, image-based positioning, and UWB:

The integration of these sensors can be approached through various fusion strategies:

**Early Fusion:** This method involves merging raw data from all sensors (LiDAR point clouds, GPS coordinates, camera images, and UWB distance measurements) at the input level. This data-rich approach can be processed to create a comprehensive and nuanced understanding of the environment.

**Middle Fusion:** Features or information extracted from each sensor are combined at an intermediate step. For instance, LiDAR data can be used to inform the depth of understanding of images captured by cameras, while GPS provides a geospatial context, and UWB ensures precision in the immediate vicinity.

**Late Fusion:** In this approach, data from each sensor are processed separately, and the results are combined at a decision-making level. This might involve using camera and LiDAR data for object detection and localization, GPS for route planning, and UWB for precise maneuvering in tightly controlled spaces.

By leveraging the complementary capabilities of LiDAR, GPS, image-based positioning, and UWB, autonomous vehicles can achieve a higher level of situational awareness and operational accuracy. This sensor fusion not only compensates for the individual weaknesses of each sensor type but also synergistically enhances their strengths, leading to more reliable and safer autonomous navigation systems.

In conclusion, the integration of these diverse sensing technologies through sophisticated fusion techniques represents the forefront of current research in autonomous vehicle navigation. The combined use of LiDAR, GPS, camera-based systems, and UWB forms a robust framework that significantly advances the reliability, safety, and efficiency of autonomous driving solutions.

## 2.2. Basic Architecture of a Real-Time Location System

A typical radio frequency (RF) location system for indoor and outdoor environments consists of a set of anchors with known positions ( $x_{anj}$ ,  $y_{anj}$ , and  $z_{anj}$ ) and one or more tags whose positions ( $x_i$ ,  $y_i$ , and  $z_i$ ) are to be determined [22–24,31,32,35,38–42]. These systems rely on a fixed infrastructure composed of anchors, referred to as Fixed-Infrastructure RTLSs (FI-RTLSs). Figure 1 shows the basic architecture, which includes multiple anchors, tags, and a Control Unit (CU). The location of each tag is estimated through two main steps: ranging and positioning.

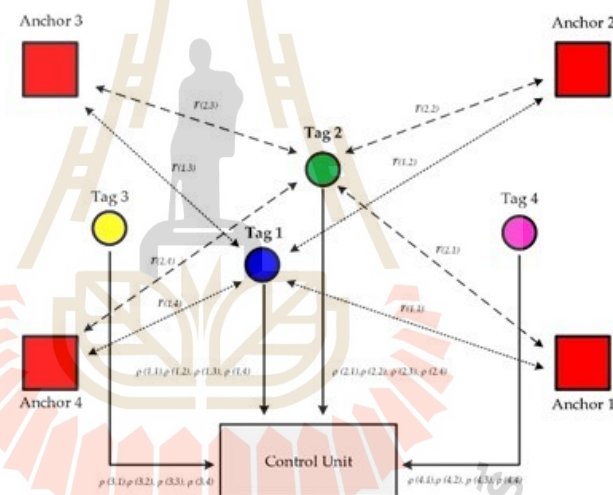


Figure 1. Schematic diagram of a Fixed-Infrastructure Real-Time Location System (FI-RTLS) designed for use in both indoor and outdoor environments [42].

Initially, the ranging measurements (angle, received power, or Time of Flight) between each anchor and the tags, denoted as  $\hat{\rho}_{(i,j)}$ , are determined using specific algorithms, as cited in [38,43–48]. These measurements often diverge from the actual values  $\rho_{(i,j)}$  due to potential transmission errors or multipath interference, which can degrade the signals. Subsequently, the position of each tag, represented by coordinates ( $x_i$ ,  $y_i$ , and  $z_i$ ), is computed in the CU utilizing these ranging estimates. Figure 1 also illustrates the transmitted signal  $r_{(i,j)}$  from the  $j^{\text{th}}$  anchor to the  $i^{\text{th}}$  tag.

The system depicted in Figure 1 is known as a tag-based system. In this system, the tag is responsible for gathering the ranging measurements, noted as  $\hat{\rho}_{(i,j)}$ , and transmitting them to the CU. Additionally, the tag can calculate its own position based on these measure-

ments and then forward these position estimates to the CU. Conversely, in an anchor-based system, it is the anchors that collect the ranging measurements and send them to the CU, where the position is then calculated.

One of the primary challenges faced by RF-based indoor and outdoor location systems is the multipath effect. Indoor and outdoor environments often produce multiple copies of the transmitted signal due to reflections from nearby objects. Sometimes, the direct path may be obscured and not represent the strongest signal path. This scenario typically results in significant degradation of ranging performance in narrowband location systems, consequently reducing location accuracy. A practical method to counteract the multipath effect is to expand the bandwidth of the signal transmitted by the tag [49]. Therefore, the extensive bandwidth of Impulse Radio Ultra-Wideband (IR-UWB) positions it as an ideal candidate for an RTLS intended for both indoor and outdoor use [50].

### 2.3. Navigation System for AGVs Using an FI-RTLS

In intralogistics environments, AGVs operate collectively within a fleet. The coordination of the fleet is managed by a Fleet Control System (FCS), which integrates production data from the factory's Enterprise Resource Planning (ERP) system. With these data, the FCS issues directives to the AGVs specifying their starting points, destinations, and the routes they should follow. In the absence of a Real-Time Location System (RTLS) capable of identifying the locations of AGVs, other mobile robots, and personnel, routing decisions are made without considering the current positions of these entities. This oversight can cause the FCS to direct traffic through busy areas, leading to avoidable halts and a decrease in overall plant efficiency. Consequently, it is evident that the locational insights provided by an RTLS significantly enhance the navigational efficiency of AGV fleets.

Figure 2 illustrates the essential layout of an FI-RTLS designed for AGV navigation. In this setup, anchors are strategically placed on the plant's infrastructure, such as poles and walls, while both AGVs and personnel are equipped with tags. In a tag-based FI-RTLS configuration, the tag locations are wirelessly transmitted to the FCS, potentially using the same IR-UWB communication link as the position estimation or an alternative link. This process increases the tags' power consumption, thereby shortening their battery life. In contrast, an anchor-based FI-RTLS has a Control Unit that gathers all ranging data, calculates the position estimates, and then forwards these estimates to the FCS.



**Figure 2.** Core layout of a Fixed-Infrastructure Real-Time Location System (FI-RTLS) for AGV truck navigation in an industrial setting.

Both scenarios require an ultra-low latency communication link between the FCS and the AGVs, especially if the FCS's commands are intended to serve as a safety mechanism, such as stopping an AGV to avoid a collision. Although 5G technology is designed to provide the necessary low latency for such applications, its widespread implementation is

still in progress. Until 5G becomes widely available, the positional data from the FI-RTLS AGV navigation system are mainly used by the FCS to monitor AGV movements.

A major drawback of current FI-RTLS AGV navigation systems is their dependence on anchors installed at various locations within the plant. The accuracy of these systems is highly influenced by the placement of the anchors, requiring meticulous planning during the implementation phase of an FI-RTLS. Many FI-RTLSs necessitate specific on-site calibration to achieve the desired accuracy [51]. Given the high product variability and short product life cycles prevalent in modern industries, production plant layouts frequently change, affecting the accuracy of an FI-RTLS. Any modification in the layout may require repositioning the anchors and/or repeating the calibration process, which can be both time-consuming and costly.

### 3. Overview of the Proposed FI-RTLS AGV System

This section can be divided into subheadings to provide a clear and detailed explanation of the proposed FI-RTLS AGV system. It will cover the design and implementation of the system, the results of experimental tests, the interpretation of these results, and the conclusions derived from the experiments.

#### 3.1. Proposed Architecture

Figure 3 presents the architecture of the proposed UWB system with LiDAR, GPS, and camera functionality, enhancing navigation and safety systems for AGVs. This setup differs from traditional RTLS-based solutions. The proposed AGV safety system should be installed only in crowded and narrow areas at risk of collision. The electric AGV truck is equipped with tags, LiDAR, GPS, and camera sensors, enabling it to determine the real-time location of moving people or assets. Therefore, the proposed safety system is based on real-time location within fixed infrastructure in specific crowded and narrow areas. In open areas or where there is sufficient road space, specialized navigation systems using LiDAR, GPS, and cameras will detect locations and serve as navigation aids.

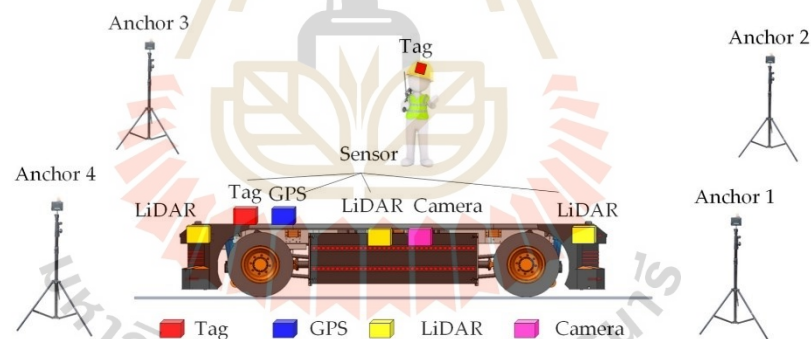


Figure 3. The architecture of the proposed hybrid FI-RTLS AGV truck safety system with multi-sensors.

