

english



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การปรับปรุงอัลกอริทึมการหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยใช้เรดาร์
สามมิติ

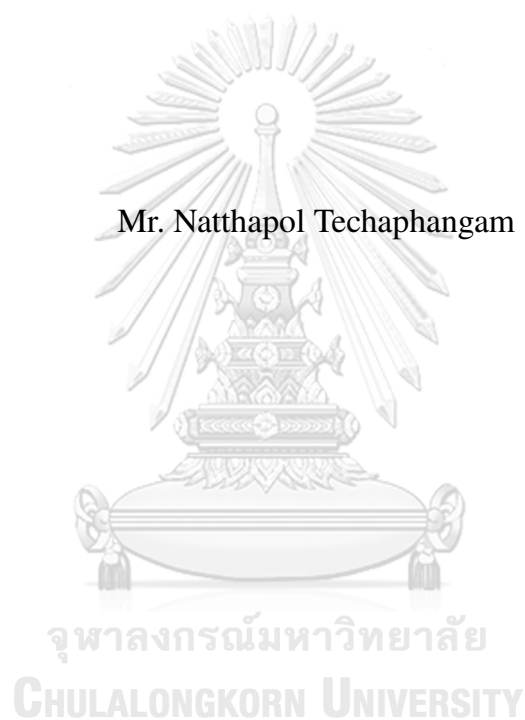


นาย อนุรักษ์ เตชะพันธ์งาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF THE OBSTACLE AVOIDANCE ALGORITHM FOR
UAVS USING 3D RADAR

Mr. Natthapol Techaphangam



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of engineering Program in Electrical engineering

Department of Electrical engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

ณัฐพล เตชะพันธ์งาม: การปรับปรุงอัลกอริทึมการหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยใช้เรดาร์สามมิติ. (IMPROVEMENT OF THE OBSTACLE AVOIDANCE ALGORITHM FOR UAVS USING 3D RADAR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 84 หน้า.

ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับอากาศยานสี่ใบพัด สิ่งสำคัญคือ ตัวรับรู้ และลักษณะของสิ่งกีดขวาง รูปร่างและการทำงานของอากาศยานสี่ใบพัดอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์อื่น ๆ และยังมีแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักมากเพื่อให้ใช้ได้ยาวนาน เพื่อลดภาระในส่วนนี้ จึงต้องอาศัยตัวรับรู้สำหรับค้นหาสิ่งกีดขวางที่มีน้ำหนักเบา และอาศัยการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อนจึงถูกเลือก งานวิจัยนี้นำเสนอการประมาณขนาด และตำแหน่งของสิ่งกีดขวางเพื่อกำหนดเส้นทางหลบหลีกโดยใช้ตัวรับรู้เรดาร์สามมิติ สัญญาณที่ได้จากตัวรับรู้เรดาร์ไม่สามารถแสดงถึงขนาดจริง และตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง อัลกอริทึมเคมีนถูกใช้สำหรับแยกกลุ่มของข้อมูลที่เป็นจุด วิธีกำลังสองต่ำสุดสำหรับวงกลมถูกใช้สำหรับประมาณสิ่งกีดขวาง โดยรัศมีแทนขนาดของวัตถุ และจุดศูนย์กลางวงกลมแทนตำแหน่งของวัตถุ ผลจากการประมาณตำแหน่งมีความใกล้เคียงค่าจริง แต่ผลจากการประมาณขนาดจะมีค่าเล็กกว่าค่าจริง จึงเพิ่มตัวแปรเพื่อขยายขนาดของการประมาณขนาด เมื่อได้ข้อมูลของสิ่งกีดขวางแล้ว โดยอาศัยอัลกอริทึมอาร์อาร์ที เพื่อค้นหาเส้นทางในการบินหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เพื่อลดเวลาในการค้นหาเส้นทาง เราได้ลดพื้นที่การค้นหาเส้นทางในทิศทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย ผลการจำลองการสร้างเส้นทางหลบหลีกจากขนาด และตำแหน่งที่ถูกประมาณแสดงให้เห็นว่าอากาศยานสี่ใบพัดสามารถบินหลบสิ่งกีดขวางได้

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2562		

6170165121: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: RADAR IMAGING SENSOR / OBSTACLE AVOIDANCE / QUADROTOR / RRT

NATTHAPOL TECHAPHANGAM : IMPROVEMENT OF THE OBSTACLE AVOIDANCE ALGORITHM FOR UAVS USING 3D RADAR. ADVISOR : Assit. Prof. Dr. Manop Wongsaisuwan, 84 pp.

In the problem of obstacle avoidance for quadrotor, two important things are sensors and shape of obstacles. The characteristic and operation of a quadrotor is equipped devices and a heavy battery for long time usage. To reduce this load, a lightweight sensor and a non-complicated process should be chosen. In this work, we use 3D-radar sensor to estimate the size and position of obstacles for calculating path avoidance. The signal received from the radar sensor could not show the real size and position of obstacles. The K-mean algorithm is used to cluster the data point. Least-square circle fitting is used to approximate obstacles with radius representing the object as its size and the center for the object as its position. The result of the approximated position is nearly actual while the result of the estimated size is smaller than the actual. We add the parameter to expand the estimated size. RRT algorithm is used to search the path avoidance. To reduce the spending time for searching, we reduce the searching area from the direction between the starting point and the goal point. The simulation result shows that a path avoidance from the estimated size and position of obstacles for quadrotor can avoid obstacles successfully.

Department : Electrical engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2019

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยแรงบันดาลใจและความช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ทุกท่าน ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำและเป็นแรงบันดาลใจในเรื่องวิทยานิพนธ์ การเรียนและการทำงานมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วัชรพงษ์ โขวิฑูรกิจ และ รศ. ดร. วารี กงประเวชนนท์ ที่ท่านสละเวลาอันมีค่าเพื่อตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ และให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม และคณาจารย์จากห้องปฏิบัติการพื้นฐานไฟฟ้า ที่ให้คำแนะนำความรู้เกี่ยวกับตัวรับรู้เรดาร์ IWR1443 ขอขอบคุณ พี่ก๊วก สมพล สุนทรสถานติก จากบริษัท ไฮฟกราวน์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องอุปกรณ์ตัวรับรู้ IWR1443 และให้ศึกษาเกี่ยวกับตัวอากาศยานสี่ใบพัด

วิทยานิพนธ์นี้สามารถเขียนให้เสร็จสมบูรณ์ได้จากความช่วยเหลือจากเพื่อนรุ่นพี่รุ่นและรุ่นน้องจากห้องปฏิบัติการ และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกด้านมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

english

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฐ
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 จุดประสงค์ของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ และการออกแบบตัวควบคุม	7
2.1 การคำนวณหาแบบจำลองของอากาศยานสี่ใบพัด	7
2.2 แบบจำลองของมอเตอร์	9
2.3 แบบจำลองสถานะ	10
2.4 ตัวควบคุมแบบ PD	10
3 การประมาณสิ่งกีดขวางด้วยตัวรับรู้เรดาร์สามมิติ	18
3.1 หลักการของเรดาร์	18
3.2 ตัวรับรู้ IWR1443	24

	ช หน้า
3.3 ผลการวัดของ IWR1443	25
3.4 การจัดแยกกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-Means	26
3.5 การประมาณตำแหน่ง และรัศมีจากข้อมูลที่เป็นจุด	29
3.6 ผลการทดลองประมาณรัศมีของสิ่งกีดขวาง	32
4 การสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวาง	47
4.1 การสร้างเส้นทางเมื่อมีสิ่งกีดขวาง	47
4.2 กระบวนการการสร้างเส้นทางด้วยการค้นหาแบบสุ่ม	51
4.3 ผลจากการสร้างเส้นทาง และการแสดงผลการบินหลบหลีก	52
5 บทสรุปงานวิจัย	58
อ้างอิง	60
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก รายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณเรดาร์	67
ก.1 ความละเอียดในการประมาณมุม	67
ก.2 ความละเอียดในการประมาณระยะทาง	67
ภาคผนวก ข การแปลงการสุ่มรัศมีเพื่อค้นหาเส้นทาง	69
ข.1 การแปลงการสุ่มค่ารัศมี	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
english	
2.1 ค่าพารามิเตอร์จากการจูนตัวควบคุม PD	13
2.2 ความผิดพลาดจากการใช้ตัวควบคุม PD	13
3.1 ผลการทดสอบการประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ เทียบกับระยะ ที่ทดสอบเก็บข้อมูล	40



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY





สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
english	
2.1 แผนภาพแรงอิสรระของอากาศยานสี่ใบพัด แกนบนกรอบอ้างอิงของผู้สังเกต และกรอบอ้างอิงบนอากาศยานสี่ใบพัด	7
2.2 แผนภาพการควบคุมสำหรับอากาศยานสี่ใบพัด	11
2.3 ผลการจำลองมุม ϕ ของอากาศยานสี่ใบพัด	14
2.4 ผลการจำลองมุม θ ของอากาศยานสี่ใบพัด	14
2.5 ผลการจำลองมุม ψ ของอากาศยานสี่ใบพัด	15
2.6 ผลการจำลองตำแหน่งตามแกน x ของอากาศยานสี่ใบพัด	15
2.7 ผลการจำลองตำแหน่งตามแกน y ของอากาศยานสี่ใบพัด	16
2.8 ผลการจำลองตำแหน่งตามแกน z ของอากาศยานสี่ใบพัด	16
2.9 ผลการจำลองเส้นทางที่อากาศยานสี่ใบพัดใช้ในการเคลื่อนที่	17
3.1 การประมาณการรับส่งของเสาอากาศ	19
3.2 ลักษณะการรับ และส่งสัญญาณเมื่อมีเสาอากาศส่วนส่งสัญญาณ $N_{Tx} = 1$ และส่วนรับสัญญาณ $N_{Rx} = 2$	19
3.3 ลักษณะการรับ และส่งสัญญาณเมื่อมีเสาอากาศส่วนส่งสัญญาณ $N_{Tx} = 3$ และส่วนรับสัญญาณ $N_{Rx} = 4$	20
3.4 ลักษณะการรับ และส่งสัญญาณเมื่อมีเสาอากาศส่วนส่งสัญญาณ $N_{Tx} = 1$ และส่วนรับสัญญาณ $N_{Rx} = 4$	22
3.5 ไดอะแกรมการรับส่งของสัญญาณ โดยวิธี FMWC	23
3.6 ความถี่ของสัญญาณ x_{out} เมื่อมีตัวรับสัญญาณหนึ่งตัว	24
3.7 ความถี่ของสัญญาณ x_{out} เมื่อมีตัวรับสัญญาณสามตัว	25
3.8 ตัวรับรู้เรดาร์ IWR1443 พร้อมแกนการวัดตำแหน่งของวัตถุ	26
3.9 การจัดแยกกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-means	27
3.10 การใช้ข้อมูล (x, y) เพื่อสร้างรัศมีของวงกลม	29
3.11 แผนภาพแสดงขั้นตอนการประมาณวัตถุ	33
3.12 ทดสอบการวัดตำแหน่งของเรดาร์เมื่ออยู่ในพื้นที่ที่มีต้นไม้	34
3.13 ข้อมูลในปริภูมิต่าง ๆ ที่เรดาร์ตรวจจับได้ในหนึ่งเฟรมจากรูป 3.12 ที่ระยะ 2 เมตร	35

3.14 ค่าของฟังก์ชัน $f(K)$ เมื่อเพิ่มค่า K มากขึ้นเรื่อย ๆ 36

3.15 ผลการแยกกลุ่มของข้อมูลตำแหน่งสิ่งกีดขวาง เมื่อกำหนดให้จำนวนกลุ่ม K เป็น 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ 36

3.16 ผลการแยกวัตถุในแต่ละเฟรม โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 37

3.17 ผลจากการประมาณรัศมีของวัตถุโดย  คือรัศมีจริงของต้นไม้ สัญลักษณ์ x , o และ \square แทนขนาดของรัศมีที่เฟรมต่าง ๆ ,  และ  แทนค่าเฉลี่ยของรัศมีวัตถุ ลำดับที่ 1, 2 และ 3 ที่ถูกตรวจจับ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 38

3.18 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน x ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 38

3.19 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน y เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน y ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 39

3.20 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางของวงกลม เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนระนาบ xy ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 39

3.21 ผลการประมาณรัศมีที่ระยะ 2 ถึง 5 เมตร โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 40

3.22 ทดสอบการวัดตำแหน่งของวัตถุหลายชิ้น 41

3.23 ผลการแยกวัตถุในแต่ละเฟรม โดยใช้ข้อมูลจากข้อมูลรูปที่ 3.22 41

3.24 ผลจากการประมาณรัศมีของวัตถุกรณีที่มีต้นไม้หลายต้น สัญลักษณ์ x , o และ \square แทนขนาดของรัศมีที่เฟรมต่าง ๆ ที่ถูกตรวจจับ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22 42

3.25 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน x ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22 42

3.26 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน y ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22 43

3.27 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางของวงกลม เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนระนาบ xy ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22 43

3.28 ทดสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุรูปร่างทรงกระบอก ที่มีรัศมี 4 เซนติเมตร 44

3.29 ผลการแยกวัตถุในแต่ละเฟรม โดยใช้ข้อมูลจากข้อมูลรูปที่ 3.28 45

3.30 ผลจากการประมาณรัศมีของวัตถุโดย ——— คือรัศมีจริงของต้นไม้
 สัญลักษณ์ x , o และ \square แทนขนาดของรัศมีที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูล
 จากรูปที่ 3.28 45

3.31 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทน
 ตำแหน่งบนแกน x ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.28 46

3.32 ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทน
 ตำแหน่งบนแกน y ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.28 46

4.1 ตัวอย่างการค้นหา และสร้างเส้นทางโดยอัลกอริทึม RRT 48

4.2 การค้นหาเส้นทางโดยวิธี RRT* 50

4.3 แผนภาพแสดงการค้นหาเส้นทางสำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวาง 53

4.4 ผลการสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยอัลกอริทึม RRT* จาก
 ข้อมูลรูปที่ 3.12 54

4.5 ผลการbinตามเส้นทางตามแนวแกน x จากเส้นทางในรูปที่ 4.4 54

4.6 ผลการbinตามเส้นทางตามแนวแกน y จากเส้นทางในรูปที่ 4.4 55

4.7 ผลการbinตามเส้นทางบนระนาบ xy จากเส้นทางในรูปที่ 4.4 55

4.8 ผลการสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยอัลกอริทึม RRT* จาก
 ข้อมูลรูปที่ 3.22 56

4.9 ผลการbinตามเส้นทางตามแนวแกน x จากเส้นทางในรูปที่ 3.22 56

4.10 ผลการbinตามเส้นทางตามแนวแกน y จากเส้นทางในรูปที่ 3.22 57

4.11 ผลการbinตามเส้นทางบนระนาบ xy จากเส้นทางในรูปที่ 3.22 57

คำอธิบายสัญลักษณ์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ และการออกแบบตัวควบคุม

สัญลักษณ์	คำนิยาม	หน่วย
x_W	ระยะตามแกน x ที่ผู้สังเกตเห็นบนกรอบอ้างอิงเฉื่อย	m
y_W	ระยะตามแกน y ที่ผู้สังเกตเห็นบนกรอบอ้างอิงเฉื่อย	m
z_W	ระยะตามแกน z ที่ผู้สังเกตเห็นบนกรอบอ้างอิงเฉื่อย	m
x_B	ระยะตามแกน x ที่ผู้สังเกตเห็นบนกรอบอ้างอิงของหุ่นยนต์	m
y_B	ระยะตามแกน y ที่ผู้สังเกตเห็นบนกรอบอ้างอิงของหุ่นยนต์	m
z_B	ระยะตามแกน z ที่ผู้สังเกตเห็นบนกรอบอ้างอิงของหุ่นยนต์	m
ω	ความเร็วเชิงมุมของใบพัด	rad/s
ϕ	มุมก้มไปทางด้านหน้าของอากาศยานไร้คนขับ (roll)	rad
θ	มุมก้มไปทางด้านข้างของอากาศยานไร้คนขับ (pitch)	rad
ψ	มุมหมุนตามแกน z ของอากาศยานไร้คนขับ (yaw)	rad
R_x	เมทริกซ์การหมุนรอบแกน x	
R_y	เมทริกซ์การหมุนรอบแกน y	
R_z	เมทริกซ์การหมุนรอบแกน z	
F	แรงที่ถูกสร้างจากใบพัด	N
m	มวลของอากาศยานสี่ใบพัด	kg
g	ความโน้มถ่วงของโลก	m/s ²
L	ความยาวจากจุดศูนย์กลางมวลของอากาศยานสี่ใบพัดไปยังตำแหน่งของใบพัด	m
M	โมเมนต์ที่ถูกสร้างจากใบพัด	N · m
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของอากาศยานสี่ใบพัด	kg · m ²
s_θ	ฟังก์ชันไซน์ของมุม θ หรือ $\sin \theta$	
c_θ	ฟังก์ชันโคไซน์ของมุม θ หรือ $\cos \theta$	
t_θ	ฟังก์ชันแทนของมุม θ หรือ $\tan \theta$	

การประมาณสิ่งกีดขวางด้วยตัวรับรู้เรดาร์สามมิติ

สัญลักษณ์	คำนิยาม	หน่วย
N_{Tx}	จำนวนเสาอากาศที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ	
N_{Rx}	จำนวนเสาอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ	
f	ความถี่ของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ปล่อยออกมาจากตัวรับรู้เรดาร์	Hz
T_c	ช่วงเวলাกำเนิดความถี่ของตัวรับรู้เรดาร์	sec
S	ความชันระหว่างความถี่ของตัวกำเนิดสัญญาณตามเวลา	Hz/s
ϕ_i	มุมเริ่มต้นของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสัญญาณที่ i	rad
S_τ	ผลต่างของความถี่ระหว่างความถี่ที่ส่งออกที่เวลาเดียวกับความถี่ที่รับสัญญาณเข้ามา	Hz
ω_i	ความถี่ของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	rad/s

การสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

สัญลักษณ์	คำนิยาม	หน่วย
X	เซตของคู่อันดับระนาบ xy ทั้งหมดบนแผนที่ที่สนใจ	
X_{free}	เซตของคู่อันดับระนาบ xy ทั้งหมดบนแผนที่ X ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง	
X_{obs}	เซตของคู่อันดับระนาบ xy ทั้งหมดบนแผนที่ X ที่เป็นบริเวณของสิ่งกีดขวาง	
V	เซตทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหา	
E	เซตของเส้นทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหา	
G	กราฟที่เกิดขึ้นมาจาก (E, V)	
q_0	จุดเริ่มต้นบนระนาบ xy	
q_{end}	จุดสุดท้าย หรือเป้าหมายบนระนาบ xy	
q_{rand}	จุดที่ถูกสุ่มขึ้นมาบนระนาบ xy	
α	ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับขยายขนาดจากการประมาณสิ่งกีดขวาง	
β	ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับความเร็ว	

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์บทนี้ประกอบไปด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหา บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามากมายในปัจจุบันอย่างงานสำรวจสถานที่ เช่น การสำรวจ ลักษณะป่า เพื่อสำรวจพื้นที่สีเขียว การตรวจสอบพื้นที่เพื่อค้นหาคนที่หลงป่า เป็นต้น หรือ งานเกษตรกรรม เช่น การฉีดปุ๋ยให้กับต้นไม้ การตรวจสอบการเจริญเติบโตของต้นไม้ หรือ ผลผลิต เป็นต้น หรือแม้แต่การติดตาม เช่น การติดตามเรือในทะเลในระยยะติตริมทะเล หรือติดตามบุคคลอื่น ๆ เป็นต้น เริ่มมีความจำเป็นต้องอาศัยหุ่นยนต์ในการทำงาน แทนมนุษย์ โดยเฉพาะงานที่ต้องทำในพื้นที่กว้าง ซึ่งหุ่นยนต์ที่ต้องวิ่งบนพื้นนั้น อาจไม่สามารถทำงานเหล่านั้นได้ เนื่องจากการวิ่งบนพื้นนั้น อาจพบกับสิ่งกีดขวางมากมาย เมื่อเทียบกับบนฟ้า ดังนั้น การอาศัยอุปกรณ์ที่สามารถบินได้ ย่อมมีความสะดวกและ ประสิทธิภาพมากกว่า อากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicles หรือ UAVs) จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่จะช่วยลดภาระงานของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี

UAV คืออุปกรณ์ที่สามารถบินได้โดยไม่ต้องอาศัยมนุษย์ขึ้นไปบังคับ ควบคุม แต่สามารถบินได้เอง โดยอาจถูกควบคุมจากมนุษย์ผ่านตัวควบคุมโดยตรง หรืออาศัย การควบคุมแบบอัตโนมัติที่ทำงานตามคำสั่ง เนื่องจาก UAV มีมากมายหลายรูปแบบ การเลือกมาใช้งาน ขึ้นกับปัญหาต่าง ๆ เช่น การสำรวจในสถานที่ที่มนุษย์ไม่สามารถ เข้าไปสำรวจได้ การส่งสินค้าขนาดเล็กเพื่อให้ถึงผู้รับอย่างแน่นอน การติดตามเรือ ขนส่งของ เรือที่อยู่ตามชายหาด หรืองานการเกษตรที่ใช้เพื่อบันทึกขนาดของพืช ผัก ผลไม้ หรือการฉีดปุ๋ย แทนแรงงานมนุษย์ เมื่อพิจารณาปัญหาเหล่านี้ UAV ที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาจึงเป็นประเภทที่สามารถบินได้ โดยงานวิจัยนี้เลือกอากาศยาน สีใบพัด และจากที่กล่าวมาทั้งหมดสิ่งกีดขวางต่าง ๆ ที่จะมาขวางทางการบินของ พาหนะ เช่น ต้นไม้ จึงนำมาสู่การแก้ปัญหาของงานวิจัยนี้

อากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด (quadrotor) มีองค์ประกอบหลัก คือ มีสี่ใบพัดที่สี่มุมของตัวอากาศยาน มีแขนยื่นออกไปเป็นสี่แขนที่มีลักษณะสมมาตรแบบสี่เหลี่ยม โดยทั่วไปอากาศยานไร้คนขับถูกเรียกว่า โดรน (drone) โดยปกติอากาศยานไร้คนขับอาศัยตัวรับรู้ (sensor) สองส่วนในการวัดสัญญาณต่าง ๆ ส่วนแรกคือ การวัดมุมต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์ใช้ ไจโรสโคป (gyroscope) และอาศัยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ในการประมาณมุมเหล่านั้น ในส่วนที่สอง คือการวัดตำแหน่งของตัวอุปกรณ์ ในส่วนนี้สามารถอาศัยอุปกรณ์ได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้คือตัวจับสัญญาณตำแหน่งจีพีเอส (global positioning system หรือ GPS) หากมีเพียงสองส่วนนี้ก็เพียงพอสำหรับควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยานสี่ใบพัดได้ แต่เพื่อให้ตัวอากาศยานสี่ใบพัดสามารถบินหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้จึงต้องมีส่วนที่สามนั่นคือ ตัวรับรู้สิ่งกีดขวาง ในปัจจุบันนิยมใช้เป็น กล้อง หรือ Lidar เพื่อสร้างรูปร่าง และประมาณระยะของสิ่งกีดขวางนั้น โดยวิธีการหลบหลีกก็ขึ้นกับการสร้างอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับตัวรับรู้ นั้น ๆ สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งไปที่ตัวอุปกรณ์ IWR1443 ซึ่งอาศัยหลักการของเรดาร์ เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการวัดตำแหน่ง 3 มิติ สำหรับงานวิจัยนี้จะเรียกอากาศยานไร้คนขับ แทนตัวอุปกรณ์อากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด เพื่อให้ความสะดวกในการอธิบายหลักการต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้

อุปกรณ์ IWR1443 เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย บริษัท Texas Instrument เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้ในการวัดสถานะปัจจุบันของตัวอุปกรณ์ที่ถูกนำไปติดตั้ง เช่น ถ้านำไปติดไว้ในรถ ทำให้สามารถวัดระยะห่างด้านข้างว่ามีสิ่งกีดขวางหรือไม่ โดยตัวรับรู้นี้มีน้ำหนักเบา และเหมาะสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็ก จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอากาศยานไร้คนขับได้เช่นกัน เนื่องจากสัญญาณเรดาร์จากอุปกรณ์ IWR1443 นั้น ไม่สามารถวัดขนาดที่แท้จริงของสิ่งกีดขวางได้ จึงต้องอาศัยการออกแบบอัลกอริทึมที่เหมาะสม เนื่องด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน การอาศัยตัวประมวลผลในการคำนวณนั้นจึงสามารถทำได้เร็วมาก เทียบกับในอดีต ดังนั้น วิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงจะเสนอการใช้ อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) เพื่อรับข้อมูลเรดาร์ มาเพื่อประเมินขนาด จำนวนสิ่งกีดขวาง และวางแผนหลบหลีก

1.2 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ได้รับการศึกษาเพื่อใช้สำหรับยานพาหนะที่อยู่บนพื้น ซึ่งเริ่มศึกษาจาก ยานพาหนะ อย่างรถยนต์ แล้วต่อยอดขึ้นมาจนมาใช้ในหุ่นยนต์ทั่วไป ในปี 2011 [1] ได้เสนอวิธีการตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถยนต์ โดยอาศัยตัวรับรู้เรดาร์ และกล้องถ่ายภาพขาวดำ โดยหากใช้อุปกรณ์สองชนิดพร้อมกัน เพื่อให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยอาศัยเรดาร์ในการประมาณระยะห่างของสิ่งกีดขวางนั้น แล้วจึงใช้กล้องเพื่อระบุว่าสิ่งกีดขวางนั้นอยู่ในตำแหน่งใด โดยวิธีการปรับตัวของค่าเริ่มต้นโดยอาศัยภาพเงา ต่อมาในปี 2018 [2] ได้เสนอตัวรับรู้โลดาร์ที่อาศัยการเรียนรู้แบบเสริมกำลังในการช่วยพิจารณาการหลบหลีกของรถว่าเมื่อได้รับสัญญาณแสดงสิ่งกีดขวางมาควรหลบหลีกแบบใด [3, 34] ได้เสนอวิธีตรวจจับการชนระหว่างรถ โดยอาศัยตัวรับรู้สองชนิดในเวลาเดียวกัน นั่นคือเรดาร์ และกล้อง ที่ต้องใช้รับรู้สองชนิด เนื่องจากต้องการให้เรดาร์นั้นประมาณระยะห่างที่ถูกต้อง และใช้กล้องในการหาตำแหน่งของรถที่อยู่ข้างหน้า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยอาศัยกล้องให้เรียนรู้รูปแบบของสิ่งกีดขวางที่เป็นรถยนต์ แล้วพิจารณาขนาดของสิ่งกีดขวางนั้น

แบบจำลองของอากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด มีงานวิจัยมากมายที่เสนอแบบจำลองของ UAV เมื่อละเลยผลของแรงต้านอากาศ เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม [15, 16, 17] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วนำไปใช้ออกแบบตัวควบคุม หรือใช้ในการหาเอกลักษณ์ของระบบ [18, 19] ได้ใช้แบบจำลองที่คำนวณมาในกรณีที่ไม่มีแรงรบกวนภายนอก แล้วอาศัยการควบคุมการทำนายรูปแบบ (model predictive control) ในการออกแบบระบบเมื่อมีสิ่งรบกวนภายนอก ในส่วนของการออกแบบตัวควบคุม [20, 22, 24] ได้เสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบ backstepping ซึ่งเป็นวิธีออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบไม่เชิงเส้น นอกเหนือจากตัวควบคุมที่ได้กล่าวไป [23] ได้เสนอตัวควบคุมแบบทำให้เป็นเชิงเส้น โดยการแปลงระบบของอากาศยานสี่ใบพัดให้กลายเป็นรูปแบบเชิงเส้น โดยไม่ต้องแปลงแบบประมาณ [21] ได้เสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัว เมื่อตัวอากาศยานสี่ใบพัดมีการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางถ่วง ซึ่งตัวควบคุมแบบอื่นไม่สามารถจัดการได้ [25] ได้แสดงวิธีการควบคุมแบบ LQR ซึ่งต้องอาศัยการแปลงระบบจากไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นโดยประมาณ [26, 27] ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD) นั้นเป็นการออกแบบที่ง่ายที่สุด สำหรับการลงบนฮาร์ดแวร์ เนื่องจากอาศัยการออกแบบ

พารามิเตอร์เพียงไม่กี่ค่า

สำหรับหุ่นยนต์ทั่วไปต้องอาศัยข้อมูลจากตัวรับรู้ช่วยในการตัดสินใจว่าทำงานอย่างไร สำหรับการค้นหาเส้นทางหลบหลีกต้องการตัวรับรู้ที่คล้ายคลึงกับดวงตาของมนุษย์ [36, 37, 39, 40] ได้เสนอว่าการหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับอากาศยานสี่ใบพัดควรจะอาศัยภาพจากกล้องในการช่วยตัดสินใจหลบหลีกสิ่งกีดขวาง แต่ว่ากระบวนการในการนำภาพมาช่วยในการตัดสินใจนั้นทำให้เกิดปัญหาคือต้องผ่านกระบวนการหลายอย่าง และสิ้นเปลืองทรัพยากร [33] เสนอว่าการใช้ไลดาร์ ซึ่งเป็นตัวรับรู้ที่ใช้เลเซอร์ในการจับภาพของสิ่งกีดขวาง แต่การใช้ไลดาร์จำเป็นต้องใช้เวลา เนื่องจากหลักการของเลเซอร์นั้นต้องยิงให้ทั่วทุกตำแหน่ง แล้วจึงค่อยผ่านกระบวนการ [32] ได้เสนอวิธีที่เรียกว่า synthetic aperture radar (SAR) ในการสร้างภาพตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ในระยะไกล [38] ได้เสนอการใช้ตัวรับรู้เรดาร์ในการสร้างขอบของสิ่งที่ตรวจจับได้ เพื่อสร้างรูปร่างวัตถุ [35, 41] เสนอว่าการใช้ภาพ และเรดาร์ โดยใช้เรดาร์หาระยะที่แม่นยำ แล้วนำข้อมูลระยะต่าง ๆ ในการหาตำแหน่งด้วยภาพ [29, 30] แสดงถึงวิธีการแปลงภาพด้วยวิธีแค่นี้ ซึ่งเป็นวิธีสร้างเส้นขอบจากสัญญาณที่ได้รับไม่ว่าจะเป็นภาพ หรือไลดาร์

อัลกอริทึมสำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยส่วนใหญ่ จะอาศัยการออกแบบตัวตัดสินใจ หรือ ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence หรือ AI) ในการตัดสินใจว่าควรหลบหลีกอย่างไร ในปี 1992 [4, 5] ได้เสนอการเรียนรู้แบบปรับตัวตามเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวาง โดยการเรียนรู้จากพื้นที่ แต่วิธีนี้จำเป็นต้องรู้พื้นที่ที่หุ่นยนต์อยู่เสียก่อน ในปี 2017 [11] เสนอวิธีการเรียนรู้เชิงลึก โดยการหาค่าที่ดีที่สุดจากการสร้างความสัมพันธ์ของสิ่งกีดขวางที่วัดได้จากตัวรับรู้ใด ๆ แล้วสร้างเขตที่ให้หุ่นยนต์วิ่งผ่านได้ ในปีเดียวกัน [13] เสนอการเรียนรู้ผ่านโครงข่ายประสาทเทียม ในการแก้ปัญหาการตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยความเร็วของหุ่นยนต์ และระยะห่างจากหุ่นยนต์ไปยังสิ่งกีดขวาง

อัลกอริทึมสำหรับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับอากาศยานสี่ใบพัด ถูกศึกษาโดยอาศัยตัวรับรู้ได้แก่ กล้อง ไลดาร์ และเรดาร์ [6, 7] ได้เสนอการใช้เรดาร์ในการจับตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง และประมาณความเร็วของอากาศยานสี่ใบพัด เพื่อออกแบบวิธีหลบหลีกสิ่งกีดขวาง [8] เสนอการใช้กล้องสองตัวเพื่อออกแบบอัลกอริทึม เพื่อหลบ

หลักสิ่งกีดขวาง [12] เสนอวิธีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการวิเคราะห์สิ่งกีดขวาง แล้วสร้างสิ่งกีดขวางนั้นในรูปของจุด แล้วทำการลบหลัก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถูกแบ่งออกเป็น 5 บท ในบทแรกนั้นกล่าวถึงที่มาของปัญหาต่าง ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และอธิบายจุดประสงค์ของงานวิจัย บทที่สอง เป็นสาระเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อากาศยานสี่ใบพัด และวิธีออกแบบตัวควบคุม รวมทั้งการออกแบบตัววัดสัญญาณที่วัดไม่ได้ บทที่สามเป็นการอธิบายเกี่ยวกับตัวรับรู้เรดาร์ IWR1443 และการประมาณขนาดของสิ่งกีดขวาง บทที่สี่เป็นการอธิบายการสร้างเส้นทางหลบหลักสิ่งกีดขวาง ด้วยข้อมูลจากการประมาณขนาดของสิ่งกีดขวาง บทสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลต่าง ๆ ที่ได้ทำมาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

1.3 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบตัวควบคุม PD สำหรับอากาศยานไร้คนขับ เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้
2. ศึกษาอัลกอริทึม การเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อพัฒนาการประมาณขอบเขตของสิ่งกีดขวาง
3. ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการค้นหาสิ่งกีดขวางผ่านตัวรับรู้คือ เรดาร์สามมิติ
4. ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการตัดสินใจหลบหลักสิ่งกีดขวางสำหรับอากาศยานไร้คนขับ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา การออกแบบและการทดสอบ ตัวเรียนรู้ด้วยเครื่อง ใช้ข้อมูลพื้นที่หน้าคณะวิทยาศาสตร์ ฝั่งบริเวณตึกชีววิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. การออกแบบการหลบหลักสิ่งกีดขวางเริ่มจากหลังตรวจจับวัตถุได้ และมุ่งไปยังเป้าหมายที่กำหนดในระยะไม่เกิน 6 เมตร
3. การบินหลบของอากาศยานสี่ใบพัดอาศัยการบินหลบไปทางด้านซ้ายหรือขวาเท่านั้น

4. สิ่งกีดขวางที่ใช้ในการหลบหลีกในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีลักษณะรูปร่างทรงกระบอกสูง และมีจำนวนไม่เกิน 4 ชั้น
5. สิ่งกีดขวางทั้งหมดไม่สามารถเคลื่อนไหวได้ หรือเคลื่อนไหวน้อยมาก เมื่อเทียบกับตัวอากาศยานที่เคลื่อนที่
6. ควบคุมเฉพาะตำแหน่งของอากาศยานสี่ใบพัด
7. การแสดงผลการทดลองถูกแสดงบน *MATLAB/Simulink*

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ศึกษาอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อพัฒนาการสร้างแบบจำลองของสิ่งกีดขวางจากตัวรับรู้
2. ตัวอากาศยานไร้คนขับสามารถบินหลบสิ่งกีดขวางได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย ทั้งตัวอากาศยานไร้คนขับ และสิ่งกีดขวางนั้นขณะบิน
3. สามารถนำไปใช้ในงานเกษตรได้ เพื่อช่วยในการบินหลบต้นไม้ หรือคนที่ออกมาเดินสำรวจสวนไร่

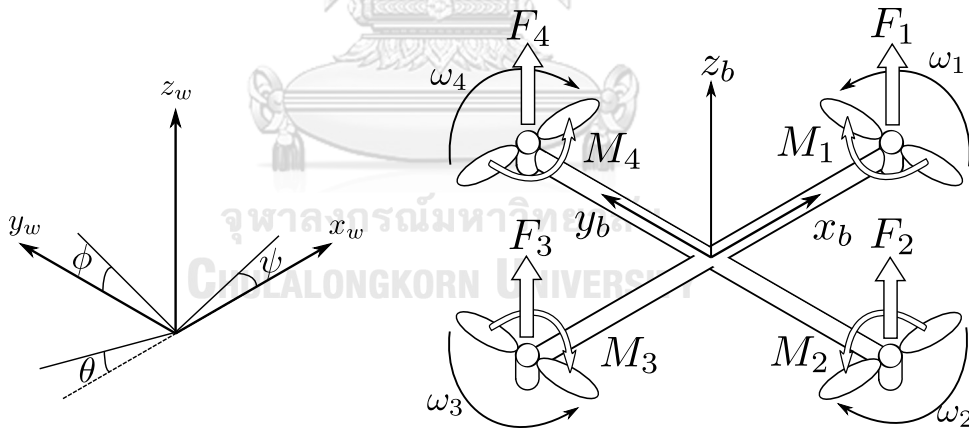
บทที่ 2

แบบจำลองคณิตศาสตร์ และการออกแบบตัวควบคุม

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย การคำนวณหาแบบจำลองของอากาศยานสี่ใบพัด แบบจำลองของมอเตอร์ แบบจำลองสถานะ และการออกแบบตัวควบคุม PD

2.1 การคำนวณหาแบบจำลองของอากาศยานสี่ใบพัด

ลักษณะของอากาศยานสี่ใบพัด มีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ใบพัดทั้งสี่อยู่บริเวณมุมของอากาศยาน ดังรูปที่ 2.1 กำหนดให้กรอบอ้างอิงของผู้สังเกตที่ยืนอยู่บนโลก (world frame) ใช้ x_w , y_w และ z_w แสดงแกนบนกรอบอ้างอิงของผู้สังเกต ส่วนกรอบอ้างอิงบนตัวอากาศยานสี่ใบพัด (body-fixed frame) มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลของอากาศยานสี่ใบพัด และ x_b , y_b และ z_b แสดงแกนบนกรอบดังกล่าว



รูปที่ 2.1: แผนภาพแรงอิสระของอากาศยานสี่ใบพัด แกนบนกรอบอ้างอิงของผู้สังเกต และกรอบอ้างอิงบนอากาศยานสี่ใบพัด

การใช้หลักการมุมของออยเลอร์ (Euler angle) เพื่อเปลี่ยนกรอบอ้างอิงจากบนตัวอากาศยานสี่ใบพัดมายังกรอบอ้างอิงของผู้สังเกต เริ่มจากการหมุนรอบแกน z_w ด้วยเมทริกซ์ $R_z(\psi)$ ต่อมาจึงหมุนรอบแกน y_w ด้วยเมทริกซ์ $R_y(\theta)$ และสุดท้ายจึงหมุนรอบแกน x_w ด้วยเมทริกซ์ $R_x(\phi)$ ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงอันเนื่องมาจากการ

หมุนแกนทำให้เราสามารถคำนวณ เมทริกซ์การหมุน (rotational matrix) R ได้จาก

$$\begin{aligned}
 R &= R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \\
 &= \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi \\ -s_\theta & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

เมื่อ s_θ คือ $\sin(\theta)$, c_θ คือ $\cos(\theta)$ และ t_θ คือ $\tan(\theta)$

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน เมื่อไม่พิจารณาแรงภายนอกและแรงต้านใด ๆ ตัวอากาศยานสี่ใบพัดนั้นมีแรงที่เกิดจากใบพัดทั้ง 4 ที่เกิดจากแต่ละใบพัด และเกิดขึ้นในแกน z_b และเมื่อเปลี่ยนกรอบอ้างอิงด้วยเมทริกซ์ R เราจะได้สมการ (2.1) ซึ่งเป็นสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ต่อมาเมื่อพิจารณาผลจากการหมุนเนื่องจากใบพัดทั้งสี่ตัว โดยหลักการของการหมุน เมื่อกำหนดให้ p , q และ r แทนความเร็วเชิงมุมในการหมุนรอบแกน x_b , y_b และ z_b ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์กับขนาดของความเร็วเชิงมุมที่ผู้สังเกตเห็น ดังสมการ (2.2)

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s_\phi t_\theta & c_\phi t_\theta \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi/c_\theta & c_\phi/c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ต่อไปพิจารณาทิสโมเมนต์ของมอเตอร์ เนื่องจากมอเตอร์แต่ละตัวนั้นทำให้เกิดโมเมนต์ตามทิศการหมุนของมอเตอร์ เพื่อให้ผลรวมของทิสโมเมนต์ทั้งหมดสามารถรวมกันเป็นศูนย์ได้ (โดยที่ไม่มีโมเมนต์ของมอเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเป็นศูนย์) มอเตอร์

ที่อยู่ติดกันต้องหมุนในทิศตรงข้ามกัน ดังในรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าเมื่อมองจากด้านบน มอเตอร์ตัวที่ 1 และ 3 หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนมอเตอร์ตัวที่ 2 และ 4 หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา ต่อมาเมื่อพิจารณาโมเมนต์ที่เกิดจากแรงของมอเตอร์แต่ละตัว สามารถคำนวณได้จากแรงคูณระยะตามแนวแรง ซึ่งแทนด้วยความยาวของแต่ละแขนของอากาศยานสี่ใบพัด (L) จากสมการของออยเลอร์ (Euler equation) ทำให้ได้สมการ (2.3)

$$I \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(F_2 - F_4) \\ L(F_3 - F_1) \\ M_1 - M_2 + M_3 - M_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times I \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.2 แบบจำลองของมอเตอร์

เนื่องจากปัจจัยหลักที่ทำให้อากาศยานสี่ใบพัดสามารถบินได้ขึ้นกับ แรง และ โมเมนต์ของมอเตอร์ กำหนดให้ ω_i แทนด้วยความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์แต่ละตัว เราสามารถคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเร็วจึงมุมได้ดังสมการ (2.4)

$$F_i = k_f \omega_i^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ k_f คือ สัมประสิทธิ์แรงผลัก

ส่วนการเกิดโมเมนต์อันเนื่องจากรวมความเร็วเชิงมุมนั้น สามารถอธิบายได้ ดังสมการ (2.5) คือ

$$M_i = k_m \omega_i^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ k_m คือ สัมประสิทธิ์โมเมนต์

ให้ U_i แทนสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม เราสามารถคำนวณหาขนาดของความเร็วเชิงมุม เพื่อใช้ในการสั่งการให้กับมอเตอร์แต่ละตัว โดยการคำนวณด้วยสมการ (2.6)

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_f & k_f & k_f & k_f \\ 0 & Lk_f & 0 & -Lk_f \\ -Lk_f & 0 & Lk_f & 0 \\ k_m & -k_m & k_m & -k_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.3 แบบจำลองสถานะ

แบบจำลองสถานะสำหรับเวลาระบบต่อเนื่อง

การเขียนรูปแบบของแบบจำลองสถานะ ($\dot{x} = f(x) + g(x)u$) สามารถทำให้ช่วยในการออกแบบตัวควบคุมได้ง่ายขึ้น จากสมการ (2.1) และ (2.3) ทำได้โดย กำหนดให้ตัวแปรสถานะของระบบ คือ

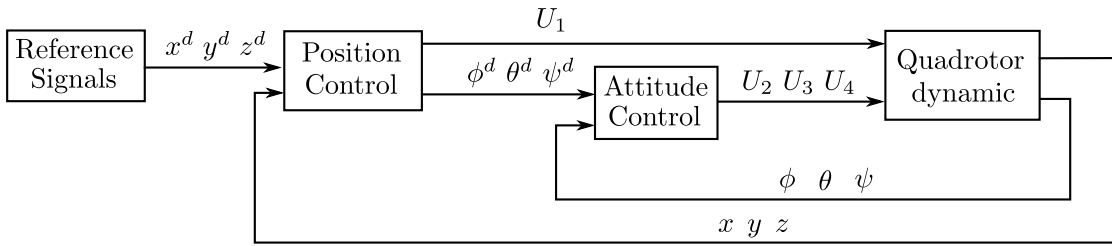
$$x(t) = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \phi \ \theta \ \psi \ p \ q \ r]^T$$

ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองสถานะของอากาศยานสี่ใบพัดได้ดังสมการ (2.7) การเขียนในรูปแบบนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมได้อย่างเป็นระบบ เนื่องจากสามารถมองเห็นส่วนของสัญญาณควบคุม U_i ของระบบได้

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\chi}_1 \\ \dot{\chi}_2 \\ \dot{\chi}_3 \\ \dot{\chi}_4 \\ \dot{\chi}_5 \\ \dot{\chi}_6 \\ \dot{\chi}_7 \\ \dot{\chi}_8 \\ \dot{\chi}_9 \\ \dot{\chi}_{10} \\ \dot{\chi}_{11} \\ \dot{\chi}_{12} \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \chi_4 \\ \chi_5 \\ \chi_6 \\ 0 \\ 0 \\ -g \\ \chi_{10} + s_{\chi_7} t_{\chi_8} \chi_{11} + c_{\chi_7} t_{\chi_8} \chi_{12} \\ c_{\chi_7} \chi_{11} - s_{\chi_7} \chi_{12} \\ (s_{\chi_7}/c_{\chi_8}) \chi_{11} + (c_{\chi_7}/c_{\chi_8}) \chi_{12} \\ (\frac{I_y - I_z}{I_x}) \chi_{11} \chi_{12} \\ (\frac{I_z - I_x}{I_y}) \chi_{10} \chi_{12} \\ (\frac{I_x - I_y}{I_z}) \chi_{10} \chi_{11} \end{bmatrix}}_{f(x)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{U_1}{m} (c_{\chi_7} s_{\chi_8} c_{\chi_9} + s_{\chi_7} s_{\chi_9}) \\ \frac{U_1}{m} (c_{\chi_7} s_{\chi_8} s_{\chi_9} - s_{\chi_7} c_{\chi_9}) \\ \frac{U_1}{m} (c_{\chi_7} c_{\chi_8}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{U_2}{I_x} \\ \frac{U_3}{I_y} \\ \frac{U_4}{I_z} \end{bmatrix}}_{g(x)u} \quad (2.7)$$

2.4 ตัวควบคุมแบบ PD

ตัวควบคุมแบบ PD มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่สามารถออกแบบได้ง่าย สะดวกต่อการติดตั้งบนอุปกรณ์จริง และยังสามารถใช้ได้ดีกับระบบที่เป็นเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น รูปแบบโดยทั่วไปของตัวควบคุมชนิดนี้ คือ มี proportional gain K_p เป็นตัวคูณกับความผิดพลาด และ derivative gain K_d เป็นตัวคูณกับอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของความผิดพลาด



รูปที่ 2.2: แผนภาพการควบคุมสำหรับอากาศยานสี่ใบพัด

จากรูปที่ 2.2 ประกอบไปด้วยส่วนแรกคือการให้สัญญาณอ้างอิง สำหรับบทยี่สมมติให้สัญญาณอ้างอิงมีลักษณะเป็นแบบไซน์ซออยด์ และในบทถัดไปจะอธิบายเกี่ยวกับการกำหนดสัญญาณอ้างอิงจากตัวรับรู้ ส่วนถัดมาคือการออกแบบตัวควบคุมวงนอกเป็นการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งต้องอาศัยสัญญาณป้อนกลับเป็นตำแหน่ง x , y และ z ซึ่งในส่วนนี้อาศัยการประมาณเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงของมุมต่าง ๆ และถูกใช้ในส่วนสุดท้าย คือการควบคุมทศนะ หรือตัวควบคุมมุม ϕ , θ และ ψ

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมตำแหน่ง

จากแบบจำลองในสมการ (2.1) จะเห็นว่า มีสัญญาณควบคุม U_1 เพียงตัวเดียว แต่ต้องควบคุมสัญญาณตำแหน่งทั้ง 3 ตัว จึงต้องอาศัยการตั้งสมการอนุพันธ์ของความผิดพลาดในการออกแบบตัวควบคุม โดยกำหนดให้ความผิดพลาด $e = r^d - r$ โดย r^d คือสัญญาณอ้างอิงของตำแหน่ง และ r คือสัญญาณตำแหน่งจริง ซึ่งเราสามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของความผิดพลาดได้เป็น

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = 0 \quad (2.8)$$

หรือสามารถเขียนขยายเพิ่มในรูปของ x , y และ z ได้เป็น

$$\ddot{x}^d - \ddot{x} + K_{d_1}(\dot{x}^d - \dot{x}) + K_{p_1}(x^d - x) = 0 \quad (2.9)$$

$$\ddot{y}^d - \ddot{y} + K_{d_2}(\dot{y}^d - \dot{y}) + K_{p_2}(y^d - y) = 0 \quad (2.10)$$

$$\ddot{z}^d - \ddot{z} + K_{d_3}(\dot{z}^d - \dot{z}) + K_{p_3}(z^d - z) = 0 \quad (2.11)$$

เพื่อหาสัญญาณอ้างอิงของมุมต่าง ๆ อาศัยการประมาณเมื่อสมมติว่า มุม ϕ และ θ มีค่าเล็ก ๆ หรือ $\sin \theta \approx \theta$ และ $\cos \theta \approx 1$ ส่วนมุม ψ เป็นค่าที่ได้จากผู้ใช้ ψ^d เมื่อแทนค่า

เข้าไปในสมการ (2.1) จะได้

$$\ddot{x}^d = \frac{U_1}{m}(\theta^d \cos(\psi^d) + \phi^d \sin(\psi^d)) \quad (2.12)$$

$$\ddot{y}^d = \frac{U_1}{m}(\theta^d \sin(\psi^d) - \phi^d \cos(\psi^d)) \quad (2.13)$$

$$\ddot{z}^d = -g + \frac{U_1}{m} \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.14) หาค่า $\frac{U_1}{m}$ แล้วแทนค่าลงในสมการ (2.12) และ (2.13) ได้

$$\theta^d \cos(\psi^d) + \phi^d \sin(\psi^d) = \frac{\ddot{x}^d}{\ddot{z}^d + g} \quad (2.15)$$

$$\theta^d \sin(\psi^d) - \phi^d \cos(\psi^d) = \frac{\ddot{y}^d}{\ddot{z}^d + g} \quad (2.16)$$

เมื่อแก้สมการหา ϕ^d และ θ^d จากสมการ (2.15) และ (2.16) ได้

$$\phi^d = \frac{\ddot{x}^d}{\ddot{z}^d + g} \sin(\psi^d) - \frac{\ddot{y}^d}{\ddot{z}^d + g} \cos(\psi^d) \quad (2.17)$$

$$\theta^d = \frac{\ddot{x}^d}{\ddot{z}^d + g} \cos(\psi^d) + \frac{\ddot{y}^d}{\ddot{z}^d + g} \sin(\psi^d) \quad (2.18)$$

เราได้สัญญาณอ้างอิงของมุมต่าง ๆ (ϕ^d , θ^d , ψ^d) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.17) และ (2.18) สำหรับเป็นสัญญาณอ้างอิงในการออกแบบตัวควบคุมที่จะกล่าวในลำดับถัดไป

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมทัศนนะ

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอากาศยานสี่ใบพัดจำเป็นต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงของ ϕ , θ และ ψ พิจารณาจากแบบจำลองจากสมการ (2.3) มีสัญญาณควบคุม 3 ค่า ดังนั้นจึงสามารถกำหนดให้สัญญาณควบคุมเป็น

$$U_2 = K_{p_4}(\phi^d - \phi) + K_{d_4}(\dot{\phi}^d - \dot{\phi}) \quad (2.19)$$

$$U_3 = K_{p_5}(\theta^d - \theta) + K_{d_5}(\dot{\theta}^d - \dot{\theta}) \quad (2.20)$$

$$U_4 = K_{p_6}(\psi^d - \psi) + K_{d_6}(\dot{\psi}^d - \dot{\psi}) \quad (2.21)$$

ผลการออกแบบตัวควบคุม

ในการทดลองแสดงการจำลองผลด้วย *MATLAB* โดยให้สัญญาณอ้างอิง $x^d = 8 \sin(0.1t)$, $y^d = 8 \cos(0.1t)$, $z^d = 1$ และ $\psi^d = 0$ และให้จุดเริ่มต้น $(0, 8, 0)$ และ

ตารางที่ 2.1: ค่าพารามิเตอร์จากการจูนตัวควบคุม PD

ตัวควบคุมตำแหน่ง	K_p	K_d	ตัวควบคุมทิศทาง	K_p	K_d
x	2	2	ϕ	625	625
y	2	2	θ	625	625
z	25	4	ψ	625	625

ไม่มีผลของแรงต้านอากาศใด ๆ

การวัดสมรรถนะของระบบสามารถวัดด้วยค่า tracking error (TE) นิยามด้วย $TE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (r_i - r_i^d)^2}$ ซึ่งจากการวัด โดยใช้ค่าที่ออกแบบไว้จากตารางที่ 2.1 ได้ค่า TE ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2: ความผิดพลาดจากการใช้ตัวควบคุม PD

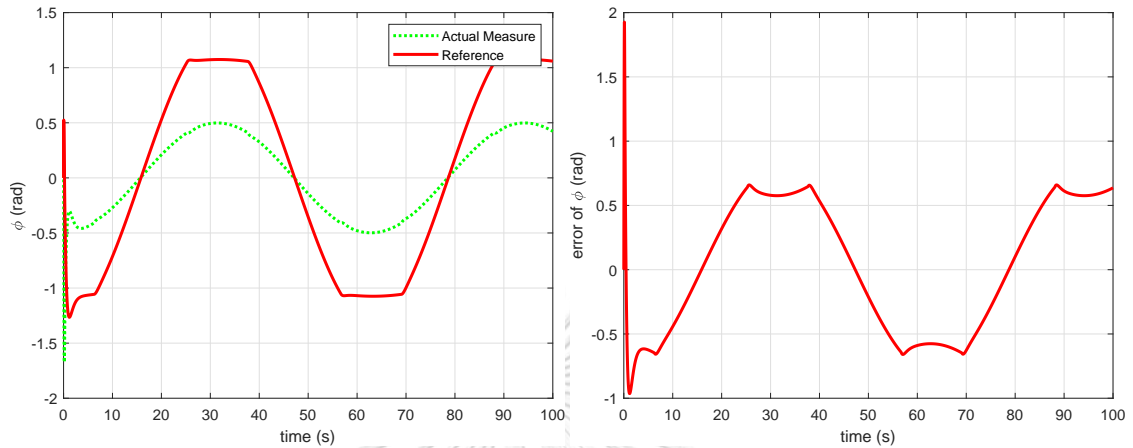
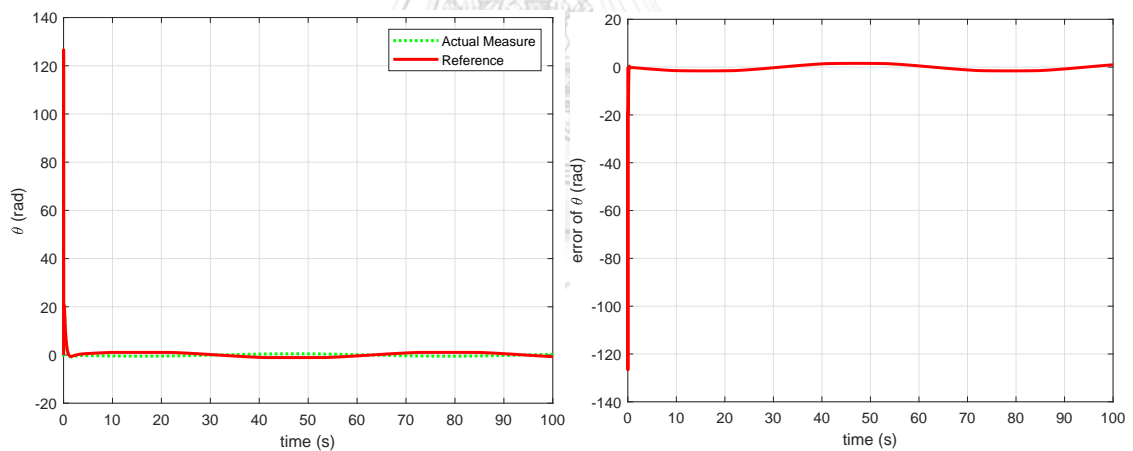
ตำแหน่ง	TE (m)	มุม	TE (rad)
x	5.39×10^{-4}	ϕ	2.12×10^{-4}
y	4.99×10^{-4}	θ	3.23×10^{-4}
z	5.61×10^{-4}	ψ	5.23×10^{-6}