This safety system is termed hybrid FI-RTLS AGV, as it incorporates both fixed and non-fixed infrastructure, combining the advantages of traditional FI-RTLS AGV systems. When operating in open areas, navigation through sensors installed on the vehicle suffices. There is no need to install numerous anchors throughout the factory area. However, in narrow spaces with many obstacles or in warehouse buildings, a UWB system will be employed to enhance positioning accuracy. The number of anchors installed depends on the plant layout. The hybrid FI-RTLS AGV system facilitates easy deployment of AGV safety and enhances usability in recycling plants. Additionally, the proposed system will enable the factory to adapt flexibly to the demands of the industry 4.0 manufacturing scenario.

Figure 4 shows the sensor configuration on an electric E-AGV truck. The arrangement comprises six LiDAR sensors strategically positioned at the vehicle's corners and along both lateral sides. Additionally, four cameras are affixed at the front, rear, left, and right facades of the truck to facilitate comprehensive visual monitoring. Navigation and identification capabilities are augmented by a GPS unit and a tagging mechanism, both installed at the vehicle's forefront. These sensors engage in communication via IR-UWB with mobile objects tagged within the operational environment, such as factory workers' helmets or other mobile assets. This interaction utilizes the Time of Flight (ToF) data of the emitted signals to accurately estimate the distance between each tag and the sensors on the E-AGV truck, thus enabling precise object localization around the electric autonomous truck.

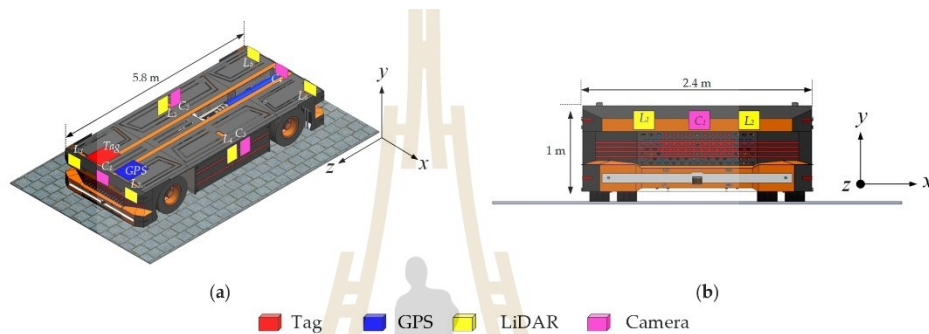


Figure 4. Placement of the tag, LiDAR, GPS, and camera sensors in the E-AGV truck: (a) perspective view; (b) front view.

### 3.2. Implementation of UWB Positioning Using the TDoA Algorithm

In our prior research, we introduced an Ultra-Wideband (UWB) positioning system that utilized Two-Way Ranging (TWR) techniques and non-line-of-sight (NLOS) mitigation strategies [52]. However, we observed that the interval required for positioning expanded significantly with an increase in the number of devices to be located. To address this issue, this study implements the Time Difference of Arrival (TDoA) algorithm [53], which maintains a consistent positioning interval regardless of the number of devices.

The successful deployment of the UWB system employing the TDoA technique hinges on the precise synchronization of anchors. This necessity arises because the clock frequency ratio (CFR) and the transmission time offsets differ across devices. The CFR, crucial for this setup, is determined by comparing the timestamps generated by two devices over the same period. For example, for  $Anchor_i$  depicted in Figure 5a, the CFR is formulated as follows:

$$r_{Anchor,i} = \frac{t_{rx,range,i} - t_{rx,poll,i}}{t_{rx,range} - t_{rx,poll}} \quad (1)$$

The TOF between the central unit, which initiates the communication, and  $Anchor_i$ , measured according to the central unit's clock, can be expressed as follows:

$$T_i = \frac{(t_{rx,pollack,i} - t_{tx,poll}) - \frac{t_{tx,pollack,i} - t_{rx,poll,i}}{r_{Anchor,i}}}{2} \quad (2)$$

This modified TWR method is designed to calculate the distance using the central unit's clock. As shown in Figure 5b, the tag captures all signals from both the central unit

and the  $Anchor_i$ . By receiving the poll and range signals from the central unit, the CFR of a tag can be expressed as follows:

$$r_{tag} = \frac{t_{rx,range,tag} - t_{rx,poll,tag}}{t_{tx,range} - t_{tx,poll}} \quad (3)$$

Next, the synchronized timestamp for  $Anchor_i$  is as follows:

$$t'_{rx,report,i,tag} = t_{rx,report,i,tag} - r_{tag} \times T_i - (t_{tx,report,i} - t_{rx,range,i}) \frac{r_{tag}}{T_{Anchor,i}} \quad (4)$$

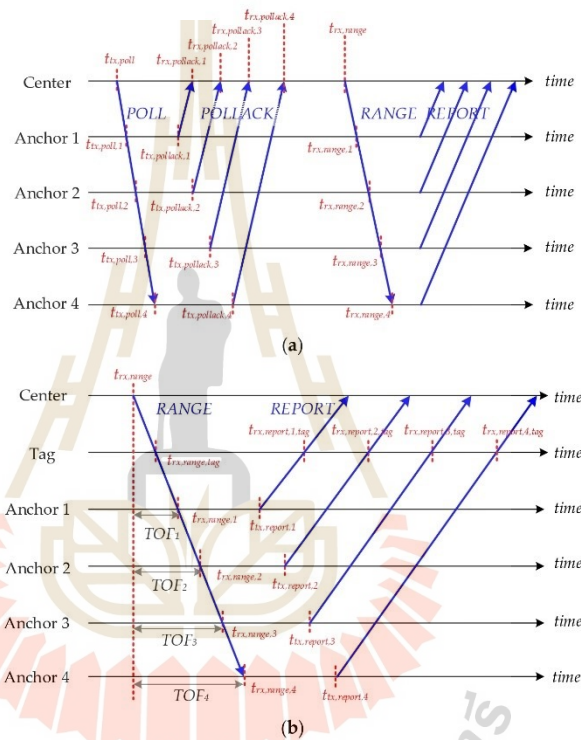
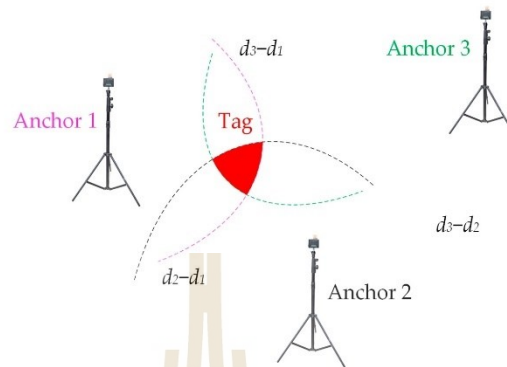


Figure 5. (a) The modified TWR between the center and anchors. (b) TDoA with anchor synchronization.

These synchronized timestamps are instrumental in TDoA calculations when compared with the received timestamp from the central unit. In this method, the tags solely act as receivers, allowing for an unlimited number of tags. By using the synchronized time differences between the central unit and the anchors, the differences in distances can be determined by multiplying these time intervals by the speed of light in air. Nonetheless, the resulting hyperbolic curves derived from these distance differences may not converge to a single point but might overlap within a specific area, as illustrated in Figure 6. To accurately determine the location of a tag, the TDoA positioning algorithm is employed to estimate its position based on where these hyperbolas intersect.





**Figure 6.** The hyperbolic curves may converge within an area rather than at a single point. The exact location of the tag must be inferred from this region.

Assume the coordinates of the  $i_{th}$  anchor are  $[x_i, y_i]$ , and the estimated coordinates of the tag are  $[x, y]$ . The measured distance difference between the  $i_{th}$  anchor and the  $j_{th}$  anchor is  $d_{ij}$ , while  $d_i$  represents the distance between the estimated tag position and the  $i_{th}$  anchor. The objective of the algorithm is to minimize the following loss function:

$$f = \sum_{i>j} (\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - d_{ij})^2 \quad (5)$$

One common approach is the least-squares (LS) closed-form solution. The relationships among  $d_{ij}$ ,  $d_i$ , and  $[x_i, y_i]$  can be represented in matrix form as follows [53,54]:

$$A\theta = b \quad (6)$$

where

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & d_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & d_{31} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & d_{n1} \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2 - d_{21} \\ x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2 - d_{31} \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 - x_1^2 - y_1^2 - d_{n1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

The solution can be formulated as follows:

$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (8)$$

Another solution is the Chan method. The method is based on a twice LS solution, and it is widely used in TDoA estimation [54–56]. However, the estimated position is not precise enough by only using LS and the Chan method. The Taylor method is a recursive method with an initial position. The displacement in each iteration can be calculated using the following equation [54,56,57]:

$$\delta_{Taylor} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = (G^T Q^{-1} G)^{-1} G^T Q^{-1} h \quad (9)$$

where

$$G = \begin{bmatrix} (x_1 - x)/d_1 - (x_2 - x)/d_2 & (y_1 - y)/d_1 - (y_2 - y)/d_2 \\ (x_1 - x)/d_1 - (x_3 - x)/d_3 & (y_1 - y)/d_1 - (y_3 - y)/d_3 \\ \vdots & \vdots \\ (x_1 - x)/d_1 - (x_n - x)/d_n & (y_1 - y)/d_1 - (y_n - y)/d_n \end{bmatrix},$$

$$h = \begin{bmatrix} d_{21} - (d_2 - d_1) \\ d_{31} - (d_3 - d_1) \\ \vdots \\ d_{n1} - (d_n - d_1) \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} \text{std}(d_{21}) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \text{std}(d_{31}) & & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{std}(d_{n1}) \end{bmatrix}.$$

By iteratively adjusting the estimated position of a tag until the displacement becomes sufficiently minimal, the precision of the tag's location can be enhanced. However, in certain cases, the estimated position derived using the Taylor method deviates significantly from the actual position due to the small determinant of  $G^T Q^{-1} G$ .

The Gradient Descent (GD) method is another iterative technique that starts with an initial position [58,59]. The adjustments to the position are informed by the gradients derived from the partial differentials of Equation (5), calculated as follows:

$$f_x = 2 \sum_{i>j} [(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - d_{ij}) \times (\frac{x-x_i}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} - \frac{x-x_j}{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}})] \quad (10)$$

$$f_y = 2 \sum_{i>j} [(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} - d_{ij}) \times (\frac{y-y_i}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} - \frac{y-y_j}{\sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}})] \quad (11)$$

$$\delta_{GD} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_x \\ -f_y \end{bmatrix} \quad (12)$$

Rather than directly adjusting the coordinates  $[x, y]$  with the displacement, employing an adaptive gradient proves beneficial in locating the minimum of the loss function [60]. The Gradient Descent (GD) method enhances accuracy but requires more computational time compared to the Taylor method. A hybrid approach, termed the GD-Taylor method, is suggested by integrating these techniques. This approach considers both the gradient information and the Taylor series expansions, allowing for a refined adjustment of the displacement as follows:

$$\delta_{GD-Taylor} = \delta_{GD} + \delta_{Taylor} \quad (13)$$

The detail of this method is outlined in Algorithm 1, starting with the computation of distance differences in Step 1, Steps 2 and 3 involve setting up the initial values for the adaptive gradient's weight and the tag's position. The core process, running from Step 4 to Step 15, iteratively adjusts the estimated position of the tag. In this main loop, Step 5 computes the distances from the anchor positions to the current estimate of the tag's position. Following this, Step 6 generates the values for  $\delta_{Taylor}$  and  $\delta_{GD}$  based on Equations (9) and (12). Steps 7 and 8 adjust the  $\delta_{GD-Taylor}$  values and update the *weights*, respectively. Steps 9 and 10 implement the modified adaptive gradient method, and Step 11 increments the iteration count. Steps 12 through 14 monitor the norm of the displacement

to potentially halt the main loop prematurely if the displacement is sufficiently small. Ultimately, the refined estimated position of the tag is finalized and output in Step 16.

In the GD–Taylor method, the initial displacement is large to facilitate rapid convergence, primarily due to the influence of the Taylor method. As the iterations progress, the estimated position gradually approximates the actual position, and the displacement reduces sufficiently to meet the criteria for early termination in Step 12. Moreover, Steps 8 through 10 are crucial for regulating the displacement to prevent data overshoot that can occur with the Taylor method. Consequently, the GD–Taylor method effectively combines the strengths of both the Taylor and Gradient Descent methods, optimizing both calculation speed and positional accuracy.

---

**Algorithm 1. Function of the GD–Taylor method.**

---

<b>Input</b>	Locations of anchors $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ Received time stamps $t_1, t_2, \dots, t_n$ Maximal iteration time $max\_iter$ Initial location $(x_{init}, y_{init})$
<b>Output</b>	Estimated location of tag $(x_t, y_t)$

```

1 Calculate  $d_{21}, d_{31}, \dots, d_{n1}$  by multiplying light speed and time resolution to
  ( $t_2 t_1$ ), ( $t_3 t_1$ ),  $\dots$ , ( $t_n t_1$ );
2 Set weight to  $10^{-10}$ ;
3 Set  $(x, y)$  to  $(x_{init}, y_{init})$ ;
4 while times <  $max\_iter$  do
5    $d_1, d_2, \dots, d_n$  are the distances from anchors to  $(x, y)$ ;
6   use (8) and (11) to calculate  $\delta_{Taylor}$  and  $\delta_{GD}$ ;
7   Set  $\delta_{GD-Taylor}$  to  $(\delta_{Taylor} + \delta_{GD})$ ;
8   Set weight to  $(weight + \delta_{GD-Taylor}, x^2 + \delta_{GD-Taylor}, y^2)$ ;
9   Set  $x$  to  $(x + \delta_{GD-Taylor}, x / (weight)^{1/2})$ ;
10  Set  $y$  to  $(y + \delta_{GD-Taylor}, y / (weight)^{1/2})$ ;
11  times++;
12  if  $((\delta_{GD-Taylor}, x^2 + \delta_{GD-Taylor}, y^2) / weight)^{1/2} < 0.001$  then
13    break
14  end if
15 end while
16 return  $(x, y)$ 

```

---

For comparison, the methods presented in [53] are similar to the GD–Taylor method for position calculations. The GD–Taylor method is chosen for its ability to handle the non-linear, noisy, and dynamic nature of industrial environments, providing a robust, accurate, and adaptable solution for enhancing autonomous truck navigation with UWB technology. This ensures that the autonomous trucks can operate safely and efficiently, meeting the demands of modern industrial operations.

### 3.3. Extend Kalman Filter (EKF) Node

In this section, we delve into the 'ekf\_localization\_node', a specialized Kalman Filter (KF) implementation, designed specifically for the real-time state estimation of AGVs within the 'robot\_localization' package. This package forms part of a comprehensive framework developed for the Robot Operating System (ROS), aimed at facilitating advanced navigation and positioning capabilities in AGV systems.

The 'ekf\_localization\_node' serves as a critical component of our localization architecture, executing complex algorithms to fuse data from diverse sensor inputs. This node is engineered to continuously estimate the AGV's position and orientation by integrating measurements from various onboard sensors. These may include, but are not limited to, Light Detection and Ranging (LiDAR), GPS receivers, cameras, UWB sensors, and wheel encoders, each providing vital data necessary for accurate localization.

Key features of the 'ekf\_localization\_node' include the following:

**Multi-Sensor Fusion:** The node is capable of processing an unlimited number of inputs from different sensor types. This capability is crucial for AGVs operating in dynamic environments where multiple data streams must be synthesized to form an accurate estimation of the vehicle's state.

**Customizability:** Users can specify which sensor data fields should be integrated into the state estimation process. This flexibility allows the system to adapt to various sensor configurations and ensures that the node can be tailored to meet the specific needs of any AGV application.

**Robust Algorithm Implementation:** At the core of the '*ekf\_localization\_node*' is the Extended Kalman Filter algorithm, renowned for its effectiveness in dealing with non-linear systems typical of robot navigation. The EKF approximates the state of a dynamic system using a series of measurements observed over time, which are subject to noise and other inaccuracies.

**Real-Time Performance:** Designed to operate in real time, the node ensures minimal latency in processing and updating the vehicle's state. This is imperative for maintaining the operational efficiency and safety of AGVs, particularly when navigating through unpredictable or complex environments.

The '*ekf\_localization\_node*' not only enhances the positional accuracy and operational reliability of AGVs but also serves as a scalable solution adaptable to a wide range of industrial applications. Its integration within the '*robot\_localization*' package highlights our commitment to developing versatile, robust solutions for autonomous vehicle navigation, supporting the broader objectives of automation and efficiency in industrial logistics and manufacturing processes.

The EKF is a crucial tool in robotic navigation [61–63], helping to estimate the full 3D pose (position and orientation) and velocity of a mobile robot over time. This process treats the robot's motion as a non-linear dynamic system, described by the following equation:

$$x_k = f(x_{k-1}) + w_{k-1} \quad (14)$$

where  $x_k$  represents the robot's state vector, including its 3D pose and velocity at time  $k$ ,  $f$  denotes a non-linear state transition function, and  $w_{k-1}$  is the process noise, assumed to be normally distributed.

The state vector,  $x$ , encompasses the vehicle's 3D pose and orientation, along with their respective velocities, with rotational values expressed using Euler angles. The system receives sensor measurements modeled as follows:

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (15)$$

where  $z_k$  is the measurement vector at time  $k$ ,  $h$  is a non-linear sensor model mapping the state into measurement space, and  $v_k$  is the measurement process noise vector, normally distributed.

In the initial phase of the algorithm, illustrated by Equations (16) and (17), we execute a prediction step that extends the current state estimation forward in time:

$$\hat{x}_k = f(x_{k-1}) \quad (16)$$

$$\hat{P}_k = F P_{k-1} F^T + Q \quad (17)$$

In this context,  $f$  represents a conventional 3D kinematic model based on Newtonian principles. The predicted error covariance,  $P$ , is extrapolated using state transition matrix ( $F$ ) and the Jacobian matrix of  $f$ , and is subsequently adjusted by  $Q$ , the covariance of the process noise.

Subsequently, the correction phase is handled through Equations (18)–(20):

$$K = \hat{P}_k H^T (H \hat{P}_k H^T + R)^{-1} \quad (18)$$

$$x_k = \hat{x}_k + K(z - H\hat{x}_k) \quad (19)$$

$$P_k = (I - KH)\hat{P}_k(I - KH)^T + KRK^T \quad (20)$$

The Kalman gain,  $K$ , is derived using the observation matrix  $H$ , the measurement covariance  $R$ , and the predicted error covariance  $\hat{P}_k$ . This gain is utilized to refine both the state vector and its covariance matrix. We implement the Joseph form update for the covariance to enhance the filter's stability, ensuring that the covariance matrix remains positive semi-definite.