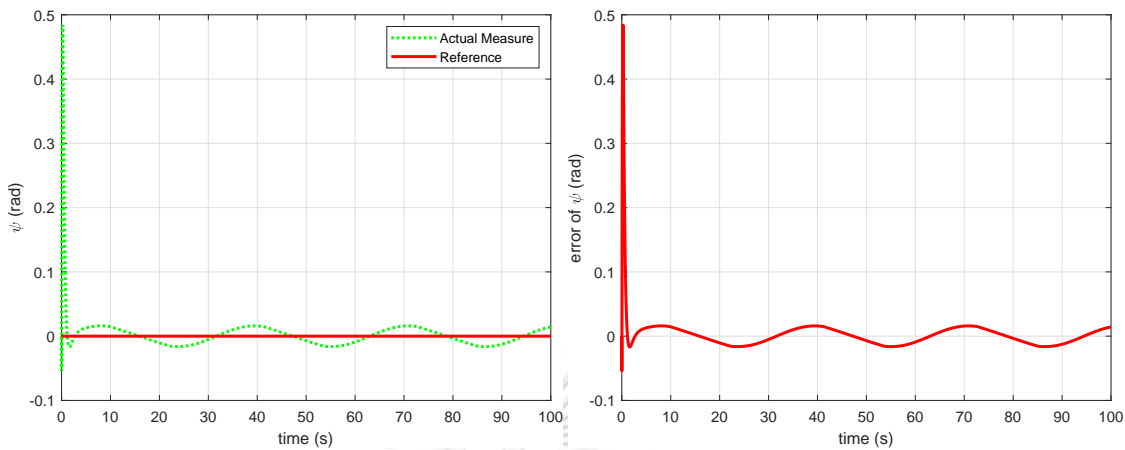
เมื่อพิจารณาการควบคุมมุมต่าง ๆ ของอากาศยานสี่ใบพัด จากรูปที่ 2.3 เป็นกรณีของมุม ϕ โดยสังเกตว่าสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณจริงที่วัดได้ ขนาดต่างกัน เป็นผลมาจากการคำนวณการลบของสมการ (2.17) ซึ่งทำให้การคำนวณอาจผิดพลาดได้ จากรูปที่ 2.4 เป็นกรณีของมุม θ ค่าความผิดพลาดของระบบค่อนข้างน้อยมาก และจากรูปที่ 2.5 เป็นกรณีมุม ψ ค่าความผิดพลาดแกว่งรอบ ๆ จุด 0 เนื่องจากสัญญาณอ้างอิงของตำแหน่ง x และ y มีลักษณะเป็นวงกลม จึงทำให้ตัวอากาศยานสี่ใบพัดมีการส่ายตลอดเวลา

เมื่อพิจารณาการควบคุมตำแหน่งต่าง ๆ ของอากาศยานสี่ใบพัด จากรูปที่ 2.6 ค่าความผิดพลาดที่มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.07 m. ในช่วงที่เริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ต่อมาจากรูปที่ 2.7 ค่าความผิดพลาดที่มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.065 m. ในช่วงที่เริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัว สุดท้ายจากรูปที่ 2.8 อากาศยานสี่ใบพัดสามารถบินเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่ความสูง 1 m. ได้โดยที่ความผิดพลาดมีค่าใกล้ 0

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าระบบของการควบคุมของตำแหน่งสามารถบอกได้ว่าเป็นระบบประเภทที่ 1 ซึ่งค่าความผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ 0 ในขณะที่ กรณีของมุม ϕ

ระบบอาจไม่ใช่ระบบประเภทที่ 1 จึงทำให้ความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวไม่เข้าสู่ศูนย์ ในขณะที่ θ และ ψ อาจเป็นระบบประเภทที่ 1 แต่สามารถควบคุมให้ตำแหน่งของอากาศยานสี่ใบพัดไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้

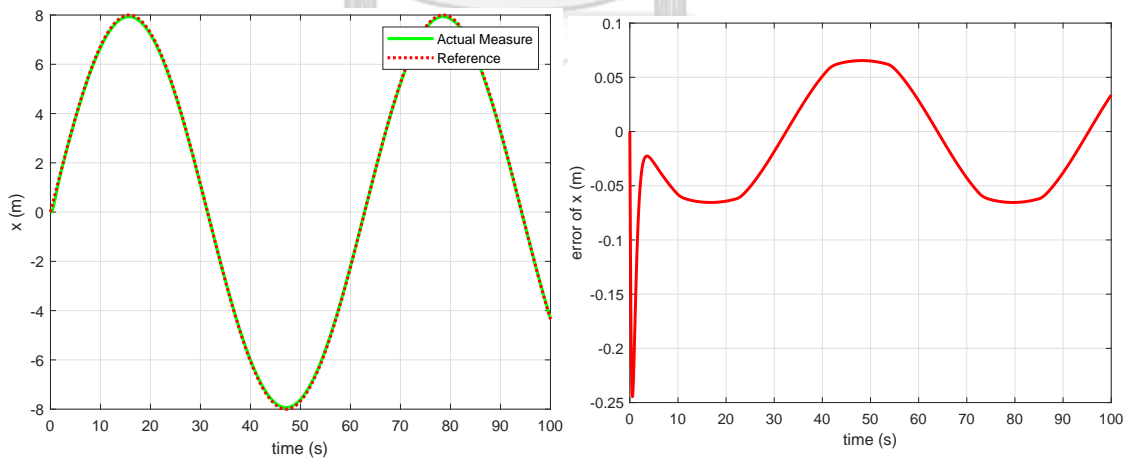
(ก) ϕ เทียบกับเวลา(ข) ความผิดพลาดของ ϕ เทียบกับเวลารูปที่ 2.3: ผลการจำลองมุม ϕ ของอากาศยานสี่ใบพัด(ก) θ เทียบกับเวลา(ข) ความผิดพลาดของ θ เทียบกับเวลารูปที่ 2.4: ผลการจำลองมุม θ ของอากาศยานสี่ใบพัด



(ก) ψ เทียบกับเวลา

(ข) ความผิดพลาดของ ψ เทียบกับเวลา

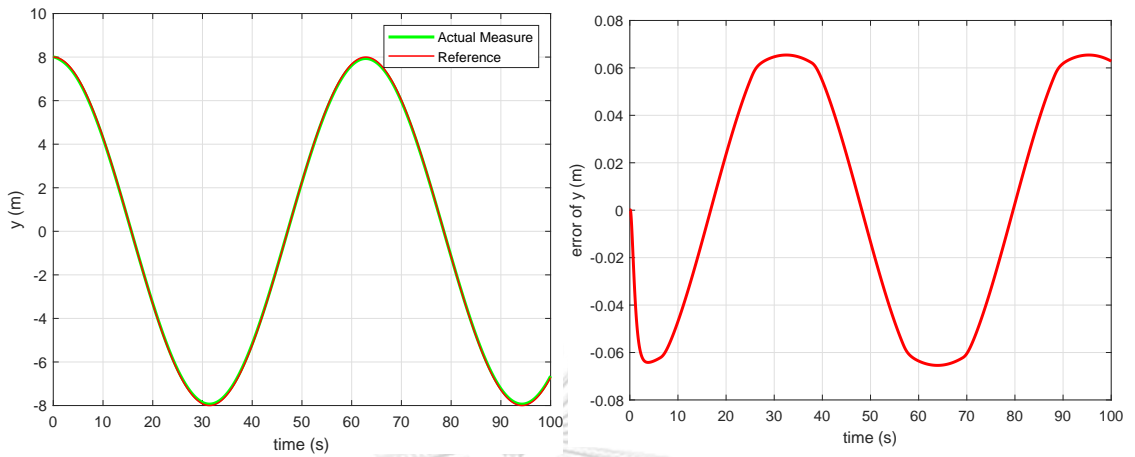
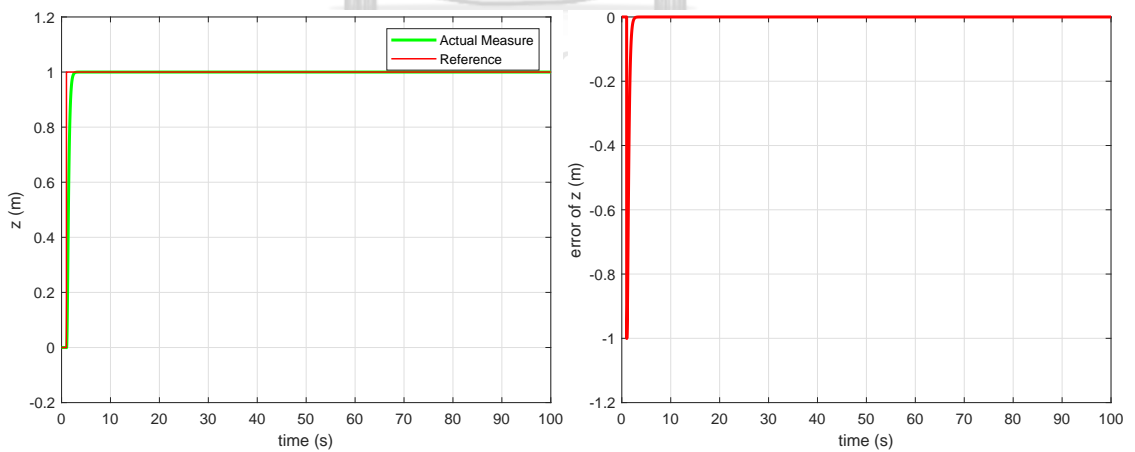
รูปที่ 2.5: ผลการจำลองมุม ψ ของอากาศยานสี่ใบพัด

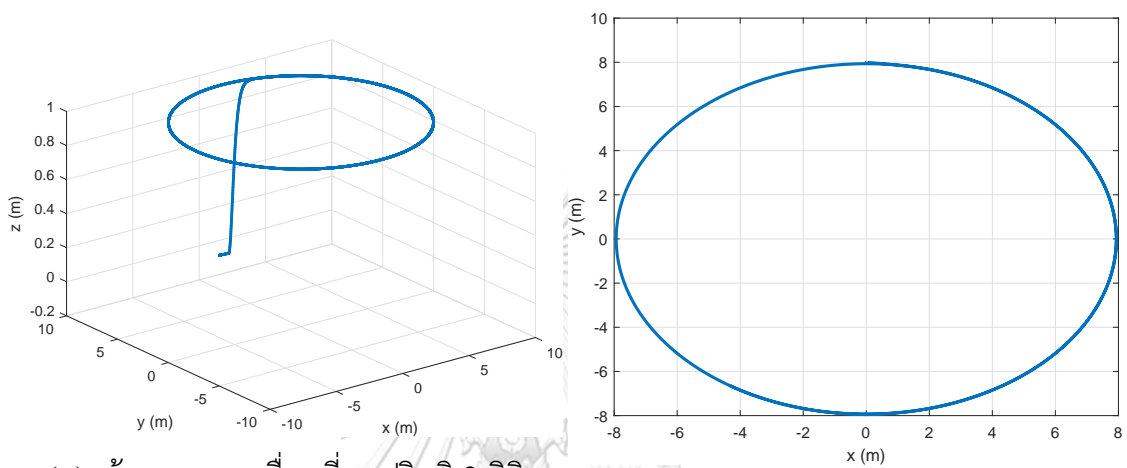


(ก) x เทียบกับเวลา

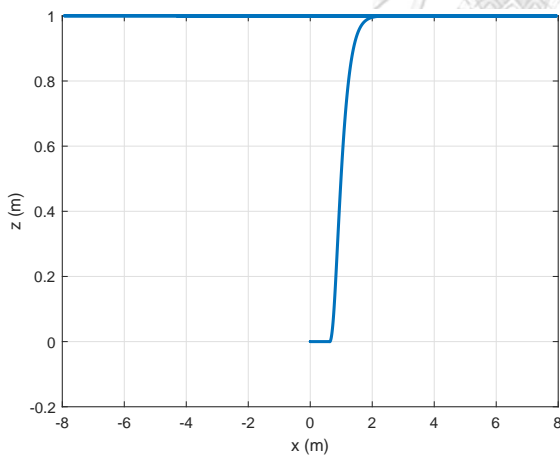
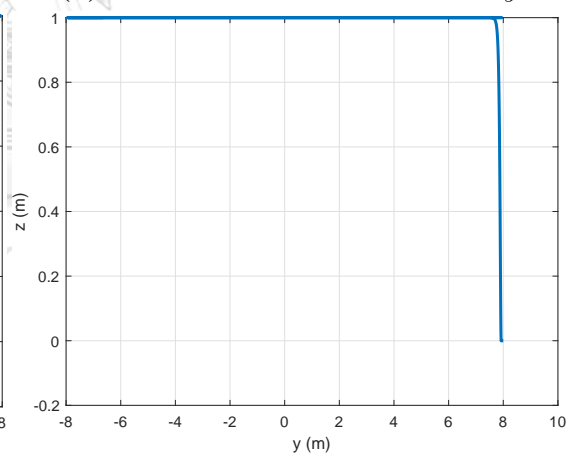
(ข) ความผิดพลาดของ x เทียบกับเวลา

รูปที่ 2.6: ผลการจำลองตำแหน่งตามแกน x ของอากาศยานสี่ใบพัด

(ก) y เทียบกับเวลา(ข) ความผิดพลาดของ y เทียบกับเวลารูปที่ 2.7: ผลการจำลองตำแหน่งตามแกน y ของอากาศยานสี่ใบพัด(ก) z เทียบกับเวลา(ข) ความผิดพลาดของ z เทียบกับเวลารูปที่ 2.8: ผลการจำลองตำแหน่งตามแกน z ของอากาศยานสี่ใบพัด



(ก) เส้นทางเคลื่อนที่บนปริภูมิ 3 มิติ

(ข) เส้นทางเคลื่อนที่บนระนาบ xy (ค) เส้นทางเคลื่อนที่บนระนาบ xz (ง) เส้นทางเคลื่อนที่บนระนาบ yz

รูปที่ 2.9: ผลการจำลองเส้นทางที่อากาศยานสี่ใบพัดใช้ในการเคลื่อนที่

บทที่ 3

การประมาณสิ่งกีดขวางด้วยตัวรับรู้เรดาร์สามมิติ

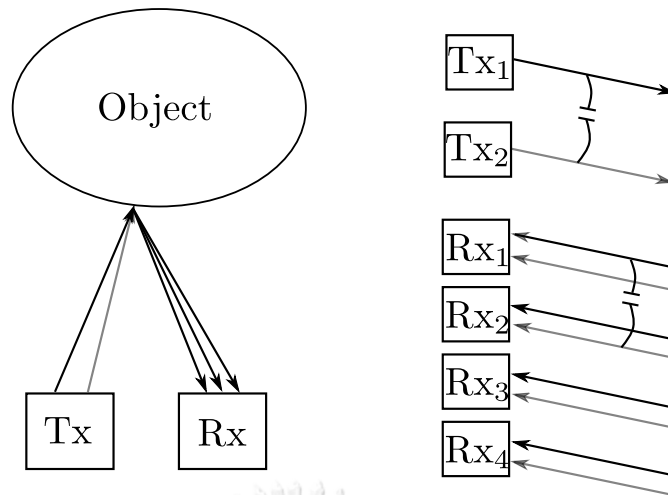
เนื้อหาของวิทยานิพนธ์บทนี้เป็นทำให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสัญญาณเรดาร์
วิธีในการวัดตำแหน่ง ด้วยตัวรับรู้ IWR1443 และการประมาณสิ่งกีดขวางที่ถูกตรวจ
จับได้

3.1 หลักการของเรดาร์

การรับและส่งสัญญาณเรดาร์ โดยทั่วไปอาศัยเสาอากาศในการส่งและรับ
สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านคลื่นวิทยุ เสาอากาศมีด้วยกันหลายรูปแบบ แต่
สำหรับการตรวจจับวัตถุ หรือสิ่งกีดขวาง อาศัยเสาอากาศแบบเฟสอเรีย (phase
array antenna) เสาอากาศประเภทนี้มีลักษณะพิเศษคือ เสาอากาศเรียงตัวกันเป็น
แถว และแต่ละแถวมีเฟสที่ส่งแตกต่างกัน การออกแบบเสาอากาศในลักษณะนี้ทำ
เพื่อให้สามารถส่งถ่ายพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกส่งออกไปได้ในทิศทางที่
ต้องการ

เมื่อพิจารณาสัญญาณของคลื่นที่เคลื่อนที่ออกไปจากตัวส่งสัญญาณ และเกิด
การสะท้อนกลับจากวัตถุที่จุดเดียวกัน แล้วกลับมายังตัวรับสัญญาณที่แสดงดังรูปที่
3.1 โดยเสาอากาศชนิดนี้มีลักษณะเส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ จากแต่ละตัวรับ และตัวส่ง
ที่ไม่ขนานกัน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เราจึงประมาณว่าคลื่นที่ส่งออก และรับเข้า
มามีลักษณะขนานกันตลอด ซึ่งการประมาณนี้ใช้ได้เมื่อสัญญาณที่ใช้มีความยาวคลื่น
ต่ำมากเทียบกับระยะของวัตถุไปยังเสาอากาศ

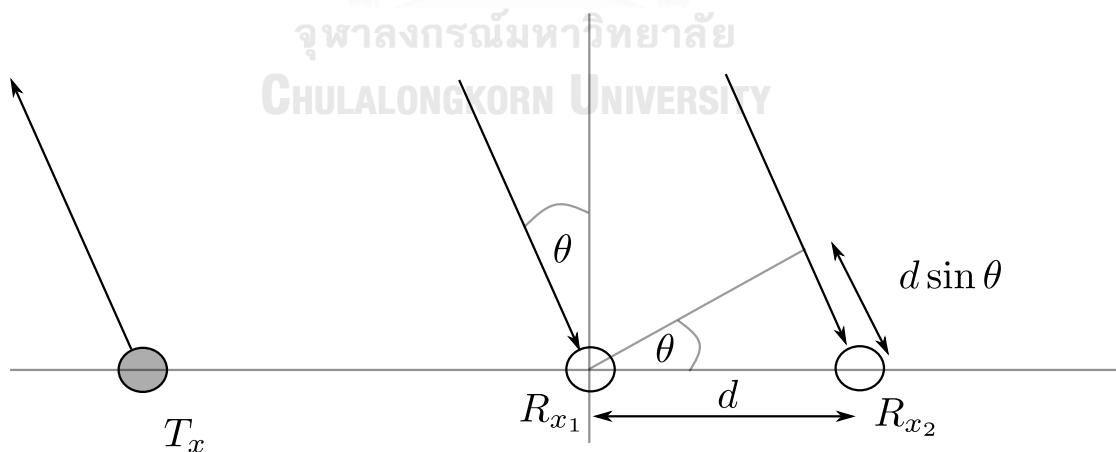
เสาอากาศสำหรับการตรวจจับมีสองส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนส่งสัญญาณ (Tx)
และส่วนรับสัญญาณ (Rx) ในการตรวจจับวัตถุ นอกจากความแรงของสัญญาณ
แล้ว ต้องคำนึงถึงจำนวนของตัวรับและตัวส่ง นิยามให้ส่วนส่งสัญญาณเป็นส่วนออก
(output) และส่วนรับสัญญาณเป็นส่วนรับ (input) เพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปผ่าน
กระบวนการหามุม และระยะห่างในลำดับถัดไป ต่อจากนี้เราจะพิจารณาเฉพาะกรณี
ที่มีตัวส่งหลายตัวและตัวรับเพียงหนึ่งตัว (single input multi output)



รูปที่ 3.1: การประมาณการรับส่งของเสาอากาศ

ตัวส่งสัญญาณหนึ่งตัวและตัวรับหลายตัว (single input multi output หรือ SIMO)

การรับและส่งสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคลื่นในกรณีที่ทำให้ตัวรับมีเพียงแค่ตัวเดียว (SISO) ทำให้สัญญาณนั้นสามารถประมาณได้เพียงแค่ระยะห่างของสิ่งที่ตรวจจับได้กับตัวอุปกรณ์เพียงอย่างเดียว ดังนั้น เราจึงต้องเพิ่มตัวรับเพื่อให้สามารถประมาณมุมและตำแหน่งที่แน่นอนของวัตถุได้ ดังในรูป 3.2 ที่มีตัวส่งสัญญาณหนึ่งตัว ($N_{Tx} = 1$) และตัวรับสัญญาณสองตัว ($N_{Rx} = 2$)



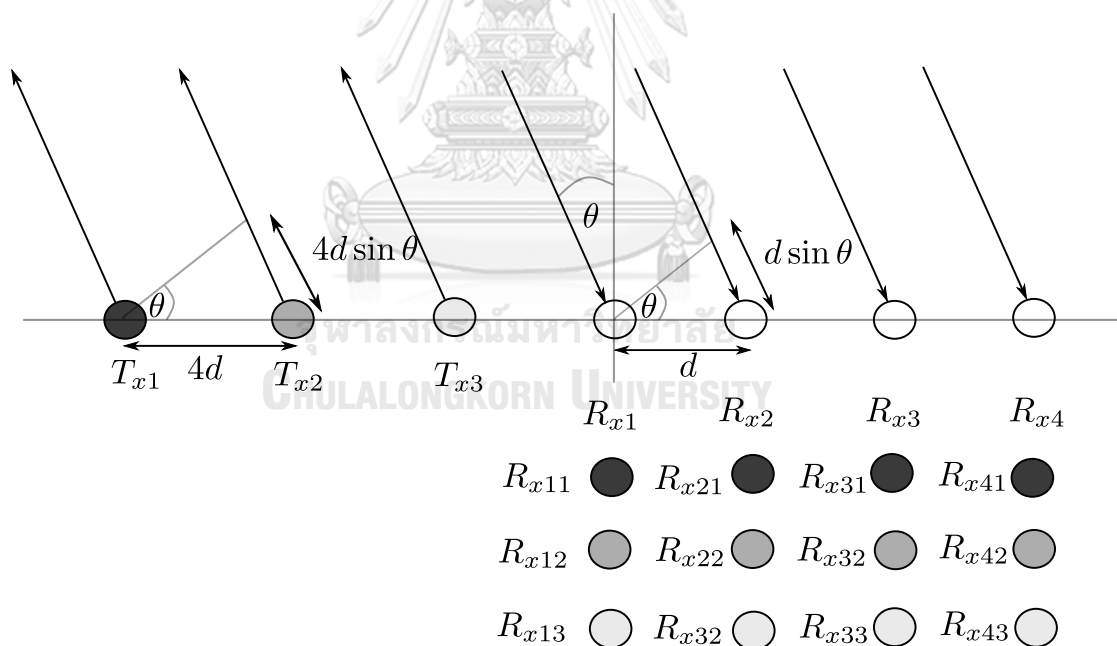
รูปที่ 3.2: ลักษณะการรับ และส่งสัญญาณเมื่อมีเสาอากาศส่วนส่งสัญญาณ $N_{Tx} = 1$ และส่วนรับสัญญาณ $N_{Rx} = 2$

เราสามารถประมาณตำแหน่งของสิ่งกีดขวางได้ โดยอาศัยสัญญาณเรดาร์โดย

การประมาณมุม และระยะห่าง เมื่อเทียบกับตำแหน่งของเรดาร์ ซึ่งอธิบายในหัวข้อ การประมาณมุม และระยะห่าง ซึ่งการหาค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้น สำหรับระบบ SIMO นั้นก็สามารถหาค่าเหล่านั้นออกมาได้ แต่เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประมาณวัตถุ เราอาศัยการส่งสัญญาณหลายตัวและตัวรับสัญญาณหลายตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการประมาณให้มากขึ้น

ตัวส่งสัญญาณหลายตัวและตัวรับสัญญาณหลายตัว (Multi input multi output หรือ MIMO)

สำหรับกรณีที่มีตัวส่งหลายตัว สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำหนด ทิศทางในการส่งสัญญาณ และทำให้สามารถกำหนดขอบเขตของสัญญาณได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาแกนปริภูมิ สำหรับกรณีที่มีตัวส่งสัญญาณเพียงหนึ่งตัว ทำให้วัดตำแหน่ง ของสิ่งกีดขวางได้เพียงแค่ 1 แกน แต่หากเพิ่มตัวส่งเป็น 2 หรือ 3 ตัวส่งสามารถวัดได้ เป็น 2 แกน หรือ 3 แกน ตามลำดับ



รูปที่ 3.3: ลักษณะการรับ และส่งสัญญาณเมื่อมีเสาอากาศส่วนส่งสัญญาณ $N_{Tx} = 3$ และส่วนรับสัญญาณ $N_{Rx} = 4$

ลักษณะโดยทั่วไปของสัญญาณเรดาร์แบบ MIMO เรียงตัวกันดังในรูปที่ 3.3 สังเกตว่า ตัวส่งสัญญาณแต่ละตัววางห่างกันเป็นระยะ 4 เท่าของระยะห่างของตัวรับแต่ละตัว เนื่องจากต้องการให้สัญญาณที่ส่งออกสามารถควบคุมทิศทางได้ง่าย และ

ที่ตัวรับแต่ละตัวรับสัญญาณที่ต่างกันจากตัวส่ง เนื่องจากการส่งสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ตัวรับเห็นลักษณะสัญญาณที่แตกต่างกัน โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform หรือ FFT) เพื่อแยกความถี่สำหรับใช้ในการคำนวณค่าอื่น ๆ

การประมาณมุมด้วยสัญญาณเรดาร์

ในขั้นแรกจากการพิจารณากรณีที่ระบบเป็นแบบ SIMO เพื่อประมาณมุมที่วัตถุ นั้นถูกตรวจจับได้ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเฟส จากรูปที่ 3.2 ได้

$$\frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \quad (3.1)$$

$$\frac{d \sin \theta}{\lambda} = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \quad (3.2)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta \phi \lambda}{2\pi d}\right) \quad (3.3)$$

เมื่อ θ คือ มุมที่วัตถุทำกับตำแหน่งตัวรับสัญญาณ $\Delta \phi$ คือ ความต่างเฟสของตัวรับสองตัว λ คือ ความยาวคลื่น และ d คือ ระยะระหว่างตัวรับสัญญาณ

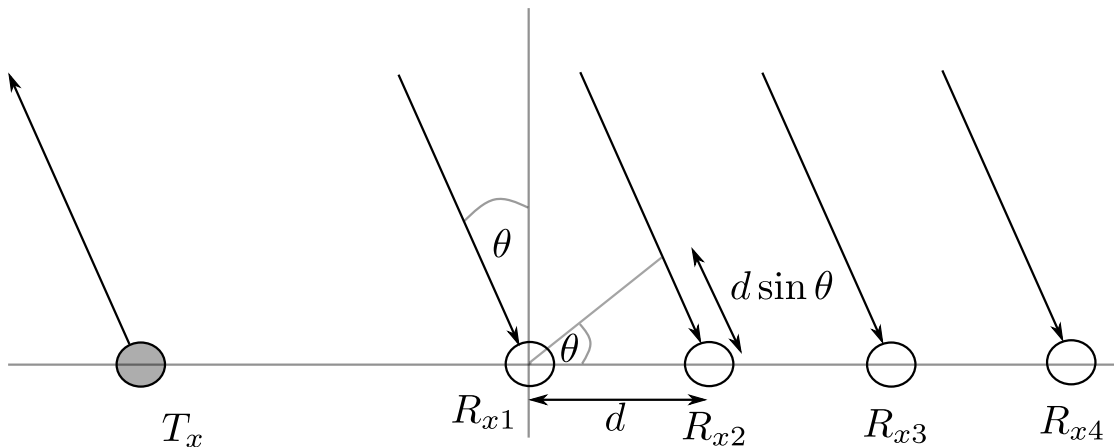
จากสมการ (3.3) กำหนดให้ระยะระหว่างตัวรับสองตัว $d = \lambda/2$ เพื่อลดตัวแปรในการคำนวณลง ดังนั้นการประมาณมุมด้วยสัญญาณเรดาร์ทำได้ตามสมการ

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta \phi}{\pi}\right) \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.4) จะเป็นกรณีที่อาศัยตัวรับเพียงสองตัว ต่อมาเมื่อพิจารณากรณีที่เพิ่มตัวรับสัญญาณ สำหรับกรณี SIMO ดังในรูป 3.4 ซึ่งเพิ่มตัวรับจาก 2 ตัวเป็น 4 ตัว เราสามารถพิสูจน์ได้ว่า การเพิ่มจำนวนตัวรับ (N_{RX}) สามารถเพิ่มความละเอียดในการจับวัตถุสองจุดได้ (วิธีพิสูจน์อยู่ในภาคผนวก ก.1)

การประมาณระยะห่างของวัตถุด้วยสัญญาณเรดาร์

หลักการประมาณระยะห่างของวัตถุด้วยคลื่นทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นคลื่นเสียง หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ โดยมีวิธีพื้นฐานนั้นคือการอาศัยความเร็วคลื่น และเวลาที่วัดได้ในการประมาณระยะทาง หากสัญญาณที่วัดได้มีค่าอ่อนมาก หรือเป็นสัญญาณ



รูปที่ 3.4: ลักษณะการรับ และส่งสัญญาณเมื่อมีเสาอากาศส่วนส่งสัญญาณ $N_{Tx} = 1$ และส่วนรับสัญญาณ $N_{Rx} = 4$

รบกวน ทำให้ระยะที่วัดได้นั้นมีความผิดพลาด เพื่อป้องกันสิ่งเหล่านี้จึงต้องอาศัยเทคนิคในการรับส่งคลื่น

คลื่นต่อเนื่องปรับความถี่ (Frequency-Modulated Continuous Wave หรือ FMCW) และสัญญาณเชิร์พ (Chirp signal)

FMCW เป็นคลื่นต่อเนื่องที่อาศัยความถี่ในการช่วยประมาณระยะทาง โดยอาศัยการเปลี่ยนความถี่ของคลื่นวิทยุแบบต่อเนื่องที่ส่งออกไป สะท้อนจากวัตถุที่ตรวจจับได้มายังฝั่งรับ แล้วอาศัยช่วงเวลาดังกล่าวในการประมาณระยะทาง สมบัติอย่างหนึ่งของคลื่นวิทยุแบบต่อเนื่อง คือปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ในการตรวจจับคลื่นที่สะท้อนกลับมา เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน และการตรวจจับสิ่งแวดล้อมที่อยู่หนึ่ง

สัญญาณเชิร์พ คือสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่บนช่วงเวลาหนึ่ง อาจเกิดการแปลงขึ้น หรือแปลงลงขึ้นกับการใช้งาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาศัยการแปลงขึ้นแบบเชิงเส้น เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์สัญญาณต่าง ๆ

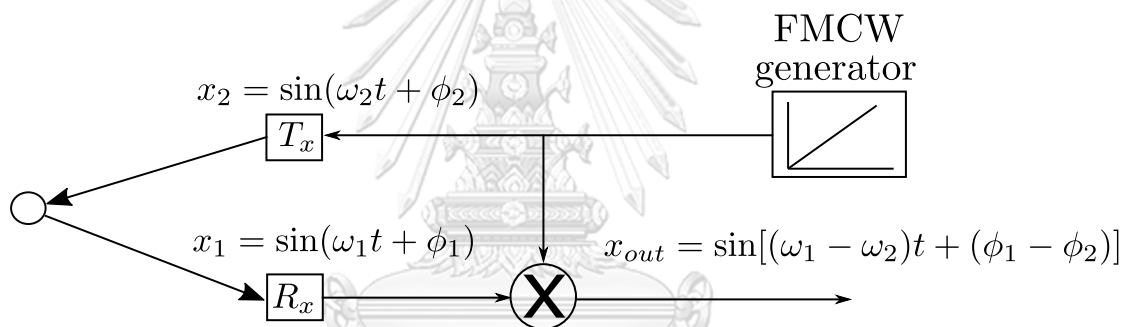
ระยะห่างของวัตถุถึงตัวรับสัญญาณ

ระยะห่างของวัตถุที่ถูกตรวจจับได้ สามารถวัดได้โดยการส่งสัญญาณคลื่นไปยังวัตถุ แล้วเคลื่อนที่กลับมายังที่ตัวรับเรดาร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (3.5) แต่ปัญหา คือ การวัดเวลา (τ) ให้ได้เที่ยงตรงนั้น ก็จำเป็นต้องมีตัวเคาะสัญญาณเวลา (clock source) ที่มีความถี่เทียบเท่ากับความถี่ของสัญญาณเรดาร์ แต่เนื่องจากการ

สร้างสัญญาณเวลาที่มีความถี่สูงมากต้องแลกกับค่าใช้จ่ายที่สูงเช่นกัน ดังนั้นจึงอาศัยวิธีอื่นในการคำนวณหาระยะห่างที่ต้องการ นั่นคือการอาศัย FMCW และสัญญาณเซิร์พในการช่วยประมาณระยะห่างได้ผลลัพธ์ตามสมการ

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (3.5)$$

พิจารณาคลื่นสองขบวนที่ประกอบด้วย สัญญาณที่ส่งออกมาจากตัวปล่อยสัญญาณ 1 สัญญาณ (x_2) และสัญญาณที่รับมาได้ 1 สัญญาณ (x_1) โดยที่สัญญาณ x_1 นั้นเกิดก่อนสัญญาณ x_2 แต่ตัวรับสามารถตรวจจับสัญญาณ x_1 ได้ในขณะที่สัญญาณ x_2 ถูกส่งออกไป โดยสัญญาณ x_1 ที่ส่งไปกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับมาใช้เวลา τ ให้สองสัญญาณผ่านตัวผสมและตัวกรองสัญญาณ ดังนั้นจึงได้สัญญาณหนึ่งที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ x_{out} ดังในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5: ไดอะแกรมการรับส่งของสัญญาณ โดยวิธี FMWC

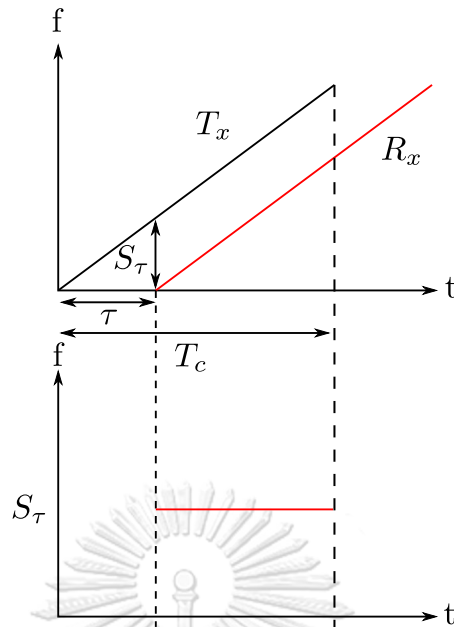
จากรูปที่ 3.5 สัญญาณ x_{out} เป็นสัญญาณที่นำไปผ่านกระบวนการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วเพื่อวิเคราะห์หาความถี่ S_τ ของ x_{out} เมื่อ $S_\tau = f_1 - f_2$ จากรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณาความชันของกราฟระหว่าง f กับ t ได้

$$S = \frac{S_\tau}{\tau} \quad (3.6)$$

นำสมการ (3.5) แทนค่าเข้าไปในสมการ (3.6) ได้สมการ (3.7) และสามารถประมาณระยะห่างจากเรดาร์ไปยังวัตถุได้

$$S_\tau = \frac{2dS}{c} \quad (3.7)$$

ซึ่งวิธีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาถูกใช้สำหรับการประมาณระยะห่างจากวัตถุถึงตัวรับรู้ โดยที่วัตถุนั้นต้องมีอยู่เพียงชิ้นเดียว หรือวัตถุหนึ่งจุด ในช่วงเวลา T_c ดังนั้นหาก



รูปที่ 3.6: ความถี่ของสัญญาณ x_{out} เมื่อมีตัวรับสัญญาณหนึ่งตัว

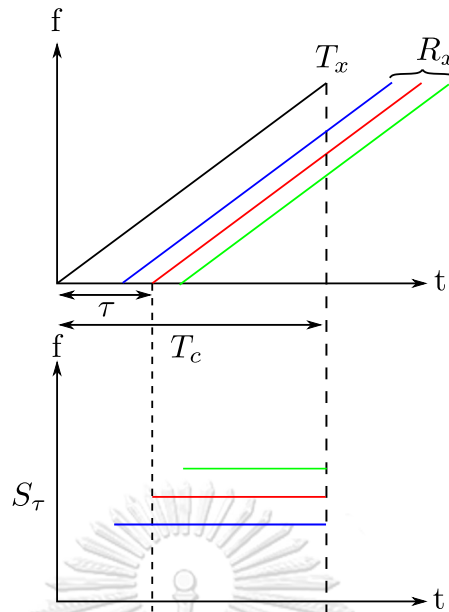
ต้องการให้ตรวจจับวัตถุได้หลาย ๆ ชิ้นจึงควรปรับค่า T_c ให้เพิ่มมากขึ้น แต่ในตัวรับเรดาร์ ค่า T_c เป็นค่าคงตัว จึงต้องอาศัยอีกวิธีหนึ่งคือการเพิ่มตัวรับสัญญาณเข้ามา ก็จะสามารถตรวจจับวัตถุหลายชิ้นได้ ในช่วงเวลา T_c ดังรูปที่ 3.7 เมื่อตัวรับสัญญาณสำหรับตำแหน่งของวัตถุที่ต่างกันสามที่ ทำให้เกิด τ สามค่า และมีค่า S_τ สามค่าเช่นกัน จึงทำให้สามารถตรวจจับวัตถุได้ 3 ตำแหน่ง

สำหรับความละเอียดในการวัดระยะทาง ขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ (bandwidth หรือ BW) ของช่วงความถี่ของอุปกรณ์ และค่า T_c (สามารถดูเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก.1)

3.2 ตัวรับรู้ IWR1443

IWR1443 เป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท เท็กซัส อินสตรูเมนต์ จำกัด มีลักษณะดังรูปที่ 3.8 เป็นตัวรับรู้ที่อาศัยหลักการของเรดาร์ มีส่วนสำคัญได้แก่

1. มีช่วงความถี่บนช่วงคลื่นวิทยุที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณบนช่วง 76 ถึง 81 GHz
2. มีตัวส่งสัญญาณ 3 ตัว และตัวรับสัญญาณ 4 ตัว
3. มีตัวกำเนิดสัญญาณเวลา 40 MHz สำหรับการคำนวณ



รูปที่ 3.7: ความถี่ของสัญญาณ x_{out} เมื่อมีตัวรับสัญญาณสามตัว

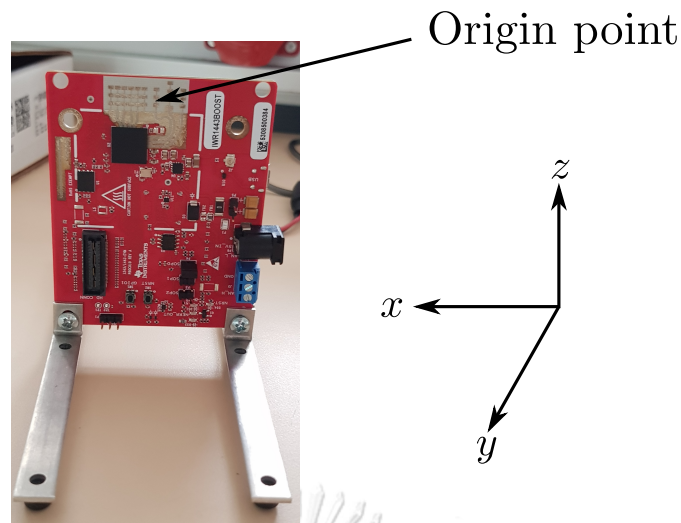
4. $\lambda = 3.8 \text{ mm}$ (คำนวณจากความถี่ 79 GHz)
5. เมื่อตั้งค่าให้มุมกว้างสุดที่สามารถเก็บข้อมูลได้ (มุมแอสิมัท = 180° และมุมเซนนิท = 90°) วัตรยะได้สูงสุด 10 m และความเร็วในการเก็บข้อมูล 5 frame/sec

สำหรับเรดาร์ชนิดนี้อาศัยการแปรค่าสัญญาณต่าง ๆ ที่รับมาด้วยเทคนิค FMCW ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการรับสัญญาณ โดยขึ้นกับค่า T_c เพียงค่าเดียวที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ แต่การปรับเปลี่ยนค่า T_c ส่งผลต่อเวลาตรวจจับวัตถุในหนึ่งเฟรม

3.3 ผลการวัดของ IWR1443

ในการทดลองวัตรยะต่าง ๆ ได้ทดลองตรวจจับต้นไม้บริเวณตึกชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยผลจากการตรวจจับต้นไม้ที่มีลักษณะเป็นลำต้นสูง ไม่มีกิ่งยื่นออกมา และตั้งค่าการวัดให้แก่ IWR1443 ดังนี้

1. ให้เฟรมเรทเท่ากับ 5 frame/s
2. ให้มุมแอสิมัทมีขนาด 180 องศา และมุมเซนนิทมีขนาด 90 องศา



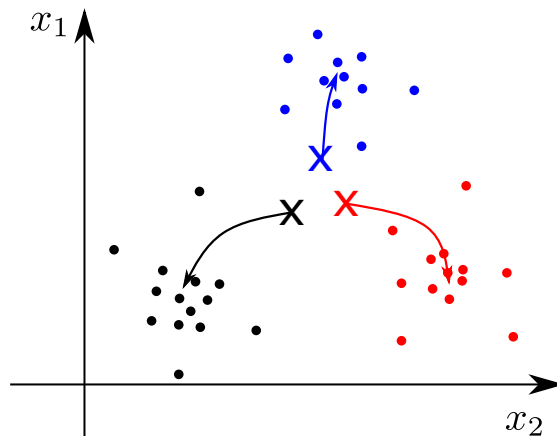
รูปที่ 3.8: ตัวรับเรดาร์ IWR1443 พร้อมแกนการวัดตำแหน่งของวัตถุ

- ตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับได้โดยถูกนิยามบนปริภูมิสามมิติดังแสดงในรูปที่ 3.8

จากการทดลองวัดในสถานะการณ์ต่าง ๆ พบว่า ตัวรับเรดาร์สามารถตรวจจับจำนวนวัตถุได้สูงสุด 64 จุด แต่วัตถุที่อยู่ในระยะตามแนวแกน y นั้นสามารถถูกตรวจจับได้ดี ในขณะที่วัตถุที่วัดในมุมเซนทิเข้าใกล้ 90° เริ่มจับวัตถุไม่ได้ สำหรับกรณีที่วัตถุที่อยู่กับที่ หรือกรณีที่เรดาร์อยู่กับที่ที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุใด ๆ ได้เช่นกัน เนื่องจากเรดาร์ชนิดนี้อาศัย FMCW ในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง จึงทำให้วัตถุที่อยู่นิ่งไม่เกิดผลต่างของความถี่ จึงทำให้ความถี่ที่จับได้มีค่าเป็น 0

3.4 การจัดแยกกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-Means

การจัดแยกกลุ่มด้วยอัลกอริทึมนี้อาศัยการย้ายจุดเซนทรอยด์จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเซนทรอยด์ของแต่ละชุดข้อมูล กำหนดจำนวนกลุ่ม (K) ที่ต้องการแยกออกจากกัน โดยเริ่มจากการวัดระยะห่างของจุดต่าง ๆ ในแต่ละกลุ่มไปยังจุดเซนทรอยด์เริ่มต้น แล้วเปลี่ยนตำแหน่งจุดเซนทรอยด์ด้วยค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มไปเรื่อย ๆ จนไม่สามารถย้ายได้ ดังในรูปที่ 3.9 อัลกอริทึมนี้มีเป้าหมายในการลดระยะห่างดังกล่าวระหว่างจุดเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มให้มีค่าต่ำที่สุด โดยมีเงื่อนไขในการพิจารณา 3 เงื่อนไข ได้แก่ ฟังก์ชันเป้าหมาย จุดเริ่มต้น และจำนวนกลุ่ม



รูปที่ 3.9: การจัดแยกกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-means

1. ฟังก์ชันเป้าหมายของ K-means ให้

$c^{(i)}$ คือชุดข้อมูลที่ถูกแยกไปยังลำดับที่ i จากชุดข้อมูล $x^{(i)}$

μ_j คือจุดเซนทรอยด์จำนวน k จุด ($\mu_j \in \mathcal{R}^n$)

$\mu_c^{(i)}$ คือจุดเซนทรอยด์ของการแบ่งที่มาจาก $x^{(i)}$

โดยได้ปัญหาในรูปของนอร์มกำลังสองต่ำสุด เขียนได้ในรูป

$$\underset{\mu_k}{\text{minimize}} \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x^{(i)} - \mu_{c^{(i)}}\|^2 \quad (3.8)$$

2. การเลือกจุดเริ่มต้น ต้องเลือกจุดที่ไม่ใช่จุดเดียวกันเพื่อไม่ให้จุดเซนทรอยด์วิ่งไปยังจุดเดียวกันทุกกลุ่ม และจุดเริ่มต้นที่ดีต้องอยู่ใกล้กับจุดเซนทรอยด์
3. การเลือกจำนวนกลุ่ม ขึ้นอยู่กับความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับข้อมูล แต่ถ้าหากเลือกจำนวนกลุ่มมากสามารถลดค่าของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายได้ต่ำมากเช่นกัน เนื่องจากสามารถแยกแต่ละกลุ่มตามแต่ละจุด

ปัญหาของอัลกอริทึมนี้คือ เราต้องทราบจำนวนกลุ่มที่ต้องการแยก K เสียก่อนจึงจะทำได้ โดยทั่วไปตั้งค่า K เป็นค่าคงที่ แต่สำหรับข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้อาจมีจำนวนวัตถุไม่คงที่ ทำให้ค่า K ควรเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงต้องอาศัยอัลกอริทึมบางอย่างในการตัดสินใจเลือกค่า K

การเลือกจำนวนกลุ่มของสิ่งกีดขวางสำหรับ K-means

การเลือกจำนวนกลุ่มนั้นขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของข้อมูล ความน่าจะเป็นที่แต่ละข้อมูลที่สามารถเกิดขึ้น และจำนวนข้อมูลที่ได้มาในการพิจารณา โดยสมมติว่าข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้เรดาร์นั้นมีโอกาสเกิดขึ้นเท่า ๆ กันในทุก ๆ ตำแหน่งในบริเวณหนึ่ง หรือมีการกระจายตัวแบบเอกรูป และข้อมูลทุกจุดเป็นอิสระจากกัน เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้เรดาร์ทุกจุดที่สามารถถูกตรวจจับได้ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของตัวเรดาร์เพียงเล็กน้อย ในขณะที่วัตถุอยู่นิ่ง และสัญญาณสามารถถูกปล่อยได้ทุกทิศทาง (ในทางด้านหน้าของเรดาร์) จากสมมติฐานนี้ [43] ได้เสนอวิธีเลือกจำนวนกลุ่ม K ในกรณีที่ข้อมูลทุกจุดที่มีความน่าจะเป็นที่เกิเกิดขึ้นได้เท่ากันหมด และทุกจุดเป็นอิสระจากกัน

ในการแบ่งกลุ่มด้วย K-means ความบิดเบือนของกลุ่ม คือฟังก์ชันของข้อมูล และระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลและค่าเฉลี่ยของกลุ่ม สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_j = \sum_{i=1}^{N_j} [d(x_{ji}, \mu_j)]^2 \quad (3.9)$$

เมื่อ I_j คือความบิดเบือนในกลุ่ม j , μ_j คือค่าเฉลี่ยของกลุ่ม j , N_j คือจำนวนข้อมูลในกลุ่ม j , x_{ji} คือข้อมูลตัวที่ i ในกลุ่มที่ j , และ $d(x, y)$ คือระยะห่างระหว่างจุด x และ y โดยใช้นิยามระยะห่างระหว่างจุดเป็น $d(x, y) = \|x - y\|_2$

นิยามฟังก์ชัน $f(K)$ เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการประเมินค่าของจำนวนกลุ่ม K ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการสร้างฟังก์ชันการประเมินนี้ จึงต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนค่า K (เพิ่มทีละ 1 เสมอ) เมื่อเทียบกับการแบ่งกลุ่มก่อนหน้าว่ามีการเปลี่ยนแปลงผลรวมรวมของความบิดเบือน ดังนั้นจึงนิยาม $f(K)$ ได้ตามสมการ

$$f(K) = \begin{cases} 1, & \text{ถ้า } K = 1 \\ \frac{S_K}{\alpha_K S_{K-1}}, & \text{ถ้า } S_{K-1} \neq 0, \forall K > 1 \\ 1, & \text{ถ้า } S_{K-1} = 0, \forall K > 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

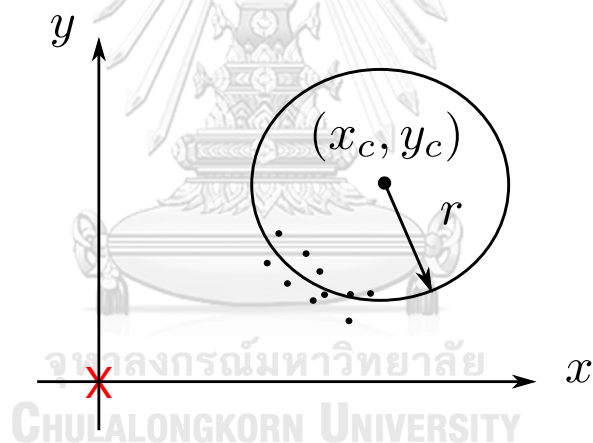
และ

$$\alpha_K = \begin{cases} 1 - \frac{3}{4N_d}, & \text{ถ้า } K = 2 \text{ และ } N_d \geq 1 \\ \alpha_{K-1} + \frac{1-\alpha_{K-1}}{6}, & \text{ถ้า } K > 2 \text{ และ } N_d \geq 1 \end{cases} \quad (3.11)$$

เมื่อ S_K คือผลรวมของความบิดเบือนจากทุกกลุ่มจำนวน K กลุ่ม N_d คือมิติของข้อมูล ในการทดลองใช้เพียง 2 แกนบนระนาบ xy เนื่องจากต้องการประมาณตำแหน่ง และขนาดของสิ่งกีดขวางด้วยวงกลมบนระนาบ xy เท่านั้น

จากสมการ (3.10) ฟังก์ชัน $f(K)$ มีความหมายว่าเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการแบ่งกลุ่มของข้อมูล โดยมี α_K เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก โดยหากค่าของ $f(K)$ มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นจะมีความหมายว่าการแบ่งกลุ่มของแต่ละ K นั้นเริ่มไม่มีความแตกต่างกัน แต่ถ้าค่าความบิดเบือนในแต่ละกลุ่มน้อยสะท้อนถึงค่า S_K ที่มีค่าน้อยลง หรือค่า $f(K)$ มีค่าน้อยลงตามไป หมายความว่า จำนวนกลุ่ม K ที่ใช้นั้น มีความบิดเบือนต่ำ จึงเป็นจำนวนที่น่าจะเหมาะสมในการแบ่งกลุ่ม กล่าวโดยสรุปคือการเลือกจำนวนกลุ่ม K ที่เหมาะสมที่สุดต้องเลือกค่าที่ทำให้ค่า $f(K)$ มีค่าต่ำสุด

3.5 การประมาณตำแหน่ง และรัศมีจากข้อมูลที่เป็นจุด



รูปที่ 3.10: การใช้ข้อมูล (x, y) เพื่อสร้างรัศมีของวงกลม

ข้อมูลจากตัวรับรู้เรดาร์ที่ได้มามีลักษณะเป็นจุด เมื่อมองข้อมูลบนระนาบ xy จุดของข้อมูลมีการกระจายดังในรูปที่ 3.10 เราจะอาศัยรูปร่างของทรงกระบอกในการสร้างรูปร่างสิ่งกีดขวาง วิธีที่ใช้หารัศมีของทรงกระบอกคือ **วิธีกำลังสองต่ำสุดสำหรับวงกลม** โดยการมองจุดทั้งหมดที่ถูกแยกกลุ่มออกมาให้อยู่บนแกน x และ y

พิจารณาเซตจำกัดบน \mathbb{R}^2 ให้ $\{(x_i, y_i) \mid 0 \leq i < N\}$ นิยามให้

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i \text{ และ } \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_i y_i \quad (3.12)$$

และให้ $u_i = x_i - \bar{x}$, $v_i = y_i - \bar{y}$ เพื่อแปลงข้อมูลจากระนาบ xy มายังระนาบ uv ต่อมา จะทำการแก้ปัญหาคำสั่งสองต่ำสุดบนระนาบ uv แล้วจึงแปลงกลับมายังระนาบ xy

ให้วงกลมมีศูนย์กลาง (u_c, v_c) และรัศมี r จากสมการวงกลม และนิยามฟังก์ชัน เป้าหมายนั้นคือ

$$F(u_c, v_c, r) = \sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - r^2]^2 \quad (3.13)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการทำคำสั่งสองต่ำสุด เราแปลงรูปแบบของปัญหาใหม่ โดยให้ $r^2 = \alpha$ ได้ฟังก์ชันเป้าหมายใหม่คือ

$$G(u_c, v_c, \alpha) = \sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha]^2 \quad (3.14)$$