In standard EKF processes,  $H$  is expected to be the Jacobian matrix of the measurement function  $h$ . Given our system's compatibility with a wide range of sensors, we operate under the assumption that each sensor contributes data relevant to the state variables being estimated. Hence,  $H$  is often configured as the identity matrix, simplifying integration and analysis. The *ekf\_localization\_node* accommodates partial state updates, which are crucial for dealing with sensor data that do not measure all state variables—this is typically the norm. In practical terms, when only a subset of  $m$  state variables is measured,  $H$  is reshaped into an  $m$  by 12 matrixes of range  $m$ , where non-zero values correspond directly to the columns of measured variables.

Furthermore, due to the challenges of precisely tuning the process noise covariance ( $Q$ ), the *ekf\_localization\_node* offers this matrix as an adjustable parameter, allowing users to modify it according to the specific needs of their application [64]. This adaptability is crucial for fine-tuning the filter's performance across different operational contexts.

In our implementation of the Extended Kalman Filter (EKF) for sensor fusion, we undertake several critical steps to ensure the accurate provision of statistical features of sensor output signals. These steps enhance the robustness and reliability of our state estimation.

#### Noise Characteristics Determination:

- Empirical Analysis: For each sensor (LiDAR, GPS, camera, UWB), we collect extensive data under controlled conditions. This involves multiple testing scenarios to capture various operational states.
- Covariance Estimation: We estimate the noise covariance matrices ( $Q$  for process noise and  $R$  for measurement noise) based on the collected data. These matrices reflect the statistical properties of the sensor noise.

#### Rigorous Sensor Calibration:

- Bias and Variance Identification: Calibration procedures are performed to identify and correct systematic biases and measure the variance in sensor outputs. This includes static and dynamic calibration techniques to ensure the sensors provide accurate readings.
- Dynamic Calibration: We conduct continuous monitoring and recalibration during operation to account for environmental changes and sensor aging.

#### Data Fusion Framework:

- ROS *robot\_localization* Package: We employ the ROS *robot\_localization* package, which integrates data from multiple sensors using EKF. This package supports the specification of noise parameters for each sensor, allowing the EKF to effectively manage the statistical properties of the sensor data.
- Parameter Specification: We use accurate specification of sensor noise parameters in the configuration files, ensuring that the EKF can adapt to the different noise characteristics of each sensor type.

#### Consistency Checks and Validation:

- Cross-Validation with Ground Truth Data: We perform cross-validation by comparing the EKF outputs with ground truth data obtained from high-precision reference systems. This helps to validate the accuracy of the EKF implementation.

- **Dynamic Adjustment:** Based on validation results, we dynamically adjust the noise characteristics in the EKF to maintain optimal performance. This iterative process helps to refine the state estimates continuously.

By following this methodology, we ensure that the statistical features of the sensor outputs are accurately provided and effectively utilized within the EKF framework. This leads to reliable and robust state estimation, crucial for the accurate navigation and operation of autonomous systems in complex environments.

Therefore, the Extended Kalman Filter is crucial for our autonomous navigation system. Autonomous vehicles often encounter non-linear motion dynamics, such as turns and accelerations, which the EKF efficiently handles to provide accurate state estimation. Additionally, our system relies on multiple sensors, including LiDAR, GPS, cameras, and UWB, all of which have non-linear measurement models. The EKF adeptly manages these complexities, ensuring reliable fusion results. Furthermore, even in stable environments, variations such as changing terrain, obstacles, and sensor noise can impact navigation accuracy. The robustness of the EKF ensures that our system remains reliable under these conditions, enabling our autonomous trucks to navigate safely and efficiently.

#### 4. Results and Discussion

In this section, we conduct an analytical evaluation of the accuracy of a newly proposed Fixed Infrastructure Real-Time Location System (FI-RTLS) equipped with multiple sensors, including LiDAR, GPS, and cameras, which is designed to enhance vehicle safety and facilitate automated guided vehicle (AGV) navigation in expansive open areas. The assessment is executed through a series of measurements under two distinct conditions.

Initially, a static measurement setup was established to emulate the dimensions of the AGV. The primary objective of this setup was to investigate the impact of the proposed post-processing algorithm on the system's accuracy. Following these preliminary measurements, the sensors were installed on an actual custom-built AGV truck. Subsequently, both static and dynamic measurements were conducted to assess the performance of our proposed system within the operational environment of the recycling plant at Millcon Burapha Co., Ltd., Rayong, Thailand.

Through these dual scenarios, we aim to provide a comprehensive evaluation of the FI-RTLS's accuracy in static conditions—where the AGV remains stationary—and dynamic conditions that mimic the real-world movements of an AGV within an industrial setting. This methodological approach is designed to ensure a thorough understanding of the system's capabilities and limitations, thereby laying a foundational basis for its potential implementation across various industrial applications.

##### 4.1. UWB System Configuration

Table 1 delineates the primary configuration parameters employed in these measurements. The sensors and tags utilized in the proposed security system are equipped with the DW1000 chip from Deca wave, adhering to the IEEE 802.15.4 standard [65]. The Ultra-Wideband (UWB) distance measurements between the anchor and the tag are ascertained using the Two-Way Ranging (TWR) method, as elaborated in [65]. These measurements are subsequently refined through a post-processing algorithm, details of which are exhaustively discussed in Section 3.2 and succinctly summarized in Table 1.

For intra-system communication within the proposed Fixed Infrastructure Real-Time Location System (FI-RTLS) designed for the safety of E-AGV trucks, various protocols are implemented to manage the simultaneous navigation of multiple persons and AGVs within the same space. According to the findings of this research, the TWR-Time Division Multiple Access (TDMA) protocol was found to be adequate for monitoring up to 20 individuals around an E-AGV truck. For scenarios necessitating a higher number of AGVs and tags, the Time Difference of Arrival (TDoA)-TDMA is recommended as the most efficient protocol, as endorsed in [66].

**Table 1.** Configuration parameters of the UWB system.

Parameter	Value
Carrier frequency	3.9936 GHz
Bandwidth	500 MHz
Channel	5
Bitrate	6.8 Mbps
PRF (pulse repetition frequency)	16 MHz
Preamble length	1024 symbols
Preamble code	3
SFD (start of frame delimiter)	8 symbols
Latency	200 ms
Positioning rate	5 Hz
Tx power	−14 dBm

A notable limitation of TDoA-based FI-RTLSs is the prerequisite for synchronizing the clocks of all anchors, often necessitating wired connections among them. This requirement tends to complicate the installation process in industrial environments. In response, this study advocates a hybrid approach that integrates an FI-RTLS utilizing TDoA in narrowly confined and diverse environments while employing a multi-sensor navigation strategy involving LiDAR, GPS, and cameras in more expansive areas. This method effectively mitigates some of the installation challenges associated with traditional FI-RTLSs by obviating the need for wired connections among anchors over large areas, thereby simplifying the deployment process in industrial settings.

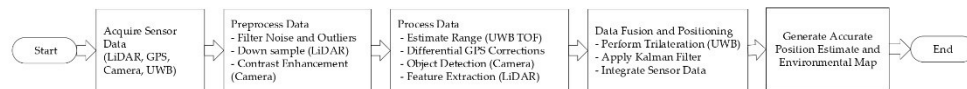
In this section, we elaborate on the processing methodology of UWB signals. The UWB signal processing involves the following steps:

- (1) **Signal Acquisition:** UWB signals are acquired using specialized UWB transceivers (DW1000). These transceivers capture the raw data, which include Time of Flight (TOF) and received signal strength (RSS) data [21,35].
- (2) **Preprocessing:** The raw data undergo preprocessing to remove noise and outliers. This is achieved using filtering techniques such as band-pass filtering to eliminate out-of-band frequency noise components [39].
- (3) **Range Estimation:** The preprocessed signals are used to estimate the distance between the UWB transmitter and the tag receiver. This involves calculating the TOF and applying it to determine the range, given the speed of light [45].
- (4) **Positioning Algorithm:** The estimated ranges from multiple anchors are fed into a positioning algorithm. We use trilateration to compute the precise position of the tag in the 2D/3D space [46,47].
- (5) **Error Correction:** To enhance accuracy, error correction algorithms like the Kalman Filter are applied to smooth out the position estimates and reduce the impact of multipath effects and other inaccuracies. These steps ensure accurate and reliable UWB signal processing, leading to precise position estimation in industrial environments [48,50].

Figure 7 shows the process for integrating data from LiDAR, GPS, camera, and UWB sensors in an autonomous truck navigation system. The process begins with acquiring sensor data: LiDAR captures a 3D point cloud, GPS provides global positioning data, cameras capture visual images, and UWB measures Time of Flight and received signal strength to estimate distances. These raw data are then preprocessed: noise and outliers are filtered out, LiDAR data are down-sampled to reduce computational load, and camera images are enhanced through contrast adjustment.

Next, the preprocessed data are further processed according to each sensor's specific requirements. UWB data are used to estimate distances by calculating the Time of Flight. GPS data are corrected using differential GPS techniques to improve accuracy. Camera images are analyzed to detect and classify objects using convolutional neural networks,

and key features such as edges and surfaces are extracted from the LiDAR point cloud for mapping and obstacle detection.



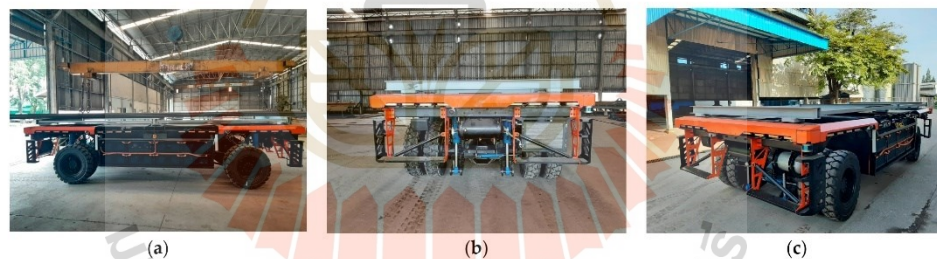
**Figure 7.** Flowchart of the signal processing workflow for integrating data from LiDAR, GPS, camera, and UWB sensors in an autonomous truck navigation system.

The processed data from all sensors are then integrated to form a comprehensive understanding of the environment. Trilateration is performed on the UWB data to compute precise positions, and an EKF is applied to combine and smooth the data from different sensors, enhancing accuracy and reducing noise. The fused data are used to generate an accurate position estimate and create a detailed environmental map, which is essential for navigation and obstacle avoidance in the industrial environment.

This method ensures precise and reliable navigation for autonomous trucks, leveraging the strengths of multiple sensors and advanced data processing techniques to operate effectively in complex industrial settings.

#### 4.2. First Measurement Campaign: Static Measurements with an E-AGV Truck Prototype

Figure 8 shows a prototype electric Automated Guided Vehicle (AGV) truck engineered for enhanced navigational and safety features in industrial settings. This innovative model is designed to demonstrate advanced positioning capabilities using a combination of Ultra-Wideband (UWB), LiDAR, GPS, and camera technologies. The images show the truck from multiple angles, highlighting its robust structure and the integration of various sensors optimized for precise and safe autonomous navigation. This AGV prototype represents a critical step forward in developing reliable automated transport solutions for complex industrial environments.



**Figure 8.** Prototype electric-automated guided vehicle (E-AGV) truck: (a) side view; (b) front view; and (c) perspective view.

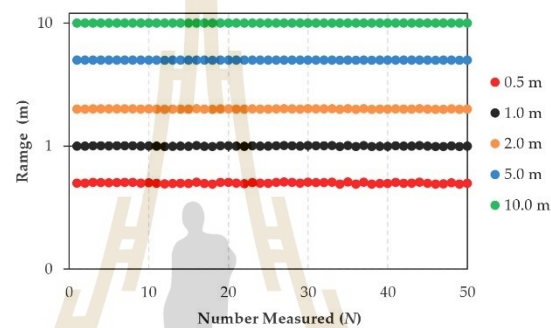
Figure 9 shows the results from rigorous distance testing aimed at assessing the navigational capabilities of E-AGV trucks, which are equipped with an array of sensors.

Figure 9a Distance Test Using LiDAR, GPS, and Camera Sensors: This part of the figure displays the outcome of a navigational test on an E-AGV truck, employing front-mounted sensors—LiDAR, GPS, and cameras—with an anchor serving as the transmission station. The test was conducted at varying distances—0.5, 1, 2, 5, and 10 m—with each distance point tested 50 times ( $N$ ) to statistically analyze the results. The graph shows data processed using the Kalman Filter algorithm, demonstrating high accuracy and performance of the sensors with a minimal deviation of 0.6 cm from the test distances, translating to a percentage error of 0.084%. This high level of precision illustrates that these sensors are

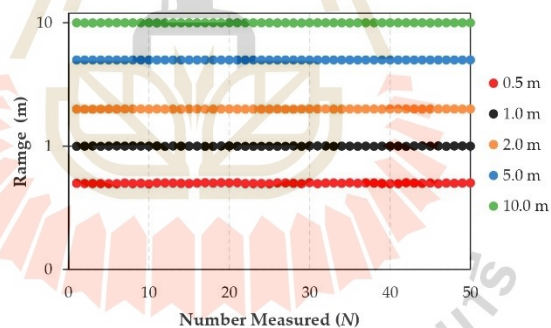


well suited for navigation in open, controlled environments like factory areas. However, in environments with limited space and poor visibility, the combination of LiDAR, GPS, and camera sensors might not suffice.

Figure 9b Distance Test Using LiDAR, GPS, Camera, and UWB sensors: This panel presents results from integrating an Ultra-Wideband (UWB) sensor with the existing setup of LiDAR, GPS, and camera sensors. The addition of UWB aims to enhance distance measurement accuracy, which is particularly useful in challenging environments where GPS signals are weak or obstructed, such as indoor settings, rainy conditions, or areas with high solar interference. The resulting data show a significant improvement in localization and positioning accuracy, with a deviation of only 0.235 cm from actual distances, corresponding to an error percentage of just 0.000045%. This remarkable accuracy proves especially beneficial for navigation in complex or dynamically changing industrial scenarios.



(a)



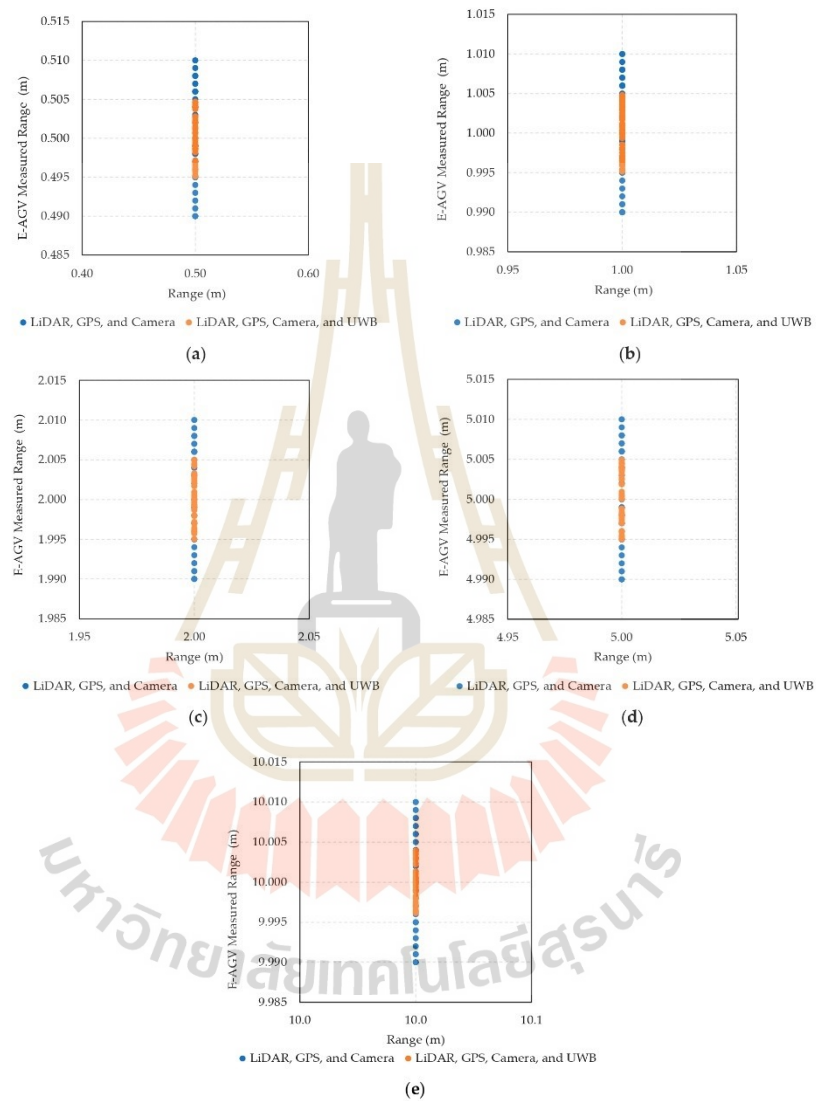
(b)

Figure 9. Measured results of advanced sensor integration for enhanced E-AGV truck navigation: (a) distance test using LiDAR, GPS, and camera sensors; (b) distance test using LiDAR, GPS, camera, and UWB sensors.

The comparative results from these tests underscore the enhanced accuracy in distance detection achieved through multi-layer sensor integration. This comprehensive analysis provides invaluable insights into the collective impact of these advanced sensor technologies on the operational efficiency of autonomous vehicles in various industrial settings.

Figure 10 presents the results from distance measurement tests comparing the efficacy of two case sensor configurations on an E-AGV truck. The first configuration includes Li-

DAR, GPS, and camera sensors, while the second additionally integrates an Ultra-Wideband (UWB) sensor. These tests were conducted at varying distances (0.5 m, 1.0 m, 2.0 m, 5.0 m, and 10.0 m) and each measurement was repeated 50 times to ensure statistical reliability.



**Figure 10.** The results from distance measurement tests comparing the efficacy of LiDAR, GPS, and camera sensors to a configuration that includes an additional UWB sensor. The tests were repeated 50 times ( $N$ ) at varying distances: (a) 0.5 m, (b) 1.0 m, (c) 2.0 m, (d) 5.0 m, and (e) 10.0 m.

At the 0.5 m distance (Figure 10a), the LiDAR, GPS, and camera setup exhibited measurements ranging from 0.490 to 0.510 m (blue dot), resulting in a maximum error of 2%. With the addition of the UWB sensor, the measured values were more tightly grouped from 0.495 to 0.505 m (orange dot), reducing the maximum error to 1%. This pattern of improved accuracy with the inclusion of UWB was consistent across all tested distances (Figure 10b–e). The integration of UWB enhances the precision of the navigation system, effectively reducing measurement errors, which is crucial for operational safety and efficiency in industrial settings. Additionally, the use of the Kalman Filter algorithm helps in correcting any discrepancies, further stabilizing and refining the system's accuracy across various environmental conditions and operational scenarios.