หาอนุพันธ์ของ $G(u_c, v_c, \alpha)$

เมื่อให้ $\frac{\partial G}{\partial \alpha} = 0$ จะได้

$$2 \sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha](-1) = 0 \quad (3.15)$$

$$\sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha] = 0 \quad (3.16)$$

เมื่อให้ $\frac{\partial G}{\partial u_c} = 0$ จะได้

$$-2 \sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha](u_i - u_c) = 0 \quad (3.17)$$

$$\sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha][u_i - \underbrace{u_c}_{=0 \text{ จาก 3.16}}] = 0 \quad (3.18)$$

$$\sum_i u_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha] = 0 \quad (3.19)$$

เมื่อให้ $\frac{\partial G}{\partial v_c} = 0$ จะได้

$$-2 \sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha](v_i - v_c) = 0 \quad (3.20)$$

$$\sum_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha][v_i - \underbrace{v_c}_{=0 \text{ จาก 3.16}}] = 0 \quad (3.21)$$

$$\sum_i v_i [(u_i - u_c)^2 + (v_i - v_c)^2 - \alpha] = 0 \quad (3.22)$$

นิยามให้ $S_u = \sum_i u_i$, $S_{uu} = \sum_i u_i^2$ แล้วกระจายสมการ (3.19) และ (3.22) ได้

จากสมการ (3.19)

$$\sum_i (u_i^3 - 2u_c u_i^2 + u_c^2 u_i + u_i v_i^2 - 2v_c u_i v_i + v_c^2 u_i - \alpha u_i) = 0 \quad (3.23)$$

$$S_{uuu} - 2u_c S_{uu} + u_c^2 S_u + S_{uvv} - 2v_c S_{uv} + v_c^2 S_u - \alpha S_u = 0 \quad (3.24)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการ (3.22)

$$\sum_i (u_i^2 v_i - 2u_c u_i v_i + u_c^2 v_i + v_i^3 - 2v_c v_i^2 + v_c^2 v_i - \alpha v_i) = 0 \quad (3.25)$$

$$S_{uuv} - 2u_c S_{uv} + u_c^2 S_v + S_{vvv} - 2v_c S_{vv} + v_c^2 S_v - \alpha S_v = 0 \quad (3.26)$$

เนื่องจาก $S_u = S_v = 0$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (3.24) และ (3.26) ใหม่ได้เป็น

$$S_{uuu} - 2u_c S_{uu} + S_{uvv} - 2v_c S_{uv} = 0$$

$$u_c S_{uu} + v_c S_{uv} = \frac{1}{2}(S_{uuu} + S_{uvv})$$

$$S_{uuv} - 2u_c S_{uv} + S_{vvv} - 2v_c S_{vv} = 0$$

$$u_c S_{uv} + v_c S_{vv} = \frac{1}{2}(S_{uuv} + S_{vvv})$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} S_{uu} & S_{uv} \\ S_{uv} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} S_{uuu} + S_{uvv} \\ S_{uuv} + S_{vvv} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.16) ทำการกระจายกำลังสองได้

$$\sum_i (u_i^2 - 2u_c u_i + u_c^2 + v_i^2 - 2v_c v_i + v_c^2 - \alpha) = 0$$

$$S_{uu} - 2u_c S_u + N u_c^2 + S_{vv} - 2v_c S_v + N v_c^2 - N \alpha = 0$$

$$\alpha = u_c^2 + v_c^2 + \frac{S_{uu} + S_{vv}}{N} \quad (3.28)$$

จากการหาค่าจุดต่ำสุดจากฟังก์ชันเป้าหมาย (3.14) ทำให้สามารถหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางวงกลมจาก $(u_c + \bar{x}, v_c + \bar{y})$ และหารัศมีของวงกลมได้จาก $\sqrt{\alpha}$ ผลที่ได้ใช้ในการหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงกลมเพื่ออธิบายขนาดของสิ่งกีดขวางโดยอาศัยแบบจำลองวงกลมนี้

3.6 ผลการทดลองประมาณรัศมีของสิ่งกีดขวาง

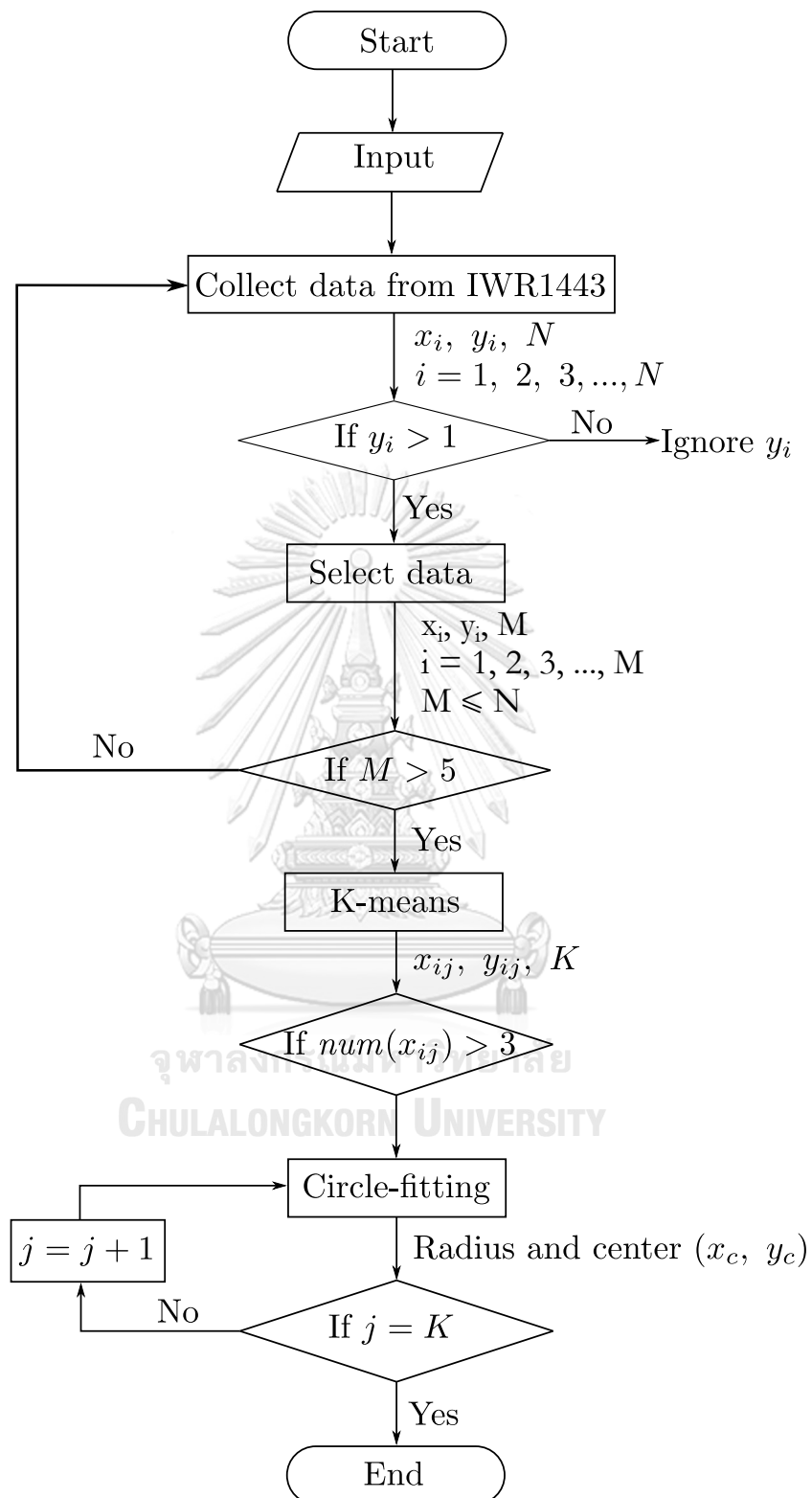
ในการทดลองสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานได้เป็น 4 ส่วน ดังรูป 3.11 ได้แก่

1. **ขั้นตอนการเก็บข้อมูล** จะเป็นส่วนที่ให้ IWR1443 ดำเนินการเก็บข้อมูล โดยการตั้งค่าให้อัตราการเก็บข้อมูลเป็น 5 frame/sec
2. **ขั้นตอนการเก็บข้อมูล** ในขั้นตอนนี้เราจะหลีกเลี่ยงกรณีที่ข้อมูลมีจำนวนน้อยเกินกว่าที่จะนำมาใช้ได้ และการเก็บข้อมูลที่ผิดพลาด ถ้าหากการเก็บข้อมูลที่ผิดพลาดในกรณีที่วัดตำแหน่งได้น้อยกว่า 1 เมตร จะทิ้งข้อมูลนั้นไป จากนั้นจะนับจำนวนข้อมูล ถ้าหากมีจำนวนข้อมูลน้อยกว่า 5 จะทิ้งเฟรมนั้น และเริ่มขั้นแรกใหม่
3. **ขั้นตอนการแยกวัตถุ** ขั้นตอนนี้จะอาศัยอัลกอริทึม K-means และเลือกจำนวนข้อมูลด้วยอัลกอริทึม K-selection โดยการคำนวณค่า K จะกำหนดให้ค่าตัวเลขสูงสุดแค่ $K=3$ เพื่อแยกข้อมูลออกจากกัน
4. **ขั้นตอนการประมาณวัตถุ** ขั้นตอนนี้สุดท้ายนั้นใช้ข้อมูลจากขั้นตอนก่อนหน้าในการประมาณวัตถุเป็นทรงกลมด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุดสำหรับวงกลม โดยถ้าหากกลุ่มใดมีจำนวนข้อมูลน้อยกว่า 4 กลุ่มดังกล่าวจะถูกละทิ้งไป

ผลการแสดงตำแหน่งของวัตถุที่ถูกตรวจจับด้วย IWR1443

ในการแสดงผลของ IWR1443 นั้นกำหนดให้ตำแหน่งของตัวรับรู้เรดาร์อยู่ที่ตำแหน่งจุดกำเนิด โดยมีสัญลักษณ์เป็น **X** และตำแหน่งของวัตถุที่ถูกตรวจจับได้นั้นแสดงด้วยสัญลักษณ์ **O** เนื่องจากข้อจำกัดของตัวรับรู้เรดาร์ ในการวัดจริงต้องอาศัยการสั่นตัวรับรู้เพียงเล็กน้อย เพื่อให้ตัวรับรู้สามารถตรวจจับวัตถุได้

จากรูปที่ 3.13 ตัวรับรู้เรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุต่าง ๆ และแสดงผลในรูปแบบของตำแหน่งที่ตรวจจับได้ โดยตรวจจับได้มากขึ้นกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือตัวเรดาร์ เนื่องจากตัวเรดาร์นั้นอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนไปของความถี่ดังที่แสดงไปในข้างต้น เมื่อดูจากรูปที่ 3.13(ข) การแสดงตำแหน่ง xy นั้นแสดงรูปร่างของวัตถุอย่างคร่าว ๆ ขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลม ตามรูปร่างของวัตถุที่ใช้ในการตรวจจับ

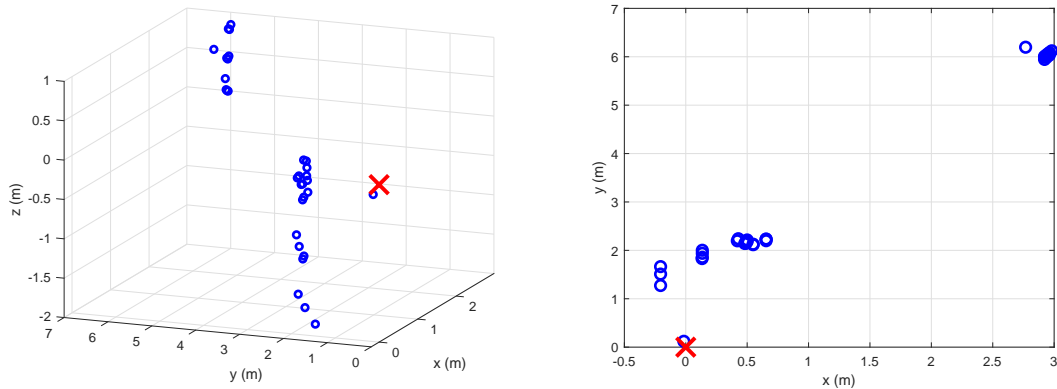


รูปที่ 3.11: แผนภาพแสดงขั้นตอนการประมวลผลวัตถุ

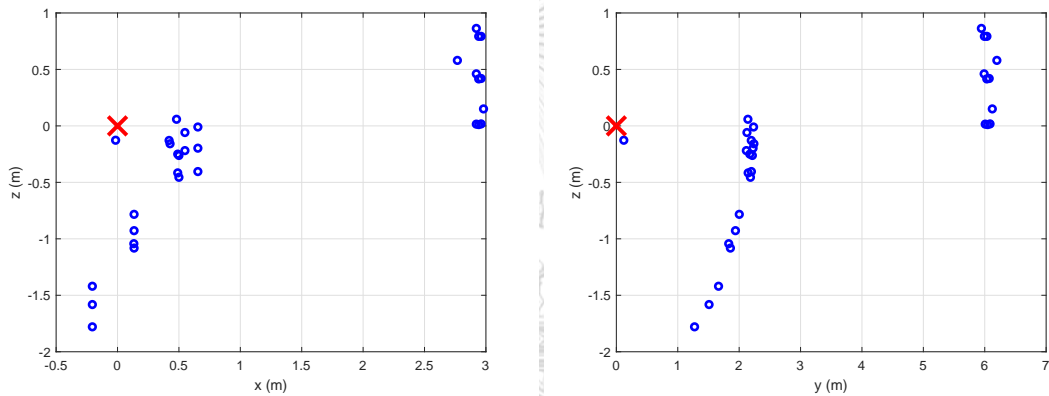
จากรูปที่ 3.13 ตัวรับรู้เรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุต่าง ๆ และแสดงผลในรูปของตำแหน่งที่ตรวจจับได้ โดยตรวจจับได้มากขึ้นกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือตัวเรดาร์ เนื่องจากตัวเรดาร์นั้นอาศัยการตรวจจับการเปลี่ยนไปของความถี่ที่แสดงไปในข้างต้น เมื่อดูจากรูปที่ 3.13(ข) การแสดงตำแหน่ง xy นั้นแสดงรูปร่างของวัตถุอย่างคร่าว ๆ ขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลม ตามรูปร่างของวัตถุที่ใช้ในการตรวจจับ



รูปที่ 3.12: ทดสอบการวัดตำแหน่งของเรดาร์เมื่ออยู่ในพื้นที่ที่มีต้นไม้



(ก) ปริภูมิสามมิติของตำแหน่งของวัตถุที่ถูก (ข) ระนาบ xy ของตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับ
ตรวจจับได้



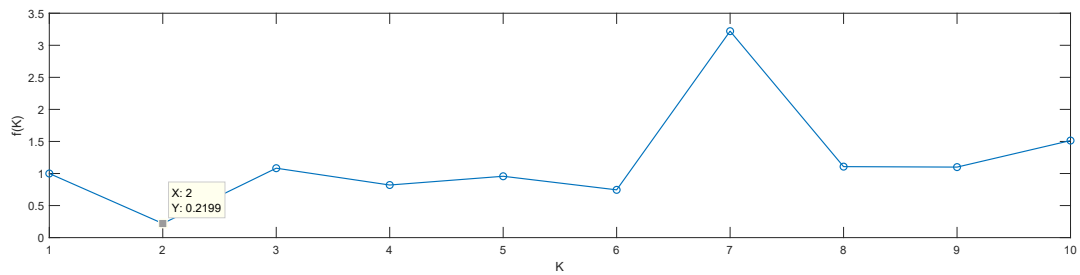
(ค) ระนาบ xz ของตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับ (ง) ระนาบ yz ของตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับ
ได้

รูปที่ 3.13: ข้อมูลในปริภูมิต่าง ๆ ที่เรดาร์ตรวจจับได้ในหนึ่งเฟรมจากรูป 3.12 ที่ระยะ 2 เมตร

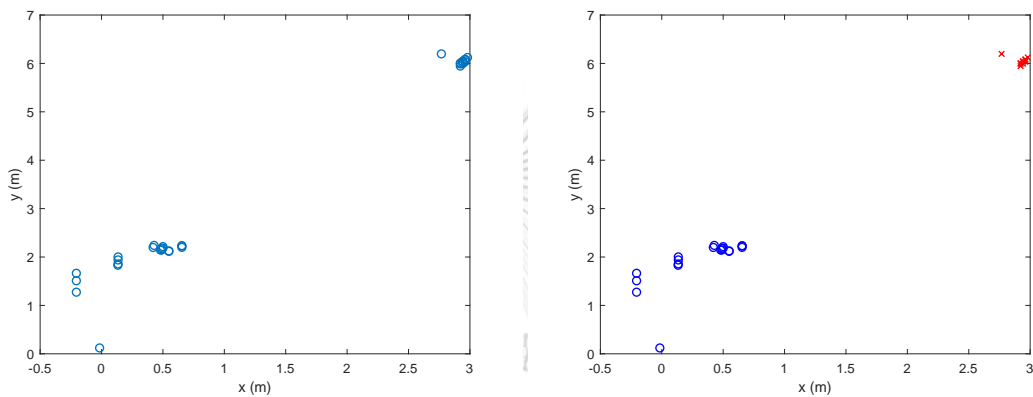
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการแยกวัตถุ

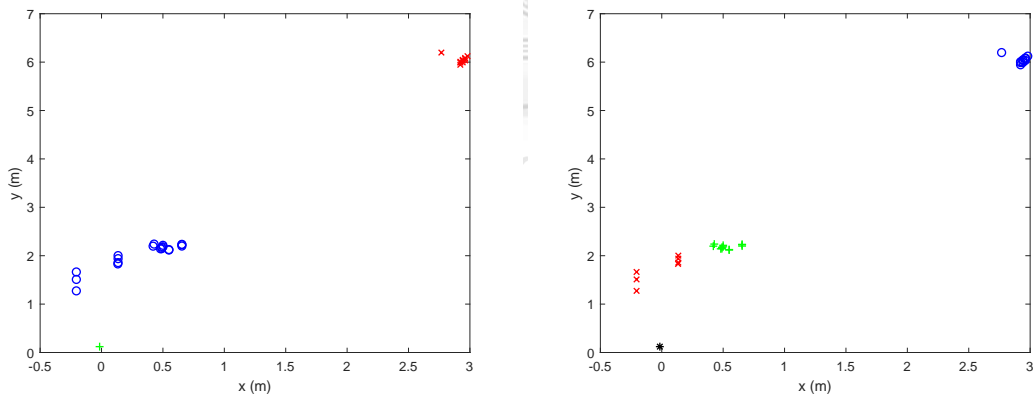
ในการทดลองใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12 ในการแสดงผลของข้อมูลว่าสามารถแยกวัตถุด้วยอัลกอริทึมที่ได้อธิบายไป จากการทดลองโดยให้ค่า $K_{max} = 10$ และทดลองหาค่า $f(K)$ ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นว่า ค่า $f(K)$ ที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.2199 และตรงกับ $K = 2$ และเมื่อดูจากรูป 3.15 จากรูป ที่ใช้ค่า $K = 2$ นั้นมีความสมเหตุสมผลที่สุด



รูปที่ 3.14: ค่าของฟังก์ชัน $f(K)$ เมื่อเพิ่มค่า K มากขึ้นเรื่อย ๆ



(ก) ผลการแยกจุดแต่ละออกเป็นกลุ่ม เมื่อให้ $K = 1$ ด้วยอัลกอริทึม K-Means (ข) ผลการแยกจุดแต่ละออกเป็นกลุ่ม เมื่อให้ $K = 2$ ด้วยอัลกอริทึม K-Means



(ค) ผลการแยกจุดแต่ละออกเป็นกลุ่ม เมื่อให้ $K = 3$ ด้วยอัลกอริทึม K-Means (ง) ผลการแยกจุดแต่ละออกเป็นกลุ่ม เมื่อให้ $K = 4$ ด้วยอัลกอริทึม K-Means

รูปที่ 3.15: ผลการแยกกลุ่มของข้อมูลตำแหน่งสิ่งกีดขวาง เมื่อกำหนดให้จำนวนกลุ่ม K เป็น 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

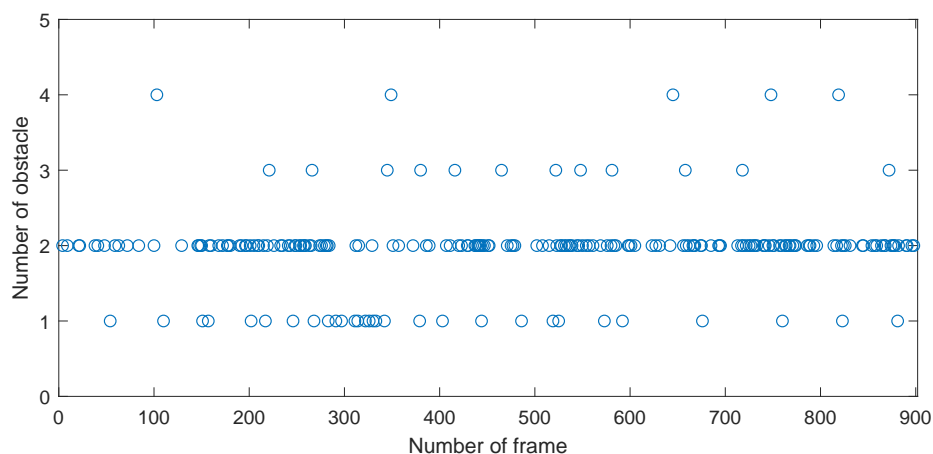
ผลการประมาณขนาดของวัตถุ

ในการทดลองเก็บข้อมูลโดยแบ่งเป็น สำหรับต้นไม้ภายนอกอาคารเก็บข้อมูลจำนวน 900 ชุด และสำหรับรางเคลื่อนที่ภายในอาคารเก็บมาจำนวน 190 ชุด

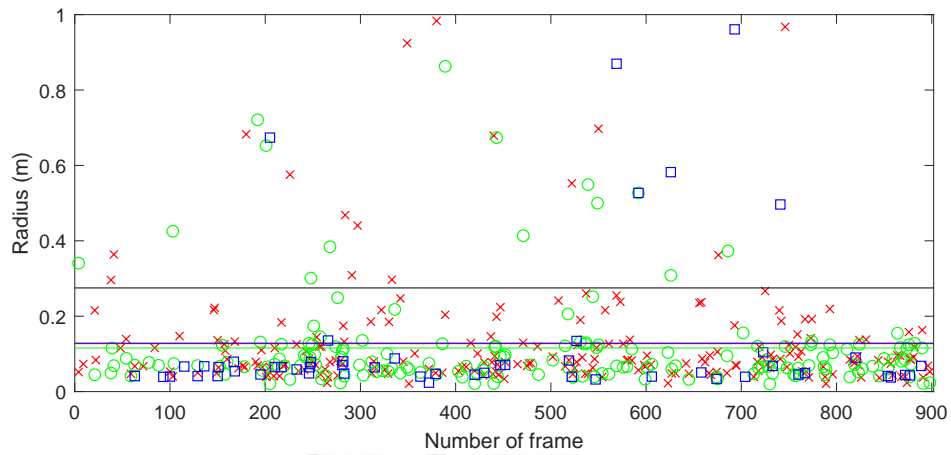
เนื่องจากการเก็บข้อมูลจากภายนอกอาคารมีสิ่งรบกวนตัวรับรู้เรดาร์มากมาย จึงต้องเก็บข้อมูลมาเป็นจำนวนมากเพื่อใช้ในการทดสอบสมมติฐาน แต่สำหรับภายในอาคารไม่มีความจำเป็นต้องคำนึงถึงสิ่งรบกวนอื่น จึงเก็บมาด้วยจำนวนที่น้อยกว่า การแสดงผลการประมาณ โดยแทนข้อมูลทั้งหมดด้วยค่าเฉลี่ย เพื่อเป็นตัวแทนในการวัดเทียบว่าการประมาณมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยเท่าใด ในการทดสอบสมมติฐานได้เก็บข้อมูลมา แบ่งเป็น ต้นไม้ต้นเดียว ต้นไม้หลายต้น และวัตถุเคลื่อนที่ เพื่อประมาณขนาดและตำแหน่งของวัตถุ

ต้นไม้ในรูปที่ 3.12 ผลการประมาณขนาดของรัศมี จุดศูนย์กลางของวงกลมของต้นไม้ รูปที่ 3.16 จำนวนวัตถุที่ถูกตรวจจับได้อาจมีอยู่สองชั้น รูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 เป็นตำแหน่งของต้นไม้ที่ถูกตรวจจับได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ ต้นไม้ที่ถูกตรวจจับได้เมื่อดูจากรูปที่ 3.12 ทางด้านขวานั้นมีต้นไม้อยู่ต้นหนึ่ง เมื่อดูขนาดรัศมี ดังในรูปที่ 3.17 จะเห็นว่าขนาดของรัศมีไปอยู่ในช่วง 0 ถึง 1.3 ซึ่งจากการหาค่าเฉลี่ย มีค่าประมาณ 0.1271 เซนติเมตร จากรูปที่ 3.21 ขนาดรัศมีที่ถูกประมาณเมื่อเทียบจากระยะต่าง ๆ เมื่อวัดจากระยะห่างมาก ๆ ทำให้รัศมีลดลง คล้ายหลักการประมาณขนาดของภาพถ่าย ที่ยิ่งไกลออกไปขนาดยังมีค่าลดลง แต่ด้วยการประมาณด้วยวิธีนี้ทำให้รัศมีเมื่อวัดจากระยะห่างค่าหนึ่งมีค่าใหญ่ผิดปกติ อันเนื่องมาจากเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นการกระจายของข้อมูลได้จากเรดาร์เริ่มผิดเพี้ยนไป และผลการแยกกลุ่มจะทำให้ข้อมูลมีการกระจายมากเกินไป ทำให้การประมาณนั้นใหญ่เกินจริงไปมาก

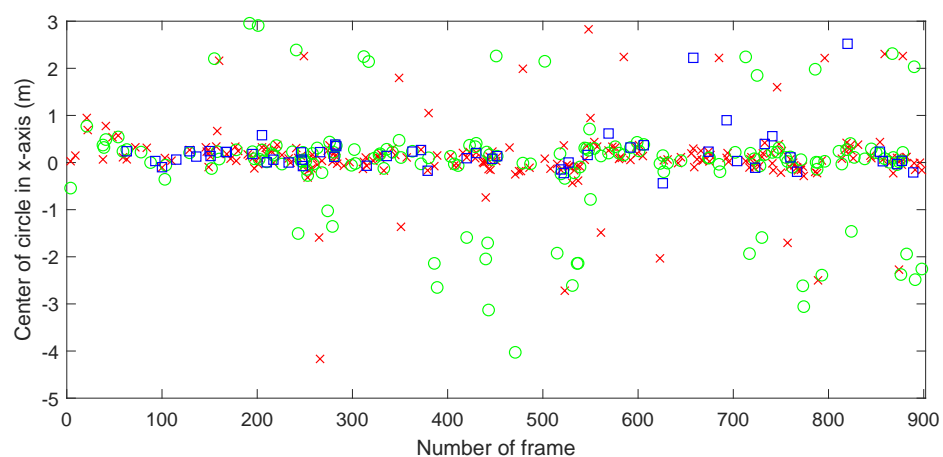
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



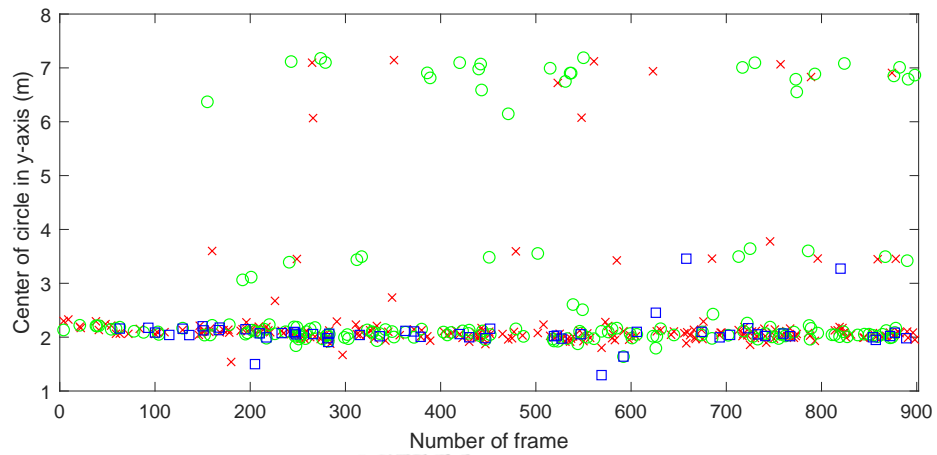
รูปที่ 3.16: ผลการแยกวัตถุในแต่ละเฟรม โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12



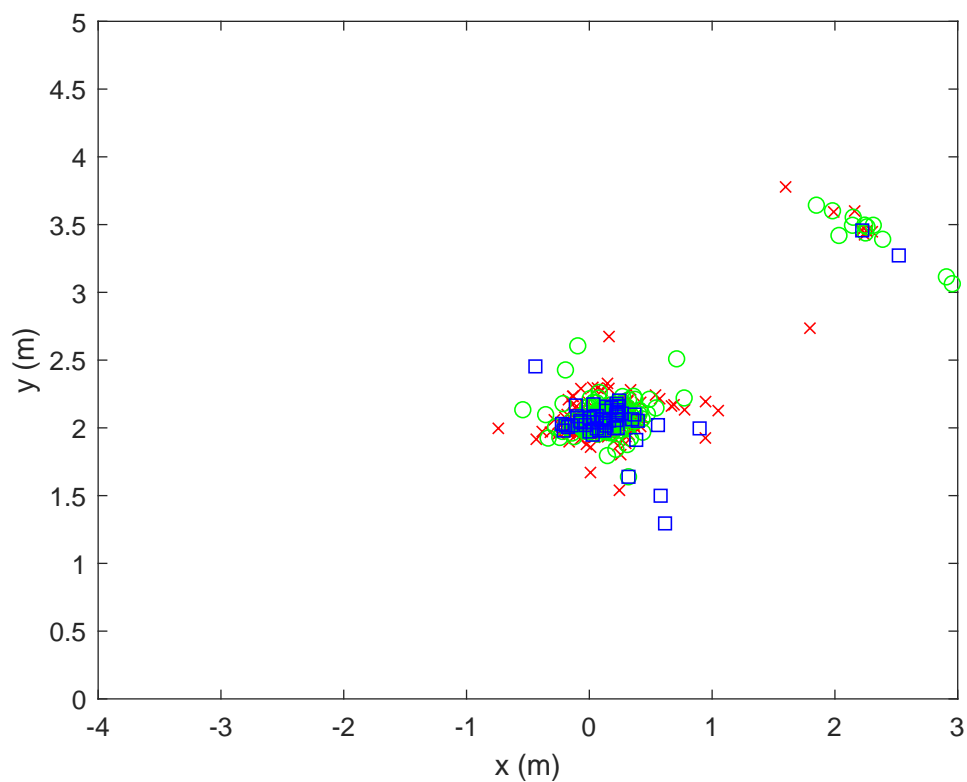
รูปที่ 3.17: ผลจากการประมาณรัศมีของวัตถุโดย — คือรัศมีจริงของต้นไม้
 สัญลักษณ์ x , o และ \square แทนขนาดของรัศมีที่เฟรมต่าง ๆ —, — และ —
 แทนค่าเฉลี่ยของรัศมีวัตถุ ลำดับที่ 1, 2 และ 3 ที่ถูกตรวจจับ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่
 3.12



รูปที่ 3.18: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทน
 ตำแหน่งบนแกน x ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.19: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน y เมื่อสัญลักษณ์ x , \circ และ \square แทนตำแหน่งบนแกน y ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.20: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางของวงกลม เมื่อสัญลักษณ์ x , \circ และ \square แทนตำแหน่งบนระนาบ xy ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.21: ผลการประมาณรัศมีที่ระยะ 2 ถึง 5 เมตร โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.12

เมื่อนำวิธีการประมาณขนาดวัตถุนี้ไปทดลองกับต้นไม้อื่น ๆ ในพื้นที่เดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นต้นไม้ต้นเดียว เห็นว่าเมื่อขนาดของต้นไม้ที่ถูกประมาณที่ระยะ 2 เมตร มีขนาดลดลงไปครึ่งหนึ่ง และค่าประมาณของรัศมีของต้นไม้ที่ต้นใหญ่มีค่าเล็กลงเมื่อระยะเพิ่มขึ้น เหมือนหลักการประมาณขนาดของกล้อง ซึ่งจากการทดลองในพื้นที่นี้ ระยะที่สามารถประมาณได้ค่อนข้างตรงอยู่ที่ระยะ 4 เมตร สำหรับต้นไม้บริเวณหน้าตึกชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แต่สำหรับขนาดที่ถูกประมาณเล็กกว่าขนาดจริงนั้น ถูกชดเชยโดยการเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของค่าประมาณ ซึ่งถูกอธิบายในบทถัดไป

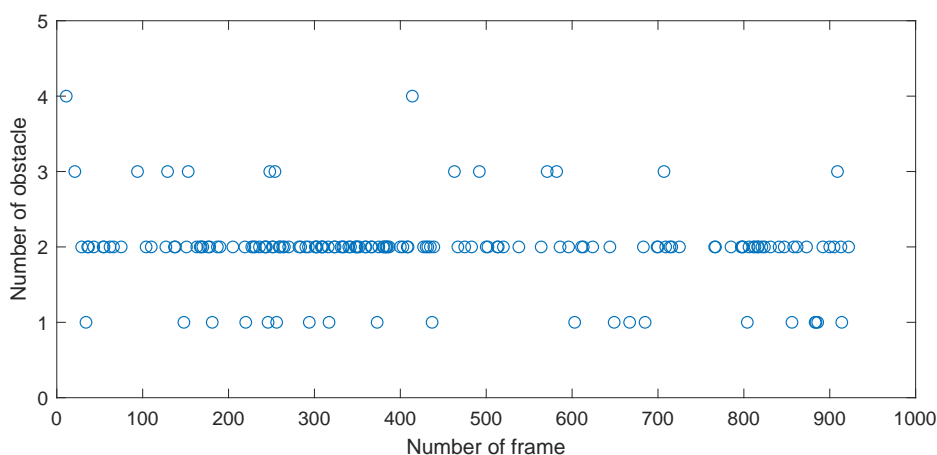
ตารางที่ 3.1: ผลการทดสอบการประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ เทียบกับระยะที่ทดสอบเก็บข้อมูล

เส้นผ่านศูนย์กลางจริง (cm)	เส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากการประมาณที่ระยะใดๆ (cm)			
	2	3	4	5
55	25.42	25.18	24.22	27.04
80	58.1	41.3	32.1	20.0
35	14.4	12.2	16.7	22.1
24	11.1	10.8	14.3	14.8

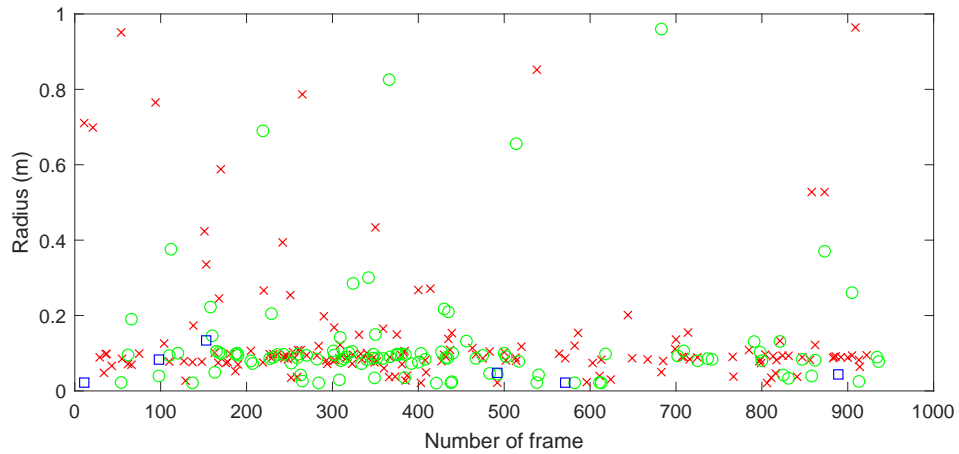
เมื่อนำไปทดลองกับต้นไม้หลายต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จากในรูปสนใจเฉพาะต้นไม้ที่อยู่ในรูป เพื่อใช้ในการตีความว่ามีวัตถุใดบ้าง ซึ่งผลที่ได้คือมีวัตถุที่ถูกตรวจจับได้ส่วนใหญ่มีเพียงสองชิ้น ดังในรูปที่ 3.23 นั่นคือต้นไม้ที่อยู่ด้านหน้าสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ 3.27 ซึ่งเห็นได้ว่า ตรวจจับต้นไม้ด้านหน้าสุดดังในรูปได้ แต่ไม่สามารถตรวจจับต้นไม้ที่อยู่ไกลกว่านั้นได้ เนื่องจากสัญญาณถูกลดทอนออกไปตามระยะทาง แต่ในส่วนของรัศมีที่ถูกแสดงในรูปที่ 3.24 รัศมีของต้นไม้ทั้งสองต้นไม้มีความใกล้เคียงกัน (ขนาดของทั้งสองต้นไม้ถูกประมาณมีขนาด 10 เซนติเมตร)



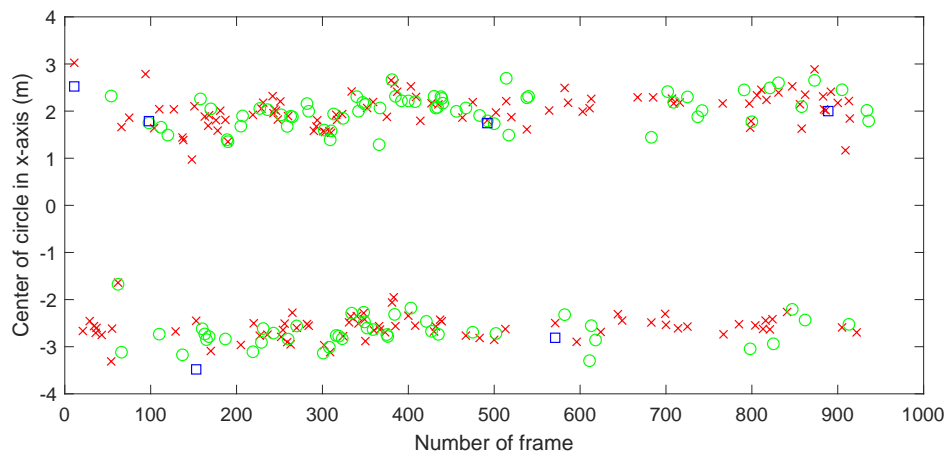
รูปที่ 3.22: ทดสอบการวัดตำแหน่งของวัตถุหลายชิ้น



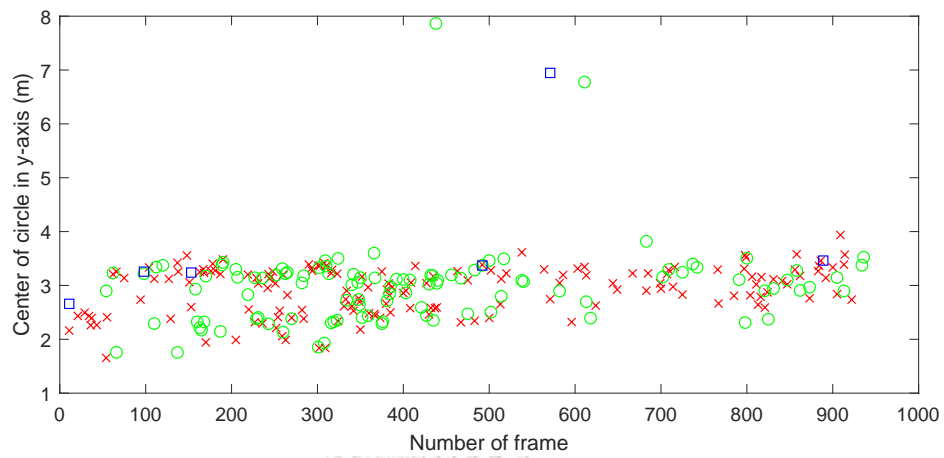
รูปที่ 3.23: ผลการแยกวัตถุในแต่ละเฟรม โดยใช้ข้อมูลจากข้อมูลรูปที่ 3.22



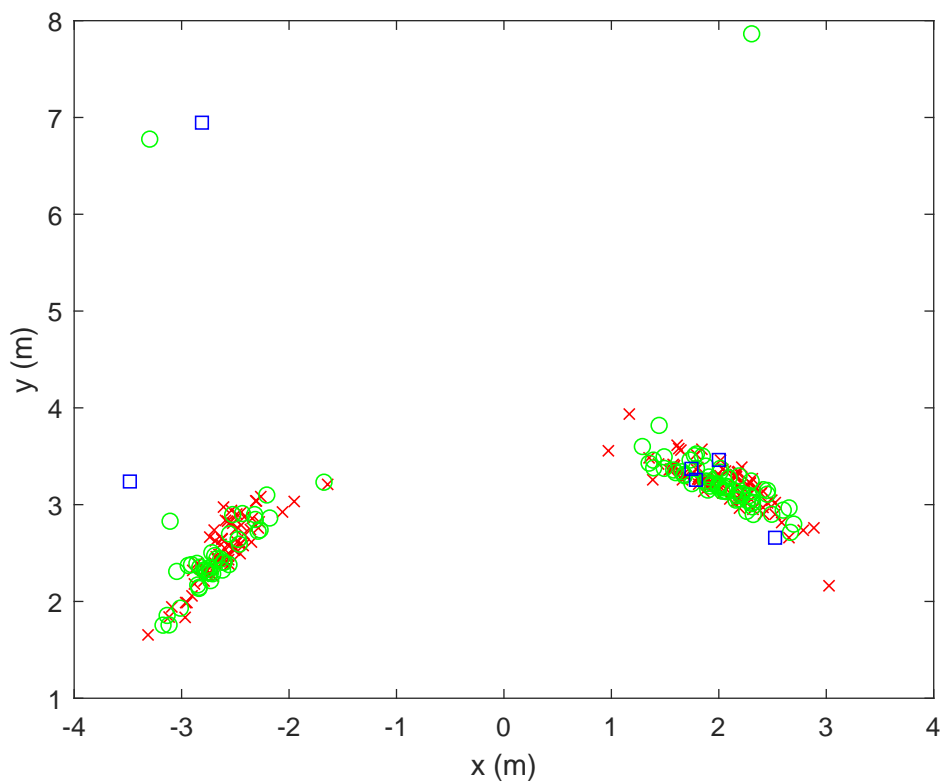
รูปที่ 3.24: ผลจากการประมาณรัศมีของวัตถุกรณีที่มีต้นไม้หลายต้น สัญลักษณ์ x , o และ \square แทนขนาดของรัศมีที่เฟรมต่าง ๆ ที่ถูกตรวจจับ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.25: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน x ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22

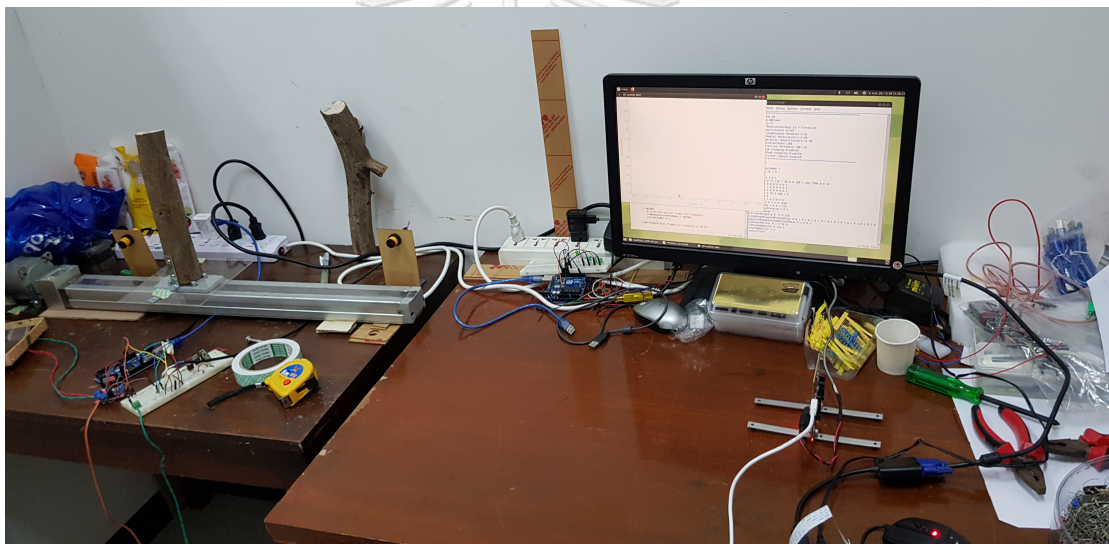


รูปที่ 3.26: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน y ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22

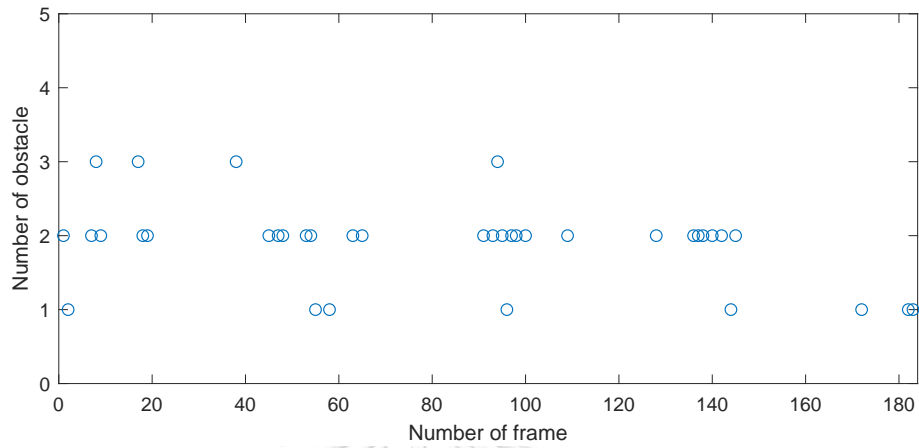


รูปที่ 3.27: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางของวงกลม เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนระนาบ xy ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.22

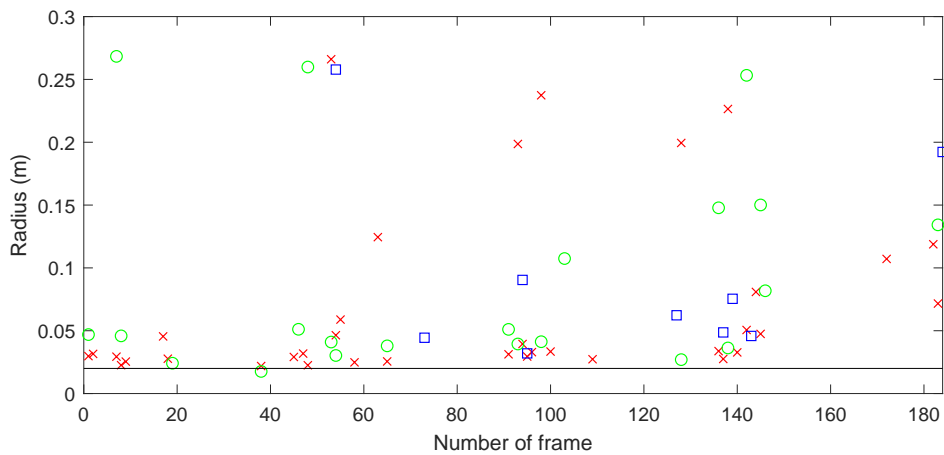
เมื่อนำไปทดลองกับวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.28 โดยในการทดลองให้ ความยาวราง = 56 เซนติเมตร แล้วใช้ความเร็วทดสอบอยู่ที่ 12 เซนติเมตร/วินาที และตั้งให้ตัวรับรู้เรดาร์ห่างจากราง 50 เซนติเมตร และได้ผลการทดลองดังรูปด้านล่าง จากรูปที่ 3.29 จำนวนวัตถุที่ถูกตรวจจับได้มากกว่า 1 ชิ้น อันเนื่องมาจากตัวรางในขณะที่มีการเคลื่อนที่แถบของรางมีการขยับตามไปด้วย ทำให้ตัวเรดาร์อาจตรวจจับผิดพลาด หรืออาจเป็นเพราะการแยกกลุ่มของ K-mean ในการเลือกจุดเริ่มต้นอาจสับสนใกล้จุดค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม จากรูปที่ 3.30 รัศมีที่ถูกประมาณได้มีค่าใหญ่กว่าค่าจริงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากขนาดของวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินไป จากรูปที่ 3.31 แสดงถึงความเยื้องของตำแหน่งของวัตถุ กับตัวรับรู้เรดาร์ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.32



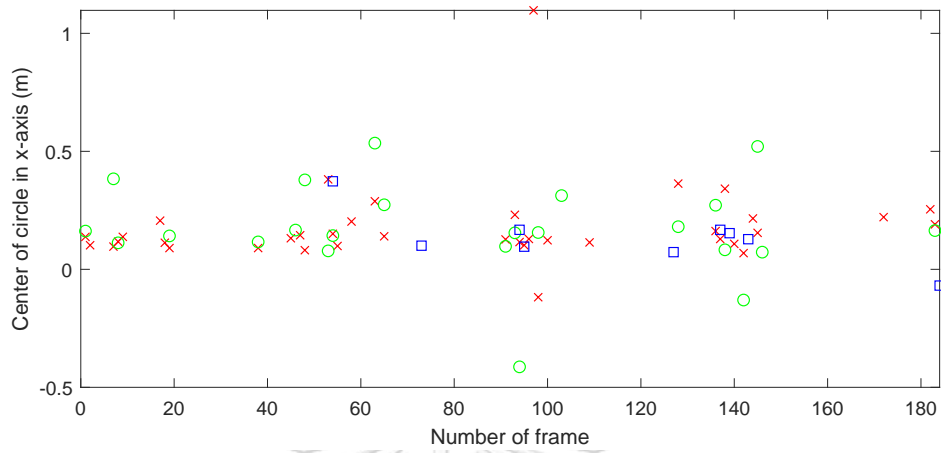
รูปที่ 3.28: ทดสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุรูปร่างทรงกระบอก ที่มีรัศมี 4 เซนติเมตร



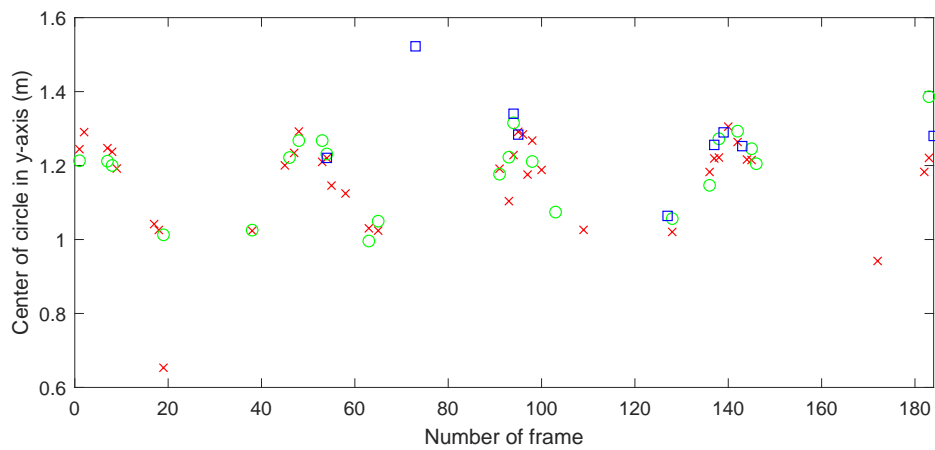
รูปที่ 3.29: ผลการแยกวัตถุในแต่ละเฟรม โดยใช้ข้อมูลจากข้อมูลรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.30: ผลจากการประมาณรัศมีของวัตถุโดย —— คือรัศมีจริงของต้นไม้
สัญลักษณ์ x, o และ □ แทนขนาดของรัศมีที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.31: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน x ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.32: ผลการประมาณจุดศูนย์กลางบนแกน x เมื่อสัญลักษณ์ x , o และ \square แทนตำแหน่งบนแกน y ที่เฟรมต่าง ๆ โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 3.28

บทที่ 4

การสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในบทนี้อธิบายกระบวนการสร้างเส้นทางเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วย RRT* แสดงผลการสร้างเส้นทางเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และแสดงผลการบินตามเส้นทางเพื่อทดสอบว่าอากาศยานหลายใบพัดสามารถบินหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ โดยอาศัยการแสดงผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink

4.1 การสร้างเส้นทางเมื่อมีสิ่งกีดขวาง

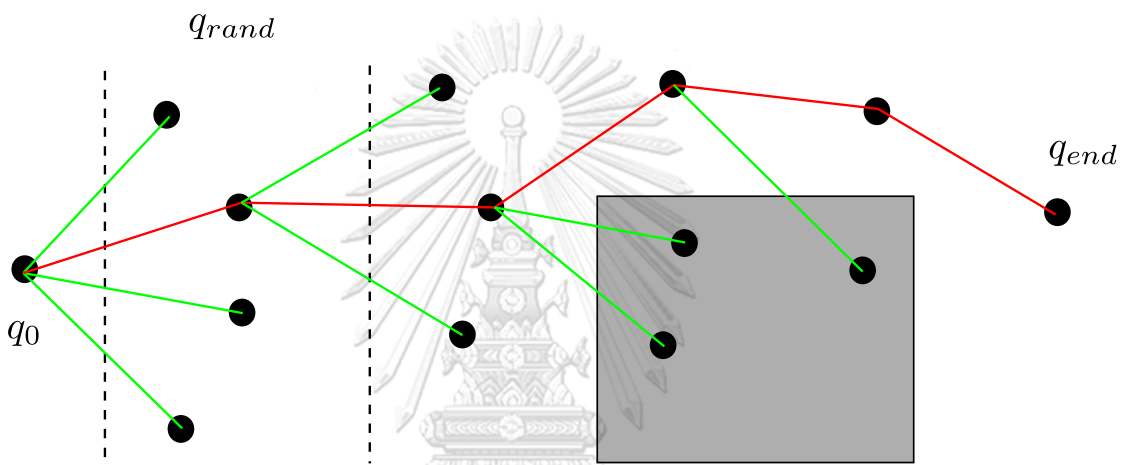
อัลกอริทึม Rapidly-exploring random tree (RRT) เป็นอัลกอริทึมหนึ่งในการสร้างเส้นทางเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ค้นหาเส้นทางที่มุ่งไปยังเป้าหมาย [45, 46] แต่เนื่องจากวิธีนี้ผู้ใช้ต้องทำการเลือกเส้นทางทั้งหมด จึงอาศัยส่วนขยายของอัลกอริทึมนี้คือ RRT* ทำการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดของการค้นหาด้วย RRT ที่ได้จากการค้นหาในรอบนั้น ๆ ก่อนไปสู่การอธิบายหลักการค้นหาเส้นทางของแต่ละอัลกอริทึม ให้นิยามของแต่ละฟังก์ชัน

- $X_{free}, X_{obs} \subset X$ โดย X เป็นขอบเขตทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางทั้งหมด
- V แทนเซตของจุดทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหา โดยที่ $V \subset X$
- E แทนเซตของเส้นทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหา และ $E(x, y) = \{x, y \in X | \gamma x + (1 - \gamma)y \in X, \gamma \in (0, 1)\}$
- $G = (E, V)$ แทนกราฟที่เกิดขึ้นทั้งหมดจาก (E, V)
- *Rand* แทนฟังก์ชันการสุ่มแบบเอกรูป
- *Steer*(x, y) คือฟังก์ชันเลือกจุดที่อยู่บน $E(x, y)$ โดยต้องเลือกจุดที่อยู่ใกล้ y มากกว่า x
- *ObstacleFree*(x, y) คือฟังก์ชันที่ใช้ตรวจสอบ x, y และ $E(x, y)$ อยู่ในบริเวณของสิ่งกีดขวางหรือไม่

- $Near(G,x,r)$ คือฟังก์ชันที่คืนกราฟ G' ที่อยู่ใกล้กับ x ในรัศมี r
- $Nearest(G,x)$ คือฟังก์ชันหาจุดที่อยู่ใกล้กับจุด x ที่สุดในกราฟ G

การสร้างเส้นทางแบบ RRT

อัลกอริทึมนี้อาศัยการค้นหาเส้นทางแบบสุ่ม เพื่อหาเส้นทางทั้งหมดเท่าที่พอเป็นไปได้ เพื่อสร้างเส้นทางต่าง ๆ จากรูปที่ 4.1 เริ่มจากการสุ่มจุดไปเรื่อย ๆ แล้วนำจุดที่สุ่มได้ สุ่มจุดถัดไปจนกว่าจุดที่ถูกสุ่มนั้นเข้าไปยังบริเวณเป้าหมาย



รูปที่ 4.1: ตัวอย่างการค้นหา และสร้างเส้นทางโดยอัลกอริทึม RRT

กำหนดให้ระยะจากการสุ่มจากจุดต่อจุดคือ ϵ จำนวนจุดที่ต้องการใช้ในการสุ่ม N จุด และจุดที่ถูกสุ่มเข้าไปในบริเวณเป้าหมาย δ ขั้นตอนการค้นหาเส้นทางได้แสดงในอัลกอริทึมที่ 1 สามารถสรุปได้ขั้นตอนต่อไปนี้

1. กำหนดจุดเริ่มต้น q_0 จำนวนจุด N และขอบเขต ϵ, δ
2. ทำการสุ่มจุดขึ้นมารอบจุด q_n โดย $q_{n+1} = \text{Rand}(\epsilon)$
3. หาจุดที่ใกล้กับจุด q_n แล้วเก็บค่า $q_{\text{nearest}} = \text{Nearest}(G, q_{\text{rand}})$
4. สร้างจุดใหม่ $q_{\text{new}} = \text{Steer}(q_{\text{nearest}}, q_n)$
5. ทำการตรวจสอบด้วย $\text{ObstacleFree}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}})$ หากพบสิ่งกีดขวาง ให้ละเลยจุดนั้นไป ไม่ทำการสุ่มต่อ
6. อัปเดตกราฟ $G = (E, V)$ จากจุด q_{new}

7. เมื่อสุ่มจนครบ N จุดหรือ มีจุดที่ถูกสุ่มอยู่ในบริเวณ δ ให้หยุดการค้นหาเส้นทาง แล้วเลือกเส้นทางใด ๆ เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่

Algorithm 1 อัลกอริทึมการสร้างเส้นทางด้วยวิธี RRT

```

1: procedure RRT( $q_0, q_{\text{goal}}, N, \epsilon, \delta$ )
2:   while  $r \in q_{\text{goal}} + \delta$  or  $n = N$  do
3:      $q_{\text{rand}} \leftarrow q_n + \text{Rand}(\epsilon)$ 
4:      $q_{\text{nearest}} \leftarrow \text{Nearest}(G, q_{\text{rand}})$ 
5:      $q_{\text{new}} \leftarrow \text{Steer}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{rand}})$ 
6:      $E \leftarrow E \cup E(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}}), V \leftarrow V \cup q_{\text{new}}$ 
7:     if  $\text{ObstacleFree}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}})$  then
8:        $G \leftarrow (E', V') \setminus (E, V)$ 
9:        $q_n \leftarrow q_{\text{new}}, n = n + 1$ 
10:  return  $G = (E', V')$ 

```

การสุ่มด้วยวิธีนี้ทำให้หุ่นยนต์ใด ๆ ต้องวิ่งตามจุดที่สร้างไว้ หรืออาจทำให้ต้องวิ่งไปยังจุดบางจุดอย่างเปล่าประโยชน์ จึงเพิ่มวิธีเลือกแค่บางจุดจาก RRT ในการหาเส้นทาง

การสร้างเส้นทางแบบ RRT*

RRT* เป็นการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการค้นหาเส้นทางของ RRT [47] RRT* วัดจากฟังก์ชันค่าใช้จ่ายซึ่งนิยามให้ $Cost(a, b)$ เป็นฟังก์ชันวัดระยะห่างระหว่างจุด a และ b และนิยามให้ $c(a)$ คือค่าใช้จ่ายที่อยู่ในเส้น จากจุด a เมื่อเทียบกับจุด q_{goal} เลือกให้ $Cost(a, b)$ เป็นฟังก์ชันระยะทางระหว่างจุด a และ b ในช่วงเริ่มต้นทุกจุดมีค่า c เป็น 0 แต่เมื่อเริ่มค้นหาเส้นทาง ค่า c ในแต่ละจุดมีค่าขึ้นมาเนื่องจากการเดินทางจากจุดก่อนหน้า สำหรับขั้นตอนการค้นหาเส้นทางกระทำเหมือนกับ RRT เพียงเพิ่มการคำนวณค่าใช้จ่าย โดยจุดเริ่มต้นมีค่า $C(q_0) = 0$ และเพิ่มขั้นตอนคำนวณค่าใช้จ่ายในขั้นตอนตรวจสอบสิ่งกีดขวาง ดังแสดงในรูป 4.2 และอัลกอริทึม 2 จากการค้นหาเส้นทาง ได้คำตอบคือ q_{parent} ทั้งหมด

1. เริ่มขั้นตอน RRT สุ่มจุด q_{new} (บรรทัดที่ 2-6)
2. หาจุดทั้งหมดที่อยู่ใกล้กับจุด q_{new} แล้วเก็บจุดทั้งหมด $Q_{\text{near}} = \text{Near}(G, q_{\text{new}}, r)$ (บรรทัดที่ 8-14)

3. หาจุดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุดในเซต Q_{near} และเก็บค่าใช้จ่ายเดิมของแต่ละจุดไว้ใน c (บรรทัดที่ 15)
4. เก็บจุดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด q_{min} และหาเส้นที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด และเก็บค่า (บรรทัดที่ 17-19)

รูปที่ 4.2: การค้นหาเส้นทางโดยวิธี RRT*

Algorithm 2 อัลกอริทึมการสร้างเส้นทางด้วยวิธี RRT*

```

1: procedure RRT( $q_0, q_{\text{goal}}, N, \epsilon, \delta$ )
2:   while  $r \in q_{\text{goal}} + \delta$  or  $n = N$  do
3:      $q_{\text{rand}} \leftarrow q_n + \text{Rand}(\epsilon)$ 
4:      $q_{\text{nearest}} \leftarrow \text{Nearest}(G, q_{\text{rand}})$ 
5:      $q_{\text{new}} \leftarrow \text{Steer}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{rand}})$ 
6:      $V \leftarrow V \cup q_{\text{new}}$ 
7:     if  $\text{ObstacleFree}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}})$  then
8:        $q_{\text{min}} \leftarrow q_{\text{nearest}}$ 
9:        $Q_{\text{near}} \leftarrow \text{Near}(G, q_{\text{new}}, r)$ 
10:      for  $q_{\text{near}} \in Q_{\text{near}}$  do ▷ หาจุดที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด
11:        if  $\text{ObstacleFree}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}})$  then
12:           $c' \leftarrow \text{Cost}(q_{\text{nearest}}, q_{\text{new}}) + c(q_{\text{near}})$ 
13:          if  $c' < c(q_{\text{new}})$  then
14:             $q_{\text{min}} \leftarrow q_{\text{near}}$ 
15:           $E \leftarrow E \cup E(q_{\text{min}}, q_{\text{new}})$ 
16:          for  $q_{\text{near}} \in Q_{\text{near}} \setminus q_{\text{min}}$  do ▷ หาเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด
17:            if  $\text{ObstacleFree}(q_{\text{near}}, q_{\text{new}})$  and  $c(q_{\text{near}}) > c(q_{\text{new}}) +$ 
18:               $\text{Cost}(q_{\text{new}}, q_{\text{near}})$  then
19:                 $q_{\text{parent}} \leftarrow q_{\text{near}}$ 
20:                 $E \leftarrow E \cup E(q_{\text{parent}}, q_{\text{new}})$ 
21:       $q_n \leftarrow q_{\text{new}}, n = n + 1$ 
22:   return  $G = (E, V)$ 

```

4.2 กระบวนการการสร้างเส้นทางด้วยการค้นหาแบบสุ่ม

ผลจากขนาด และความเร็ว

จากที่ได้อธิบายไปเกี่ยวกับ RRT* อัลกอริทึมนี้สมมติว่าขนาดของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่นั้นเป็นจุด แต่ในความเป็นจริงไม่มีหุ่นยนต์ที่เป็นจุด จึงต้องปรับเปลี่ยนผลบางอย่าง เพื่อให้วิธีนี้ยังคงสามารถใช้ได้ เนื่องจากอากาศยานสี่ใบพัดนั้นมีขนาดของ

ความยาวแขน และมีลักษณะเป็นวงกลมโดยมีความยาวของแขนเป็นขนาดของรัศมี ดังนั้น เราย้ายผลจากขนาดของความยาวแขนนี้ไปยังรัศมีของสิ่งกีดขวางที่ถูกตรวจจับได้ ต่อจากการประมาณในบทที่แล้วแสดงให้เห็นว่าขนาดของรัศมีเล็กกว่าความเป็นจริง จึงมีการขยายขนาดของรัศมีค่าหนึ่ง

จากความยาวของแขนของอากาศยานสี่ใบพัด มีขนาด L และมีความเร็วค่าหนึ่ง เมื่อรวมผลจากการทดลองประมาณขนาดของสิ่งกีดขวาง สามารถหารัศมีสำหรับการหลบหลีกได้โดยประมาณ

$$r_{scale} = \alpha r_{est} + \beta L \quad (4.1)$$

โดย r_{est} คือรัศมีที่ได้จากการประมาณด้วยตัวรับรู้เรดาร์ α คือค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการขยายผลเนื่องจากการประมาณที่ผิดพลาด และ β คือค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการขยายผลเนื่องจากความเร็ว สำหรับค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสองนั้นต้องมีค่ามากกว่า 1 และ β มีขนาดมากขึ้นตามความเร็วที่เกิดขึ้นในขณะนั้น แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ สนใจการควบคุมตำแหน่ง ดังนั้นจึงกำหนดให้ $\beta = 1$

ทิศทางการค้นหา

การค้นหาเส้นทางสำหรับ RRT* โดยทั่วไปใช้วิธีการสำรวจพื้นที่ทั้งหมดที่ระบุตำแหน่งสิ่งกีดขวาง โดยในการสำรวจอาจมีบางตำแหน่งที่ถูกค้นหา แต่ในบริเวณดังกล่าวไม่มีจุดเป้าหมายอยู่ ดังนั้นจึงมีการกำหนดทิศทางการค้นหาเส้นทางในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพื่อหาทางหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ด้วยความกว้างของมุมค่าหนึ่ง เพื่อลดเวลาในการค้นหาเส้นทางให้น้อยลง สาเหตุที่สามารถกำหนดมุมในการค้นหาได้เนื่องจากความซับซ้อนของสิ่งกีดขวางที่เป็นทรงกระบอกทำให้ เพียงแค่การหลบหลีกเพียงซ้าย หรือขวาก็เพียงพอในการค้นหาเส้นทางเพียงบางบริเวณ

สำหรับ IWR1443 ยังคงกำหนดการตรวจจับเดิม เพื่อป้องกันกรณีที่ค้นพบสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ทำให้มุมที่ใช้ค้นหาอาจไม่สามารถค้นหาเส้นทางได้

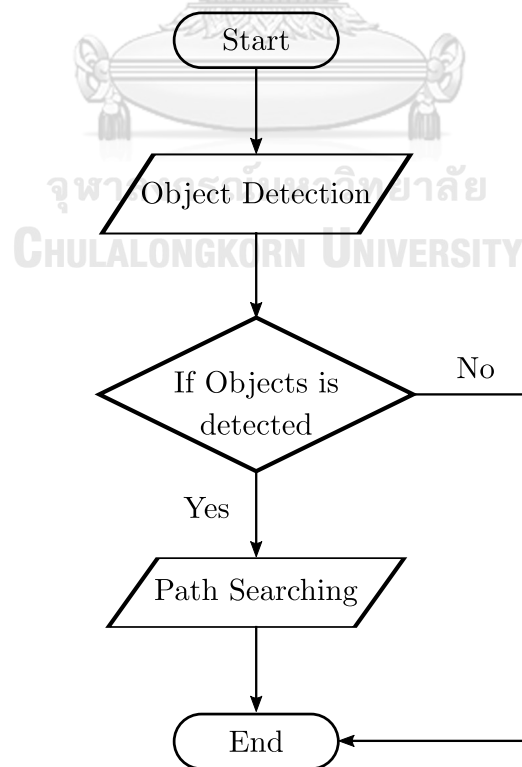
การเริ่มสร้างเส้นทาง

สำหรับการค้นหาเส้นทางนั้น ได้กำหนดจุดเป้าหมาย *Goal* อยู่ในระยะเวลาที่ IWR1443 สามารถตรวจจับถึง ดังนั้นการค้นหาเส้นทางโดยการสุ่มค่าจากฟังก์ชัน

Rand บนพิกัดเชิงขั้วนั้นทำให้เกิดความหนาแน่นของจุดที่ใช้ในการค้นหาอยู่ในบริเวณจุดกำเนิดมากเกินไป จึงอาศัยการแปลงจากฟังก์ชันตัวแปรสุ่มแบบสามเหลี่ยม ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข.1

กระบวนการค้นหาเส้นทาง ประกอบไปด้วยสองส่วนคือ การกำหนดเส้นทางเดิมโดยไม่ทราบตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง และกระบวนการตรวจจับ แล้วค้นหาเส้นทางซ้ำ แสดงในรูปที่ 4.3

การเริ่มต้นค้นหาเริ่มทำเมื่อเงื่อนไขการตรวจจับของ IWR1443 ตรงกับที่ต้องการจึงเริ่มทำการค้นหาเส้นทาง และเริ่มการค้นหาเส้นทางใหม่ถ้ามีการตรวจจับสิ่งกีดขวางใหม่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงด้วยกระบวนการตรวจจับวัตถุ *Object Detection* โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้าตำแหน่งของวัตถุที่ถูกตรวจจับได้อยู่ในระยยะ $z \in (-0.1, 0.3)$ เพื่อเป็นส่วนเผื่อของอากาศยานไร้คนขับ หากจุดที่ถูกตรวจจับได้อยู่นอกเขตนี้ ถือว่า ไม่พบวัตถุ ในส่วนของการค้นหาเส้นทางอาศัย *RRT** ที่ได้อธิบายไว้ในการค้นหาเส้นทาง และจากการทดลองที่แสดงไปในบทที่ 3 พบว่าระยะที่เหมาะสมในการประมาณนั้นต้องอยู่ในระยะ 5 เมตร



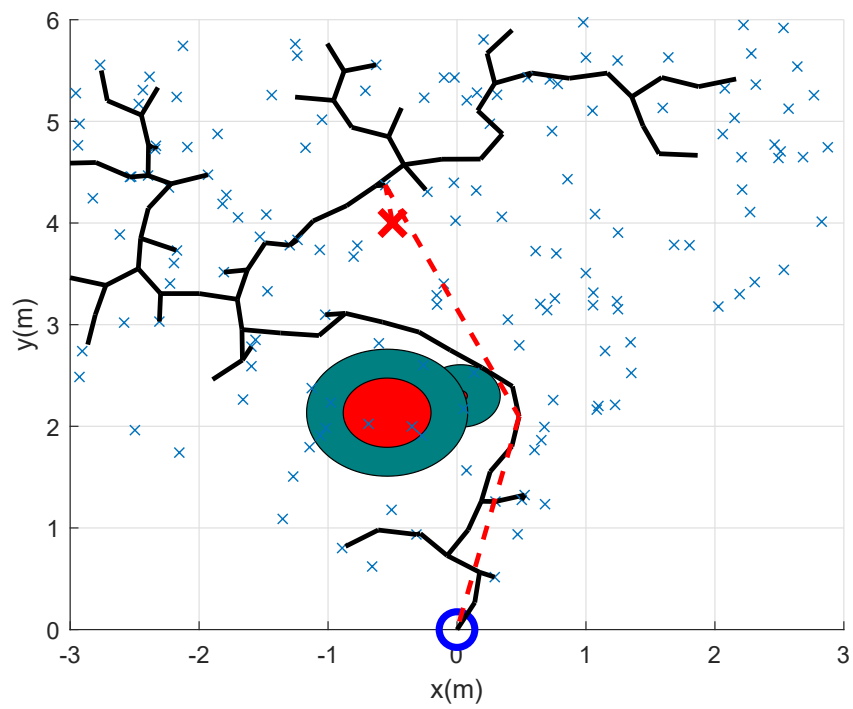
รูปที่ 4.3: แผนภาพแสดงการค้นหาเส้นทางสำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

4.3 ผลจากการสร้างเส้นทาง และการแสดงผลการบินหลบหลีก

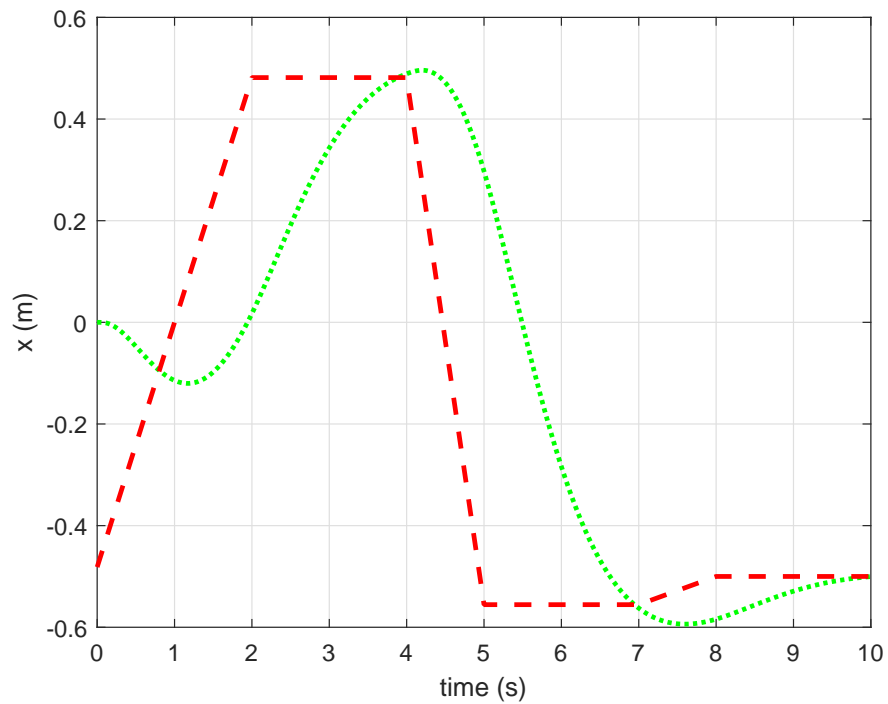
ในการทดลองเริ่มให้จุดเริ่มต้นอยู่ที่จุด $(0, 0, 1)$ ส่วนตำแหน่งของสิ่งกีดขวางนั้น เอาข้อมูลจากรูปที่ 3.12 และ 3.22 ในการทดลองการบินหลบหลีกด้วยอัลกอริทึม RRT* และจุดเป้าหมายอยู่ในบริเวณรัศมี 5 เมตรจากจุดกำเนิด และเลือกให้ขนาดของรัศมีชดเชย $\alpha = 2$

สำหรับผลการทดลองค้นหาเส้นทางด้วยอัลกอริทึม RRT* ได้คำตอบเป็นเส้นทางสีแดงดังแสดงในรูป 4.4 และ 4.8 วงกลมสีแดงแทนขนาดและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางที่ได้จากการประมาณด้วยอัลกอริทึมจากบทที่ 3 วงกลมสีเขียวแทนขนาดและตำแหน่งที่ได้รับการชดเชย เนื่องจากอัลกอริทึม RRT* เลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดจากการทำ RRT ในรอบนั้น ๆ โดยการหาจากจุดที่อยู่บนเส้นดำแล้วคำนวณจุดที่อยู่ใกล้ที่สุดบนเส้นดำต่อ จึงทำให้อาจมีบางคำตอบเดินออกจากเส้นทาง

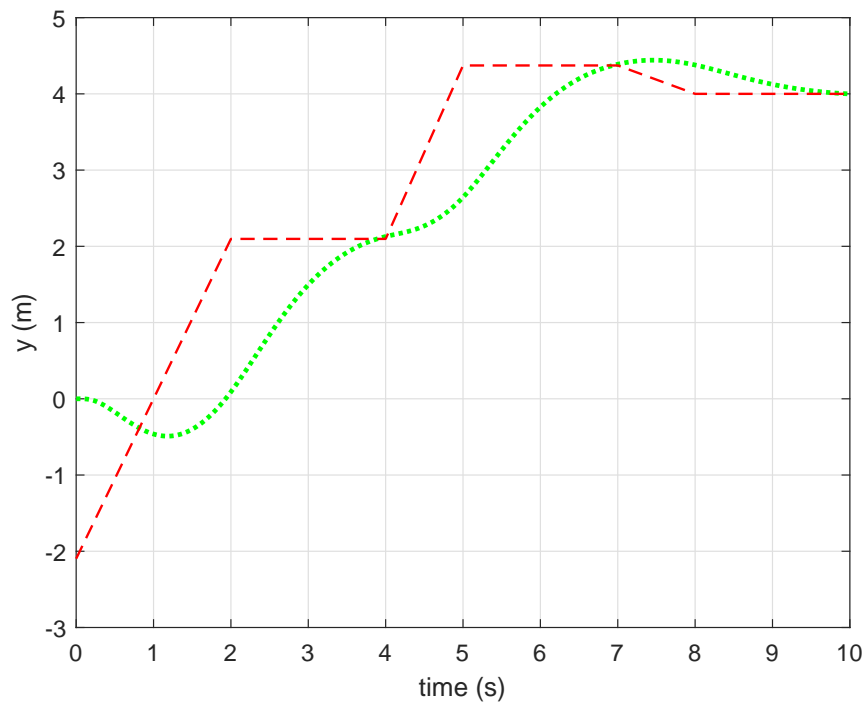
จากการใช้ตัวควบคุมตำแหน่งของอากาศยานสี่ใบพัดที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 ได้ผลการบินตามเส้นทางตามแนวแกน x ดังรูป 4.5 และ 4.9 ตามแนวแกน y ดังรูป 4.6 และ 4.10 และบนระนาบ xy ดังรูป 4.7 และ 4.11 โดยผลที่ออกมาแสดงให้เห็นว่าตัวอากาศยานสี่ใบพัดที่เคลื่อนที่ตามเส้นสีเขียว สามารถหลบสิ่งกีดขวางได้ โดยในบางครั้งยังสามารถบินสัมผัสกับแนวสีเขียวที่มีการเผื่อขนาดไว้แล้ว



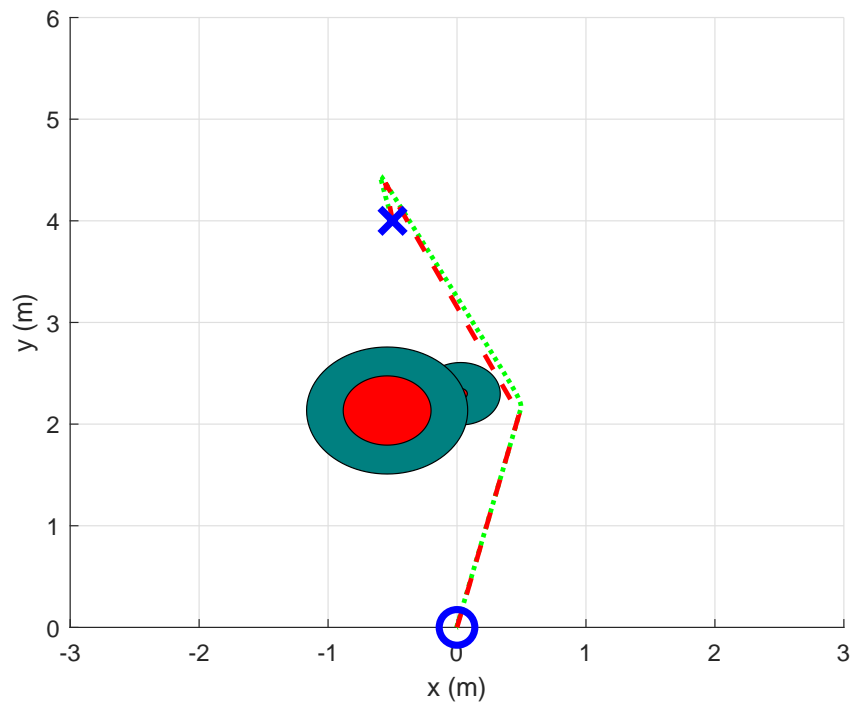
รูปที่ 4.4: ผลการสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยอัลกอริทึม RRT* จากข้อมูลรูปที่ 3.12



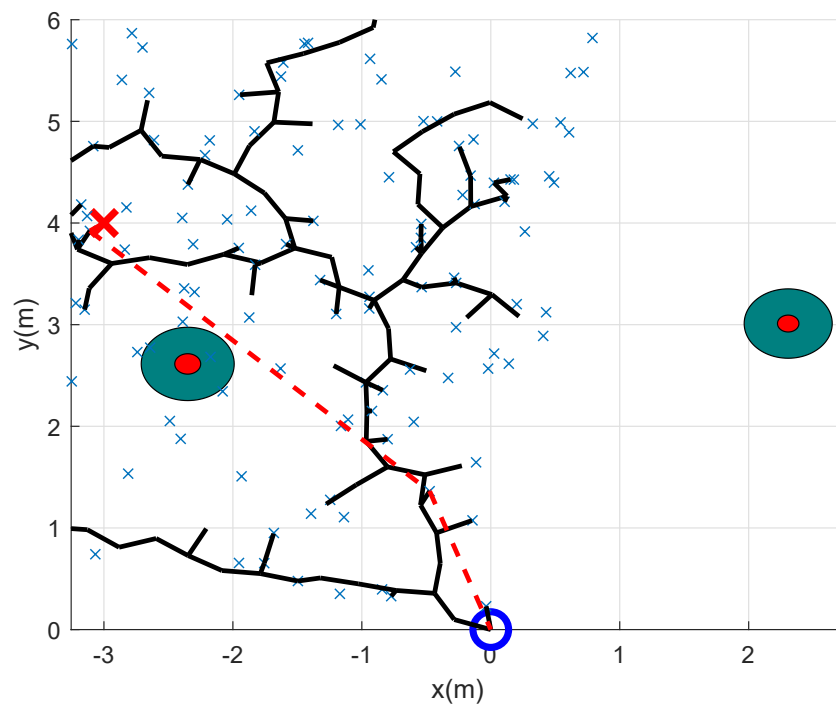
รูปที่ 4.5: ผลการติดตามเส้นทางตามแนวแกน x จากเส้นทางในรูปที่ 4.4



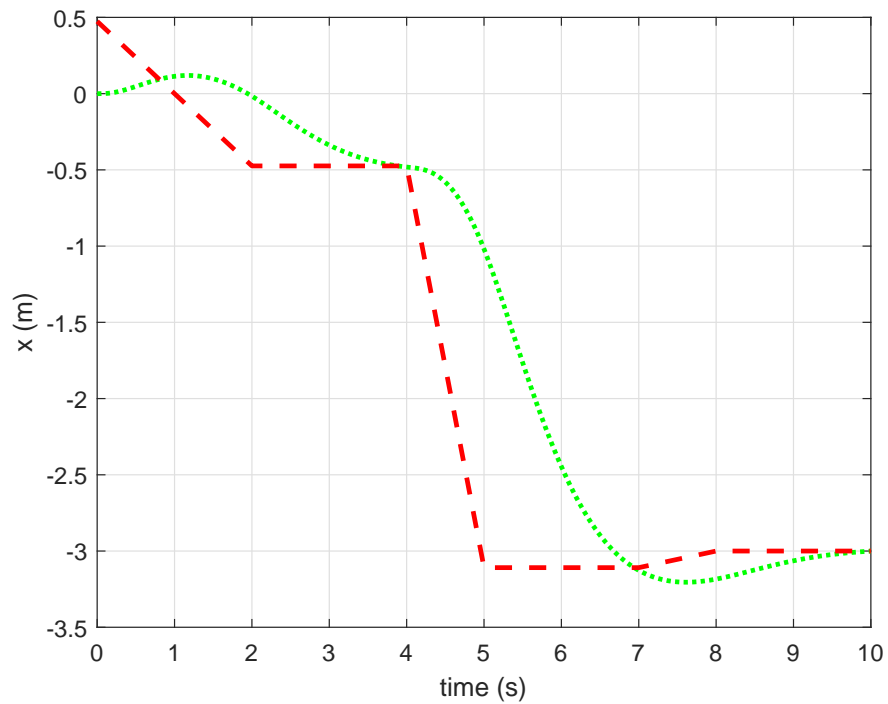
รูปที่ 4.6: ผลการบินตามเส้นทางตามแนวแกน y จากเส้นทางในรูปที่ 4.4



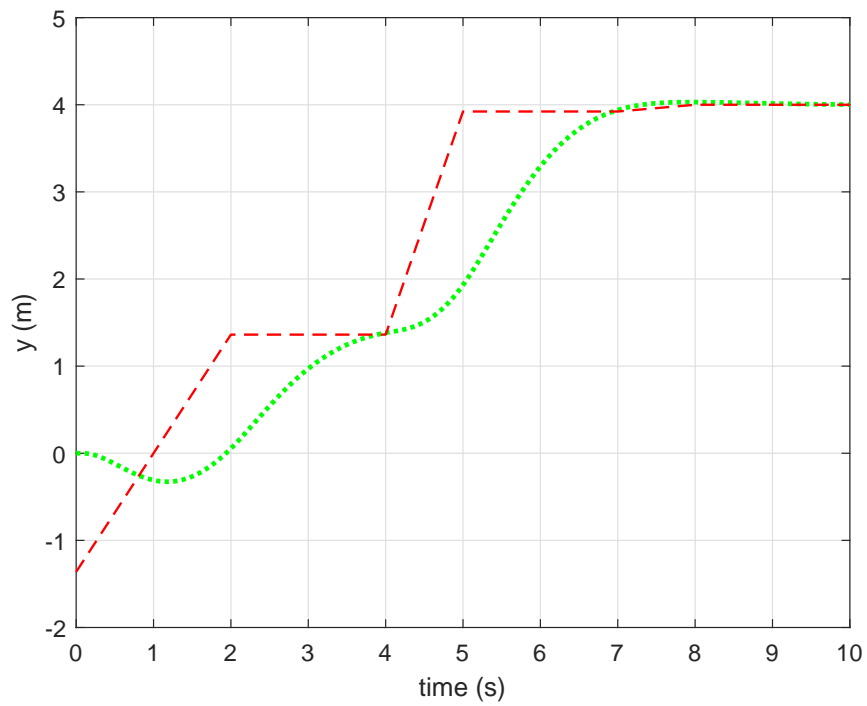
รูปที่ 4.7: ผลการบินตามเส้นทางบนระนาบ xy จากเส้นทางในรูปที่ 4.4



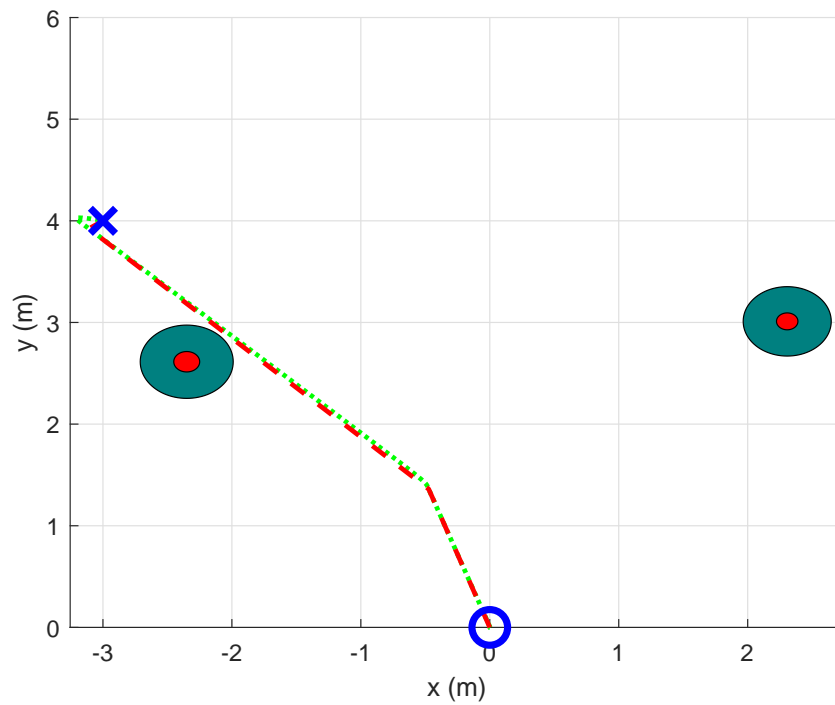
รูปที่ 4.8: ผลการสร้างเส้นทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยอัลกอริทึม RRT* จากข้อมูลรูปที่ 3.22



รูปที่ 4.9: ผลการบีนตามเส้นทางตามแนวแกน x จากเส้นทางในรูปที่ 3.22



รูปที่ 4.10: ผลการบินตามเส้นทางตามแนวแกน y จากเส้นทางในรูปที่ 3.22



รูปที่ 4.11: ผลการบินตามเส้นทางบนระนาบ xy จากเส้นทางในรูปที่ 3.22

บทที่ 5

บทสรุปงานวิจัย

สำหรับการออกแบบวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางมีสิ่งที่จะต้องคำนึงอยู่ 3 ประการ ได้แก่ หุ่นยนต์ ตัวรับรู้ และรูปแบบของสิ่งกีดขวาง สำหรับหุ่นยนต์นั้นจะเลือกใช้แบบไหนขึ้นกับปัญหาที่สนใจ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจหุ่นยนต์ขนาดเล็ก จึงเลือกเป็นอากาศยานสีไบพัด ตัวแทนของก่อนบอกรายละเอียดของหุ่นยนต์นั้น ๆ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุม ตัวอากาศยานสีไบพัด ประกอบไปด้วยไบพัดทั้งสองฝั่ง แทนด้วยสัญญาณขาเข้าสัญญาณ และด้วยอุปกรณ์ตัววัดต่าง ๆ จะใช้แทนการวัดสถานะต่าง ๆ ที่จะใช้ในการหาสัญญาณควบคุมให้แก่ตัวพาหนะ เนื่องจากอากาศยานสีไบพัดจะถูกใช้ในงานที่อาศัยการควบคุมตำแหน่งเป็นสำคัญ จึงจะออกแบบด้วยตัวควบคุมแบบพีดี เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งทำให้ตัวระบบเป็นระบบแบบอันดับที่ 1 ซึ่งมีผลทำให้ตัวควบคุมแบบพีดีนั้นเพียงพอ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดว่า การควบคุมบนระนาบ xy นั้นจะมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวที่น้อยมาก เนื่องจากการควบคุมเฉพาะตำแหน่งของระบบแบบอันดับที่ 1

ตัวรับรู้แบบเรดาร์ คือการใช้สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการรับส่งข้อมูลบนช่วงความถี่วิทยุ ซึ่งสำหรับตัวรับรู้ IWR1443 ทำงานบนช่วงความถี่ 76-81 GHz เพื่อหลีกเลี่ยงการกวนกันของสัญญาณบนช่วงอื่น ๆ ซึ่งผลจากการใช้ IWR1443 ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางนั้นจะได้ลักษณะเป็นจุด และสามารถตรวจจับวัตถุแบบ 3 มิติ ทำให้พอจะประมาณรูปร่างของวัตถุที่ไม่มีความซับซ้อนมากจนเกินไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งไปที่วัตถุรูปร่างทรงกระบอกจำพวกต้นไม้ ขั้นตอนในการประมาณนั้นจะประกอบไปด้วย การแยกข้อมูลจากตัวรับรู้ออกจากกันเป็นวัตถุแต่ละชิ้น และการประมาณขนาดและตำแหน่งของวัตถุ ผลจากการแยกวัตถุด้วยอัลกอริทึมเคมีน สามารถแยกวัตถุได้เป็นอย่างดี สำหรับการประมาณขนาดและตำแหน่งของวัตถุ จะใช้วิธีการมองวัตถุบนระนาบ xy และใช้วิธีกำลังสองต่ำสุด ในการประมาณขนาดด้วยรัศมี และตำแหน่งด้วยจุดศูนย์กลางวงกลม สำหรับรัศมีที่ประมาณจะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น เมื่อระยะในการวัดเพิ่มมากขึ้น และการประมาณตำแหน่งของวัตถุจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในทุก ๆ ระยะการวัด

อัลกอริทึมอาร์อาร์ที คือการค้นหาเส้นทางเคลื่อนที่โดยการสุ่มจุดต่อจุด ซึ่งอัลกอริทึมนี้เหมาะสำหรับกรณีที่ทราบถึงตำแหน่งของสิ่งกีดขวางทั่วทั้งบริเวณที่สนใจ แล้วจึงเลือกเส้นทางที่ต้องการ ในกรณีที่ได้เส้นทางทั้งหมดแล้ว เมื่อทำการคำนวณย้อนจากเป้าหมายมายังเส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด จะได้เส้นทางที่ใกล้ที่สุด ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า **RRT*** ผลลัพธ์จากการใช้อัลกอริทึมนี้จะให้คำตอบเป็นตำแหน่งต่าง ๆ ในการเลือกเส้นทางจากอัลกอริทึม **RRT** แต่เนื่องจากกำหนดให้จุดเป้าหมายที่ต้องการไปถึงมาแล้ว จึงลดขั้นตอนการค้นหาเส้นทางโดยการเลือกการสุ่มเฉพาะบริเวณเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางทรงกระบอกได้

จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือ การออกแบบวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยอาศัยตัวรับรู้เรดาร์สามมิติสำหรับอากาศยานสีใบพัด ซึ่งจะมีขั้นตอนการทำงานคือ รับข้อมูลจากตัวรับรู้เรดาร์เพื่อตีความว่าตรวจจับวัตถุได้จริงหรือไม่ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประมาณขนาดของวัตถุ แล้วจึงใช้อัลกอริทึม **RRT*** ในการค้นหาเส้นทาง แล้วจึงให้ตัวอากาศยานสีใบพัดบินไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้จาก **RRT*** ไปยังเป้าหมายจากการทดลองอากาศยานสีใบพัดสามารถบินหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ ด้วยการอาศัยอัลกอริทึมที่กล่าวมา โดยอัลกอริทึมไม่มีความซับซ้อนมากจนเกินไป และเนื่องด้วยตัวรับรู้เรดาร์มีขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับตัววัดอื่น ๆ จึงทำให้กระบวนการในการตัดสินใจสามารถทำได้เร็วกว่า เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

อ้างอิง

- [1] T. Wang, N. Zheng, J. Xin, and Z. Ma, "Integrating millimeter wave radar with a monocular vision sensor for on-road obstacle detection applications," *Sensors*, vol. 11, no. 9, pp. 8992-9008, 2011.
- [2] C. Arvind and J. Senthilnath, "Autonomous vehicle for obstacle detection and avoidance using reinforcement learning," in *Soft Computing for Problem Solving*. Springer, 2020, pp. 55–66.
- [3] N. Shima, M. Babasaki, Y. Akidzuki, K. F. Honda, T. Higuchi, H. Higashida, and R. Nakamura, "Fusion sensor for driving assistance system," *Fujitsu Ten Technical Journal (17)*, pp. 35-44, 2001.
- [4] T. J. Prescott and J. E. Mayhew, "Obstacle avoidance through reinforcement learning," in *Advances in neural information processing systems*, 1992, pp. 523-530.
- [5] J. Beitelspacher, "Applying reinforcement learning to obstacle avoidance," in *Under review by the International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2005.
- [6] K. B. Ariyur, P. Lommel, and D. F. Enns, "Reactive inflight obstacle avoidance via radar feedback," in *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005*. IEEE, 2005, pp. 2978-2982.
- [7] Y. K. Kwag and C. H. Chung, "Uav based collision avoidance radar sensor," in *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2007, pp. 639-642.
- [8] J. Park and Y. Kim, "Stereo vision based collision avoidance of quadrotor uav," in *2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems*. IEEE, 2012, pp. 173-178.
- [9] Q. Geng, H. Shuai, and Q. Hu, "Obstacle avoidance approaches for quadrotor uav based on backstepping technique," in *2013 25th Chi-*

- nese Control and Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2013, pp. 3613-3617.
- [10] H. Pham, S. A. Smolka, S. D. Stoller, D. Phan, and J. Yang, "A survey on unmanned aerial vehicle collision avoidance systems," *arXiv preprint arXiv:1508.07723*, 2015.
- [11] P. Long, W. Liu, and J. Pan, "Deep-learned collision avoidance policy for distributed multiagent navigation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 656-663, 2017.
- [12] Y. Xiaodong, L. Rui, S. Yingjing, and C. Xiang, "Obstacle avoidance for outdoor flight of a quadrotor based on computer vision," in *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2017, pp. 3841-3846.
- [13] G. Kahn, A. Villaflor, V. Pong, P. Abbeel, and S. Levine, "Uncertainty-aware reinforcement learning for collision avoidance," *arXiv preprint arXiv:1702.01182*, 2017.
- [14] N. Pokhrel, "Drone obstacle avoidance and navigation using artificial intelligence," G2 Pro gradu, diplomity"o, 2018-05-14. [Online]. Available: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201806012988>
- [15] R. W. Beard, "Quadrotor dynamics and control," *Brigham Young University*, vol. 19, no. 3, pp. 46-56, 2008.
- [16] S. Kurak and M. Hodzic, "Control and estimation of a quadcopter dynamical model," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63-75, 2018.
- [17] O. Araar, M. Z. Mimouni, K. Fellah, and H. Osmani, "Identification & control of a multirotor uav in the presence of actuator asymmetry," in *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. IEEE, 2017, pp. 1035-1040.

- [18] T. S. Lourenco, A. M. de Almeida Pinto, and R. V. Lopes, "Model predictive control applied to a quadrotor uav," *Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia*, vol. 2, no. 20, pp. 164-178, 2017.
- [19] P. Ru and K. Subbarao, "Nonlinear model predictive control for unmanned aerial vehicles," *Aerospace*, vol. 4, no. 2, p. 31, 2017.
- [20] R. Rashad, A. Aboudonia, and A. El-Badawy, "Backstepping trajectory tracking control of a quadrotor with disturbance rejection," in *2015 XXV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*. IEEE, 2015, pp. 1-7.
- [21] I. Palunko and R. Fierro, "Adaptive control of a quadrotor with dynamic changes in the center of gravity," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 2626-2631, 2011.
- [22] T. Madani and A. Benallegue, "Backstepping control for a quadrotor helicopter," in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2006, pp. 3255-3260.
- [23] M. Belkheiri, A. Rabhi, A. El Hajjaji, and C. Pegard, "Different linearization control techniques for a quadrotor system," in *CCCA12*. IEEE, 2012, pp. 1-6.
- [24] V. K. Tripathi, L. Behera, and N. Verma, "Design of sliding mode and backstepping controllers for a quadcopter," in *2015 39th National Systems Conference (NSC)*. IEEE, 2015, pp. 1-6.
- [25] F. Sabatino, "Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation," 2015.
- [26] D. W. Mellinger, "Trajectory generation and control for quadrotors," 2012.
- [27] A. Zulu and S. John, "A review of control algorithms for autonomous quadrotors," *arXiv preprint arXiv:1602.02622*, 2016.

- [28] P. M. Domingos, "A few useful things to know about machine learning." *Commun. acm*, vol. 55, no. 10, pp. 78-87, 2012.
- [29] M. Bastan, S. S. Bukhari, and T. Breuel, "Active canny: edge detection and recovery with open active contour models," *IET Image Processing*, vol. 11, no. 12, pp. 1325-1332, 2017.
- [30] P. S. Deokar, "Implementation of canny edge detector algorithm using fpga," *IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 2, no. 6, 2015.
- [31] O. Strömngren, 'Deep Learning for Autonomous Collision Avoidance', Dissertation, Linköping University, 2018.
- [32] M. Ruegg, E. Meier, D. Nuesch, and M. Hagelen, "High resolution millimeter wave sar for moving target indication," in *6th Eu-ropean Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR2006)*, 2006.
- [33] B. J. Guerreiro, C. Silvestre, R. Cunha, and D. Cabecinhas, "Lidar-based control of autonomous rotorcraft for the inspection of pierlike structures," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 1430-1438, 2017.
- [34] J. Choi, V. Va, N. Gonzalez-Prelcic, R. Daniels, C. R. Bhat, and R. W. Heath, "Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 160-167, 2016.
- [35] S. Sugimoto, H. Tateda, H. Takahashi, and M. Okutomi, "Obstacle detection using millimeter-wave radar and its visualization on image sequence," in *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, 2004. ICPR 2004., vol. 3. IEEE, 2004, pp. 342-345.
- [36] F. Zhang, "Obstacle detection using monocular camera for low flying unmanned aerial vehicle," Ph.D. dissertation, Carleton University, 2015.

- [37] A. Kamath, "Obstacle distance estimation for uav collision avoidance using two-view geometry with a sheye camera," Ph.D. dissertation, University of Kansas, 2018.
- [38] S. H. Cen and P. Newman, "Precise ego-motion estimation with millimeterwave radar under diverse and challenging conditions," in *2018 IEEE Inter-national Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2018, pp. 1-8.
- [39] D. Valencia and D. Kim, "Quadrotor obstacle detection and avoidance system using a monocular camera," in *c Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*. IEEE, 2018, pp. 78-81.
- [40] A. Ferrick, J. Fish, E. Venator, and G. S. Lee, "Uav obstacle avoidance using image processing techniques," in *2012 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*. IEEE, 2012, pp. 73-78.
- [41] T. Wang, N. Zheng, J. Xin, and Z. Ma, "Integrating millimeter wave radar with a monocular vision sensor for on-road obstacle detection applications," *Sensors*, vol. 11, no. 9, pp. 8992-9008, 2011.
- [42] D. Comaniciu and P. Meer, "Mean shift: A robust approach toward feature space analysis," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, no. 5, pp. 603-619, 2002.
- [43] D. T. Pham, S. S. Dimov, and C. D. Nguyen, "Selection of k in k-means clustering," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 219, no. 1, pp. 103-119, 2005.
- [44] C. A. Sugar and G. M. James, "Finding the number of clusters in a dataset: An information-theoretic approach," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 98, no. 463, pp. 750-763, 2003.

- [45] S. M. LaValle, “Rapidly-exploring random trees: A new tool for path plan-ning,” Technical Report. Computer Science Department, Iowa State University, 1998.
- [46] S. M. LaValle and J. J. Kuffner Jr, “Randomized kinodynamic plan-ning,”*The international journal of robotics research*, vol. 20, no. 5, pp. 378–400,2001.
- [47] S. Karaman and E. Frazzoli, “Incremental sampling-based algorithms foroptimal motion planning,”*arXiv preprint arXiv:1005.0416*, 2010.





ภาคผนวก ก

รายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณเรดาร์

ก.1 ความละเอียดในการประมาณมุม

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่ตรวจจับได้แล้วนำมาคำนวณมุมได้ θ สัญญาณที่เข้ามาตกกระทบกับตัวรับสัญญาณกับ R_{x2} มีความต่างเฟส $\Delta\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}d \sin\theta$ ในขณะที่เดียวกันสัญญาณที่มาตกกระทบกับตัวรับ R_{x3} มีความต่างเฟส $\Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}d \sin(\theta + \Delta\theta)$ เมื่อหาความต่างเฟสใหม่ ดังสมการ ก.1

$$\Delta\phi_{1-2} = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{2\pi d}{\lambda}(\sin(\theta - \Delta\theta) - \sin(\theta)) \quad (ก.1)$$

โดยการประมาณให้ $\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta \approx \cos(\theta)(\Delta\theta)$ จะได้

$$\Delta\phi_{1-2} = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\theta)(\Delta\theta) \quad (ก.2)$$

สมมติให้ $\Delta\phi_{1-2}$ สามารถแยกความต่างเฟสออกจากกันได้ด้วยการอาศัยการแยกค่าสูงสุดด้วยวิธี FFT จากจุด N จุด (จุด N เกิดจากการรับข้อมูลบนช่วงเวลาหนึ่งของ FMCW ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเสาอากาศจึงเป็นการเพิ่มจำนวนจุดไปในตัว) โดยค่าสูงสุดที่สามารถจับได้จะมีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{N}$ ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนได้ดังสมการ ก.5

$$\Delta\phi_{1-N} > \frac{2\pi}{N} \quad (ก.3)$$

$$\frac{2\pi d}{\lambda}(\cos(\theta)\Delta\theta) > \frac{2\pi}{N} \quad (ก.4)$$

$$\Delta\theta > \frac{\lambda}{Nd\cos(\theta)} \quad (ก.5)$$

ให้ θ_{res} แทนค่าความละเอียดของมุมที่วัดได้ เนื่องจากกำหนดให้ระยะห่างระหว่างเสาอากาศ $d = \frac{\lambda}{2}$ และสำหรับวัดมุมที่ $\theta = 0$ จะได้

$$\theta_{res} = \frac{2}{N} \quad (ก.6)$$

ก.2 ความละเอียดในการประมาณระยะทาง

เมื่อพิจารณาวัตถุที่อยู่ในระยะใกล้กัน จะทำให้วัดความถี่ได้ 2 ค่า คือ S_{τ_1} และ S_{τ_2} โดยทั้งสองความถี่นี้จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ๆ ดังนั้นจะทำให้ $\Delta f = S_{\tau_1} - S_{\tau_2}$

กำหนดให้ τ_c คือ ช่วงเวลาที่สามารถตรวจจับได้ ดังนั้น

$$\Delta f > \frac{1}{\tau_c} \quad (\text{ก.7})$$

พิจารณาการคำนวณ

$$\Delta f = \frac{2S\Delta d}{c} \quad (\text{ก.8})$$

$$\Delta d = \frac{c\Delta f}{2S} > \frac{c}{2S\tau_c} \quad (\text{ก.9})$$

ให้ d_{res} แทนค่าความละเอียดของระยะที่วัดได้ จะได้สมการแสดงค่าความละเอียด (ก. 10) แสดงให้เห็นว่าความละเอียดในการวัดระยะจะขึ้นกับแบนด์วิธของ FMCW

$$d_{res} > \frac{c}{2S\tau_c} \quad (\text{ก.10})$$

ภาคผนวก ข

การแปลงการสุ่มรัศมีเพื่อค้นหาเส้นทาง

ข.1 การแปลงการสุ่มค่ารัศมี

กำหนดให้ $\Theta \sim \mathcal{U}(-\pi, \pi)$ และ $R \sim \mathcal{U}(0, R_{\max})$ จะทำให้ผลของการสุ่มจะอยู่ใกล้กับจุดกำเนิดมากเกินไป จึงต้องเลือกฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $(f_R(r))$ เป็นแบบอื่น

ให้ S มีการกระจายตัวแบบเอกรูป $S \sim \mathcal{U}(0, R_{\max}^2)$ และแปลงรูป $S = R^2$ จะได้ว่า

$$F_R(r) = P(R < r) \tag{ข.1}$$

$$= P(\sqrt{S} < r) \tag{ข.2}$$

$$= P(S < r^2) \tag{ข.3}$$

$$= F_S(r^2) \tag{ข.4}$$

$$f_R(r) = \frac{dF_S(r^2)}{dr} \tag{ข.5}$$

$$= \frac{2r}{R_{\max}^2} \tag{ข.6}$$

จากสมการ ข.6 เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นการกระจายตัวแบบสามเหลี่ยม หรือ $R \sim \mathcal{T}(0, R_{\max}, R_{\max})$ นั่นคือจะสามารถสร้างการกระจายตัวบนสมการเชิงเส้น โดยผ่านตัวแปรสุ่มแบบเอกรูป

ดังนั้นจะได้การกระจายตัวแบบเอกรูปบนพิกัดเชิงขั้วโดย $\Theta \sim \mathcal{U}(-\pi, \pi)$ และ $R^2 \sim \mathcal{U}(0, R_{\max}^2)$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ณัฐพล เตชะพันธ์งาม เกิดเมื่อวันที่ 4 มีนาคม 2539 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนแรกของ นายประเวศน์ เตชะพันธ์งาม และ นางสาวสมศรี เมธีพิทักษ์ธรรม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2561 ด้วยโครงการ เรื่องการออกแบบตัวควบคุมสำหรับอากาศยานไร้คนขับหลายใบพัด เพื่อปฏิบัติตาม สัญญาณจีพีเอส ในสังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ใน ระดับปริญญาโทบัณฑิต ในที่ปรึกษาของ ผศ.ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ สังกัด ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