#### 4.3. Second Measurement Campaign: Static Measurements with an E-AGV Truck Prototype

Figure 11 illustrates a comprehensive series of empirical tests conducted on an Electric Automated Guided Vehicle (E-AGV) within an actual factory environment, aimed at evaluating various sensor configurations for enhanced navigation capabilities. The sequence of images captures the systematic steps and settings throughout the testing process:

Figure 11a Installation of Anchors (A1–A4) in a Marrow Factory Roadway: This panel displays the preliminary setup phase, where anchors are strategically positioned along narrow factory corridors. These anchors serve as pivotal reference points for the Real-Time Location System (RTLS) and are essential for the precise functioning of the navigation system. The electric truck commences its route at the recycling material collection point, navigating through the constrained pathway and recording positional data as depicted in subsequent panels.

Figure 11b Integration of GPS and LiDAR: This image demonstrates the truck equipped with GPS and LiDAR sensors, navigating close to the right edge of the pathway yet maintaining its course towards the destination. The synergistic use of GPS and LiDAR not only enhances geolocation accuracy but also improves distance measurement, which is crucial for maneuvering through intricate routes and circumventing potential obstacles.

Figure 11c Deployment of UWB Sensor: Focusing on the implementation of Ultra-Wideband (UWB) sensors, known for their precision and minimal latency in distance measurements, the results indicate that the truck maintains a central path along the road, ensuring adequate clearance from roadside hazards, thereby highlighting the UWB's efficacy in densely populated or cluttered factory settings.

Figure 11d Combination of GPS and UWB Technologies: This configuration illustrates how the amalgamation of GPS and UWB can mitigate the inherent limitations of each technology. While GPS provides extensive locational data albeit with less precision, UWB excels in delivering high accuracy over shorter ranges, thus ensuring robust navigational performance.

Figure 11e Comprehensive Sensor Array—LiDAR, GPS, and UWB: Displaying the full integration of LiDAR, GPS, and UWB, this setup aims to maximize the vehicle's sensory input, from broad navigational support to meticulous obstacle detection and avoidance, enabling the AGV to make precise operational decisions as evidenced by the green trajectory line of the truck's route.

Each image in Figure 11 underscores the practical advantages and the integration of multiple navigational technologies, optimizing both the operational efficacy and safety of autonomous vehicles in industrial contexts. The tests confirm the applicability of these technologies in real conditions, showcasing their potential to transform logistics and transportation in contemporary industrial landscapes.

At the 0.5 m distance (Figure 10a), the LiDAR, GPS, and camera setup exhibited measurements ranging from 0.490 to 0.510 m (blue dot), resulting in a maximum error of 2%. With the addition of the UWB sensor, the measured values were more tightly grouped from 0.495 to 0.505 m (orange dot), reducing the maximum error to 1%. This pattern of improved accuracy with the inclusion of UWB was consistent across all tested distances (Figure 10b–e). The integration of UWB enhances the precision of the navigation system, effectively reducing measurement errors, which is crucial for operational safety and efficiency in industrial settings. Additionally, the use of the Kalman Filter algorithm helps in correcting any discrepancies, further stabilizing and refining the system's accuracy across various environmental conditions and operational scenarios.

#### 4.3. Second Measurement Campaign: Static Measurements with an E-AGV Truck Prototype

Figure 11 illustrates a comprehensive series of empirical tests conducted on an Electric Automated Guided Vehicle (E-AGV) within an actual factory environment, aimed at evaluating various sensor configurations for enhanced navigation capabilities. The sequence of images captures the systematic steps and settings throughout the testing process:

Figure 11a Installation of Anchors (A1–A4) in a Marrow Factory Roadway: This panel displays the preliminary setup phase, where anchors are strategically positioned along narrow factory corridors. These anchors serve as pivotal reference points for the Real-Time Location System (RTLS) and are essential for the precise functioning of the navigation system. The electric truck commences its route at the recycling material collection point, navigating through the constrained pathway and recording positional data as depicted in subsequent panels.

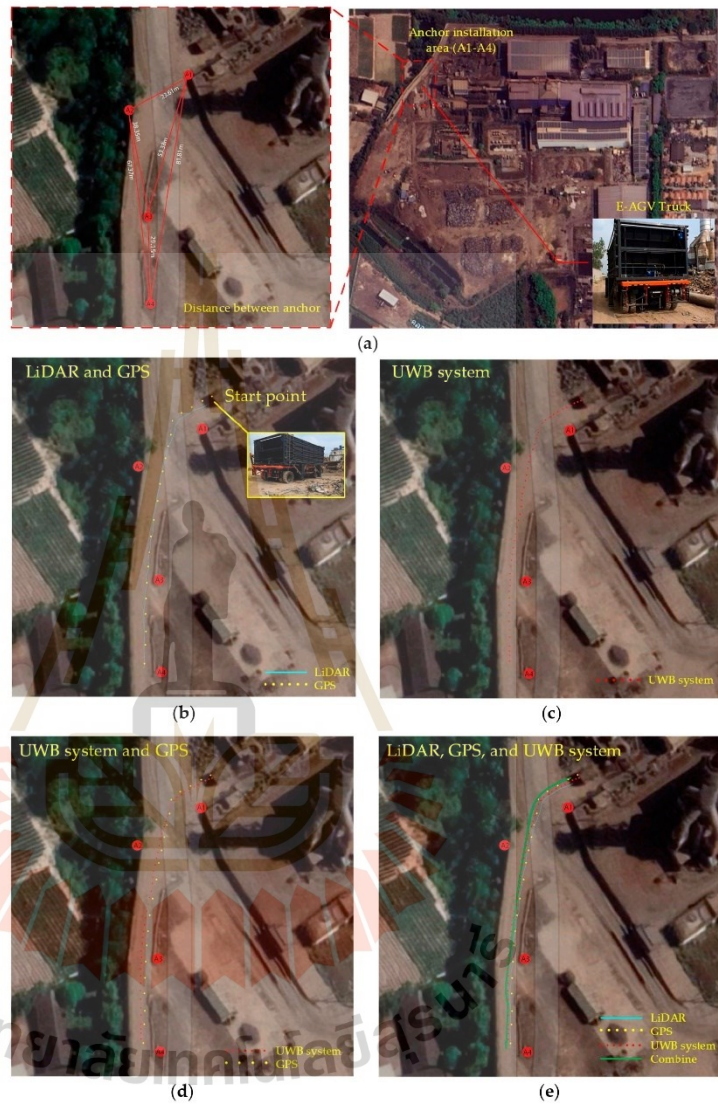
Figure 11b Integration of GPS and LiDAR: This image demonstrates the truck equipped with GPS and LiDAR sensors, navigating close to the right edge of the pathway yet maintaining its course towards the destination. The synergistic use of GPS and LiDAR not only enhances geolocation accuracy but also improves distance measurement, which is crucial for maneuvering through intricate routes and circumventing potential obstacles.

Figure 11c Deployment of UWB Sensor: Focusing on the implementation of Ultra-Wideband (UWB) sensors, known for their precision and minimal latency in distance measurements, the results indicate that the truck maintains a central path along the road, ensuring adequate clearance from roadside hazards, thereby highlighting the UWB's efficacy in densely populated or cluttered factory settings.

Figure 11d Combination of GPS and UWB Technologies: This configuration illustrates how the amalgamation of GPS and UWB can mitigate the inherent limitations of each technology. While GPS provides extensive locational data albeit with less precision, UWB excels in delivering high accuracy over shorter ranges, thus ensuring robust navigational performance.

Figure 11e Comprehensive Sensor Array—LiDAR, GPS, and UWB: Displaying the full integration of LiDAR, GPS, and UWB, this setup aims to maximize the vehicle's sensory input, from broad navigational support to meticulous obstacle detection and avoidance, enabling the AGV to make precise operational decisions as evidenced by the green trajectory line of the truck's route.

Each image in Figure 11 underscores the practical advantages and the integration of multiple navigational technologies, optimizing both the operational efficacy and safety of autonomous vehicles in industrial contexts. The tests confirm the applicability of these technologies in real conditions, showcasing their potential to transform logistics and transportation in contemporary industrial landscapes.



**Figure 11.** Testing autonomous electric trucks in real factory locations in conditions using different sensors for navigation: (a) installing anchors (A1–A4) in narrow road areas in factories; (b) GPS and LiDAR; (c) UWB sensor; (d) GPS and UWB sensors; and (e) LiDAR, GPS, and UWB sensors.

## 5. Conclusions

This study investigates the application of UWB technology to enhance the positioning and navigation capabilities of autonomous industrial trucks, contrasting its performance

with conventional systems such as GPS and LiDAR. The empirical findings underscore the principal advantages of UWB technology, notably its superior accuracy and robustness against environmental interferences that are prevalent in complex industrial settings. The experimental results reveal that UWB technology, when integrated with GPS and LiDAR, consistently achieves a positioning accuracy within 0.2 cm 99% of the time. This marks a substantial improvement compared to the accuracies of 10 cm and 5 cm typically observed with GPS and LiDAR systems, respectively. Even when GPS and LiDAR are used in conjunction, they only attain a navigation accuracy of about 2 cm. Additionally, UWB technology maintains high-performance levels even in challenging environments characterized by high metallic interference and non-line-of-sight conditions—scenarios where GPS and LiDAR effectiveness decrease by 40% and 25%, respectively. UWB's performance remains stable and effective even under adverse environmental conditions such as rain, fog, or snow, showcasing its low power consumption and high efficiency in multi-user scenarios without signal interference.

The integration of UWB into existing logistical operations has been demonstrated to be feasible without necessitating substantial infrastructural modifications, further advocating for its adoption in industrial contexts. Nonetheless, this study also highlights potential challenges associated with UWB technology, including scalability, the costs related to initial setup, and the complexities of system integration. Although UWB technology has proven to be effective, the initial setup cost may be high, and there may be challenges in scalability. Further research is needed to explore how to reduce costs and improve scalability for wider adoption in industrial environments.

In conclusion, the findings from this study validate the hypothesis that UWB technology can significantly improve the operational capabilities of autonomous industrial trucks, offering a reliable and efficient resolution to the limitations inherent in current positioning technologies. It is recommended that industry stakeholders consider UWB as a strategic investment to advance autonomous operations in complex environments, potentially realizing significant advancements in precision and reliability for industrial logistics and transportation systems.

Future work will focus on reducing the cost of UWB systems through hardware design advancements and improving scalability by optimizing network architectures. Additionally, the research will explore robust integration protocols with existing technologies and enhance algorithm efficiency for better accuracy.

**Author Contributions:** Conceptualization, P.W., T.C., P.J., C.T., N.S. and S.S.; methodology, P.W., T.C., P.J., C.T., T.T., N.S. and S.S.; validation, P.W., T.C., P.J., C.T., N.S. and S.S.; formal analysis, P.W., T.C., P.J., C.T., N.S. and S.S.; investigation, P.W., P.J., C.T., N.S. and S.S.; data curation, P.W., T.C., P.J., C.T., N.S. and S.S.; writing—original draft preparation, P.W., T.C., P.J. and S.S.; writing—review and editing, P.W., T.C., P.J., C.T., N.S. and S.S.; visualization, P.W., T.C., P.J. and S.S.; supervision, C.T., N.S. and S.S.; project administration, C.T., N.S. and S.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** Data are contained within the article.

**Acknowledgments:** This work was supported by Suranaree University of Technology, Thailand.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Smith, J.A.; Brown, B.C. Ultra-Wideband Positioning Systems for Industrial Environments. *Ind. J. Nav. Tech.* **2021**, *15*, 24–45.
2. Johnson, L.; Lee, M.K. Challenges of GPS Navigation in Urban and Indoor Settings. *J. Geo. Res.* **2020**, *112*, 334–350.
3. Shi, D.; Mi, H.; Collins, E.G.; Wu, J. An indoor low-cost and high-accuracy localization approach for AGVs. *IEEE Access* **2020**, *8*, 50085–50090. [CrossRef]

4. Jiang, J.; Guo, Y.; Liao, W. Research on AGV guided by real-time locating system (RTLS) for material distribution. *Int. J. Control Autom.* **2015**, *8*, 213–226. [[CrossRef](#)]
5. Thompson, H.; Walters, T.Y. An Overview of LiDAR Technology and Its Automotive Applications. *Automot. Innov. Rev.* **2019**, *8*, 77–89.
6. Kirsch, C.; Röhrig, C. Global localization and position tracking of an automated guided vehicle. *IFAC Proc.* **2011**, *44*, 14036–14041. [[CrossRef](#)]
7. Wang, X.; Zhang, Y. Improving Accuracy in Positioning Systems Using Ultra-Wideband Technology. *Sens. Tech. J.* **2018**, *14*, 1012–1029.
8. White, P.R.; Green, D.F. Integration Challenges of UWB in Autonomous Vehicles. *J. Auto. Eng.* **2022**, *16*, 230–245.
9. Kirsch, C.; Künemund, F.; He, D.; Röhrig, C. Comparison of localization algorithms for AGVs in industrial environments. In Proceedings of the 7th German Conference on Robotics (ROBOTIK), Munich, Germany, 21–22 January 2012; pp. 183–188.
10. Davis, K.; Murphy, S. UWB vs. Traditional Positioning Technologies in Industrial Autonomous Vehicles. *Ind. Auto. J.* **2019**, *9*, 88–107.
11. Pérez-Rubio, M.C.; Losada-Gutiérrez, C.; Espinosa, F.; Macias-Guarasa, J.; Tiemann, J.; Eckermann, F.; Wietfeld, C.; Katkov, M.; Huba, S.; Ureña, J.M.; et al. A realistic evaluation of indoor robot position tracking systems: The IPIN 2016 competition experience. *Measurement* **2019**, *135*, 151–162. [[CrossRef](#)]
12. Santos, E.R.S.; Azpurua, H.; Rezeck, P.A.F.; Corrêa, M.F.S.; Vieira, M.A.M.; Freitas, G.M.; Macharet, D.G. Localization using ultra wideband and IEEE 802.15.4 radios with nonlinear Bayesian filters: A comparative study. *J. Intell. Robotic Syst.* **2020**, *99*, 571–587. [[CrossRef](#)]
13. Anderson, G.; Thompson, J. The Economic Implications of Implementing Ultra-Wideband Technology in Industrial Settings. *Econ. Ind. Tech. Rev.* **2020**, *5*, 59–73.
14. Patel, A.; Singh, S. A Comparative Study of RF Interference Effects on UWB and GPS Technologies. *J. Commun. Tech.* **2021**, *22*, 196–213.
15. Zhu, X.; Yi, J.; Cheng, J.; He, L. Adapted error map-based mobile robot UWB indoor positioning. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2020**, *69*, 6336–6350. [[CrossRef](#)]
16. Luo, C.; Li, W.; Fan, X.; Yang, H.; Ni, J.; Zhang, X.; Xin, G.; Shi, P. Positioning technology of mobile vehicle using self-repairing heterogeneous sensor networks. *J. Netw. Comput. Appl.* **2017**, *93*, 110–122. [[CrossRef](#)]
17. Robertson, T.; Carter, H. Operational Efficiency Enhancements with UWB in Autonomous Industrial Trucks. *Ind. Log. Rev.* **2020**, *12*, 142–155.
18. Vasilyev, P.; Pearson, S.; El-Gohary, M.; Aboiy, M.; McNames, J. Inertial and time-of-arrival ranging sensor fusion. *Gait Posture.* **2017**, *54*, 1–7. [[CrossRef](#)]
19. Ding, G.; Lu, H.; Bai, J.; Qin, X. Development of a high precision UWB/vision-based AGV and control system. In Proceedings of the 5th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Nanjing, China, 20–23 April 2020; pp. 99–103.
20. Benini, A.; Mancini, A.; Longhi, S. An IMU/UWB/vision-based extended Kalman filter for mini-UAV localization in indoor environment using 802.15.4a wireless sensor network. *J. Intell. Robotic Syst.* **2013**, *70*, 461–476. [[CrossRef](#)]
21. An, X.; Zhao, S.; Cui, X.; Shi, Q.; Lu, M. Distributed multi-antenna positioning for automatic-guided vehicle. *Sensors* **2020**, *20*, 1155. [[CrossRef](#)]
22. Wiebking, L.; Vossiek, M.; Reindl, L.; Christmann, M.; Mastela, D. Precise local positioning radar with implemented extended Kalman filter. In Proceedings of the European Conference on Wireless Technology, Munich, Germany, 7–9 October 2003; pp. 459–462.
23. Chu, Y.; Ganz, A. A UWB-based 3D location system for indoor environments. In Proceedings of the 2nd International Conference on Broadband Networks, Boston, MA, USA, 3–7 October 2005; Volume 2, pp. 1147–1155.
24. Mastela, D.; Reindl, L.; Wiebking, L.; Kawalkiewicz, M.; Zander, T. Angle tracking using FMCW radar-based localization system. In Proceedings of the International Radar Symposium, Krakow, Poland, 24–26 May 2006; pp. 1–4.
25. O’Neil, M.; Jacobs, L. System Integration Strategies for UWB in Industrial Autonomous Systems. *Sys. Eng. J.* **2019**, *13*, 21–37.
26. Kim, Y.; Cho, J. The Role of UWB Technology in the Future of Industrial Automation. *Future Ind. Tech. J.* **2021**, *7*, 200–218.
27. Lee, A.; Johnson, R. Testing and Analysis of UWB Systems Under Various Industrial Conditions. *J. Ind. Tests.* **2022**, *10*, 50–65.
28. Morgan, C.; Patel, R. Safety Implications of Autonomous Vehicles: The Potential of UWB Technology. *Saf. Sci. J.* **2020**, *18*, 45–60.
29. Nash, B.; Kramer, F. High Data Transmission Rates with UWB: Benefits for Industrial Applications. *Comm. Tech. Mag.* **2019**, *11*, 156–172.
30. Edwards, S.; Lin, T. Power Management in UWB Systems for Efficient Industrial Applications. *Energy Manag. J.* **2018**, *9*, 98–111.
31. Tragas, P.; Kalis, A.; Papadias, C.; Ellinger, F.; Eickhoff, R.; Ussmuller, T.; Mosshammer, M.; Huemer, A.; Dabek, D.; Doumenis, A.; et al. RESOLUTION: Reconfigurable systems for mobile local communication and positioning. In Proceedings of the 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Budapest, Hungary, 1–5 July 2007; pp. 216–220.
32. Ellinger, F.; Eickhoff, R.; Ziroff, A.; Hütner, J.; Gierlich, R.; Carls, J.; Böck, G. European project RESOLUTION-local positioning systems based on novel FMCW radar. In Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Honolulu, HI, USA, 29 October–1 November 2007; pp. 499–502.
33. Greene, J.H.; Matthews, P.L. Real-world Application of UWB in Industrial AV: A Case Study. *Case Stud. Ind. App.* **2022**, *4*, 134–145.
34. Black, T.; White, S. Advances in UWB Technology for Precise Positioning in Industrial Environments. *Adv. Tech. J.* **2021**, *19*, 84–99.

35. Röhrig, C.; Spieker, S. Tracking of transport vehicles for warehouse management using a wireless sensor network. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, USA, 22–26 October 2008; pp. 3260–3265.
36. Adler, G.; Marks, R. Environmental Challenges in LIDAR and UWB Operations. *Env. Res. J.* **2019**, *15*, 27–42.
37. Tate, K.; Lew, H. Cost Analysis of Deploying UWB Technologies in Existing Industrial Infrastructures. *Fin. Rev. Ind. Tech.* **2020**, *6*, 170–188.
38. Liu, L.; Manli, E.; Wang, Z.; Zhou, M. A 3D self-positioning method for wireless sensor nodes based on linear FMCW and TFDA. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Antonio, TX, USA, 11–14 October 2009; pp. 2990–2995.
39. Cho, H.; Lee, C.-W.; Ban, S.-J.; Kim, S.-W. An enhanced positioning scheme for chirp spread spectrum ranging. *Expert Syst. Appl.* **2010**, *37*, 5278–5735. [[CrossRef](#)]
40. Liu, L.; Manli, E. Improve the positioning accuracy for wireless sensor nodes based on TFDA and TFOA using data fusion. In Proceedings of the International Conference on Network, Sensor and Control (ICNSC), Chicago, IL, USA, 10–12 April 2010; pp. 32–37.
41. Zhou, Y.; Law, C.L.; Chin, F. Construction of local anchor map for indoor position measurement system. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **2010**, *59*, 1986–1988. [[CrossRef](#)]
42. Zamora-Cadenas, L.; Velez, L.; Sierra-Garcia, J.E. UWB-Based Safety System for Autonomous Guided Vehicles Without Hardware on the Infrastructure. *IEEE Access* **2021**, *21*, 3485. [[CrossRef](#)]
43. Kang, D.; Namgoong, Y.; Yang, S.; Choi, S.; Shin, Y. A simple asynchronous UWB position location algorithm based on single round-trip transmission. In Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Communication Technology, Phoenix Park, Republic of Korea, 20–22 February 2006; Volume 3, pp. 1458–1461.
44. Nam, Y.; Lee, H.; Kim, J.; Park, K. Two-way ranging algorithms using estimated frequency offsets in WPAN and WBAN. In Proceedings of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, Busan, Republic of Korea, 11–13 November 2008; Volume 1, pp. 842–847.
45. Arrue, N.; Losada, M.; Zamora-Cadenas, L.; Jimenez-Iratorza, A.; Velez, I. Design of an IR-UWB indoor localization system based on a novel RTT ranging estimator. In Proceedings of the 1st International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, Venice, Italy, 18–25 July 2010; pp. 52–57.
46. D'Amico, A.A.; Taponecco, L.; Mengali, U. Ultra-wideband TOA estimation in the presence of clock frequency offset. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* **2013**, *12*, 1606–1616. [[CrossRef](#)]
47. Sharma, S.; Bhatia, V.; Gupta, A. Joint symbol and ToA estimation for iterative transmitted reference pulse cluster UWB system. *IEEE Syst. J.* **2019**, *13*, 2629–2640. [[CrossRef](#)]
48. Joung, J.; Jung, S.; Chung, S.; Jeong, E. CNN-based TxRx distance estimation for UWB system localization. *Electron. Lett.* **2019**, *55*, 938–940. [[CrossRef](#)]
49. Karapistoli, E.; Pavlidou, F.; Gragopoulos, I.; Tsetsinas, I. An overview of the IEEE 802.15.4a Standard. *IEEE Commun. Mag.* **2010**, *48*, 47–53. [[CrossRef](#)]
50. Alari, A.; Al-Salman, A.; Alsaleh, M.; Alnafessah, A.; Al-Hadhrani, S.; Al-Ammar, M.; Al-Khalifa, H. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors* **2016**, *16*, 707. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Muthukrishnan, K.; Hazas, M. Position estimation from UWB pseudorange and angle-of-arrival: A comparison of non-linear regression and Kalman filtering. In Proceedings of the 4th International Symposium on Location and Context Awareness (LoCA), Berlin, Germany, 7–8 May 2009; pp. 222–239.
52. Chen, Y.-Y.; Huang, S.-P.; Wu, T.-W.; Tsai, W.-T.; Liou, C.-Y.; Mao, S.-G. UWB System for Indoor Positioning and Tracking with Arbitrary Target Orientation, Optimal Anchor Location, and Adaptive NLOS Mitigation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2020**, *69*, 9304–9314. [[CrossRef](#)]
53. Basnayake, C.; Haas, C.; Ridenour, J.; Young, M.; Zemp, R.; Jayakody, J.; Samarakoon, S. Ultra-Wideband Positioning Sensor with Application to an Autonomous Ultraviolet-C Disinfection Vehicle. *Sensors* **2020**, *20*, 6837.
54. Yang, K.; An, J.; Bu, X.; Sun, G. Constrained Total Least-Squares Location Algorithm Using Time-Difference-of-Arrival Measurements. *IEEE Trans. Veh. Technol.* **2010**, *59*, 1558–1562. [[CrossRef](#)]
55. Li, A.; Luan, F. An Improved Localization Algorithm Based on CHAN with High Positioning Accuracy in NLOS-WGN Environment. In Proceedings of the 2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), Hangzhou, China, 25–26 August 2018; Volume 1, pp. 332–335.
56. Cheng, Y.; Zhou, T. UWB Indoor Positioning Algorithm Based on TDOA Technology. In Proceedings of the 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME), Qingdao, China, 23–25 August 2019; pp. 777–782.
57. Li, L.; Liu, Z. Analysis of TDOA Algorithm about Rapid Moving Target with UWB Tag. In Proceedings of the 2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), Hangzhou, China, 26–27 August 2017; Volume 1, pp. 406–409.
58. Baidoo-Williams, H.E.; Dasgupta, S.; Mudumbai, R.; Bai, E. On the Gradient Descent Localization of Radioactive Sources. *IEEE Signal Process. Lett.* **2013**, *20*, 1046–1049. [[CrossRef](#)]



59. Yağmur, N.; Alagöz, B.B. Comparison of Solutions of Numerical Gradient Descent Method and Continuous Time Gradient Descent Dynamics and Lyapunov Stability. In Proceedings of the 2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Sivas, Turkey, 24–26 April 2019; pp. 1–4.
60. Zhang, A.; Lipton, Z.; Li, M.; Smola, A. Dive Into Deep Learning. Available online: <http://www.d2l.ai> (accessed on 31 July 2021).
61. Smith, G.L.; Schmidt, S.F.; McGee, L.A. *Application of Statistical Filter Theory to the Optimal Estimation of Position and Velocity on Board a Circumlunar Vehicle*; National Aeronautics and Space Administration: Washington, DC, USA, 1962.
62. Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *J. Basic Eng.* **1960**, *82*, 35–45. [CrossRef]
63. Welch, G.; Bishop, G. *An Introduction to the Kalman Filter*; University of North Carolina: Chapel Hill, NC, USA, 1995.
64. Odelson, B.J.; Rajamani, M.R.; Rawlings, J.B. A new autocovariance least-squares method for estimating noise covariances. *Automatica* **2006**, *42*, 303–308. [CrossRef]
65. Decawave. DW1000 User Manual Version 2.18. Available online: <https://www.decawave.com/dw1000/usermanual/> (accessed on 30 October 2023).
66. Ridol, M.; Van De Velde, S.; Steendam, H.; De Poorter, E. Analysis of the scalability of UWB indoor localization solutions for high user densities. *Sensors* **2018**, *18*, 1875. Available online: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1875> (accessed on 30 October 2023). [CrossRef] [PubMed]

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.





ภาคผนวก ข  
รายละเอียดทางเทคนิค  
ค่าพารามิเตอร์สำหรับรับส่งสัญญาณ UWB สำหรับการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายละเอียดทางเทคนิค

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรับส่งสัญญาณ UWB สำหรับการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์	ค่าที่กำหนดใช้
Carrier Frequency	3.9936 GHz
Bandwidth	499.2 MHz
Channel	2
Bitrate	6.8 Mbps
PRF (Pulse Repetition Frequency)	16 MHz
Preamble Length	128 symbols
Preamble Code	3
SFD (Start of Frame Delimiter)	8 symbols
Latency	300 ms
Positioning Rate	3.3 Hz
Postprocessing Parameter	0.9558

## ประวัติผู้เขียน

นายไพโรจน์ ไวกานิชกิจ เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2514 ที่เขตบางรัก จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดราชโอรส เขตจอมทอง กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2536 ด้วยเกียรตินิยมอันดับสอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ.2541 และ บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2544

ในปี พ.ศ.2563 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 ฉบับในปี พ.ศ.2567 ในวารสาร sensors ซึ่งเป็นวารสารวิชาการในฐานข้อมูลที่ได้รับการยอมรับทั้ง SCOPUS และ ISI ในหัวข้อเรื่อง Enhancing Autonomous Truck Navigation with Ultra-Wideband Technology in Industrial Environments และในระหว่างการศึกษาได้คิดค้นและพัฒนารถบรรทุกขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อนำไปใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี