

การเพิ่มความสามารถในการติดตามบุคคลของระบบกล้องวงจรปิดด้วยระบบกล้องเคลื่อนที่ได้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Increase of Pedestrian Tracking Performance in the Stationary Close-Circuit Camera  
System Using Mobile Camera System



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Defense Engineering and Technology

Common Course

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความสามารถในการติดตามบุคคลของระบบกล้อง วงจรปิดด้วยระบบกล้องเคลื่อนที่ได้
โดย	นายณัฏชน สันตยากร
สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สุรรัฐ ขวัญเมือง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	พันเอก ดร.อาคิส บุญยะประภัศร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.สุรรัฐ ขวัญเมือง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(พันเอก ดร.อาคิส บุญยะประภัศร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.พสุ บุญวิสุทธิ)

ณัชพน สันตยากร : การเพิ่มความสามารถในการติดตามบุคคลของระบบกล้องวงจรปิด  
ด้วยระบบกล้องเคลื่อนที่ได้. ( Increase of Pedestrian Tracking Performance in  
the Stationary Close-Circuit Camera System Using Mobile Camera System)  
อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : พ.อ. ดร.อาศิส บุญยะ  
ประภัสร์

ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการติดตามในระบบกล้องวงจร  
ปิดโดยการพัฒนาาระบบเพื่อติดตามเป้าหมายเมื่อเดินผ่านขอบเขตการมองเห็น (FOV) ของกล้อง  
วงจรปิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ไปแล้ว และรวมเข้ากับข้อมูลการติดตาม จากนั้นจะทำการคำนวณตำแหน่ง  
และตรวจจับเป้าหมาย ถ้าความคลุมเครือของเป้าหมายมากเกินไปที่กำหนดไว้ ระบบจะสั่งให้  
กล้องเคลื่อนที่ได้ไปยังพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดเพื่อหาเป้าหมายนั้นอีกครั้ง งานวิจัยนี้เสนอ  
ระบบติดตามโดยใช้ Monte Carlo Localization (MCL) เป็นหลักในการติดตาม ในการ  
ทดสอบได้จัดทำโปรแกรมเพื่อตรวจจับ และติดตามวัตถุโดยใช้ระบบของกล้อง ผลถูกทดลองใน  
การจำลองที่ใช้ 5000 อนุภาคเพื่อติดตามเป้าหมายในพื้นที่ เมื่อการกระจายของอนุภาคมากกว่า  
ค่าที่กำหนดไว้ ระบบจะส่งกล้องที่สามารถเคลื่อนที่ได้ไปยังตำแหน่งค่าเฉลี่ยของกลุ่มการกระจาย  
ของอนุภาค ผลเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่ากล้องเคลื่อนที่ได้สามารถไปยังพื้นที่ที่เหมาะสมที่จะติด  
เป้าหมาย



สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการ	ลายมือชื่อนิสิต .....
	ป้องกันประเทศ	
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5970155321 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORD: TRACKING SYSTEM, MONTE CARLO LOCALIZATION, MOBILE CAMERA,  
CLOSE-CIRCUIT CAMERA

Natchapon Santayakorn : Increase of Pedestrian Tracking Performance in  
the Stationary Close-Circuit Camera System Using Mobile Camera System.

Advisor: Prof. Surat Kwanmuang, Ph.D. Co-advisor: Col. Arsit  
Boonyaprapasorn, Ph.D.

This research aims to increase the performance of the tracking algorithm in the closed-circuit camera system. The system is developed to track a target that walks passes into the field of view (FOV) of multiple stationary cameras and fuse the tracking information, calculate the position and direction of the target. If the uncertainty of target position reaches a threshold, the system instructs a mobile camera to go to the most probable area for acquiring target again. This work proposes a tracking system which is a deviation of Monte Carlo Localization (MCL) as a tracking framework. In the experiment, the program was implemented to detect and track a subject using a system of cameras and test via simulation using 5000 particles to track a target in the simulated area. When the particle distribution is above a threshold, the system will send the mobile camera to the mean of the particle dispersal group. The preliminary results show that a mobile camera can go to the appropriate position for tracking the target.

Field of Study: Defense Engineering and Technology      Student's Signature .....

Academic Year: 2018      Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ของอาจารย์ ดร. สุรัฐ ขวัญเมือง และพันเอก ดร. อาศิส บุญยะประภัสร์ ที่คอยใส่ใจ และให้คำปรึกษา แนะนำแนวคิด ตลอดจนการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในงานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณ บิดา มารดา เพื่อน และรุ่นพี่ ที่คอยให้กำลังใจในการทำงาน รวมถึงการให้คำแนะนำ และสนับสนุนในรูปแบบต่างๆ ทั้งวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ และสถานที่ที่ใช้ทำการทดสอบ โดยเฉพาะนายธนพล ใจเอื้อที่เป็นผู้ช่วยในการทดสอบระบบในงานวิจัยนี้จนได้ผลสำเร็จ และเจ้าหน้าที่หลังสูตรวิศวกรรมและเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่คอยดำเนินเรื่อง และแนะนำเกี่ยวกับเอกสารสำคัญต่างๆ ที่จำเป็นตลอดช่วงดำเนินงานวิจัยนี้

ณัชพน สันตยากร



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย .....	1
1.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 กล้องวงจรปิด .....	2
1.2.2 กล้องเคลื่อนที่ได้.....	2
1.2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV).....	3
1.2.1.2 Unmanned Ground Vehicle (UGV).....	4
1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ปรัชศน์วรรณกรรม .....	5
2.1 ระบบตรวจตราโดยการใช้กล้อง .....	5
2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV).....	5
2.1.2 ยานภาคพื้นไร้คน (Unmanned Ground Vehicle; UGV).....	6
2.2 การทำงานร่วมกันระหว่างยานพาหนะไร้คนขับ (Unmanned Vehicle; UV).....	7

2.2.1 การทำงานร่วมกันระหว่าง UAV และ UGV .....	7
2.3 การติดตามเป้าหมาย.....	9
2.3.1 การติดตามแบบแอคทีฟ (Active Tracking Method).....	9
2.3.1.1 ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System; GPS) .....	9
2.3.1.2 หน่วยการวัดเฉื่อย (Inertial Measurement Unit; IMU).....	10
2.3.2 การติดตามแบบพาสซีฟ (Passive Tracking Method).....	10
2.3.2.1 เซ็นเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Sensor; EM Sensor).....	10
2.3.2.2 เซ็นเซอร์อินฟราเรด (Infrared Sensor; IR Sensor) .....	11
2.3.2.3 เรดาร์ (Radar).....	11
2.3.2.4 กล้องวงจรปิด (Close-Circuit Camera; CCTV) .....	11
2.4 การสอบเทียบกล้อง .....	12
2.4.1. การแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพ (Undistortion).....	14
2.4.2. การหาขอบเขตการมองเห็นของกล้อง.....	15
2.4.3 ตำแหน่งบนระนาบจริงเทียบกับตำแหน่งบนระนาบภาพ .....	15
2.5 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น.....	17
2.5.1 Bayes' Rule .....	17
2.5.2 Grid Localization .....	18
2.5.3 Kalman Filter.....	19
2.5.4 Monte Carlo Localization (Particle Filter) .....	20
2.5.5 ค่าตัววัด (Measurement).....	23
2.6 ทฤษฎีความน่าจะเป็น .....	24
2.7 ลักษณะนิสัยของบุคคล .....	25
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	28
3.1 การทำงานของระบบ.....	28



3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดย Monte Carlo Localization สำหรับงานวิจัยนี้ .....	29
3.2.1 สมการการเคลื่อนที่ .....	31
3.2.2 ระยะแบบยุคลิด (Euclidean Distance) .....	31
3.2.3 ค่าความผิดพลาดตามระยะทาง (Total Distance Error).....	32
3.2.4 การกำหนดขอบเขตให้กล้องวงจรปิด .....	32
3.2.5 หาน้ำหนักของแต่ละอนุภาค .....	33
3.2.6 การหาความกว้างของการกระจายตัวของอนุภาค .....	33
3.3 แผนการวิจัย .....	34
3.4 การสร้างระบบจำลองการทำงาน (Simulation) .....	34
3.5 การจำลองการทำงานของระบบ .....	35
3.5.1 กำหนดโมเดลเริ่มต้น .....	35
3.5.2 การแสดงผลของการจำลอง .....	35
3.6 การทดสอบ .....	36
3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ .....	36
3.8 สรุปตัวแปรเริ่มต้น และเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ .....	40
บทที่ 4 ผลการทดสอบ .....	41
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ .....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	52
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	52
บรรณานุกรม .....	54
ประวัติผู้เขียน .....	58

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าตัวอย่างความสูงเฉลี่ยของมนุษย์ในทวีปเอเชีย .....	16
ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองอัตราเร็วในการหมุนเข้าหาเป้าหมาย .....	27
ตารางที่ 3.1 พิกัดในการติดตั้งกล้องวงจรปิดในหน่วยเมตร .....	38
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรภายใน (Intrinsic parameter) ของกล้องแต่ละตัวในงานวิจัยนี้ .....	40
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ย .....	48



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 กล้องวงจรปิดที่เห็นได้ทั่วไปในระบบรักษาความปลอดภัย .....	2
รูปที่ 1.2 UAV .....	3
รูปที่ 1.3 UGV .....	4
รูปที่ 2.1 UAV .....	6
รูปที่ 2.2 UGV .....	6
รูปที่ 2.3 ขอบข่ายงานการทำงานร่วมกันเพื่อการค้นหา และระบุตำแหน่งด้วยการใช้ UAV และทีม UGV ....	8
รูปที่ 2.4 ผลการตรวจจับกลุ่มคนด้วยกล้องจาก UAV และ UGV .....	8
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจับความร้อน .....	12
รูปที่ 2.6 ภาพที่ได้จากกล้องธรรมดา .....	12
รูปที่ 2.7 การบิดเบี้ยวของเลนส์ .....	13
รูปที่ 2.8 กระดานสอบเทียบ .....	14
รูปที่ 2.9 Pinhole Model .....	15
รูปที่ 2.10 Grid Localization .....	18
รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่างแสดงการทำงานของ Kalman Filter .....	19
รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างขั้นต่อแรกของ Particle Filter .....	20
รูปที่ 2.13 แสดงขั้นตอนการใส่น้ำหนักให้กับอนุภาค .....	20
รูปที่ 2.14 ภาพอธิบายขั้นตอนการ Resampling .....	21
รูปที่ 2.15 การทำงานของ Particle Filter .....	22
รูปที่ 2.16 การทำงานของ Particle Filter ในระนาบสองมิติ .....	23
รูปที่ 2.17 sensor สำหรับรถขับเคลื่อนด้วยตัวเอง .....	24
รูปที่ 3.1 กระบวนการวิเคราะห์ภาพสำหรับการติดตาม .....	28

รูปที่ 3.2 รูปแสดงจำนวนอนุภาคเทียบกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ และค่าความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ย .....	29
รูปที่ 3.3 Flow Chart แสดงการทำงานของ MCL .....	30
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเคลื่อนแบบ Euclidean .....	32
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างผลที่ได้จากการจำลอง .....	35
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ .....	37
รูปที่ 3.7 พื้นที่ทดสอบ .....	38
รูปที่ 3.8 มุมมองด้านบนของพื้นที่ทดสอบ และสัญลักษณ์ในรูป .....	39
รูปที่ 4.1 การแสดงผลของการทดสอบ .....	42
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 1 .....	43
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 2 .....	45
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 3 .....	47
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 4 .....	48
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 5 .....	50
รูปที่ 4.7 ตัวอย่างภาพที่กล้องเคลื่อนที่ครอบคลุมเป้าหมายได้ .....	51

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

ในสังคมปัจจุบันมนุษย์ต้องการความมั่นใจในความปลอดภัยสำหรับการใช้ชีวิตมากขึ้น เนื่องจากปัญหาอาชญากรรมในปัจจุบันที่มาได้หลากหลายรูปแบบ ประชาชนกำลังเผชิญ หรือเกี่ยวข้องกับเหตุที่อาจก่อให้เกิดอันตราย ความสูญเสีย ความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ถึงแม้ว่าเจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบจะปฏิบัติอย่างเต็มที่แล้วก็ตาม ซึ่งปฏิเสธไม่ได้ว่าจำนวนอาชญากรรมยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และการที่จะหาตัวผู้กระทำผิดที่ออกมาก่อเหตุอื่นๆ กระทำได้ยาก ใช้เวลานาน ดังนั้นในการติดตามหาผู้กระทำผิดเพื่อมาดำเนินคดี รวมถึงการตรวจตราเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นจึงควรมีเทคโนโลยีที่เหมาะสมเข้ามาช่วยลดความยาก และเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติหน้าที่ดังกล่าวให้กับเจ้าหน้าที่ รวมทั้งเพิ่มความมั่นใจในความปลอดภัยให้กับประชาชน

กล้องวงจรปิด และยานไร้คนขับ (Unmanned Vehicle) ชนิดต่างๆ เช่น Unmanned Aerial Vehicle (UAV) และ Unmanned Ground Vehicle (UGV) เป็นต้น ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจตรา และสอดส่องดูแลความเรียบร้อยในพื้นที่ต่างๆ แต่อุปกรณ์เหล่านี้ก็ล้วนแล้วแต่มีข้อจำกัด เช่น กล้องวงจรปิดเป็นระบบที่มีความนิยมในการติดตั้งมากที่สุดในระบบรักษาความปลอดภัย เนื่องจากมีราคาที่ไม่สูงมากนัก และการติดตั้งทำได้ง่าย แต่ข้อเสียของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือ การที่ตัวกล้องมีมุมมองการมองเห็นค่อนข้างจำกัด และไม่สามารถเคลื่อนที่เพื่อติดตามเป้าหมายได้ ส่วน UAV มีพิสัยการทำงานไกล, เคลื่อนที่ได้รวดเร็ว และสามารถติดตามเป้าหมายได้ แต่ภาพที่ได้มาเป็นมุมมองที่ค่อนข้างกว้าง ทำให้ความแม่นยำในการตรวจสอบเป้าหมายจึงมีน้อย ส่วน UGV สามารถระบุเป้าหมายได้แม่นยำ และสามารถติดตามเป้าหมายได้ แต่การเคลื่อนที่ช้า และพิสัยการทำงานไม่ไกลมากนัก [1-4]

จากข้อดี และข้อเสียของอุปกรณ์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีในหลากหลายรูปแบบมาปฏิบัติงานร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความแม่นยำในการสอดส่องดูแลความเรียบร้อยในระบบรักษาความปลอดภัย เช่นการใช้ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ทำงานร่วมกับ Unmanned Ground Vehicle (UGV) หรือการใช้ กล้องวงจรปิดทำงานร่วมกับกล้องเคลื่อนที่ได้ชนิดต่างๆ เป็นต้น [1-4]

การสืบสวนหาผู้กระทำผิดเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นการที่สามารถติดตามไปยังบริเวณที่ผู้กระทำผิดเดินทางไปได้นั้นจะทำให้สามารถคาดเดาถึงเส้นทางการหลบหนีได้แม่นยำมากขึ้น แต่ถ้าหากขณะที่กำลังติดตามเป้าหมายที่สนใจด้วยกล้องวงจรปิดตามข้างทาง แต่บุคคลนั้นได้เคลื่อนที่ออกจาก

ขอบเขตการมองเห็นที่กล้องวงจรปิดสามารถถ่ายได้ออกไป จะส่งผลให้ผู้เฝ้าระวังหรือเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยไม่สามารถติดตามเป้าหมายนั้นต่อไปได้ ดังนั้นการที่สามารถทำนายบริเวณต่อไปที่เป้าหมายอยู่ได้ หลังจากเป้าหมายเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิดไปแล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการติดตามบุคคลเหล่านั้นได้อย่างมาก

เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจที่จะนำวิธี Monte Carlo Localization (MCL) หรือ Particle Filter มาใช้งานในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นจากข้อมูลที่ได้รับจากกล้องที่ติดตั้งอยู่กับที่ เพื่อบอกถึงบริเวณที่เป้าหมายอยู่ จากนั้นจึงส่งให้กล้องที่สามารถเคลื่อนที่ได้ไปบริเวณนั้น เพื่อให้สามารถติดตามเป้าหมายได้อีกครั้ง

## 1.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 กล้องวงจรปิด

กล้องวงจรปิดเป็นอุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้ในการเฝ้าระวัง ที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในระบบการรักษาความปลอดภัยในปัจจุบัน สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทตามประสิทธิภาพของกล้อง คือ กล้องวงจรปิดธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไปเนื่องจากราคาไม่สูงมากนัก แต่ก็แลกมากับข้อเสียที่ไม่สามารถถ่ายภาพได้อย่างชัดเจนในพื้นที่ที่มีแสงสว่างไม่เพียงพอ อีกประเภทหนึ่ง คือ กล้องที่สามารถตรวจจับความร้อนได้ (Thermal Camera) กล้องชนิดนี้สามารถทำให้มองเห็นวัตถุที่มีความร้อนได้ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในการใช้งานในที่มืด เป็นกล้องประสิทธิภาพสูงที่นิยมใช้กันในการทหาร แต่แลกมากับราคาที่สูง



รูปที่ 1.1 กล้องวงจรปิดที่เห็นได้ทั่วไปในระบบรักษาความปลอดภัย [5]

### 1.2.2 กล้องเคลื่อนที่ได้

กล้องที่สามารถเคลื่อนที่ได้นี้หมายถึงอุปกรณ์ชนิดใดก็ได้ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ไปพร้อมกับตัวกล้องที่ทำการถ่ายภาพอยู่ อาจเป็นกล้องพกพาขนาดเล็ก เช่น กล้อง GoPro ที่ถูกติดตั้งเข้ากับหมวก

หรือเครื่องแต่งการอื่นๆ ของเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย เป็นต้น เมื่อเจ้าหน้าที่เดินตรวจตรากล้องตัวนี้ก็จะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปด้วย หรืออาจจะเป็นกล้องที่ติดตั้งไว้กับยานพาหนะเคลื่อนที่อัตโนมัติ (Unmanned vehicle) สิ่งนี้ คือ ยานพาหนะที่ไม่มีคนขับอยู่ภายใน อาจเป็นได้ทั้งการใช้รีโมทคอนโทรลในการควบคุม หรือสามารถเป็นการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติที่ยานพาหนะสามารถรับรู้สภาพแวดล้อม และนำทางด้วยตัวเอง Unmanned vehicle มีความเหมาะสมที่จะทำงานแทนมนุษย์ในพื้นที่อันตราย สกปรก หรือพื้นที่ที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปได้ ในปัจจุบันมี Unmanned vehicle มีหลากหลายชนิดเช่น Unmanned Aerial Vehicle (UAV) และ Unmanned Ground Vehicle (UGV) เป็นต้น

#### 1.2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)

UAV หรือที่คนส่วนใหญ่รู้จักกันในชื่อ “โดรน” หรืออากาศยานไร้คนขับ เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการอยู่บนเครื่องซึ่งควบคุมได้จากระยะไกล มีรูปร่าง, ขนาด, รูปแบบ และเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไปตามการใช้งานในภารกิจที่ต่างกัน สามารถแบ่งรูปแบบการทำงานได้เป็นสองลักษณะ คือ การควบคุมด้วยระบบควบคุมจากระยะไกล และการทำงานแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเองโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบที่ซับซ้อนกับเซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งไว้ในตัวอากาศยาน

ปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับมักถูกใช้เพื่อปฏิบัติในภารกิจที่ยาก และอันตรายเกินกว่าที่จะใช้เครื่องบินที่มีคนขับในการปฏิบัติหน้าที่ ในการทหารมักใช้สิ่งนี้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สอดแนม และภารกิจโจมตี สำหรับบุคคลทั่วไปการใช้งานอากาศยานไร้คนขับยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักแต่ก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อุปกรณ์นี้มักถูกใช้เพื่อปฏิบัติในภารกิจที่ยาก และอันตรายเกินกว่าที่จะใช้เครื่องบินที่มีคนขับในการดำเนินภารกิจ [6]



รูปที่ 1.2 UAV [6]

### 1.2.1.2 Unmanned Ground Vehicle (UGV)

ยานภาคพื้นไร้คนขับ (Unmanned Ground Vehicle, UGV) ที่สามารถปฏิบัติภารกิจบนบก หรือภาคพื้นตามภูมิประเทศ ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์การทหาร เพื่อการลาดตระเวน รวบรวมข้อมูล หรือ เก็บกู้วัตถุระเบิดในพื้นที่เสี่ยงภัยต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 1.3 UGV [7]

## 1.3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.4.1. เพิ่มประสิทธิภาพ และอุดช่องโหว่ระบบรักษาความปลอดภัย และติดตามบุคคล ในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีจำนวนกล้องวงจรปิดจำกัด

1.4.2. ออกแบบ และทดสอบการทำงานร่วมกันของกล้องวงจรปิด และกล้องเคลื่อนที่ได้

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ในงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะส่วนของการติดตามเท่านั้น

1.5.2 การทดสอบจะกระทำด้วยการจำลองบนคอมพิวเตอร์และยืนยันผลด้วยการทดลองในสถานที่จริง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจตราพื้นที่ขนาดใหญ่ ที่มีจำนวนกล้องวงจรปิดจำกัด

1.6.2 สามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบรักษาความปลอดภัย เพื่ออุดช่องโหว่ของระบบ

1.6.3 สามารถนำผลที่ได้จากการจำลองมาใช้ในการระบุตำแหน่งของบุคคลในสถานการณ์จริง



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

#### 2.1 ระบบตรวจตราโดยการใช้กล้อง

ในปัจจุบันเทคโนโลยีรักษาความปลอดภัยนั้นได้ถูกนำมาใช้ในงานหลากหลายรูปแบบ ทั้งการติดตามเป้าหมาย หรือการหาตำแหน่งเป้าหมาย จากนั้นอาจจะนำมาประยุกต์ใช้กับการสืบสวนสำหรับตำรวจ หรือการวางแผนการเข้าถึงเป้าหมายสำหรับทางการทหารเป็นต้น เพื่อให้เจ้าหน้าที่ทำงานได้ง่ายมากขึ้นจึงมีการนำอุปกรณ์บางตัวมาช่วยในการทำงานนี้ อุปกรณ์ที่นำมาช่วยในการทำงานนี้ คือ กล้องวงจรปิดซึ่งเป็นสิ่งที่เห็นได้ทั่วไปในพื้นที่ที่มีผู้คนจำนวนมาก หรือพื้นที่ที่มีความต้องการการเฝ้าระวังพิเศษเช่น ห้างสรรพสินค้า, สนามบิน หรือธนาคารเป็นต้น ตัวอย่างเช่นการนำกล้องวงจรปิดมาใช้ในการตรวจจับใบหน้าคนในห้องประชุมเพื่อตรวจสอบความสนใจต่อผู้ที่ทำการบรรยายอยู่ในขณะนั้นของ Daniel Gatica-Perez และคณะ [8], ในงานของ Qi Mei-Bin และคณะ [9] ที่นำกล้องวงจรปิดมาหาตำแหน่งของบุคคลที่เดินเข้ามาในอาคารโดยการสร้างแบบจำลองความสูงของเป้าหมายและนำมาหาตำแหน่งบนพิกัด  $x - y$  และในงานวิจัยของ Chao-Ho Chen และคณะ [10] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับระบบการตรวจตราตามท้องถนนด้วยการใช้กล้องวงจรปิด เมื่อมีบุคคลเดินผ่านกล้องวงจรปิดตัวแรก ระบบจะทำการระบุตัวบุคคลนั้นด้วยการแสดงออกมาเป็นกรอบเส้นสีล้อมรอบบุคคลนั้นเมื่อบุคคลคนเดิมเดินผ่านกล้องวงจรปิดอีกตัวบุคคลนั้นจะถูกแสดงโดยการล้อมรอบด้วยกรอบสีแดง เป็นต้น

จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจตรามากมายหลายรูปแบบ เช่น การเพิ่มจำนวนกล้องวงจรปิดในพื้นที่ หรือการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการค้นหาเป้าหมายในอุปกรณ์ตรวจตราชนิดต่างๆ และวิธีการที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งที่ต้องสนองต่อความต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของกล้องให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้น คือ การนำกล้องมาติดตั้งเข้ากับสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่น มนุษย์ และยานพาหนะ (Unmanned Vehicle; UV) ชนิดต่างๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้น โดยการสั่งการให้กล้องเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ตัวอย่าง UV ที่นิยมนำมาติดตั้งกล้องเพื่อนำมาใช้สำหรับงานตรวจตราที่พบได้มากในปัจจุบัน คือ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) และ Unmanned Ground Vehicle (UGV) เป็นต้น [3, 4, 11]

##### 2.1.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) หรือที่รู้จักกันในชื่อ “โดรน” คือ อากาศยานไร้คนขับ มีพิสัยการทำงานไกลกว่า UV หลายๆ ชนิด ภาพที่ได้จากการติดตั้งกล้องเข้ากับ UAV เป็นภาพมุมสูงที่มีขอบเขตการมองเห็นกว้าง [2-4] จึงสามารถใช้ได้ในหลากหลายงาน ทำให้ในปัจจุบันบุคคลทั่วไป

มีความนิยมที่จะนำมาใช้ในการถ่ายภาพเพื่อให้ได้มุมมองที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และด้วยข้อดีนี้จึงได้มีการนำมาใช้ในการสอดแนมระยะไกลสำหรับการทหารอีกด้วย ในงานวิจัยของ Jianqiang Li และคณะ [11] ได้นำ UAV มาใช้ในการวางแผนการเดินทางให้กับหุ่นยนต์ โดยการให้ UAV ถ่ายภาพมุมสูงเพื่อให้เห็นสิ่งกีดขวางทั้งหมดในพื้นที่แล้วทำการหาเส้นทางที่ใกล้ที่สุด และไปให้ถึงเป้าหมาย โดยเดินทางหลบสิ่งกีดขวางไปด้วย



รูปที่ 2.1 UAV [12]

### 2.1.2 ยานภาคพื้นไร้คน (Unmanned Ground Vehicle; UGV)

Unmanned Ground Vehicle (UGV) เป็น UV อีกชนิดที่นิยมนำมาติดตั้งกล้อง ถึงจะมีพิสัยการทำงานไกลกว่า UAV แต่ก็แลกมาด้วยการมีความแม่นยำ และสามารถเข้าใกล้เป้าหมายได้มากกว่า UAV [2-4] จึงถูกนำมาใช้ในหลายๆ งานเช่นกัน ตัวอย่างที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ งานกู้ภัยในพื้นที่ที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปถึงได้ เช่นในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถล่ม และพื้นที่ไฟไหม้เป็นต้น หรือในพื้นที่ที่มีอันตราย ซึ่งสถานที่บางแห่งยังได้มีการนำมาใช้เป็นหุ่นยนต์ลาดตระเวนรักษาความปลอดภัยในอาคารแทนมนุษย์อีกด้วย [2, 13]



รูปที่ 2.2 UGV [13]

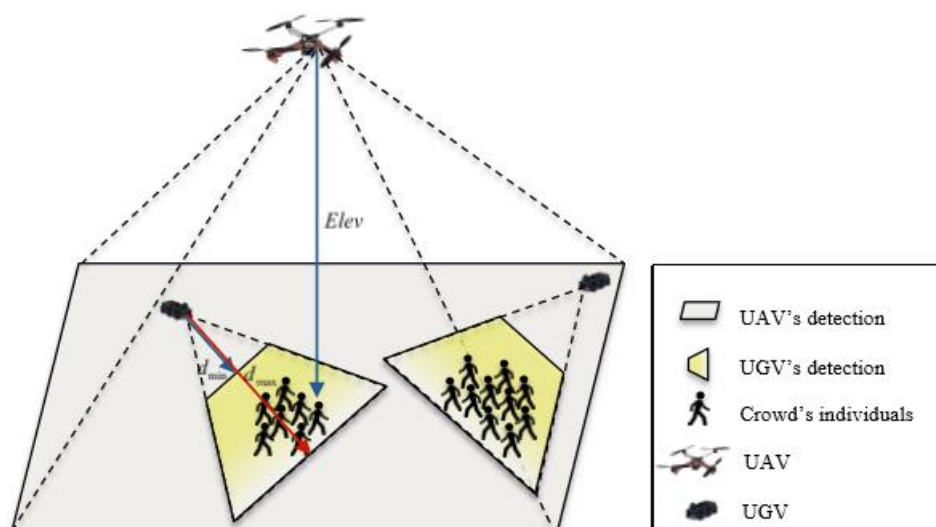
## 2.2 การทำงานร่วมกันระหว่างยานพาหนะไร้คนขับ (Unmanned Vehicle; UV)

ต่อมาได้มีงานวิจัยที่ต้องการนำ UV หลายชนิดมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้การทำงานนั้นๆ มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และอุดช่องโหว่จุดของจุดอ่อน หรือเพิ่มข้อจำกัดให้กันและกัน

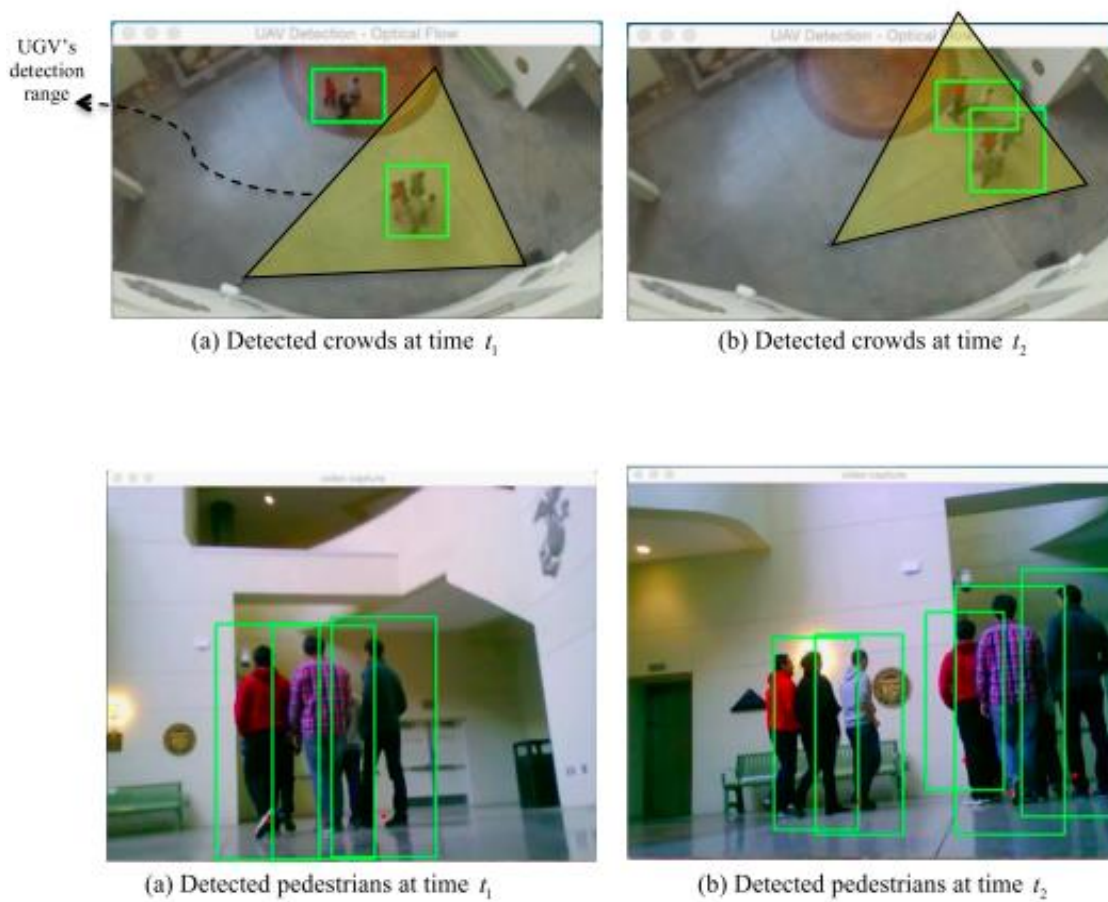
### 2.2.1 การทำงานร่วมกันระหว่าง UAV และ UGV

สาเหตุที่มีการนำ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) และ Unmanned Ground Vehicle (UGV) มาทำงานร่วมกัน เนื่องจากทั้ง UAV และ UGV มีข้อดี และข้อจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน นั้น คือ UAV มีพิสัยการทำงานไกล เคลื่อนที่ได้รวดเร็ว และสามารถติดตามเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว แต่ภาพที่ได้ออกมาเป็นมุมมองที่กว้าง จึงทำให้ความแม่นยำในการตรวจสอบเป้าหมายต่ำ ส่วน UGV สามารถระบุเป้าหมายได้แม่นยำกว่า และสามารถติดตามเป้าหมายได้ในระยะใกล้ แต่การเคลื่อนที่ช้า และพิสัยการทำงานไม่ไกลมากนัก [2-4] ในการทดลองบางงานยังมีการนำกล้องวงจรปิดที่ติดตั้ง เพื่อให้ภาพในมุมมองเดียวกันกับ UAV และ UGV มาทำหน้าที่แทน UAV หรือ UGV จริงๆ มาทำงานร่วมกับ UV ชนิดอื่น เนื่องจากข้อจำกัดในความเหมาะสมของพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ [1, 3]

ในงานวิจัยของ Sara Minaeian, Jian Liu และ Young-Jun Son [3] ต้องการที่จะตรวจจับ และระบุตำแหน่งของกลุ่มคนเพื่อใช้ในการกิจตรวจตราแบบอัตโนมัติและควบคุมกลุ่มคน จุดประสงค์ของขอบข่ายงานแสดงในรูปที่ 2.4 และต้องการที่จะให้ระบบรองรับการเปลี่ยนแปลงระหว่างตำแหน่งภาพเป้าหมายกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์จริง จึงเลือกใช้วิธีการระบุตำแหน่งโดยการทำงานร่วมกันของ UAV และ UGV เริ่มจากให้ UAV ถ่ายภาพมุมสูงให้ตำแหน่งโดยประมาณของกลุ่มคนเพื่อให้ UGV วางแผนเส้นทางไปยังกลุ่มคนนั้น และจากนั้น UGV ที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าจะ update ตำแหน่งโดยประมาณที่เวลานั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 วิธีนี้ต้องการ GIS (Geographical Information System) ทำงานร่วมกันของ UV ในเวลาจริง ที่สามารถรับได้จาก Onboard GPS เซ็นเซอร์เพื่อให้ UGV และกลุ่มคนอยู่ใกล้กันในระดับเดียวกัน ใช้ Optical-Flow ในการตรวจจับการเคลื่อนที่สำหรับ UAV และใช้ HOG-Based ในการตรวจจับคนสำหรับ UGV



รูปที่ 2.3 ขอบข่ายงานการทำงานร่วมกันเพื่อการค้นหา และระบุตำแหน่งด้วยการใช้ UAV และทีม UGV [3]



รูปที่ 2.4 ผลการตรวจจับกลุ่มคนด้วยกล้องจาก UAV และ UGV [3]

## 2.3 การติดตามเป้าหมาย

การติดตามเป้าหมายเป็นการบอกถึงการเคลื่อนที่ของเป้าหมาย เมื่อสามารถรู้ถึงบริเวณที่เป้าหมายอยู่ก็จะสามารถนำข้อมูลนั้นมาประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายงาน เช่น ระบบการนำทางในรถยนต์ หรือสมาร์ทโฟนที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ไปจนถึงการสอดแนมเป้าหมายเพื่อใช้เป็นข้อมูลการสืบสวนสำหรับตำรวจ หรือการทหาร เป็นต้น การติดตามสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก หรือ GPS และการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลจากสิ่งต่างๆ ที่ได้รับมา เช่น การใช้ข้อมูลจากการภาพถ่ายทางอากาศ เป็นต้น โดยการติดตามเป้าหมายสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทตามชนิดของการเลือกใช้เซ็นเซอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลในการติดตามเป้าหมาย ดังนี้

### 2.3.1 การติดตามแบบแอคทีฟ (Active Tracking Method)

การติดตามแบบแอคทีฟ คือ การติดตามโดยการใช้เซ็นเซอร์ที่ติดอยู่กับเป้าหมายเป็นตัวบอกตำแหน่งที่เป้าหมายอยู่ ดังนั้นการติดตามประเภทนี้จำเป็นที่จะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ หรือเซ็นเซอร์บางตัวให้กับเป้าหมายก่อนที่จะเริ่มทำการติดตาม ตัวอย่างเซ็นเซอร์ที่จัดอยู่ในรูปแบบการติดตามแบบแอคทีฟแสดงดังนี้

#### 2.3.1.1 ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System; GPS)

ระบบนี้ได้พัฒนาขึ้นโดยกระทรวงกลาโหม ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจัดทำโครงการ Global Positioning System มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2521 โดยอาศัยดาวเทียมและระบบคลื่นวิทยุนำร่อง และรหัสที่ส่งมาจากดาวเทียม NAVSTAR จำนวน 24 ดวง โดยแบ่งเป็นชุด ชุดละ 4 ดวงโดยทำการโคจรอยู่รอบโลกวันละ 2 รอบ และมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นโลกที่ความสูง 20,200 กิโลเมตร [14]

GPS ที่เราใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันจะมีอยู่ 2 ประเภทด้วยกัน คือ GPS Navigator (อุปกรณ์และระบบนำทาง) เป็น GPS ที่เราใช้งานในรถยนต์ทั่วไปที่บอกแผนที่การเดินทางด้วยการป้อนข้อมูลของเป้าหมายลงไปเครื่องนำทาง GPS และ GPS Tracking System (อุปกรณ์และระบบติดตามรถยนต์ ยานพาหนะหรือสัตว์เลี้ยง) ซึ่งเป็น GPS ที่สามารถติดตามการเดินทาง และบอกพิกัดและตำแหน่งของเครื่อง GPS ได้อีกด้วย โดยสามารถแบ่งเป็น 2 แบบด้วยกัน คือ อุปกรณ์ติดตามรถยนต์แบบ Offline สามารถตรวจสอบประวัติการเดินทางได้ แต่ไม่สามารถตรวจสอบตำแหน่งที่อยู่ของเครื่อง GPS ได้ และแบบที่สองอุปกรณ์ติดตามรถยนต์แบบกึ่ง Offline ซึ่งจะทำงานร่วมกับมือถือเราสามารถที่จะดูประวัติการเดินทาง พร้อมทั้งตำแหน่งปัจจุบันของอุปกรณ์ GPS นั้นๆ ได้อีกด้วย ในหลายๆ งานวิจัยมีการนำระบบ GPS นี้มาติดตั้งที่ตัวหุ่นยนต์เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถรู้ถึงตำแหน่งของหุ่นยนต์ขณะปฏิบัติการกิจได้ตามเวลาจริง [15]

เนื่องจากการใช้สัญญาณดาวเทียมเป็นตัวระบุตำแหน่ง ทำให้ระบบนี้มีจุดอ่อนตรงบริเวณที่สัญญาณดาวเทียมไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น ในอุโมงค์ ในป่าทึบ หรือในอาคารบางแห่ง เป็นต้น บริเวณเหล่านี้จึงไม่สามารถใช้ GPS ในการระบุตำแหน่งได้ [15]

เพื่ออุดช่องโหว่ของระบบ GPS ที่กล่าวมาข้างต้นจึงมีการนำเสนอหลากหลายวิธีเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งแทนสถานการณ์ที่ GPS ไม่สามารถใช้งานได้ ในงานวิจัยของ Xipeng Wang และคณะ [15] ต้องการที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ แม้อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มี GPS จึงเสนอวิธี “Feature-Based Localization between Air and Ground (FLAG)” ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณตำแหน่งโดยรวม โดยการใช้ภาพที่ถ่ายจากทางอากาศ (ภาพถ่ายจาก UAV) แต่ภาพถ่ายทางอากาศไม่สามารถบอกถึงสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นแนวตั้งได้ เช่น บ้านที่มีชายคา และต้นไม้ เป็นต้น จึงเป็นเรื่องยากที่หุ่นยนต์ภาคพื้น (UGV) จะทำงานได้โดยอาศัยภาพถ่ายทางอากาศอย่างเดียว จึงใช้ภาพที่ถ่ายได้จาก UGV มาประกอบการวิเคราะห์ในระบบด้วย

### 2.3.1.2 หน่วยการวัดเฉื่อย (Inertial Measurement Unit; IMU)

IMU คือเซ็นเซอร์ หรืออุปกรณ์ในเครื่องระบบการนำทางเฉื่อย (Inertial Navigation System) เป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้ในเครื่องบิน, ยานอวกาศ และเรือ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ Accelerometer ที่ใช้ในการรับค่าความเร่ง และ Gyroscopes ที่ใช้ในการรับค่าความเร็วเชิงมุมของเป้าหมายที่ติดตั้ง ในงานวิจัยของ Thiago Teixeira และคณะ [16] ใช้เครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) และเครื่องวัดค่าแม่เหล็ก (Magnetometer) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ความเฉื่อย (Inertial Sensors) ในโทรศัพท์มือถือมาช่วยในการระบุตัวบุคคลเมื่อเดินผ่านกล้องวงจรปิด โดยจับคู่การเคลื่อนที่ของบุคคลกับโทรศัพท์มือถือที่มี ID (Identity Document)

### 2.3.2 การติดตามแบบพาสซีฟ (Passive Tracking Method)

วิธีการติดตามแบบพาสซีฟ คือ การติดตามเป้าหมายโดยการรับค่าจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่รอบบริเวณที่กำหนด เมื่อเป้าหมายที่ต้องการจะติดตามเดินผ่านเซ็นเซอร์ดังกล่าว ระบบจะเริ่มทำการวัดหาบริเวณที่เป้าหมายอยู่ ด้วยวิธีนี้จึงไม่ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ หรือเซ็นเซอร์บางอย่างกับตัวเป้าหมายซึ่งจะต่างกับวิธีการติดตามแบบแอคทีฟ ตัวอย่างเซ็นเซอร์ที่ใช้ในวิธีการติดตามแบบพาสซีฟมีดังนี้

#### 2.3.2.1 เซ็นเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Sensor; EM Sensor)

เซ็นเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยมาจากอุปกรณ์ หรือวัตถุบางอย่าง ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละคลื่นมีลักษณะเฉพาะ จึงสามารถใช้เซ็นเซอร์ชนิดนี้ในการติดตามเป้าหมายที่มีวัตถุที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาได้

### 2.3.2.2 เซ็นเซอร์อินฟราเรด (Infrared Sensor; IR Sensor)

เซ็นเซอร์อินฟราเรด เป็นเซ็นเซอร์ที่ประกอบด้วยตัวส่ง และตัวรับโดยการทำงาน คือ ตัวส่งจะปล่อยแสงที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่มนุษย์มองไม่เห็น (ใต้แดง) เมื่อแสงที่ปล่อยออกไป กระแทกกับสิ่งกีดขวาง และสะท้อนกลับมาหาตัวรับ เซ็นเซอร์จะสามารถรับรู้ได้ถึงระยะระหว่างตัวเซ็นเซอร์กับสิ่งกีดขวางโดยการจับเวลาไป-กลับของแสง อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เซ็นเซอร์ชนิดนี้สามารถรับรู้ค่าเป็นระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวเซ็นเซอร์ได้อย่างเดียว จึงไม่สามารถบอกถึงประเภทของเป้าหมายนั้นได้ และยังมีข้อเสียที่เซ็นเซอร์ชนิดนี้อาจไม่แม่นยำเนื่องจากความเข้มแสงในสภาพแวดล้อมนั้นๆ

### 2.3.2.3 เรดาร์ (Radar)

การทำงานของเรดาร์ คือ การส่งคลื่นวิทยุไป แล้วคลื่นนั้นเกิดการสะท้อนกลับเมื่อไปเจอสิ่งกีดขวางสามารถบอกทิศทางและระยะของวัตถุนั้นได้ คลื่นจะสะท้อนได้ดีกับวัตถุที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี เช่น โลหะ เป็นต้น

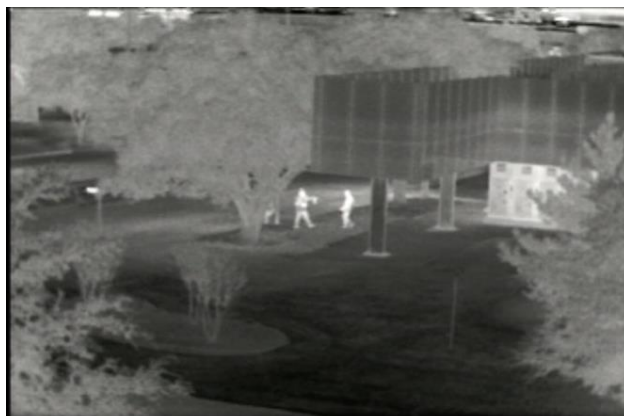
### 2.3.2.4 กล้องวงจรปิด (Close-Circuit Camera; CCTV)

กล้องวงจรปิด เป็นสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบรักษาความปลอดภัยในปัจจุบัน และเป็นสิ่งที่หาได้ไม่ยาก ดังนั้นกล้องวงจรปิด จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบติดตามเป้าหมาย กล้องวงจรปิดสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภทตามประสิทธิภาพในการถ่ายภาพ ดังนี้

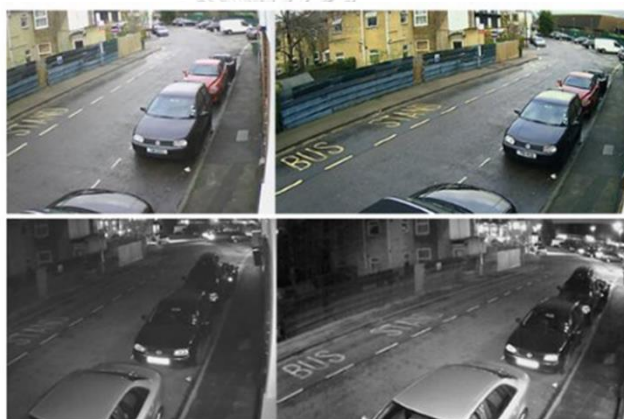
- กล้องจับความร้อน หรือ Thermal Camera เป็นกล้องที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถถ่ายภาพโดยใช้คลื่นอินฟราเรดในย่านที่มีความยาวคลื่นสูง เพื่อจับความร้อนที่ปล่อยออกมาจากสิ่งต่างๆ จึงสามารถใช้งานได้ทั้งในที่มืด หรือในพื้นที่ที่มีทัศนวิสัยไม่ดี เช่น ในสภาวะที่มีหมอก หรือฝุ่นควัน เป็นต้น ส่วนใหญ่ใช้ในการทหารสำหรับอากาศยานขับเคลื่อนอัตโนมัติในการลาดตระเวนระยะไกล

- กล้องธรรมดา กล้องที่พบเห็นได้ทั่วไปสามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีแสงสว่างมากเพียงพอ แต่ถ้ามองการใช้งานในที่มืดต้องมีอุปกรณ์ส่องแสงอินฟราเรดช่วย จะทำให้สามารถเห็นภาพจากแสงที่สะท้อนเข้าเลนส์ได้ แต่ไม่สามารถมองเห็นเป็นพลังงานความร้อนได้เหมือนกล้องจับความร้อน





รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจับความร้อน [17]



รูปที่ 2.6 ภาพที่ได้จากกล้องธรรมดา [17]

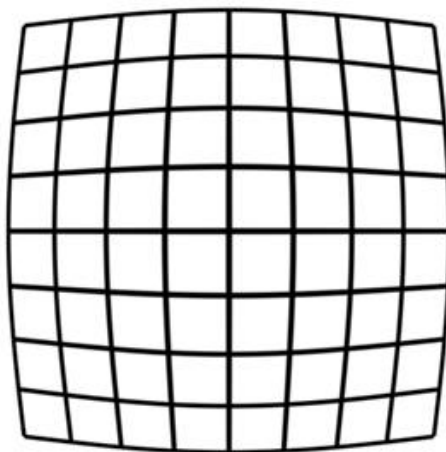
แต่ภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิดเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถนำมาใช้ในการติดตามเป้าหมายได้ จึงต้องนำภาพมาผ่านกระบวนการวิเคราะห์เพื่อให้สามารถหาบริเวณที่เป้าหมายอยู่ได้หลังจากผ่านขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิดไปแล้ว ให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

#### 2.4 การสอบเทียบกล้อง

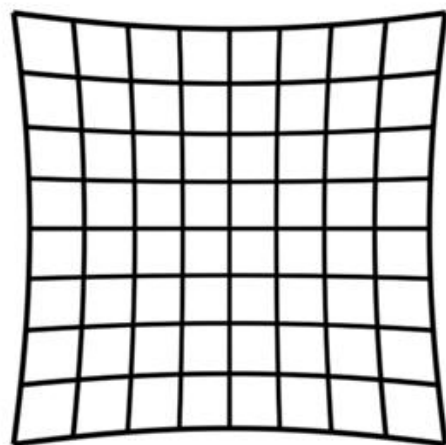
การสอบเทียบกล้อง (Camera Calibration) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับระบบวิสัยทัศน์ของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) เพราะภาพที่ถ่ายจากกล้องปกติจะมีการบิดเบี้ยว (Distortion) เนื่องจากความโค้งของตัวเลนส์เสมอ ตัวอย่างการบิดเบี้ยวของภาพแสดงในรูปที่ 2.7 โดยทั่วไปค่าความบิดเบี้ยวของเลนส์จะผกผันกับระยะโฟกัส นั่นหมายความว่า ถ้าระยะโฟกัสน้อยค่าความบิดเบี้ยวของเลนส์จะมีค่ามาก แต่ถ้าระยะโฟกัสมากค่าความบิดเบี้ยวของเลนส์จะมีค่าน้อย ด้วยเหตุนี้ทำให้ไม่สามารถนำภาพที่ถ่ายได้จากกล้องมาใช้ในการตรวจจับเป้าหมายได้อย่างแม่นยำเนื่องจากภาพที่ได้รับมามีความผิดเพี้ยน และกล้องแต่ละตัวจะมีค่าความบิดเบี้ยวไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการสอบเทียบกล้องทุกตัวที่ใช้ในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้



ได้เลือกใช้โปรแกรม MATLAB ในการสอบเทียบ หลังจากกระบวนการสอบเทียบกล้องเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะทำให้ทราบค่าตัวแปรต่างๆ ของกล้องที่ทำการสอบเทียบเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป



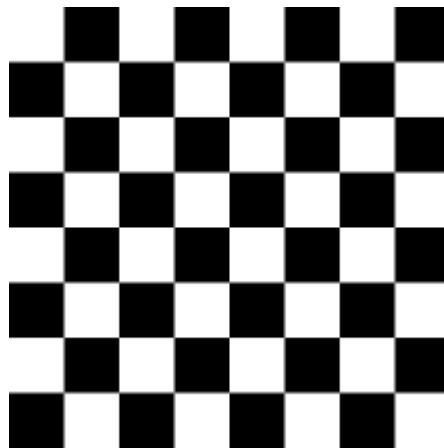
ก. ภาพโป่งกลาง



ข. ภาพตีบกลาง

รูปที่ 2.7 การบิดเบี้ยวของเลนส์ [18]

อุปกรณ์จำเป็นที่ต้องเตรียมเพื่อใช้ในการสอบเทียบ คือ กระจาดสอบเทียบ (Checker Board) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เพื่อใช้ในการป้อนเข้าไปในโปรแกรมคำนวณ การประมวลผลเริ่มจากการใช้กล้องที่ต้องการทำการสอบเทียบถ่ายรูปกระจาดสอบเทียบในมุมมองต่างๆ 10-20 ภาพ จากนั้นนำภาพทั้งหมดส่งเข้าโปรแกรมคำนวณ และป้อนขนาดของตารางบนกระจาดสอบเทียบ หลังจากโปรแกรมประมวลผลเสร็จแล้วจะได้ข้อมูลตัวแปรจำนวน 2 ชุด คือ พารามิเตอร์ภายใน และพารามิเตอร์ภายนอก (Intrinsic Parameter and Extrinsic Parameter) ของกล้องตัวนั้นออกมา



รูปที่ 2.8 กระดานสอบเทียบ

#### 2.4.1. การแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพ (Undistortion)

เมื่อกำลังจับภาพ แต่ละพิกเซลในภาพที่ได้จะมีการเลี้ยวเบนทำให้จุดที่ได้ไม่ใช่พิกัดจริงของพิกเซลนั้นๆ ตำแหน่งจริงของแต่ละพิกเซลสามารถอธิบายได้โดยตัวแปร  $x_2$  และ  $y_2$  พิกเซลที่เลี้ยวเบนสามารถอธิบายได้โดยการใช้สมการดังนี้

$$x_2 = x_1(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_1x_1y_1 + p_2(r^2 + 2x_1^2) \quad (1)$$

$$y_2 = y_1(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_2x_1y_1 + p_1(r^2 + 2y_1^2) \quad (2)$$

$$r = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (3)$$

โดย  $x_2, y_2$  = ตำแหน่งจุดที่ไม่เลี้ยวเบน

$x_1, y_1$  = ตำแหน่งจุดที่เลี้ยวเบน

$k_1, k_2$  = สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนตามรัศมี (Radial Distortion) ของเลนส์

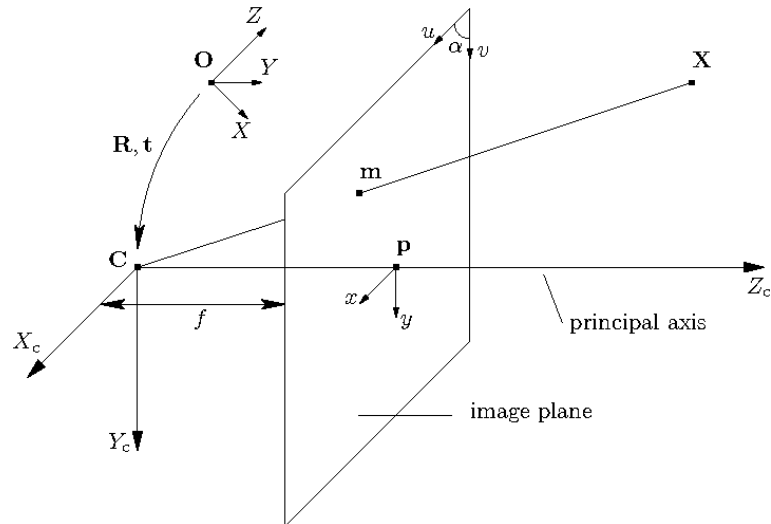
$p_1, p_2$  = สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนตามขอบ (Tangential Distortion) ของเลนส์

สำหรับการใช้งาน เช่น การติดตาม การหาตำแหน่งที่ถูกต้องแม่นยำของพิกเซลเป็นสิ่งจำเป็น จุดมุ่งหมายของสมการนี้ คือ การหาตำแหน่งที่ไม่เลี้ยวเบนของพิกเซล ( $x_2, y_2$ ) โดยให้ตำแหน่งพิกเซลที่เลี้ยวเบน ( $x_1, y_1$ ) และสัมประสิทธิ์ของเลนส์ เมื่อ  $r$  คือ ระยะแบบยูคลิด (Euclidean Distance) ของจุดที่เลี้ยวเบนกับศูนย์กลางการเลี้ยวเบน ถ้าศูนย์กลางการเลี้ยวเบนคือจุดต้นกำเนิด (Origin) ของภาพ จะสามารถอธิบาย  $r$  ได้ด้วยสมการ (3) อย่างไรก็ตาม ถ้า  $(x_0, y_0)$  คือ ศูนย์กลางการเลี้ยวเบน  $r$  จะสามารถอธิบายได้ดังสมการ (4) ดังนี้ [19]

$$r = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (4)$$

### 2.4.2. การหาขอบเขตการมองเห็นของกล้อง

ขอบเขตการมองเห็น (Field of View) ของกล้องวงจรรูปปิดสามารถหาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 2.9 Pinhole Model [20]

$$FOV = \arctan\left(\frac{p}{f}\right) \quad (5)$$

เมื่อ  $FOV$  คือ ขอบเขตการมองเห็น (Field of View)

$p$  คือ จุดมุขยสำคัญ (Principal Point)

$f$  คือ ระยะโฟกัสในหน่วยพิกเซล

### 2.4.3 ตำแหน่งบนระนาบจริงเทียบกับตำแหน่งบนระนาบภาพ

เมื่อได้ภาพ หรือวิดีโอที่ถ่ายจากกล้องมาแล้ว จะสามารถนำเข้าสู่กระบวนการตรวจจับได้ เมื่อสามารถตรวจจับวัตถุได้จะทำให้ทราบได้ว่าวัตถุที่กำลังสนใจนั้น อยู่ที่พิกัดใดบนระนาบภาพในหน่วยพิกเซล อย่างไรก็ตามพิกัดในหน่วยพิกเซลในระนาบภาพนี้ ยังไม่สามารถบ่งบอกถึงพิกัดในระนาบจริงได้ เราสามารถพิจารณาระนาบจริงได้โดยสมการ (6) และ (7) เรียกว่า พินโฮลด์โมเดล ซึ่งใช้หาตำแหน่งภาพฉายของวัตถุในระนาบ 3 มิติไปยังระนาบภาพ เพื่อหาตำแหน่งที่ถูกต้อง

$$sm' = A[R|t]M' \quad (6)$$

หรือ

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

พิกัดในหน่วยพิกเซลของวัตถุบนระนาบภาพ และพิกัดจริงบนโลกสามารถอธิบายโดยตัวแปร  $(u, v)$  และ  $(X, Y, Z)$  ตามลำดับ ตัวแปรภายใน (Intrinsic Parameters)  $A$  ของกล้องแต่ละตัว ประกอบด้วยระยะโฟกัส  $(f_x, f_y)$  และจุดมูขยสำคัญ (Principal Point;  $(c_x, c_y)$ ) เมทริกซ์ของตัวแปรภายในไม่ได้ขึ้นอยู่กับมุมมองการมองเห็นของกล้อง ดังนั้นการสอบเทียบกล้อง 1 ครั้ง สามารถใช้ได้ตลอดตราบที่ระยะโฟกัสยังคงที่ กล่าวคือ กล้องหนึ่งตัวจะมีตัวแปรภายใน 1 ชุดเท่านั้น ตัวแปร  $R$  และ  $t$  คือ โรเทชันเมทริกซ์ และทรานสเลชันเวกเตอร์ ตามลำดับ เมื่อตัวแปรสองตัวนี้รวมกันจะเรียกว่าตัวแปรภายนอก (Extrinsic Parameter)  $[R|t]$  ชุดข้อมูลตัวแปรภายใน และภายนอกมาจากการสอบเทียบกล้อง การแปลงสมการด้านบนเท่ากับสมการ (8) - (12) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad (8)$$

เมื่อ

$$x' = \frac{x}{z} \quad (9)$$

$$y' = \frac{y}{z} \quad (10)$$

$$u = f_x \times x' + c_x \quad (11)$$

$$v = f_y \times y' + c_y \quad (12)$$

เพื่อที่จะทำให้สมการนี้สมบูรณ์จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าความสูงของเป้าหมาย  $Z$  จากการศึกษาความสูงเฉลี่ยของมนุษย์ในเอเชียแสดงดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าตัวอย่างความสูงเฉลี่ยของมนุษย์ในทวีปเอเชีย [21]

ประเทศ	ความสูง (cm.)	
	ชาย	หญิง
จีน	170	161
ฟิลิปปินส์	167.6	152.4
เกาหลีใต้	173.7	158.4
ไทย	171	159
อินเดีย	167.6	152.4
เฉลี่ย	169.98	156.64

การวิเคราะห์ภาพที่ได้จากกล้องนั้นมีหลายวิธี เช่น ในงานวิจัยของ Sara Minaeian และคณะ [3] เลือกใช้ Optical Flow ในการจับรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ชัดเจนของวัตถุในพื้นที่ที่มองเห็นทำให้เกิดการเคลื่อนไหวสัมพันธ์ระหว่างผู้สังเกตกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการวิเคราะห์ภาพจากกล้องที่ติดตั้งไว้กับอากาศยานขับเคลื่อนอัตโนมัติ (UAV) และใช้ Histogram of Oriented Gradients (HOG) ในการวิเคราะห์ภาพที่ได้จาก หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ (UGV) เพื่อตรวจจับบุคคล นอกจากวิธีการวิเคราะห์ภาพข้างต้นนี้ ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการติดตามเป้าหมาย นั่นคือ การวิเคราะห์โดยความน่าจะเป็น

## 2.5 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น

การวิเคราะห์ความน่าจะเป็น เป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ภาพที่ได้จากกล้องเพื่อใช้ในการติดตามเป้าหมายไปยังบริเวณที่มีความเป็นไปได้ที่เป้าหมายจะเคลื่อนที่ไป โดยการวิเคราะห์นี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของ Bayes' Rule ซึ่งวิธีเหล่านั้น ได้แก่ Grid Localization และ Particle Filter และยังมีอีกวิธีที่นิยมใช้กัน คือ Kalman Filter วิธีเหล่านี้เป็นวิธีนำข้อมูลที่ได้จากแหล่งต่างๆ มาเป็นข้อมูลตั้งต้น และวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ชุดใหม่ที่สามารถนำมาใช้ในการติดตามได้ [13, 15, 22-25] เช่น ความเร็วที่วัตถุเคลื่อนที่ และตำแหน่งล่าสุดก่อนทำการวิเคราะห์สำหรับการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์ หรือลักษณะการเดินของมนุษย์เมื่อเจอสิ่งกีดขวาง เป็นต้น ในงานวิจัยของ Simone Calderara และคณะ [22] ได้ทำการทดลองระบบตรวจตราบุคคลด้วยกล้องวงจรปิดหลายตัว โดยแต่ละตัวจะมีมุมมองที่ทับซ้อนกัน คือ เมื่อมีวัตถุใหม่ผ่านเข้ามาที่ FOV ของกล้องตัวแรก ระบบจะทำการแสดงเครื่องหมายไว้เป็นกรอบสี่เหลี่ยมรอบวัตถุนั้น และเมื่อวัตถุนั้นเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ จนไปอยู่ในมุมมองของกล้องตัวอื่น กล้องตัวนั้นต้องสันนิษฐานการจับคู่วัตถุที่มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นวัตถุเดียวกันโดยใช้ทฤษฎีของ Bayes มาหาความเป็นไปได้ใหม่ ถ้าต้องการความละเอียดที่สูงขึ้นต้องใช้การคำนวณที่มีค่าใช้จ่ายแพงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำแบบจำลองกราฟที่เรียกว่า Camera Transition Graph (CTG) มาใช้เพื่อลดพื้นที่ค้นหาของการจับคู่กล้องหลายๆ ตัว วิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่กล่าวมาข้างต้นอธิบายได้ดังนี้

### 2.5.1 Bayes' Rule

Bayes' Rule หรือ Bayesian Filter เป็นวิธีที่ใช้ในการหาความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ต่างๆ สามารถนำมาใช้กับการระบุตำแหน่งได้ โดยเริ่มจากการกำหนด state ( $x_t$ ) เป็นพื้นที่ที่พิจารณา ( $x_1, \dots, x_n$ ) ยิ่งถ้าต้องการความละเอียดสูงจำนวนตัวแปรก็จะมีจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย ในขั้นเริ่มต้นแต่ละ state จะมีความเป็นไปได้  $p(x_t)$  เท่ากันทั้งหมด ทำให้เกิดการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) เช่น ถ้าพื้นที่พิจารณาแบ่งเป็น 4 ช่อง  $p(x_1)$  ถึง  $p(x_4)$

มีค่าความเป็นไปได้เท่ากับ 0.25 หรือ 25 เปอร์เซ็นต์เท่ากัน จากนั้นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งไว้จะรับค่าตัววัด (Measurement,  $z$ ) เข้ามา ทำให้ได้ความเป็นไปได้ใหม่ของแต่ละ state ( $p(x_i | z)$ ) ซึ่งความเป็นไปได้ใหม่นี้ ก็จะเป็นความเป็นไปได้เริ่มต้นของการรับค่าตัววัด ( $z$ ) ครั้งต่อไป สมการพื้นฐานของ Bayes' Rule แสดงได้ดังนี้

$$P(x_i | z) = \frac{P(z | x_i) P(x_i)}{P(z)} \quad (13)$$

เมื่อ  $P(x_i | z)$  = ความเป็นไปได้ที่จะเกิด State  $x$  เมื่อมีตัววัด  $z$

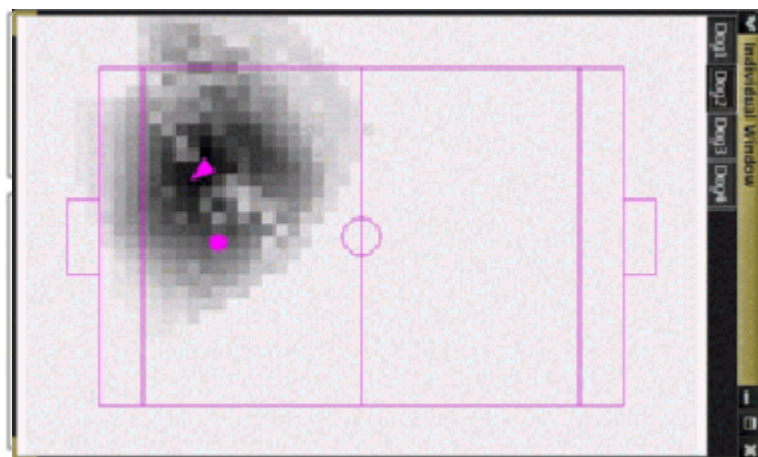
$P(z | x_i)$  = ความเป็นไปได้ที่จะเกิดตัววัด  $z$  เมื่อรู้ State  $x$

$P(x_i)$  = ความเป็นไปได้ของ State  $x$

$$P(z) = \sum_{i=1}^n P(z | x_i) P(x_i)$$

### 2.5.2 Grid Localization

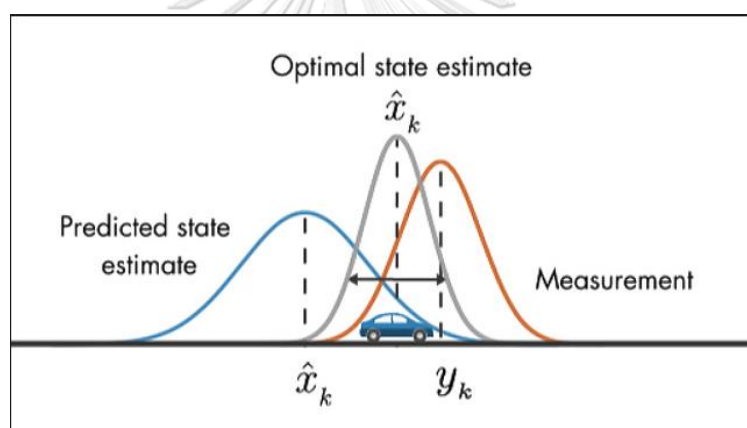
การวิเคราะห์แบบ Grid Localization เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ที่ต้องการพิจารณาออกเป็น กริดที่มีค่าความเป็นไปได้เท่ากันทุกกริด จากนั้นจะได้รับค่าตัววัดเข้ามา จะทำให้กริดที่ใกล้เคียงกับค่าตัววัดมีค่าความเป็นไปได้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 กริดที่มีค่าความเป็นไปได้มากจะมีสีเข้มกว่ากริดอื่นๆ วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อเสียที่จะบอกได้เพียง กริดใดเป็นกริดที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด จะทำให้รู้เพียงว่าเป้าหมายมีความเป็นไปได้ที่จะอยู่ในกริดนั้นเท่านั้น เพราะฉะนั้นถ้าต้องการเพิ่มความแม่นยำ จึงต้องกำหนดให้กริดมีความถี่มากตามไปด้วยซึ่งจะทำให้การคำนวณช้าลง



รูปที่ 2.10 Grid Localization [26]

### 2.5.3 Kalman Filter

Kalman Filter เป็นวิธีการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นอีกแบบหนึ่งที่ยินนำมาใช้ในการระบุบริเวณที่เป้าหมายอยู่ กระบวนการมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ Motion Update เป็นการเคลื่อนที่เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าตัววัด หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการคาดเดา (Prediction) ซึ่งเป็นขั้นตอนของการระบุตำแหน่ง ขั้นตอนต่อมา คือ Measurement Update เป็นการนำค่าตัววัดที่ได้จากขั้นตอนแรกมาทำการประมวลผลร่วมกับความเป็นไปได้ก่อนหน้านี้ (Prior Probability) เพื่อให้ได้ความเป็นไปได้ต่อมา (Posterior Probability) ทำ 2 ขั้นตอนนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ โดยให้ Posterior Probability เป็น Prior Probability ของการวิเคราะห์ครั้งต่อไป ในจุดนี้จะเหมือนกับ Bayes Filter โดยเริ่มจากการนำ Prior Probability  $p(x)$  กับ Measurement Probability ( $Z$ ) ที่จะแสดงด้วยรูปแบบ Gaussian หลังจากผ่านการประมวลผลแล้ว จะทำให้ได้ Posterior Probability ที่มีค่าเฉลี่ย อยู่ระหว่างค่าเฉลี่ยของ ( $x$ ) และ ( $y$ ) และจะมีค่าการกระจายน้อยลง



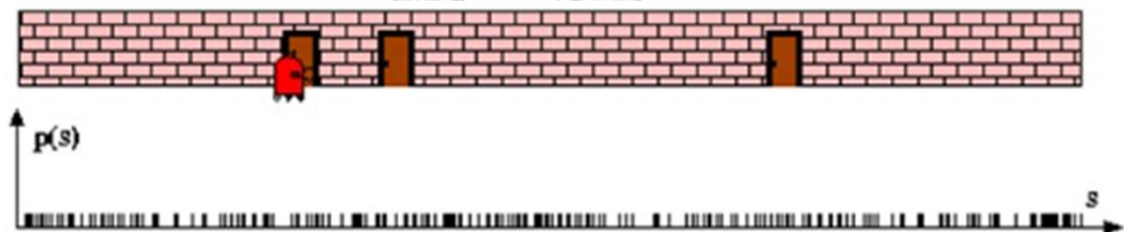
รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่างแสดงการทำงานของ Kalman Filter [27]

Kalman Filter จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีข้อมูลอยู่หนึ่งชุด คือ ความเป็นไปได้เริ่มต้น และค่าตัววัดจะทำให้ชุดข้อมูลที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการนี้ มีค่าความเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยน้อยลง และจุดสูงสุดของกราฟ (Peak) สูงขึ้น แต่ถ้าข้อมูลมีหลายชุดจะต้องทำให้ระบบมีความสามารถในการจัดกลุ่มข้อมูลที่ดี กล่าวคือ เมื่อมี 2 เป้าหมายที่ต้องการจะระบุตำแหน่งจะต้องทำการจับคู่เป้าหมายกับ Measurement Probability ให้ถูกต้อง มิฉะนั้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณ ในงานวิจัยของ Jo-Anne Ting และคณะ [28] ได้นำ Kalman filter มาประยุกต์ใช้ และหาประสิทธิภาพการทำงานในการได้มาซึ่งตำแหน่งของหุ่นยนต์หมา (LittleDog) โดย Kalman Filter จะมีการรับค่าการวัดมาจาก Motion Capture (MOCAP) และ IMU ที่ติดตั้งภายในตัวหุ่นยนต์เป็นข้อมูลในการพิจารณาหาตำแหน่งที่เป็นไปได้จากการรับข้อมูลทิศทางจากเซ็นเซอร์เหล่านี้

### 2.5.4 Monte Carlo Localization (Particle Filter)

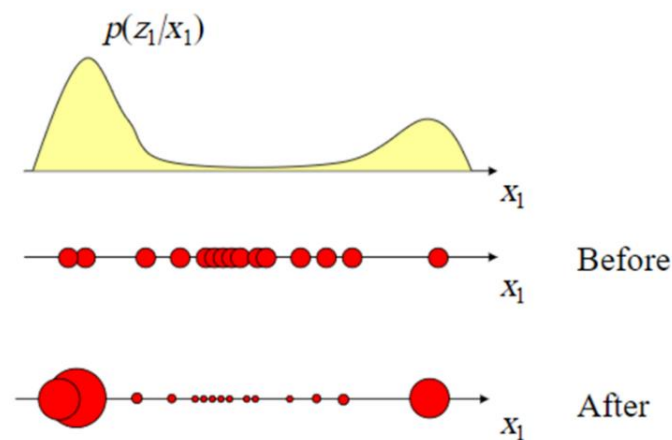
Monte Carlo Localization หรือ Particle Filter เป็นการวิเคราะห์ที่ยืดหลักของ Bayes' Rule เป็นพื้นฐาน นิยมใช้ในการติดตาม และระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เนื่องจากวิธีนี้สามารถให้ความละเอียดสูงได้ตามจำนวนอนุภาค (Particle) ที่ใส่เข้าไป และเหมาะสำหรับการประมวลผลที่มีข้อมูลหลายๆ ชุดอย่างการระบุตำแหน่งในหลากหลายวิถี [29]

ขั้นตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์แบบ Particle Filter คือ การกระจายแบบสุ่มของอนุภาคตามจำนวนที่กำหนดในพื้นที่ที่ทำการพิจารณา อนุภาคแต่ละตัวแทน State ( $x_i$ ) ซึ่งเก็บค่าต่างๆ ไว้ เช่น ถ้าใช้อนุภาคในการระบุตำแหน่งอนุภาคชุดนี้ คือ State ที่มีค่าของ พิกัดแกน  $x$  และพิกัดแกน  $y$  เป็นต้น ในขั้นตอนนี้อนุภาคทุกอนุภาคมีความเป็นไปได้เท่ากันทั้งหมด



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างขั้นต่อแรกของ Particle Filter [30]

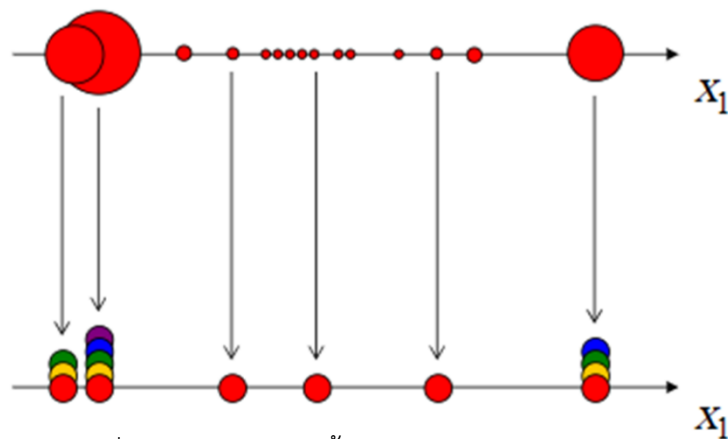
ขั้นตอนต่อมาอนุภาคที่กระจายแบบสุ่มในขั้นตอนแรกเรียกว่า ความเป็นไปได้ก่อนหน้า (Prior Probability) อนุภาคชุดนี้จะได้รับค่าตัววัดจากเซ็นเซอร์ จะทำให้อนุภาคที่ใกล้เคียงกับ Measurement Probability จะถูกใส่น้ำหนักเข้าไป นั่นหมายความว่าอนุภาคที่มีน้ำหนักมากก็จะมีความเป็นไปได้สูงกว่าบริเวณที่มีน้ำหนักน้อยที่เป้าหมายจะอยู่บริเวณนั้น ขั้นตอนนี้เรียกว่า Sensors Update



รูปที่ 2.13 แสดงขั้นตอนการใส่น้ำหนักให้กับอนุภาค [26]



ในตอนนี้ออนุภาคชุดนี้จะมีบางอนุภาคที่มีน้ำหนักมาก และบางอนุภาคมีน้ำหนักน้อย ในส่วนของอนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยนั้นหมายความว่า ความเป็นไปได้ที่เป้าหมายจะอยู่บริเวณนั้นมีน้อย ดังนั้นอนุภาคเหล่านี้ ซึ่งไม่ค่อยมีความสำคัญในการคำนวณ จึงได้มีขั้นตอนหนึ่งที่ทำให้นำอนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยออกไป และนำมาใส่ใหม่ในบริเวณที่อนุภาคมีน้ำหนักมาก ทำให้อนุภาคทุกตัวยังมีประสิทธิภาพในการคำนวณอยู่ ขั้นตอนนี้เรียกว่า Resampling



รูปที่ 2.14 ภาพอธิบายขั้นตอนการ Resampling [26]

ขั้นตอนการ Resampling นี้ไม่จำเป็นต้องทำทุกรอบการคำนวณ เนื่องจากขั้นตอนนี้ต้องใช้แอมโมรีอย่างมากในการวิเคราะห์ เพราะจำเป็นต้องทำการคำนวณซ้ำในทุกอนุภาค ทำให้ระบบทำการวิเคราะห์ช้าลง จึงได้มีการกำหนดจำนวนอนุภาคที่มีประสิทธิภาพ (Effective Particle ( $N_{eff}$ )) ที่ยอมรับได้ในการพิจารณา อาจทำการกำหนดไว้ว่าเมื่อมีอนุภาคที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของอนุภาคทั้งหมด จึงให้เริ่มทำการ Resampling สมการใช้ในการหาจำนวนอนุภาคที่มีประสิทธิภาพแสดงดังนี้

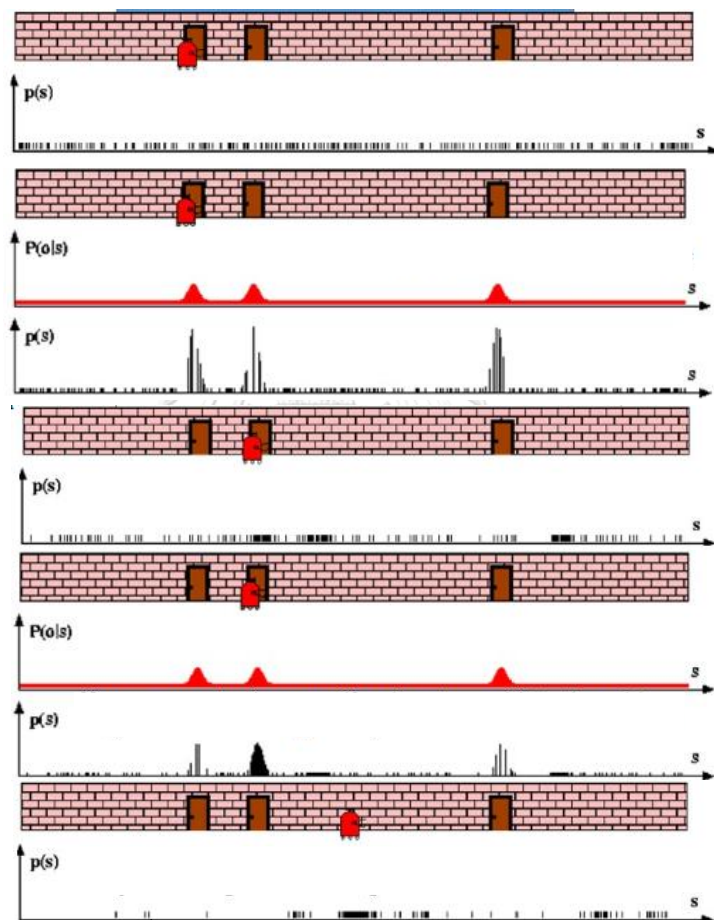
$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (w_k^i)^2} \quad (14)$$

เมื่อ  $N_{eff}$  = จำนวนอนุภาคที่มีประสิทธิภาพ

$w_k^i$  = น้ำหนักของแต่ละอนุภาคในแต่ละช่วงเวลา

นอกจากจะทำให้การคำนวณมีความไวขึ้นแล้ว ด้วยสิ่งนี้ยังเป็นสิ่งที่ใช้ในการตรวจสอบปัญหาการเสื่อมอีกด้วย ปัญหาการเสื่อมจะเกิดขึ้นเมื่อมีอนุภาคเพียงน้อยนิดเท่านั้นที่มีน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ และอนุภาคที่เหลือทั้งหมดมีน้ำหนักน้อยมากๆ [31]

เมื่อเป้าหมายเคลื่อนที่ทำให้อนุภาคทุกตัวเคลื่อนที่ตามไปด้วย จากนั้นทำตามขั้นตอนที่กล่าวมาซ้ำวนไปจนถึงจุดหนึ่ง ทุกอนุภาคส่วนใหญ่จะรวมอยู่ที่บริเวณเดียวกันแสดงถึงตำแหน่งที่ถูกต้อง อนุภาคที่อยู่ตำแหน่งที่ผิดจะหายไปทั้งหมดด้วยกระบวนการ Resampling ตัวอย่างด้านล่างนี้แสดงขั้นตอนการหาตำแหน่งหุ่นยนต์ในระนาบหนึ่งมิติโดยมีตำแหน่งของประตูเป็น Measurement Probability



รูปที่ 2.15 การทำงานของ Particle Filter [30]

วิเคราะห์แบบ Particle Filter นี้สามารถพิจารณาได้หลายตำแหน่ง และไม่จำเป็นต้องมีระบบการจับกลุ่มที่ดีเหมือนกับ Kalman Filter ในการวิเคราะห์อาจจะจะมีบางอนุภาคที่จับคู่ผิด แต่เมื่อทำตามขั้นตอนซ้ำไปเรื่อยๆ อนุภาคที่ผิดก็จะหายไปด้วยกระบวนการ Resampling จากที่กล่าวมาเมื่อเทียบกับ 2 วิธีก่อนหน้านี้ วิธีนี้จะเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า ทั้งในด้านความเร็วของการประมวลผล และปริมาณของชุดข้อมูลที่ใส่ไปได้ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายงาน เช่น ในงานวิจัยของ Frank Dellaert, Dieter Fox, Wolfram Burgard และ Sebastian Thrun [13] ได้นำ Monte Carlo Localization มาใช้ในการหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นจุดสำคัญที่สุด

สำหรับการสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ เพื่อให้หุ่นยนต์รู้ว่าตัวเองอยู่ตำแหน่งใดในพื้นที่ทำงาน ณ ขณะนั้น

รูปที่ 2.16 ก. เป็นกระบวนการเริ่มต้นการทำงานของกระบวนการ Monte Carlo Localization ที่ทำการสร้างอนุภาคจำนวนหนึ่งลงไปในพื้นที่ที่พิจารณา จะเห็นได้ว่ามีอนุภาคกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลที่สามารถบอกได้ว่าหุ่นยนต์อยู่ตำแหน่งใด สำหรับรูปที่ 2.16 ข. จะเห็นได้ว่าอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งตำแหน่งที่อนุภาคเกาะกลุ่มกันอยู่นี้คือ ตำแหน่งที่มีความเป็นไปได้ว่าหุ่นยนต์จะอยู่ตำแหน่งนั้น แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้รับยังไม่มากพอจึงมีความผิดพลาดเนื่องจากความสมมาตรของพื้นที่ ทำให้มีกลุ่มอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันมี 2 จุด และเมื่อได้รับข้อมูลมากพอจะทำให้สามารถระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.16 ค. เมื่อกลุ่มของอนุภาคที่เหลืออยู่เกาะกลุ่มอยู่ที่ตำแหน่งเดียว [13]



ก.

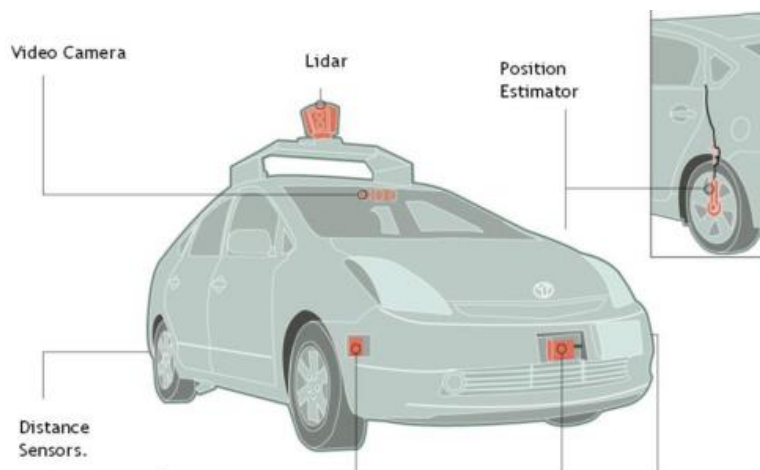
ข.

ค.

รูปที่ 2.16 การทำงานของ Particle Filter ในระนาบสองมิติ [13]

### 2.5.5 ค่าตัววัด (Measurement)

ค่าตัววัด เป็นชุดของข้อมูลที่ได้จากการใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ ในการรับรู้ข้อมูล การใช้ค่าตัววัดในแต่ละงานจะเลือกใช้ชนิดของข้อมูลจากเซ็นเซอร์คนละชนิด เช่น ถ้าต้องการหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ ควรเลือกใช้ Sensor ที่สามารถหาระยะทางระหว่างตัวหุ่นยนต์กับสภาพแวดล้อมรอบตัวได้ เช่น Laser Sensor Scan, Radar และกล้องตรวจจับวัตถุรอบทิศทาง เป็นต้น ในงานวิจัยรถขับเคลื่อนด้วยตัวเองของ Google Self-Driving Cars และงานวิจัยของ Lutin และคณะ [32, 33] ได้ใช้เซ็นเซอร์เหล่านี้ติดตั้งไว้กับรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อเป็นตัวรับค่าระยะทางระหว่างตัวรถยนต์กับวัตถุใดๆ ที่วัดได้จากรอบตัวรถยนต์ และตำแหน่งของรถขณะนั้น มาเป็นข้อมูลตัววัด รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์เหล่านี้จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ควบคู่กับ Prior Probability (ความเป็นไปได้ก่อนหน้า) เพื่อให้ได้มาซึ่ง Posterior Probability (ความเป็นไปได้ภายหลัง)



รูปที่ 2.17 เซ็นเซอร์สำหรับรถขับเคลื่อนด้วยตัวเอง [33]

## 2.6 ทฤษฎีความน่าจะเป็น

เมื่อสามารถคาดเดาดำแหน่งของเป้าหมายหลังจากผ่านกล้องวงจรปิดได้แล้ว หลังจากขั้นตอนการหาตำแหน่งของอนุภาค ขั้นตอนต่อมาคือการส่งกล้องเคลื่อนที่ได้ไปบริเวณที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมาเพื่อติดตามเป้าหมายให้ได้อีกครั้ง การที่จะส่งกล้องเคลื่อนที่ได้ไปยังบริเวณตามที่คำนวณไว้ได้นั้นคือต้องหาตำแหน่งเฉลี่ย (Mean) ของกลุ่มอนุภาคบริเวณนั้น และความแปรปรวน (Variance) หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของอนุภาคที่ตำแหน่งนั้น เพื่อบอกถึงขอบเขตการกระจายที่เหมาะสมที่จะส่งกล้องเคลื่อนที่ได้ออกไปเก็บข้อมูล ทั้งนี้ถ้าเมื่อส่งกล้องเคลื่อนที่ได้ออกไปตอนที่ความแปรปรวนมีมากเกินไปก็จะทำให้การที่จะหาเป้าหมายเป็นไปได้ยาก เพราะฉะนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการหาค่าความแปรปรวนที่เหมาะสมที่ควรส่งงานกล้องเคลื่อนที่ได้ไปปฏิบัติภารกิจ

ทั้งความแปรปรวน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่างก็เป็นสถิติเชิงบรรยายที่ใช้วัดการกระจาย (Measure of Dispersion) ทั้งคู่ และต้องใช้กับตัวแปรที่เป็นตัวแปร Interval /Ratio Scale of Measurement เท่านั้น ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) นั้นเป็นระยะทางเฉลี่ยของข้อมูลทุกค่าจากค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) มีหน่วยตรงกับตัวแปรที่เรานำมาคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนั้น เนื่องจากเป็นระยะทางเฉลี่ยจึงเป็นสิ่งที่คนทั่วไปเข้าใจได้ง่ายกว่า ไม่ซับซ้อน ยิ่งข้อมูลชุดใดมีระยะทางเฉลี่ยออกมาจากค่ากลางมาก ย่อมแสดงว่ามีการกระจายมาก แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนั้นนักสถิติไม่นิยมนำไปใช้งานในการอนุมานทางสถิติ แต่นำความแปรปรวน (Variance) ไปใช้งานแทน เพราะความแปรปรวนนั้นมี Statistical Distribution ที่แน่นอนกว่า เช่น Variance แจกแจงแบบไคกำลังสอง สมการของค่าความแปรปรวน, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยแสดงด้านล่างนี้

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N} \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{\sum x_i}{N} \quad (17)$$

เมื่อ  $\sigma^2$  = ค่าความแปรปรวน (Variance)

$x_i$  = ข้อมูล

$\mu$  = ค่าเฉลี่ย (Mean)

$N$  = จำนวนของข้อมูล

$\sigma$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

แต่เมื่อเป็นการทำการจำลองในระนาบ 2 มิติ ดังนั้นแทนที่จะใช้การหาค่าความแปรปรวนใน 1 มิติดังที่อธิบายไว้ข้างต้น จึงเลือกใช้การหาค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) ในการหาการกระจายตัวของอนุภาคในระนาบ  $x$  และ  $y$  สมการค่าความแปรปรวนร่วมแสดงด้านล่างนี้

$$\Sigma = \begin{bmatrix} E[(x_1 - \mu_1)(x_1 - \mu_1)] & E[(x_1 - \mu_1)(x_2 - \mu_2)] & \cdots & E[(x_1 - \mu_1)(x_n - \mu_n)] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[(x_n - \mu_n)(x_1 - \mu_1)] & E[(x_n - \mu_n)(x_2 - \mu_2)] & \cdots & E[(x_n - \mu_n)(x_n - \mu_n)] \end{bmatrix} \quad (18)$$

เมื่อ  $\Sigma$  = ค่าความแปรปรวนร่วม

$E$  = ค่าเฉลี่ยของพจน์นั้นๆ ในเมทริกซ์

$\mu$  = ค่าเฉลี่ยของชุดตัวแปร

## 2.7 ลักษณะนิสัยของบุคคล

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะติดตามมนุษย์ ซึ่งมนุษย์ไม่ใช่หุ่นยนต์ที่จะสามารถควบคุมได้ว่าจะไปทิศทางไหน หรือใช้ความเร็วเท่าไร ทำให้คาดเดาได้ยากว่ามนุษย์จะอยู่บริเวณไหน เมื่อต้องการทำการติดตาม จึงจำเป็นต้องมีการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อนำมาใช้เป็นค่าตัววัดเพิ่มเติมจากเซ็นเซอร์ที่จะช่วยในการติดตามได้อย่างแม่นยำมากขึ้น มีการวิจัยที่ทำการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของมนุษย์ที่กล่าวว่า เมื่อมนุษย์ต้องการจะเดินไปให้ถึงจุดหมายจุดหนึ่งจะทำการเดินไปยังจุดนั้นเป็นเส้นตรง แต่เมื่อมีสิ่งกีดขวางจะทำการเปลี่ยนองศาทิศทางเดินเพื่อหลบสิ่งกีดขวาง จากนั้นจะทำการเปลี่ยนองศาการเดินอีกครั้งเพื่อหันไปยังจุดหมาย และเดินต่อไปเป็นเส้นตรงจนถึงจุดหมายนั้น [34] ในงานวิจัยของ Brett R. Fajen และ William H. Warren [34]

ต้องการที่จะค้นหาความจริงเกี่ยวกับเส้นทาง และการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของมนุษย์ โดยมีการดำเนินงานคือ 1) ระบุตัวแปรลักษณะของเส้นทาง และการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และเสนอรูปแบบทั่วไปของแบบจำลอง 2) หาค่าตัวแปรลักษณะสำหรับการเดินของมนุษย์ 3) จัดการแบบจำลองเฉพาะอย่างเต็มรูปแบบของลักษณะการเคลื่อนที่ และ 4) พยายามคาดเดาเส้นทางในสถานการณ์ปกติด้วยแง่ของการรวมกันเชิงเส้นสำหรับเป้าหมาย และสิ่งกีดขวาง

เมื่อพิจารณามนุษย์ที่เคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมปกติด้วยความเร็วคงที่ ( $s$ ) และทิศทางการเคลื่อนที่ ( $\phi$ ) จากตำแหน่งปัจจุบันของมนุษย์ ( $x, y$ ) กำหนดตำแหน่งของเป้าหมายด้วยทิศทาง  $\psi_g$  ที่ระยะ  $d_g$  และตำแหน่งสิ่งกีดขวางด้วยทิศทาง  $\psi_0$  ที่ระยะ  $d_0$  เพื่อที่จะเคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมายมนุษย์ต้องเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ด้วยอัตราการหมุน  $\dot{\phi}$  จนกระทั่งมีทิศทางไปยังเป้าหมาย ดังนั้น  $\phi - \psi_g = 0$  และ  $\dot{\phi} = 0$  ในเวลาเดียวกันมนุษย์ต้องหมุนตัวออกจากทิศทางที่มีสิ่งกีดขวาง ดังนั้น  $\phi - \psi_0 \neq 0$  เมื่อ  $\dot{\phi} = 0$  เพราะ  $\phi$  และ  $\dot{\phi}$  เป็นตัวแปรสถานะที่ใช้ในการอธิบาย state ของความประพฤติปัจจุบันของมนุษย์ ในงานวิจัยของ Brett R. Fajen และ William H. Warren [34] ได้ทำการทดลองกับบุคคลสิบคนที่มีความสูงหกคน และผู้หญิงสี่คน มีอายุตั้งแต่ 18-26 ปี แยกการทดลองเป็นสามชุด คือชุดทดลอง 1a, 1b และ 2 โดยทำการเปลี่ยนแปลงมุมมองของเป้าหมายที่มองเห็นกับระยะทางถึงเป้าหมาย และได้ผลอัตราเร็วในการเปลี่ยนทิศทางการเดินไปหาเป้าหมายออกมาดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการทดลองอัตราเร็วในการหมุนเข้าหาเป้าหมาย [34]

เงื่อนไข	ความเร็วการหมุน (องศา/วินาที)	
	ค่าเฉลี่ย	SD
<b>การทดลอง 1a</b>		
องศาเป้าหมายเริ่มต้น (องศา)		
5	9.48	2.3
10	13.11	2.38
15	17.94	2.77
20	22.17	2.98
25	27.12	4.38
<b>การทดลอง 1b</b>		
องศาเป้าหมายเริ่มต้น (องศา)		
10	16.2	3.06
20	25.83	3.69
ระยะทางเป้าหมายเริ่มต้น (เมตร)		
2	28.35	6.25
4	18.73	2.41
8	15.97	2.37
<b>การทดลอง 2</b>		
องศาเป้าหมายเริ่มต้น (องศา)		
1	15.69	4.03
2	15.18	3.1
4	13.17	3.4
8	10.74	3.39
ระยะทางเป้าหมายเริ่มต้น (เมตร)		
3	16.96	3.8
4	12.86	2.94
5	11.27	3.42

ความเร็วในการเดินเพิ่มจาก 0 เมตรต่อวินาทีไปถึงความเร็วเฉลี่ย 0.98 เมตรต่อวินาทีในหนึ่งเมตรแรก จากนั้นเพิ่มขึ้นไปถึงค่าเฉลี่ยสูงสุด 1.14 เมตรต่อวินาที ก่อนที่จะลดลงไปที่ 0.01 เมตรต่อวินาทีในวินาทีสุดท้ายก่อนถึงเป้าหมาย ความเร็วสูงสุดในการเดินค่อยๆ ลดลงตามองศาเป้าหมายเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น (1.15 เมตรต่อวินาที และ 1.13 เมตรต่อวินาทีสำหรับ 10 องศา และ 20 องศาตามลำดับ) และเพิ่มขึ้นเนื่องด้วยระยะเป้าหมายเริ่มต้น (1.07, 1.18 และ 1.19 เมตรต่อวินาทีสำหรับ 2, 4 และ 8 เมตรตามลำดับ) เมื่อพิจารณาโดยรวมจะสังเกตได้ว่าความเร็วในการเดินของมนุษย์ค่อนข้างคงที่ [34]

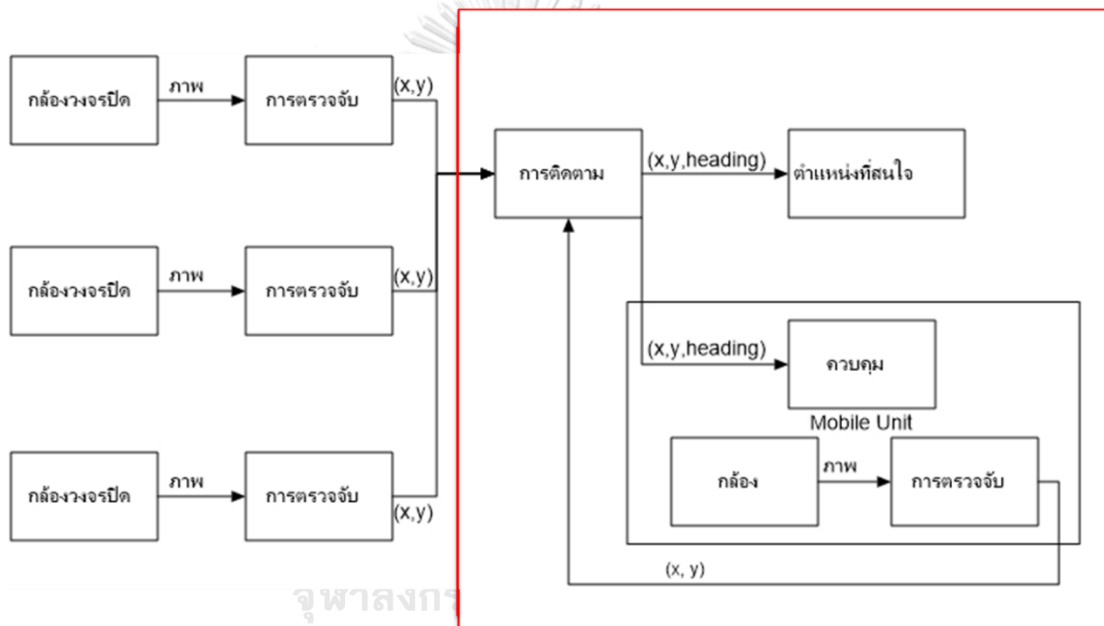
### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะทำการทดสอบการทำงานร่วมกันของกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ และกล้องเคลื่อนที่ได้ในการระบุตำแหน่ง และติดตามเป้าหมายในพื้นที่ทดสอบ

#### 3.1 การทำงานของระบบ

แผนภาพการทำงานของระบบการติดตามเป้าหมายจากภาพที่ได้จากกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ และภาพที่ติดตั้งอยู่ในหน่วยกล้องเคลื่อนที่ได้แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการวิเคราะห์ภาพสำหรับการติดตาม

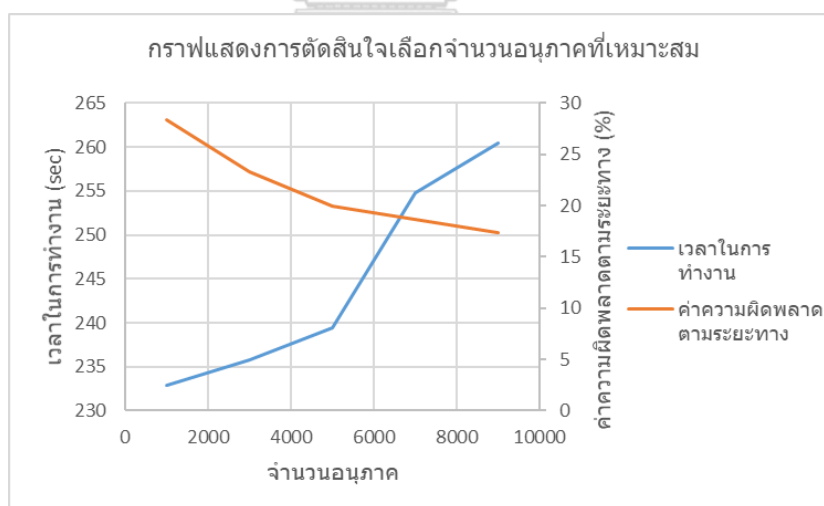
ดังที่กล่าวไว้ในขอบเขตงานวิจัย งานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะส่วนงานในการติดตามที่อยู่ในกรอบเท่านั้น เพราะส่วนงานในการตรวจจับนั้นถือว่าเป็นขอบเขตงานที่ใหญ่อีกขอบเขตหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาได้อีกมากมาย ดังนั้นเพื่อไม่ให้ขอบเขตของงานวิจัยนี้ใหญ่เกินไป จึงตั้งสมมติฐานว่าข้อมูลที่ได้จากการบวกรตรวจจับมีความแม่นยำมากเพียงพอที่จะนำเข้ามาสู่กระบวนการติดตามแล้ว และผู้วิจัยไม่ต้องการที่จะสนใจการแยกแยะวัตถุ (Object recognition) ดังนั้นวิธีการตรวจจับ จึงได้เลือกใช้วิธีที่ง่ายที่สุด นั่นคือการตรวจจับสี (Color Detection) โดยกำหนดให้เป้าหมายที่สนใจสวมใส่หมวกสีแดงไว้ที่ศีรษะเพื่อให้ระบบสามารถรับรู้ถึงเป้าหมายได้ผ่านภาพที่ได้รับมาจากกล้อง



หลังจากศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ข้อสรุปดังนี้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การติดตามแบบพาสซีฟ (Passive Tracking Method) เนื่องจากการติดตามแบบแอคทีฟนั้นจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์บางตัวไว้ที่ตัวเป้าหมายเพื่อรับข้อมูลตำแหน่งมาทำการวิเคราะห์ แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะติดตามเป้าหมายที่บังเอิญเดินผ่านเข้ามาในขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิด ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นคนร้ายหรือฆาตกรที่กำลังหลบหนี จึงเป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่จะเข้าไปขอความร่วมมือในการติดตั้งอุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ดังกล่าว ดังนั้นการติดตามแบบพาสซีฟที่อาศัยเซ็นเซอร์ภายนอกในการรับรู้ถึงเป้าหมายที่สนใจจึงมีความเหมาะสมมากกว่า

### 3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลโดย Monte Carlo Localization สำหรับงานวิจัยนี้

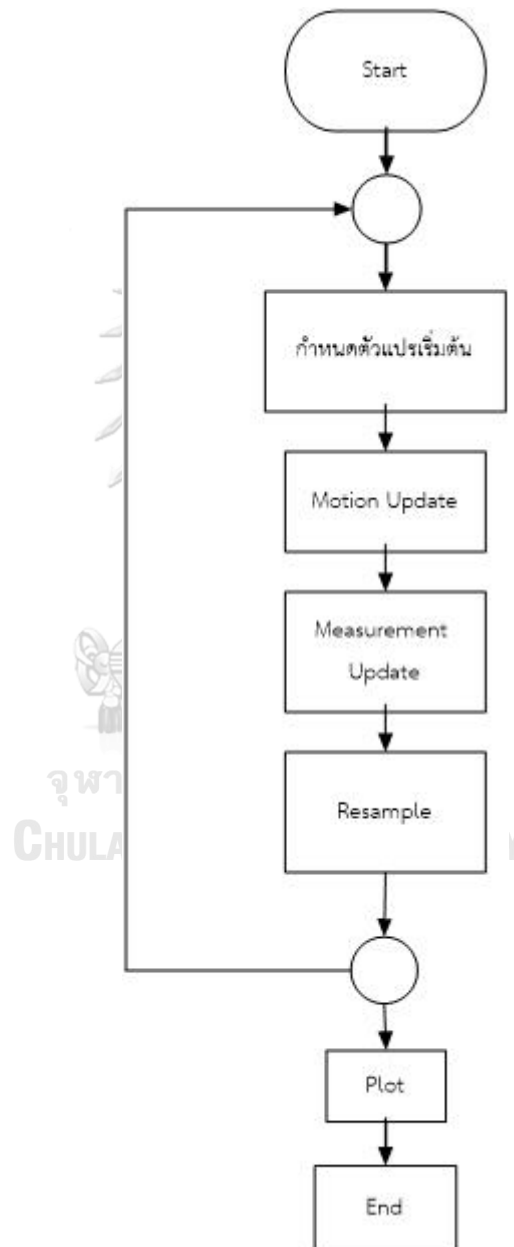
การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Monte Carlo Localization (MCL) หรือ Particle Filter ดังนั้นเพื่อหาจำนวนอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการทดสอบสอบการทำงานของระบบโดยจำนวนอนุภาคที่แตกต่างกัน เมื่อเงื่อนไขตัวแปรในการทดสอบอื่นๆ เหมือนกันทั้งหมด เพื่อทำการหาจำนวนอนุภาคเทียบกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และค่าความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ย ได้ผลออกมาดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยการคำนวณนี้อ้างอิงจากการใช้คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในหัวข้อ 3.7



รูปที่ 3.2 รูปแสดงจำนวนอนุภาคเทียบกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ และค่าความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ย

เมื่อผู้วิจัยพิจารณาผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จึงเลือกใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 5000 อนุภาค เนื่องจากเมื่อเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ในกรณีที่ใช้ 1000 3000 และ 5000 อนุภาคแล้วจะ

เห็นว่าเวลาที่ใช้นั้นแตกต่างกันไม่มาก แต่เมื่อทำการทดสอบในกรณีที่ใช้ 7000 และ 9000 อนุภาค เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์กลับเพิ่มขึ้นอย่างมาก และจากการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ย การที่จำนวนอนุภาคมากขึ้นจะทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงก็จริง แต่ไม่ได้ลดลงมากเท่าที่ควร ผู้วิจัยจึงเห็นว่าไม่คุ้มค่าที่จะทำให้การคำนวณใช้เวลานานแต่ลดค่าความผิดพลาดได้เพียงนิดเดียว ด้วยเหตุผลทั้งหมดเหล่านี้จึงเลือกใช้ 5000 อนุภาค Flow Chart แสดงการทำงานของ MCL แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Flow Chart แสดงการทำงานของ MCL

ก่อนที่จะทำการทดสอบจริงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการพิสูจน์ก่อนว่าวิธีนี้สามารถทำได้จริง และมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด วิธีการที่จะทำให้รู้ได้ถึงสิ่งเหล่านี้ได้คือการจำลอง (Simulation) ระบบการทำงาน ในการที่จะสามารถจำลองการทำงานของ Monte Carlo Localization ต้องใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้มาช่วยในการเขียนโปรแกรม

### 3.2.1 สมการการเคลื่อนที่

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาตำแหน่งของเป้าหมายโดยอ้างอิงจากอนุภาคที่ใส่เข้าไป ดังนั้นจึงได้กำหนดให้แต่ละอนุภาคประกอบด้วย พิกัดแกน  $x$  พิกัดแกน  $y$  และทิศทางการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ เพื่อให้สอดคล้องกับตำแหน่งของเป้าหมาย เมื่อต้องการหาตำแหน่งต่อไปของอนุภาคต้องใช้ข้อมูลจากจุดเดิมในการหา เช่นถ้าต้องการหาทิศทางใหม่ของอนุภาคที่เกิดขึ้นก็ต้องนำทิศทางเก่ารวมกับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปจะได้ทิศทางใหม่ที่เกิดขึ้น แต่ในความเป็นจริงเครื่องมืออาจมีความคลาดเคลื่อน จึงต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนนั้นด้วย สมการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่มีดังนี้

$$\phi' = \text{mod}_{p_i}(\phi + \psi + n(0, \delta\psi)) \quad (19)$$

$$l' = l + n(0, \delta l) \quad (20)$$

$$x' = x + l' \cos(\phi') \quad (21)$$

$$y' = y + l' \sin(\phi') \quad (22)$$

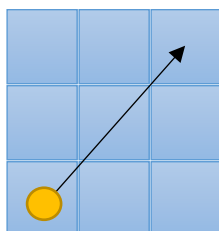
เมื่อ  $\phi', l', x'$  และ  $y'$  เป็นตัวแปรตำแหน่งจุดใหม่คือ ทิศทาง, ระยะทาง, พิกัด  $x$  และ พิกัด  $y$  ตามลำดับ โดย  $\phi, l, x$  และ  $y$  คือ ทิศทาง, ระยะทาง, พิกัด  $x$  และ พิกัด  $y$  ตามลำดับ ของจุดตัวแปรของตำแหน่งเดิม และ  $\delta\psi$  และ  $\delta l$  เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของมุมการหมุน และ ระยะทางตามลำดับ

### 3.2.2 ระยะแบบยุคลิด (Euclidean Distance)

ในการจำลองการเคลื่อนที่มีกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ไปยังจุดต่อไปในรูปแบบเส้นตรง ดังนั้นจึงเลือกทฤษฎีแบบยุคลิดในการวัดระยะเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในขั้นตอน Sensor Update ที่จะรับค่าตัววัดเพื่อหาน้ำหนักของแต่ละอนุภาค อนุภาคที่มีค่าตัววัดใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงมากก็จะมีน้ำหนักมากตามไปด้วย และสมการนี้ยังใช้ในการหาระยะที่ผิดพลาดของระยะจริง และระยะที่เป้าหมายเคลื่อนที่อีกด้วย สมการในการหาระยะแบบยุคลิดแสดงด้านล่างนี้

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2} \quad (23)$$

เมื่อกำหนดให้  $p$  และ  $q$  เป็นตำแหน่ง 2 ตำแหน่งที่ต้องการหาระยะ ถ้า  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  และ  $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  ในระบบพิกัดเป็น 2 จุดใน  $n$  มิติ



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเคลื่อนแบบยุคลิด

### 3.2.3 ค่าความผิดพลาดตามระยะทาง (Total Distance Error)

คือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อเทียบกับระยะทาง จากทฤษฎีการวัดระแบบยุคลิด ที่กล่าวถึงการหาระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุด 2 จุดด้วยการคำนวณดังที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความผิดพลาดของเส้นทางได้จากสมการ *Total Distance error %*

$$\text{Total Distance error \%} = \frac{d(p, q)}{D} \times 100 \quad (24)$$

เมื่อ  $d(p, q)$  = ระยะระหว่างตำแหน่งจริง ถึงตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์ (Euclidean Distance)

$D$  = ระยะทั้งหมดที่เป้าหมายเคลื่อนที่

ด้วยการหาค่าความผิดพลาดนี้จะบอกถึงความแม่นยำของโปรแกรมจำลองการเดินทางว่ามีความน่าเชื่อถือมากเท่าไร ถ้าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของเส้นทางน้อยนั้นก็หมายความว่ามีความเป็นไปได้สูงที่เมื่อทำการส่งกล่องเคลื่อนที่ได้ไปที่บริเวณนั้นๆ แล้วจะสามารถพบเป้าหมายได้

### 3.2.4 การกำหนดขอบเขตให้กล่องวงจรปิด

ในงานวิจัยนี้มีกล่องวงจรปิดเป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่ง ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์ด้วยการการจำลองมีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความเป็นจริงที่ว่า “กล่องวงจรปิดมีมุมมองการมองเห็นที่จำกัด” นั้นหมายความว่า จะสามารถใช้ข้อมูลจากกล่องมาเป็น Measurement Probability ได้ก็ต่อเมื่อเป้าหมายอยู่ในขอบเขตการมองเห็นของกล่องวงจรปิดนั้น

ให้มุมที่กล่องวงจรปิดหันไปเป็น  $\theta$  และขอบเขตการมองเห็นของกล่องเป็น  $\phi$  ให้  $x_i$  และ  $y_i$  เป็นพิกัดของอนุภาค  $i$  แต่ละจุด และ  $x$  และ  $y$  เป็นพิกัดของกล่องวงจรปิด ความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้สามารถเขียนออกมาได้ดังที่แสดงด้านล่างนี้

$$\left| a \tan 2 \left( \frac{y - y_i}{x - x_i} \right) - \theta \right| \leq \phi \quad (25)$$

เมื่อความสัมพันธ์ด้านบนนี้เป็นจริงนั้นหมายความว่าอนุภาค  $i$  ที่กำลังทำการพิจารณานั้นอยู่ในขอบเขตที่กล้องวงจรปิดสามารถมองเห็นได้ ดังนั้นเราจึงรับค่าตัววัดจากกล้องตัวดังกล่าวได้

### 3.2.5 หาน้ำหนักของแต่ละอนุภาค

ในการวิเคราะห์แบบ Particle Filter คือการใส่อนุภาคลงไปจำนวนหนึ่ง อนุภาคเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณที่กำหนดไว้ ดังนั้นเพื่อที่จะนำอนุภาคเหล่านี้มาใช้ในการระบุตำแหน่งจึงต้องนำค่าตัววัดที่ทราบมาเทียบกับค่าที่ได้จากแต่ละอนุภาคซึ่งในงานวิจัยนี้คือมุมที่อนุภาคแต่ละอนุภาคอยู่ในขอบเขตการมองเห็นของกล้อง เทียบกับมุมของตำแหน่งจริงที่เคลื่อนที่ไป เพื่อหาการกระจายในโค้ง Gaussian อนุภาคที่อยู่ที่มีมุมที่แตกต่างกับตำแหน่งจริงมากจะถูกตัดออกไปในการคำนวณครั้งต่อไปเพราะมีน้ำหนักน้อย ตามการทำงานของกระบวนการ Resampling แต่ว่าการ Resampling ไม่จำเป็นต้องทำทุกรอบการคำนวณดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขไว้ว่า หากจำนวนอนุภาคที่มีประสิทธิภาพ (Effective Particle) มีค่าน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนอนุภาคทั้งหมดระบบถึงจะทำการ Resampling อีกครั้ง

### 3.2.6 การหาความกว้างของการกระจายตัวของอนุภาค

ในงานวิจัยนี้จะสนใจค่าความแปรปรวนร่วมในระนาบ  $x$  และ  $y$  ดังนั้นการหาค่าความแปรปรวนร่วมของชุดข้อมูลนี้จะแสดงด้วยสมการเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\Sigma = \begin{bmatrix} x^2 & xy \\ yx & y^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} E(x - \bar{x})^2 & E[(x - \bar{x})(y - \bar{y})] \\ E[(x - \bar{x})(y - \bar{y})] & E(y - \bar{y})^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

เมื่อ  $x$  = พิกัดในแกน  $x$

$\bar{x}$  = ค่าเฉลี่ยของพิกัดในแกน  $x$

$y$  = พิกัดในแกน  $y$

$\bar{y}$  = ค่าเฉลี่ยของพิกัดในแกน  $y$

การหาค่าความแปรปรวนนี้มีเพื่อบอกให้รู้ถึงการกระจายของอนุภาคที่เป็นตัวบอกตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเป้าหมายจากค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลนั้นๆ ถ้าค่าความแปรปรวนร่วมที่ได้ออกมามีค่ามากถึงจุดๆ หนึ่งก็จำเป็นจะต้องมีวิธีการบางอย่างที่จะลดค่าความแปรปรวนนั้นอีกครั้ง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้รอยเมทริกซ์ (Trace Matrix) เป็นตัวบอกความกว้างของขอบเขตที่เป้าหมายมีความเป็นไปได้

ที่จะอยู่บริเวณนั้น เมื่อค่าความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้น รอยเมทริกซ์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเพื่อครอบคลุมความเป็นไปได้ทั้งหมด การหารอยเมทริกซ์แสดงดังนี้

$$\text{Trace Matrix} = E(x - \bar{x})^2 + E(y - \bar{y})^2 \quad (28)$$

### 3.3 แผนการวิจัย

เมื่อเป้าหมายเดินผ่านจุดที่มุมมองของกล้องวงจรปิดสามารถจับภาพได้ ระบบจะทำการประมวลผลบริเวณของเป้าหมายเมื่อเทียบกับมุมมองของกล้องด้วยการวิเคราะห์แบบ Monte Carlo Localization หรือ Particle Filter ด้วยการวิเคราะห์นี้จะทำให้สามารถรับรู้บริเวณที่เป้าหมายอยู่ โดยการแสดงในรูปแบบที่มีอนุภาค (Particle) หลายอนุภาคกระจายตัวอยู่รอบๆ จุดที่เป้าหมายอยู่ ต่อมาเมื่อเป้าหมายเดินเลยมุมมองที่กล้องสามารถจับภาพได้ Particle Filter ก็ยังทำการวิเคราะห์ต่อไป แต่รูปแบบของอนุภาคจะเริ่ม มีการกระจายตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่เป้าหมายออกจากการมองเห็นของกล้องไป จากนั้นตัวโปรแกรมจะเริ่มทำการตรวจสอบค่าความแปรปรวน (Variance) ค่าความแปรปรวนนี้เป็นตัวแสดงถึงความกว้างของการกระจายของอนุภาคจากจุดค่าเฉลี่ย (Mean) ของบริเวณที่เวลานั้นๆ และเมื่อผลการวิเคราะห์ออกมาว่าค่าความแปรปรวนมีค่ามากถึงค่าหนึ่งแล้วระบบ จะทำการส่งกล้องเคลื่อนที่ได้ออกไปยังบริเวณนั้นเพื่อทำการตรวจตรา และติดตามเป้าหมายให้ได้อีกครั้งโดยอาศัยรอยเมทริกซ์เป็นตัวช่วยในการบอกรัศมีความกว้างของการกระจายของข้อมูล ถ้าสามารถติดตามเป้าหมายได้ ค่าความแปรปรวน และรอยเมทริกซ์ที่ระบบทำการวิเคราะห์หจะมีค่าน้อยลงอีกครั้ง

### 3.4 การสร้างระบบจำลองการทำงาน (Simulation)

เพื่อให้ทราบว่าระบบที่เลือกใช้นั้นสามารถนำมาใช้งานได้จริง วิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการดำเนินการ คือการสร้างระบบจำลองการทำงาน หรือที่เรียกกันว่า Simulation ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมการทำงานของ Monte Carlo Localization หรือ Particle Filter เพื่อใช้ในการติดตามเป้าหมายที่เดินผ่านกล้องวงจรปิดไปแล้วด้วยโปรแกรม MATLAB นั้นหมายความว่าในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะติดตามเป้าหมายโดยใช้ข้อมูลสุดท้ายที่มีอยู่ ก่อนที่เป้าหมายจะเคลื่อนที่ออกจากขอบเขตการมองเห็นของกล้องมาวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีความน่าจะเป็น เพื่อหาบริเวณที่เป้าหมายอยู่ หลังจากผ่านไปช่วงเวลานึง จากนั้นจึงส่งกล้องเคลื่อนที่ได้ ไปยังบริเวณนั้นเพื่อครอบคลุมเป้าหมายอีกครั้ง ในการสร้างระบบจำลองการทำงานจะมีการหาตำแหน่งของเป้าหมายโดยการตรวจจับ และตำแหน่งเฉลี่ยของกลุ่มอนุภาคในแต่ละสแต็ปการเคลื่อนที่ เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งจริง และตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์

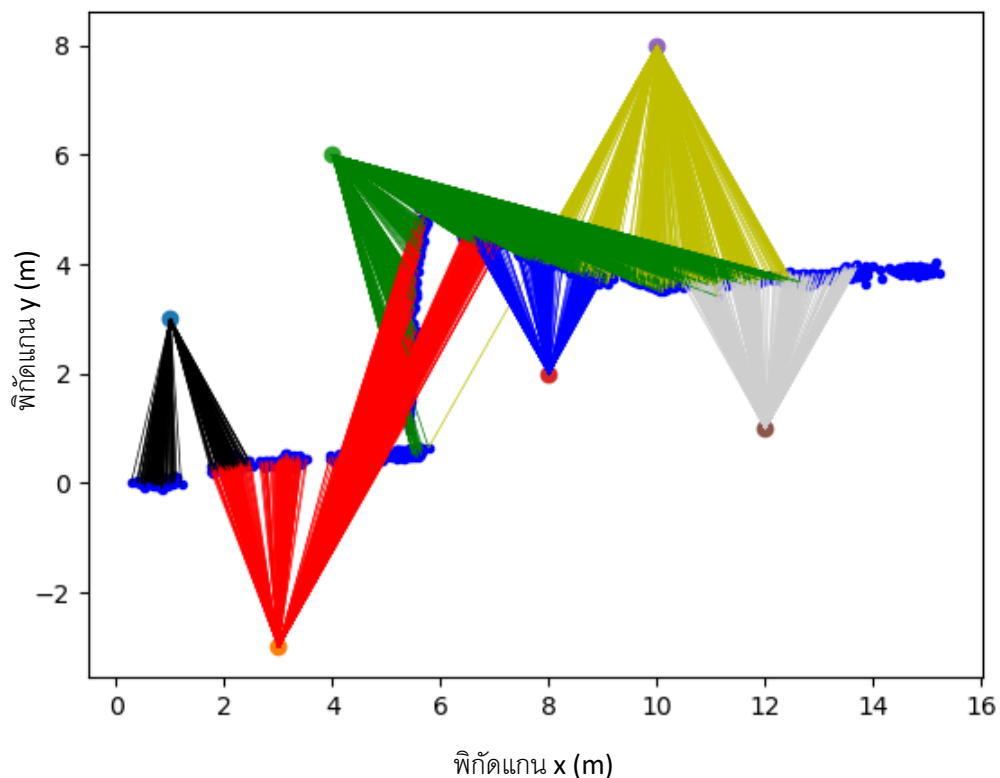
### 3.5 การจำลองการทำงานของระบบ

#### 3.5.1 กำหนดโมเดลเริ่มต้น

- ขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิด =  $\pm 45^\circ$
- ระยะการมองเห็นของกล้องวงจรปิด = 10m.
- มนุษย์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (1m. ต่อ step)
- จำนวนอนุภาคที่ใช้ในการจำลอง = 5000 (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 )
- $N_{eff} = 2500$

#### 3.5.2 การแสดงผลของการจำลอง

การแสดงผลในการจำลองเป็นการแสดงด้วยการพล็อต การพล็อตจะทำการเขียนโปรแกรมแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือการพล็อตกลุ่มอนุภาคของตำแหน่งที่เป็นไปได้ที่เป้าหมายจะอยู่ในแต่ละช่วงเวลา (Time Step) โดยในการจำลองได้กำหนดให้แต่ละช่วงเวลาเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ 1 เมตร และอีกชุดหนึ่งคือการพล็อตแสดงจุดของกล้องวงจรปิด และขอบเขตการมองเห็นของกล้องแต่ละตัวไปยังแต่ละอนุภาค เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าอนุภาคใดบ้างที่สามารถใช้กล้องวงจรปิดตัวใดเป็นตัววัดได้บ้าง โดยกำหนดให้กล้องวงจรปิดแต่ละตัวมีมุมมองการมองเห็น  $\pm 45$  องศา



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างผลที่ได้จากการจำลอง

### 3.6 การทดสอบ

เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบการติดตามด้วยระบบกล้องวงจรปิด เมื่อมีการเสริมกล้องเคลื่อนที่ได้เข้าไปในระบบ เปรียบเทียบกับระบบกล้องวงจรปิดปกติ และพิจารณาว่าการเพิ่มกล้องเคลื่อนที่ได้เข้าไปในระบบสามารถลดความผิดพลาดในการบอกริเวณของเป้าหมายได้มากน้อยเพียงใด จากผลการทดสอบระบบเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่จะทำการส่งกล้องเคลื่อนที่ไปนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะครอบคลุมเป้าหมายอีกครั้งหลังจากเป้าหมายไม่อยู่ในขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิด [35] จากนั้นจึงได้เริ่มต้นการทดสอบจริงที่ดำเนินการในพื้นที่ 300 ตารางเมตร โดยทำการติดตั้งกล้องวงจรปิดชนิดไอพี 4 ตัวทำหน้าที่ตรวจจับเป้าหมายตามเวลาจริง โดยกล้องเหล่านี้จะถูกติดตั้งในตำแหน่ง และทิศทางที่แตกต่างกันภายในห้อง ปกติแล้วการติดตั้งกล้องวงจรปิดต้องทำให้มุมมองการมองเห็นของกล้องครอบคลุมพื้นที่ได้มากที่สุด แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยตั้งใจเว้นช่วงบางพื้นที่ไว้เป็นจุดบอดของกล้อง เพื่อให้เห็นผลการทดสอบจากการเพิ่มกล้องเคลื่อนที่ได้เข้าไปในระบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากไม่สามารถหาตำแหน่งของกล้องที่เคลื่อนที่ไปด้วยได้จึงเลือกใช้กล้องเว็บแคมที่ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดตำแหน่งไว้ 2 จุดเพื่อใช้สำหรับการย้ายตำแหน่งระหว่างทำการทดสอบ และให้ระบบพิจารณาว่าจะใช้กล้องที่อยู่ตำแหน่งไหนในการเตรียมรับรู้ตำแหน่งของเป้าหมาย โดยใช้ระยะแบบยุคลิกระหว่างตำแหน่งกล้องกับตำแหน่งเป้าหมายจากการวิเคราะห์

### 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ 1) กล้องวงจรปิดชนิด IP (IP Camera) จำนวน 4 ตัว, 2) สายแลน CAT 6 จำนวน 4 เส้น ความยาว 20 เมตร 2 เส้น และ 15 เมตร 2 เส้น และสายแลน CAT 5E ความยาว 15 เมตร 1 เส้น 3) สวิตช์ POE (Power Over Ethernet) 1 ตัว 4) กล้องเว็บแคม (Webcam) จำนวน 1 ตัว, 5) ขาตั้งกล้อง, 6) คอมพิวเตอร์พกพา (Laptop) ASUS TUF Gaming FX504 RAM 8.00 GB และ 7) วัตถุที่มีสีแดงที่สามารถสวมใส่บริเวณศีรษะของเป้าหมายได้ เมื่อทำการทดสอบจะทำการติดตั้งกล้องวงจรปิดทั้ง 4 ตัวในตำแหน่ง และทิศทางที่ต่างกันบริเวณใต้เครื่องปรับอากาศของพื้นที่ทดสอบ ส่วนกล้องเว็บแคมต่อเข้ากับขาตั้งกล้อง และคอมพิวเตอร์พกพา เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถย้ายตำแหน่งของกล้องไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้ อุปกรณ์บางส่วนที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 3.6





รูปที่ 3.6 ก. กล้องเคลื่อนที่ได้ (กล้องเว็บแคม และคอมพิวเตอร์พกพา)



รูปที่ 3.6 ข. กล้องวงจรปิด (กล้อง IP)



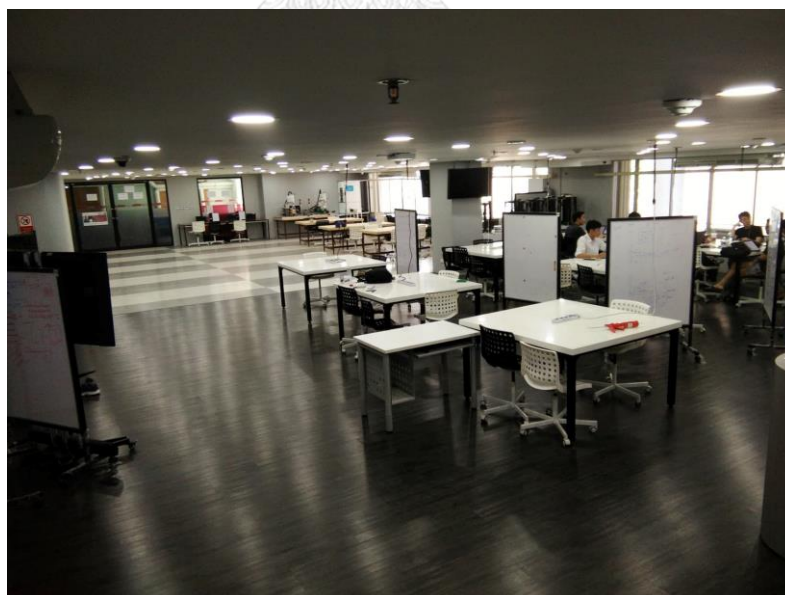
รูปที่ 3.6 ค. เป้าหมายการตรวจจับ

รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

หลังจากวางแผนการทดสอบการทำงานของระบบ สิ่งแรกที่ผู้วิจัยให้ความสนใจคือการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกล้องวงจรปิดในพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ ที่มีอยู่จำนวน 4 ตัวดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 ข. โดยปกติแล้วการติดตั้งกล้องวงจรปิดที่ตึ้นนั้นจะต้องทำให้มุมมองการมองเห็นของกล้องแต่ละตัวอยู่ในตำแหน่ง และทิศทางที่จะทำให้เห็นพื้นที่โดยรวมที่สนใจได้อย่างครอบคลุมมากที่สุดโดยใช้จำนวนกล้องวงจรปิดให้น้อยที่สุด แต่เพื่อให้สอดคล้องกับการทดสอบผู้วิจัยจึงตั้งใจทำการติดตั้งกล้องวงจรปิดแต่ละตัวในตำแหน่ง และทิศทางที่ทำให้การถ่ายภาพที่ได้ออกมานั้นไม่ครอบคลุมทั่วพื้นที่ทดสอบ เพื่อให้สามารถทำการทดสอบการหาบริเวณที่เป้าหมายอยู่เมื่อเป้าหมายหลุดพ้นจากการมองเห็นของกล้องวงจรปิดไปแล้วได้ เมื่อกำหนดพื้นที่ทดสอบเป็นพื้นที่ขนาด 12 x 24 เมตร พิกัดของกล้องแต่ละตัวมีแสดงในตารางที่ 3.1 และพื้นที่ทดสอบถูกแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 พิกัดในการติดตั้งกล้องวงจรปิดในหน่วยเมตร

หน่วย	เมตร			
กล้อง	1	2	3	4
ตำแหน่ง (x)	22.0	17.0	7.0	1.5
ตำแหน่ง (y)	0.0	0.0	12.0	0.0



รูปที่ 3.7 พื้นที่ทดสอบ

หลังจากหาตำแหน่งที่จะใช้ในการติดตั้งกล่องวงจรปิดได้แล้ว สิ่งต่อมาที่ต้องคำนึงถึงก็คือการคำนวณหาความยาวของสายแลนที่เหมาะสมที่ใช้ในการต่อจากสวิช POE ที่อยู่บริเวณกลางห้องที่เป็นพื้นที่ทดสอบไปยังกล่องแต่ละตัว และสายแลนที่ต่อจากเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังสวิช POE หลังจากการคำนวณความยาวสายแลนที่จำเป็นต้องใช้รวมกับความยาวเพื่อสำหรับการเดินสาย สามารถสรุปได้ดังนี้ กล่องตัวที่ 1 และตัวที่ 4 ใช้สายแลนยาว 20 เมตร ส่วนกล่องตัวที่ 2 และตัวที่ 3 ใช้สายแลนที่มีความยาว 15 เมตรเป็นสายแลนชนิด CAT 6 ต่อกออกจากสวิช POE และใช้สายแลนชนิด CAT 5E ความยาว 15 เมตรต่อจากเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังสวิช POE

เนื่องจากกล่องเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้กล่องเว็บแคมที่เชื่อมต่อไว้กับคอมพิวเตอร์พกพา และผู้วิจัยจะเป็นผู้เคลื่อนย้ายตำแหน่งด้วยตนเองจึงต้องมีการทำสัญลักษณ์ที่ตำแหน่งที่จะใช้ในการย้ายกล่องไปยังจุดที่กำหนดไว้ และเป็นการทำเพื่อที่จะได้ทราบตำแหน่งของกล่องขณะจับภาพด้วย โดยการพิจารณาหาตำแหน่งที่จะนำกล่องเคลื่อนที่ได้ไปติดตั้งนั้นสืบเนื่องมาจากการวางตำแหน่งของกล่องวงจรปิด จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยได้ตั้งใจให้มุมมองการมองเห็นของกล่องวงจรปิดมีมุมอับที่ไม่สามารถรับรู้ถึงข้อมูลตำแหน่งเป้าหมายในพื้นที่ทดสอบได้ ผู้วิจัยจึงได้ใช้บริเวณนั้นในการหาตำแหน่งที่จะทำสัญลักษณ์แสดงตำแหน่งที่จะทำการย้ายพิกัดของกล่องเคลื่อนที่

หลังจากได้ทำการพิจารณาผู้วิจัยจึงเลือกตำแหน่งในการทำสัญลักษณ์เพื่อเตรียมการย้ายที่ของกล่องเคลื่อนที่ได้สองจุดด้วยกันคือที่ตำแหน่งคือที่พิกัด (12.75, 5) และ (4.68, 0.82) เมตร



รูปที่ 3.8 มุมมองด้านบนของพื้นที่ทดสอบ และสัญลักษณ์ในรูป

เมื่อทราบตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งกล่องวงจรปิด และจุดวางสัญลักษณ์สำหรับการย้ายกล่องเคลื่อนที่แล้ว การสอบเทียบกล้องเพื่อหาค่าของสมการภายใน และสมการภายนอกของกล้องที่ตำแหน่งต่างๆ นั้นต้องการเพื่อเป็นการทำให้โปรแกรมคำนวณสามารถรับรู้ถึงตำแหน่งของกล่องแต่ละตัวขณะทำการจับภาพได้ และเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการรับรู้ถึงตำแหน่งของเป้าหมายด้วยการตรวจจับสีโดย Pinhole Model ตัวแปรภายในของกล้องแต่ละตัวสำหรับการแก้ความบิดเบี้ยวของเลนส์แสดงในตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรภายใน (Intrinsic Parameter) ของกล้องแต่ละตัวในงานวิจัยนี้

กล้อง	1	2	3	4	เคลื่อนที่
ระยะ โฟกัส ( $f_x$ ; มิลลิเมตร)	343.21	349.32	463.56	347.28	641.12
ระยะ โฟกัส ( $f_y$ ; มิลลิเมตร)	340.16	349.16	460.27	346.88	640.07
จุดมูขยสำคัญแกน x ( $C_x$ )	390.38	399.87	407.51	392.65	299.75
จุดมูขยสำคัญแกน y ( $C_y$ )	223.61	213.44	208.41	212.09	227.23
การเลี้ยวเบนตามรัศมี ( $k_1$ )	-0.3139	-0.3154	-0.4946	-0.3315	0.0431
การเลี้ยวเบนตามรัศมี ( $k_2$ )	0.1177	0.2311	0.5600	0.3879	0.3985

### 3.8 สรุปตัวแปรเริ่มต้น และเงื่อนไขต่างๆ สำหรับการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ

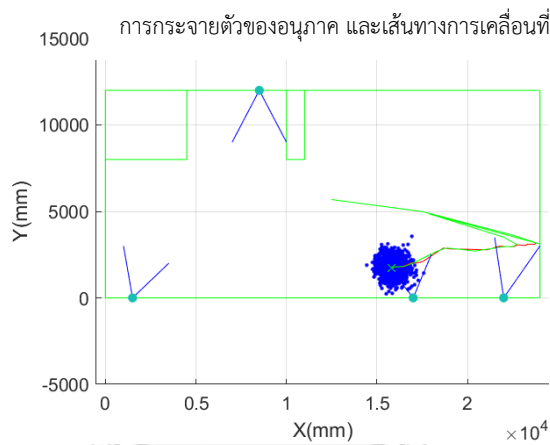
ตัวแปรเริ่มต้นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

- จำนวนอนุภาค = 5000 อนุภาค (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 )
- กำหนดจำนวนอนุภาคที่มีประสิทธิภาพไว้ว่า ถ้าจำนวนอนุภาคที่มีประสิทธิภาพมีค่าน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนอนุภาคทั้งหมดจะทำการ Resampling
- ถ้าวัดระยะมากกว่า 5 เมตร ระบบจะทำการสั่งให้ใช้กล้องเคลื่อนที่ได้
- ความกว้างของกลุ่มอนุภาค ขณะที่ระบบสามารถรับรู้ถึงเป้าหมายได้ = 2 เมตร
- ความสูงของผู้ทดสอบที่ถูกติดตาม = 180 เซนติเมตร แต่ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าความสูงของมนุษย์ ( $Z$ ) ใน Pinhole Model = 170 เซนติเมตร เพื่อเป็นการเผื่อความคลาดเคลื่อนกับความสูงของมนุษย์เฉลี่ยในเอเชีย
- เนื่องจากไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่งจริงของเป้าหมาย ณ เวลานั้นๆ ได้ จึงใช้การกำหนดตำแหน่งบนพื้น และให้ผู้ทดสอบเดินไปยังจุดที่ได้ทำการกำหนดไว้
- หลังจากเป้าหมายเคลื่อนที่ผ่านขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิดไปแล้ว จะใช้สมมติฐานที่ว่า มนุษย์จะเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมตรงไปเท่าที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ = 1 เมตรต่อวินาที
- ดำเนินการทดสอบในพื้นที่ทดสอบขนาด 12 x 24 ตารางเมตร พื้นที่ทดสอบแสดงในรูปที่ 3.6

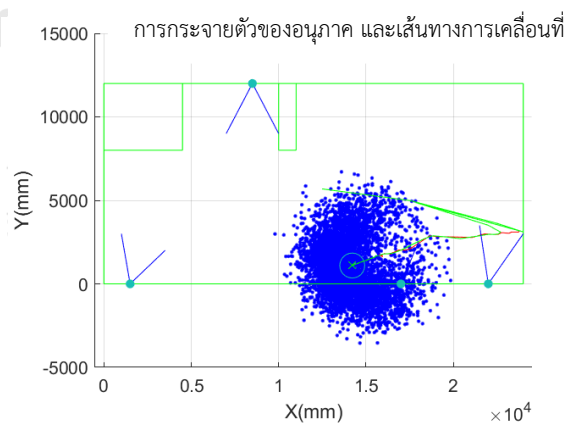
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ

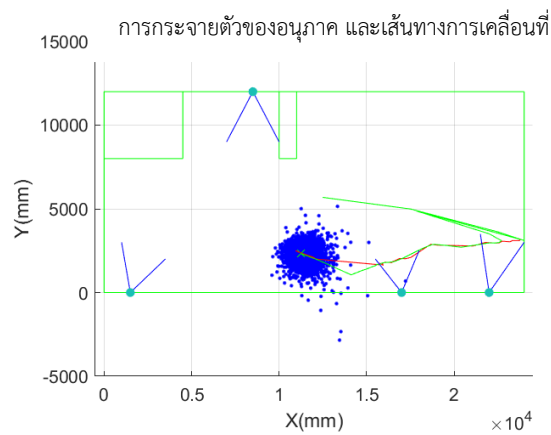
ผลการทดสอบจะเป็นการแสดงให้เห็นว่ากล้องเคลื่อนที่สามารถครอบคลุมเป้าหมายได้อีกครั้ง หลังจากเป้าหมายเดินผ่านขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิดหรือไม่ โดยแสดงผลเป็นการกระจายตัวของอนุภาค ถ้าหากกล้องเคลื่อนที่สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์กลุ่มอนุภาคที่กระจายตัวอยู่จะกลับมารวมกันบริเวณที่เป้าหมายอยู่ขณะนั้น จากนั้นจะนำข้อมูลพิกัดที่ได้จากการทดสอบตามเฟรมภาพที่ถ่ายได้มาทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทาง (Distance Error) ระหว่างตำแหน่งจริง และตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์โดย MCL ตัวอย่างผลการทดสอบดังกล่าวแสดงด้านล่างนี้



รูปที่ 4.1 ก. การกระจายตัวของอนุภาคเมื่อกล้องสามารถรับรู้ถึงเป้าหมายได้



รูปที่ 4.1 ข. การกระจายตัวของอนุภาคเมื่อเป้าหมายเดินผ่านกล้องวงจรปิดไปแล้ว



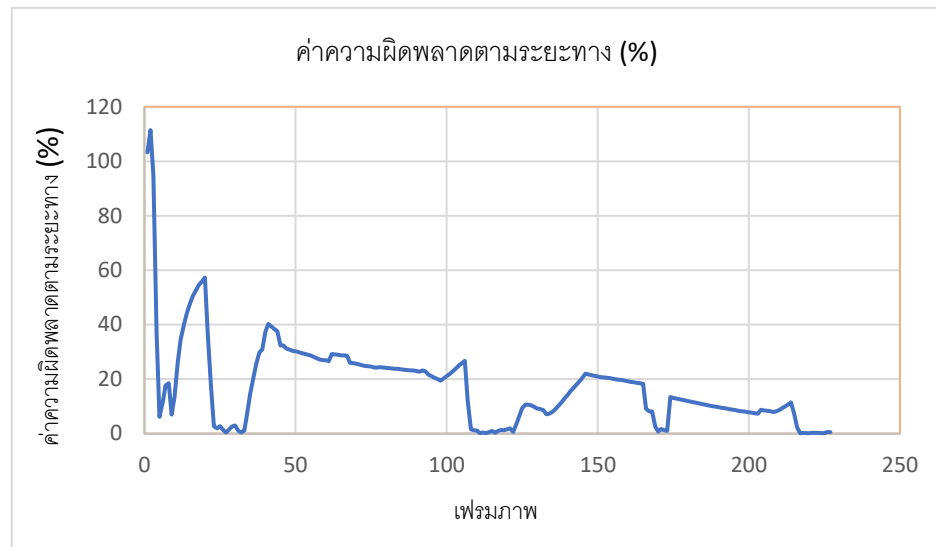
รูปที่ 4.1 ค. การกระจายตัวของอนุภาคเมื่อระบบสามารถรับรู้ได้ถึงเป้าหมายอีกครั้ง

รูปที่ 4.1 การแสดงผลของการทดสอบ

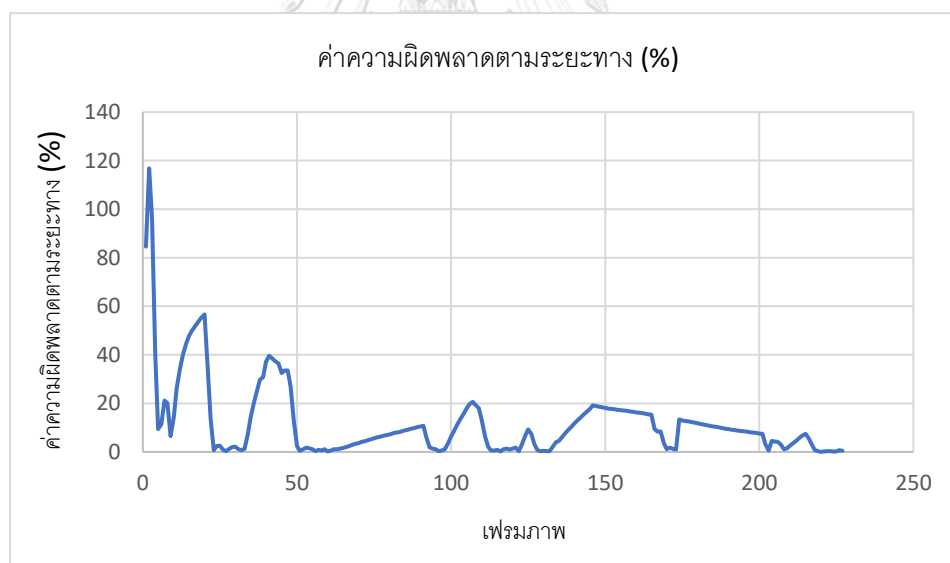
รูปที่ 4.1 ก. แสดงกลุ่มการกระจายของอนุภาคเมื่อกล้องสามารถตรวจจับเป้าหมายได้ รูปที่ 4.1 ข. แสดงกลุ่มของอนุภาคเมื่อเป้าหมายหายไปจากของเขตการมองเห็นของกล้อง ปัจจุบันทราบเพียงว่าแต่ละอนุภาคมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นตำแหน่งของเป้าหมายเมื่อรอยเมทริกซ์เริ่มมีค่ามากขึ้นระบบจะแสดงพิกัดที่มีความเป็นไปได้ที่จะเห็นเป้าหมายอีกครั้ง และส่งกล้องเคลื่อนที่ไปยังพิกัดนั้น ถ้าสามารถค้นหาเป้าหมายเจอ การกระจายตัวของอนุภาคจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.1 ค.



รูปที่ 4.2 ก. เส้นทางการเดินรูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.2 ข. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 1



รูปที่ 4.2 ค. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 1

รูปที่ 4.2 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 1



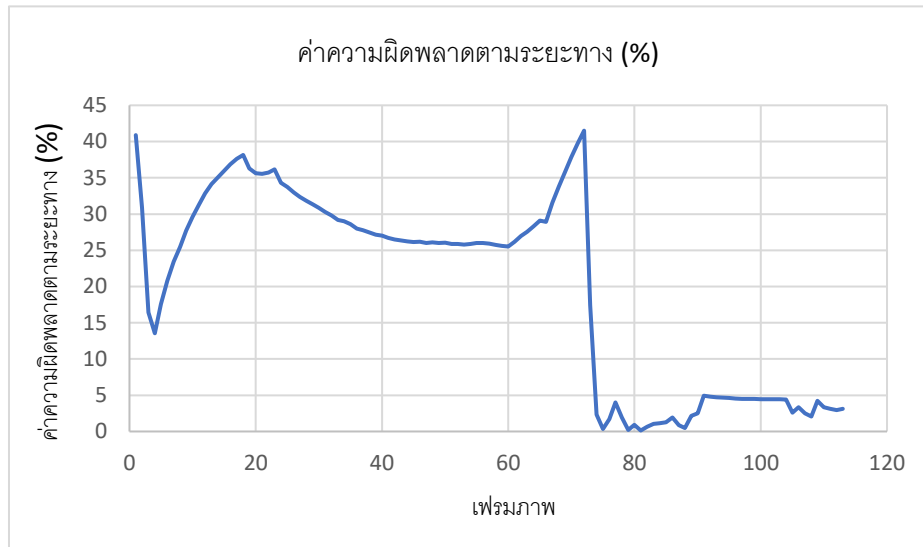
จากรูปที่ 4.2 ก. และ ข. คือกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางที่เป้าหมายเคลื่อนที่กรณีไม่มีกล้องเคลื่อนที่ในระบบ และกรณีที่มีกล้องเคลื่อนที่ในระบบตามลำดับ ในรูปแบบการเคลื่อนที่ที่เหมือนกันของเป้าหมาย เมื่อแกน  $x$  แสดงเฟรมของภาพที่ถ่ายได้จากกล้องวงจรปิด และแกน  $y$  แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทาง เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.2 ก. กับรูปที่ 4.2 ข. จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.2 ก. จะมีช่วงที่ค่าความผิดพลาดสูงกว่า จะเห็นได้อย่างชัดเจนในช่วงเฟรมประมาณเฟรมที่ 50 ถึง 100 นั่นคือช่วงที่เป้าหมายได้หายไปจากการมองเห็นของกล้องวงจรปิดเป็นระยะเวลาหนึ่ง แต่การที่ได้เพิ่มกล้องเคลื่อนที่เข้าไปในระบบทำให้ช่วงเหล่านั้นมีค่าความผิดพลาดลดลง เนื่องจากตัวกล้องเคลื่อนที่ที่สามารถครอบคลุมเป้าหมายได้อีกครั้งในบริเวณที่เป้าหมายไม่อยู่ในขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิด

เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นกับผลการทดสอบที่ได้มา ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบในรูปแบบการเดินที่แตกต่างกันอีก 4 รูปแบบ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทาง และเฟรมภาพของการทดสอบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.6 ด้านล่างนี้ โดยรูปชุด ก. และ ชุด ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดกับเฟรมภาพ กรณีที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่ได้อยู่ในระบบ และมีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบตามลำดับ

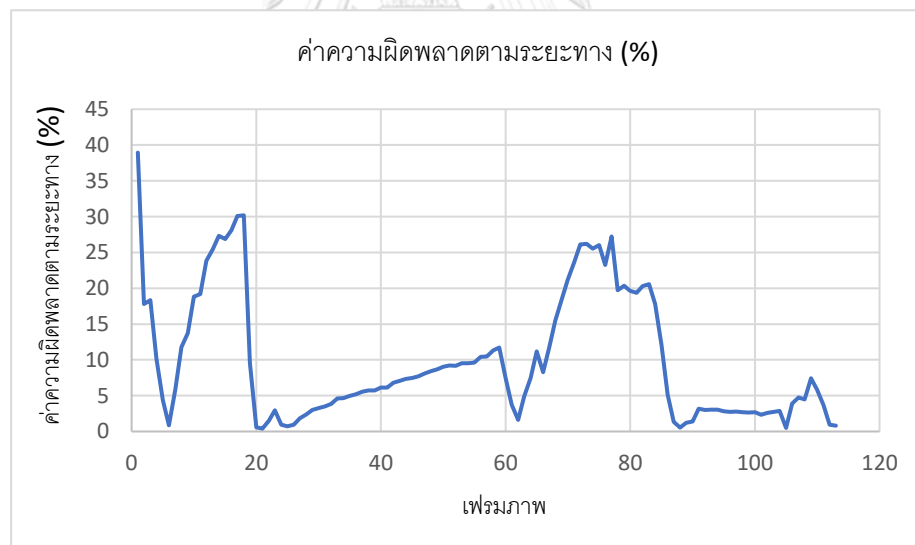


รูปที่ 4.3 ก. เส้นทางการเดินรูปแบบที่ 2



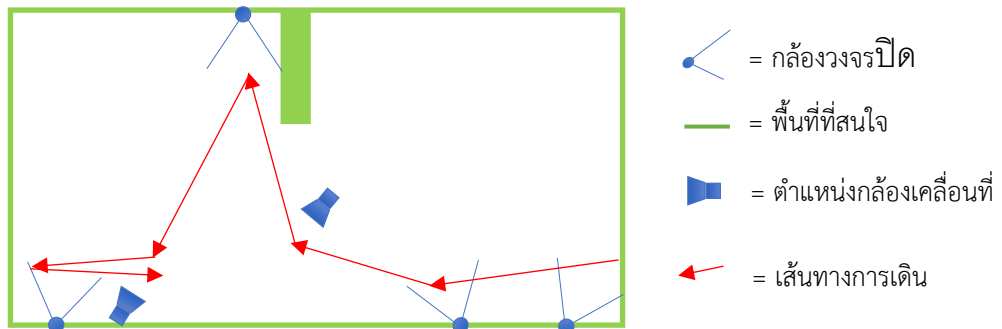


รูปที่ 4.3 ข. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 2

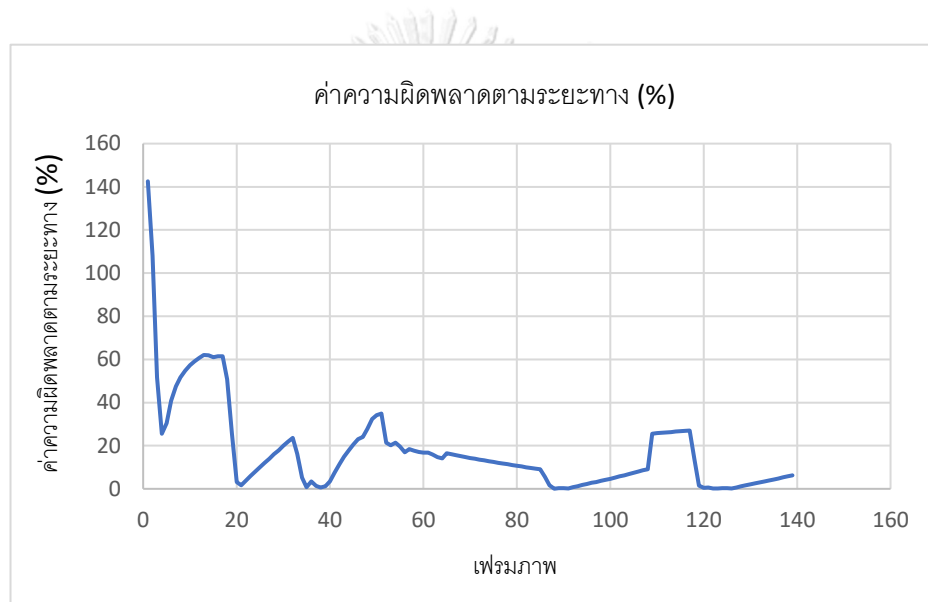


รูปที่ 4.3 ค. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 2

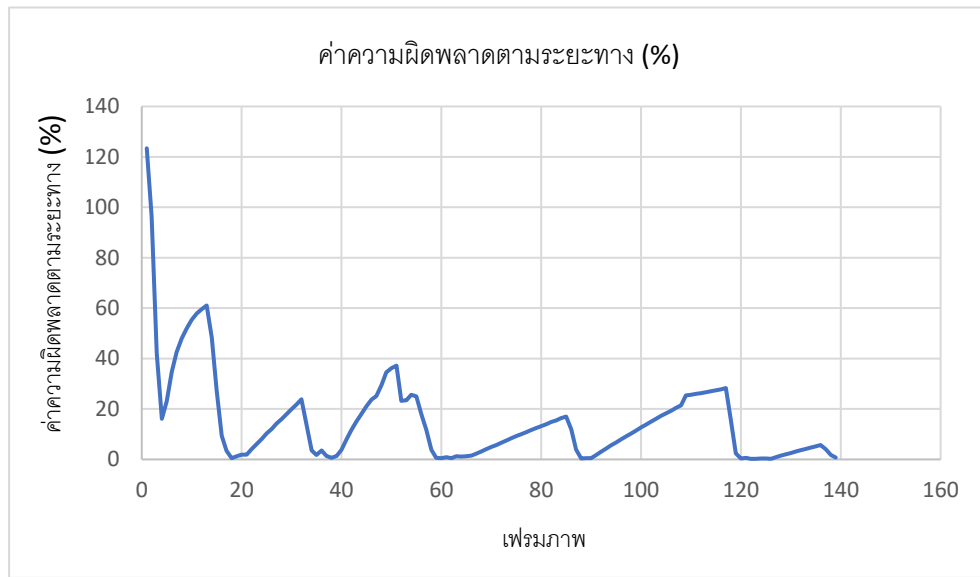
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 2



รูปที่ 4.4 ก. เส้นทางเดินรูปแบบที่ 3

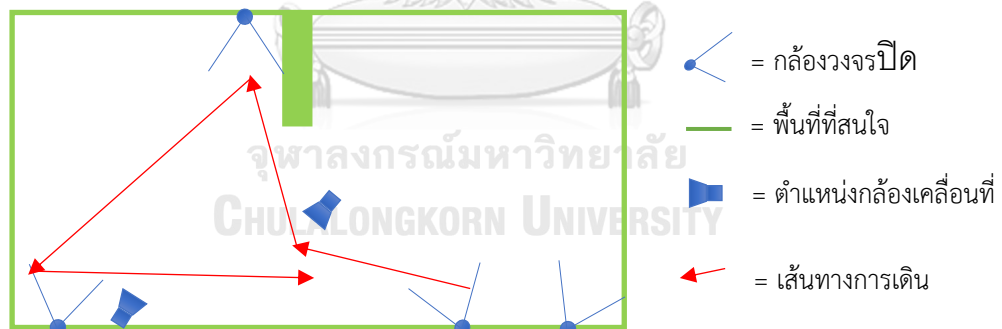


รูปที่ 4.4 ข. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 3

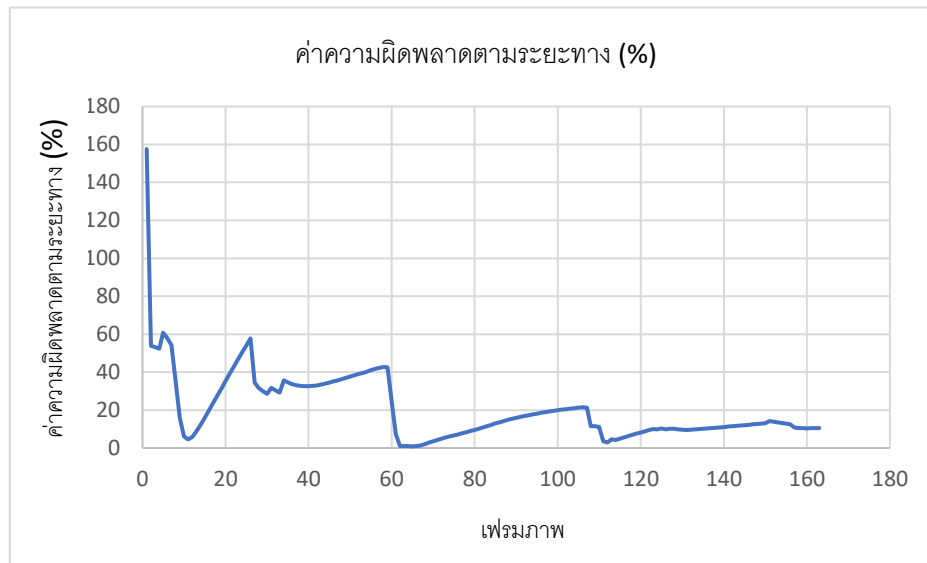


รูปที่ 4.4 ค. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 3

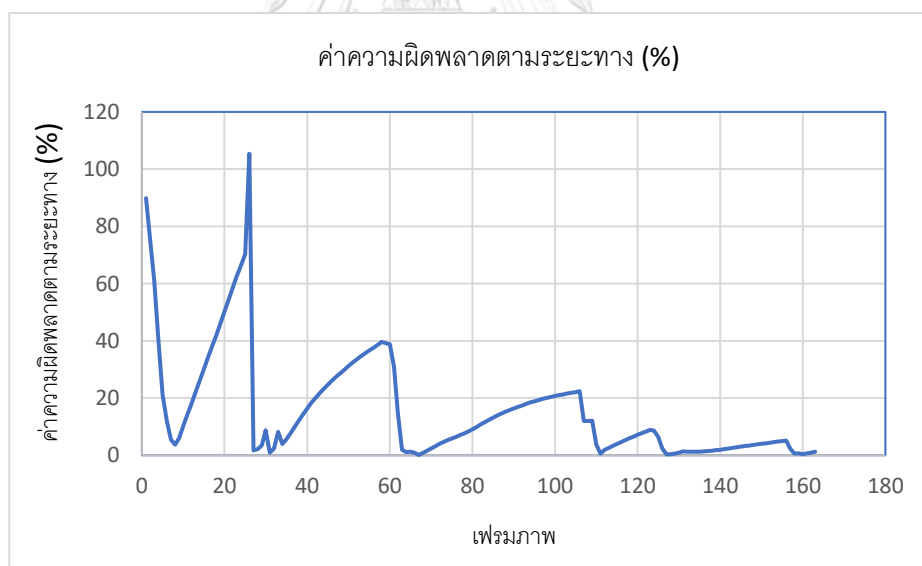
รูปที่ 4.4 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 3



รูปที่ 4.5 ก. เส้นทางการเดินรูปแบบที่ 4

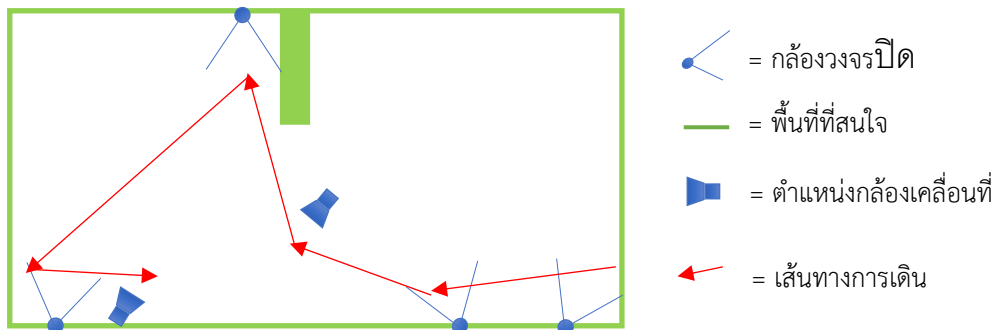


รูปที่ 4.5 ข. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่ไม่มีกล่องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 4

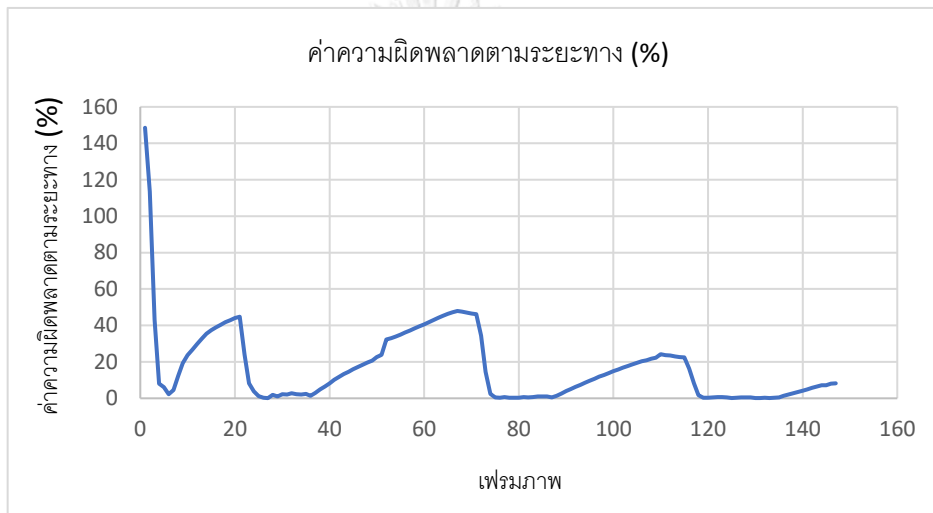


รูปที่ 4.5 ค. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่มีกล่องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 4

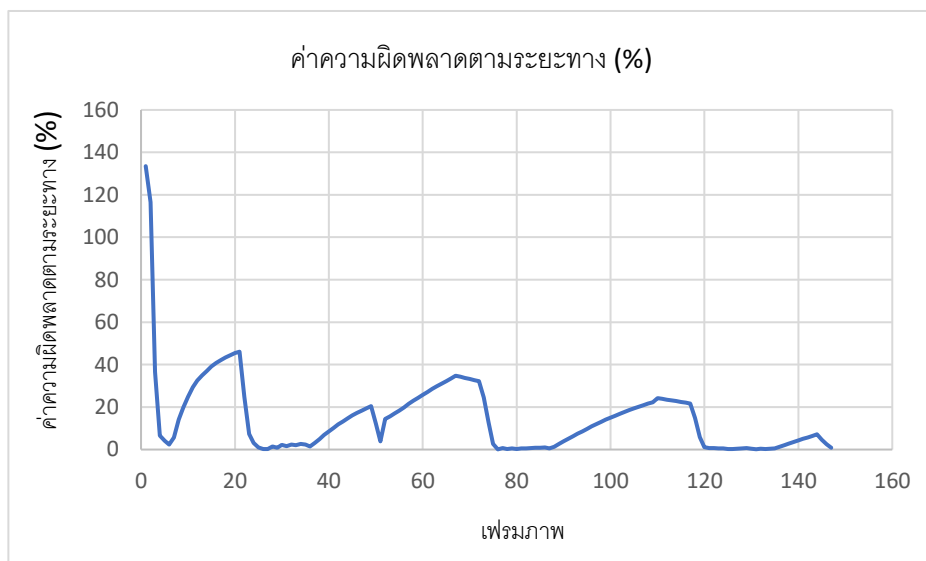
รูปที่ 4.5 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 4



รูปที่ 4.6 ก. เส้นทางเดินรูปแบบที่ 5



รูปที่ 4.6 ก. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 5



รูปที่ 4.6 ข. กราฟแสดงค่าความผิดพลาดตามระยะทางในกรณีที่มีกล้องเคลื่อนที่อยู่ในระบบของการเดินรูปแบบที่ 5

รูปที่ 4.6 รูปแบบการเดิน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางกับเฟรมภาพ ของการเดินรูปแบบที่ 5

จากค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากผลการทดสอบที่แสดงข้างต้น การเคลื่อนที่ของเป้าหมายรูปแบบที่ 2 ในรูปที่ 4.3 เป็นชุดผลการทดสอบที่ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างการที่มี และไม่มีกล้องเคลื่อนที่ในระบบได้ชัดเจนที่สุด เปรียบเทียบกับระหว่างรูปที่ 4.3 ก. และ ข. หลังจากตรวจจับเป้าหมายได้ในครั้งแรก เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงสุดของระบบที่มีกล้องเคลื่อนที่มีค่า 30.17 % ในทางตรงกันข้ามในกรณีที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่มีค่าสูงถึง 41.5 %

ในรูปแบบการเดินอื่นๆ ก็เช่นกัน ถึงแม้จะเห็นไม่ชัดเจนเท่ารูปที่ 4.3 แต่ก็เห็นได้ว่ามีบางช่วงของเฟรมที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดลดลงอย่างรวดเร็วเข้าใกล้ถึง 0 % เมื่อเทียบกับกรณีที่ระบบไม่มีกล้องเคลื่อนที่ดังที่เห็นในกราฟข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากการมีกล้องเคลื่อนที่ช่วยในการหาเป้าหมายได้ในบริเวณที่กล้องวงจรปิดมองไม่เห็น



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างภาพที่กล้องเคลื่อนที่ครอบคลุมเป้าหมายได้

ตารางด้านล่างนี้แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ยของทั้ง 5 รูปแบบการเดินที่ได้ทำการทดสอบและอธิบายไว้ในบทที่ผ่านมา ทั้งรูปแบบที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ในระบบ และรูปแบบที่มีกล้องเคลื่อนที่ได้ที่อยู่ในระบบ

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ย

เส้นทางการเดิน	ค่าความผิดพลาดตามระยะทางเฉลี่ย (%)	
	ไม่มีกล้องเคลื่อนที่ได้	มีกล้องเคลื่อนที่ได้
1	17.61	11.82
2	20.00	9.89
3	17.53	15.17
4	20.43	15.68
5	16.80	14.86
ค่าเฉลี่ย	18.474	13.484

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างการทดสอบที่มีกล้องเคลื่อนที่ได้ และการทดสอบที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่ได้ จะสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดของทั้งห้ารูปแบบการทดสอบจะลดลงไม่มากนักน้อยเมื่อนำกล้องเคลื่อนที่ได้เข้ามาในระบบ และจากค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของการทดสอบทั้งห้าครั้งจะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของการทดสอบที่มีกล้องเคลื่อนที่ได้ในระบบมีค่าน้อยกว่าการทดสอบที่ไม่มีกล้องเคลื่อนที่ได้อยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นการพิสูจน์ได้ว่าเมื่อนำกล้องเคลื่อนที่ได้เข้ามาเสริมในระบบกล้องวงจรปิดเดิมที่มีอยู่ จะทำให้มีโอกาสที่จะติดตามเป้าหมายที่ออกจากขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิดไปแล้วครั้งหนึ่งได้มากกว่าการไม่มีกล้องเคลื่อนที่ได้ในระบบ

## บทที่ 5

### สรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดช่องโหว่ระบบรักษาความปลอดภัย และติดตามบุคคล โดยออกแบบ และทดสอบการทำงานร่วมกันของกล้องวงจรปิด และกล้องเคลื่อนที่ได้ ด้วยการติดตามเป้าหมาย และคาดการณ์พื้นที่ของเป้าหมายหลังจากเดินผ่านขอบเขตการมองเห็นของกล้องวงจรปิดไปแล้ว และสามารถใช้กล้องเคลื่อนที่ได้ไปยังตำแหน่งที่เหมาะสม และสามารถครอบคลุมเป้าหมายได้อีกครั้ง ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการลดช่องโหว่ของระบบรักษาความปลอดภัยโดยกล้องวงจรปิด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากที่กล่าวข้างต้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่สนใจเรื่องการแยกแยะวัตถุจึงเรื่องใช้การตรวจจับวัตถุด้วยสี แต่การตรวจจับเป้าหมายด้วยการตรวจจับสีนั้นอาจทำให้การหาตำแหน่งของเป้าหมายเกิดความผิดพลาดได้ ถ้าในขอบเขตการมองเห็นของกล้องมีวัตถุที่มีสีเดียวกับวัตถุที่สนใจที่เป้าหมายสวมใส่ขณะทำการทดสอบ และถึงแม้ว่าจะมีวัตถุที่มีสีตรงกับที่กำหนดไว้เพียงวัตถุเดียวแต่ขณะที่เป้าหมายเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ อาจมีบางมุมมองที่ระบบมองเห็นว่าวัตถุที่มีขึ้นเดี่ยวนั้นมีสองชิ้นเนื่องจากแสงและเงาของสภาพแวดล้อมขณะนั้น หรือมุมมองของกล้องที่มีต่อตัววัตถุก็เป็นได้ ผู้วิจัยพบว่าการทดสอบบางรอบเกิดเหตุการณ์ที่กล่าวข้างต้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่โดยรวมของเป้าหมายมีค่ามากกว่าที่ควรจะเป็นทำให้การคำนวณที่ผิดพลาด หากนำไปใช้ในสถานการณ์จริงควรพัฒนาระบบในการตรวจจับโดยวิธี Object Recognition หรือ Face Recognition ช่วยในการตรวจจับเป้าหมาย จะหมดปัญหาเรื่องการแยกแยะวัตถุทันที

ถึงจะมีการตรวจจับเป้าหมายด้วยสีแต่การตรวจจับก็มีระยะที่ระบบสามารถอ่านได้ ทำให้ถึงแม้ว่าจะเห็นเป้าหมายจะเดินเข้ามาในขอบเขตของกล้องวงจรปิดแล้วแต่ระบบตรวจจับสีก็ยังไม่ทำงานจนกว่าเป้าหมายจะเข้าสู่ระยะที่เหมาะสมมากพอที่ระบบจะมองเห็นวัตถุเป็นสีที่กำหนดได้

ในการทดสอบนี้ไม่มีวิธีที่จะสามารถทำให้รู้ถึงพิกัดจริงที่เป้าหมายเคลื่อนที่ ณ เวลานั้นๆ ได้ จึงต้องใช้การกำหนดตำแหน่งที่ผู้ทดสอบจะเคลื่อนที่ไว้ล่วงหน้าเป็นช่วงๆ และให้ผู้ทดสอบเดินไปยังจุดที่ได้ทำการกำหนดไว้ ซึ่งอาจทำให้การรับรู้ถึงตำแหน่งจริงผิดเพี้ยนไป ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณหาค่าความผิดพลาดโดยรวมตามระยะทาง (Total Distance Error)



ปัญหาที่พบอีกอย่างหนึ่งคือการใช้หน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยจนถึงขีดความสามารถตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.7 ทำให้ด้วยเหตุนี้ทำให้การวิเคราะห์เกิดความล่าช้า สาเหตุมีที่มาจากการทำงานของคอมพิวเตอร์ต้องรับภาพตามเวลาจริงจากกล้องวงจรปิดถึง 4 ตัวที่เชื่อมต่อกับสัญญาณเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของพื้นที่ที่ทำการวิจัย รวมกับการใช้จำนวนอนุภาคในการวิเคราะห์ถึง 5000 อนุภาค การแก้ไขปัญหานี้อาจทำได้โดยการลดจำนวนอนุภาคในการวิเคราะห์ลง แต่การทำวิธีนี้จะทำให้ความแม่นยำของระบบลดลง ซึ่งอาจจะทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้มาก ดังนั้นการแก้ไขที่เหมาะสมควรเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์เอง เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น



## บรรณานุกรม

- [1] S. Minaeian, J. Liu, and Y.-j. Son, "Vision-Based Target Detection and Localization via a Team of Cooperative UAV and UGVs," *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS*, vol. 46, no. 7, pp. 1005-1016, 2016.
- [2] T. K. L. P. Martin Saska, "Cooperative  $\mu$ UAV-UGV autonomous indoor.pdf," ed, 2012.
- [3] S. Minaeian, J. Liu, and Y.-j. Son, "Crowd Detection and Localization Using a Team of Cooperative UAV / UGVs," pp. 1-12, 2015.
- [4] B. Y. B. E. N. Grocholsky, J. Keller, V. Kumar, and G. Pappas, "A Scalable Approach to the Detection and Localization," *IEEE Robotics & Automation Magazine* 1070-9932/06/\$20.00©2006, no. September, pp. 16-26, 2006.
- [5] Cosmotech. (2014). *10 Different Types of CCTV Cameras and Their Purposes*. Available: <https://cosmotechph.wordpress.com/2014/09/08/10-different-types-of-cctv-cameras-and-their-purposes/>
- [6] Ayarafun. (2010). *why UAV is come back*. Available: <http://www.ayarafun.com/2010/03/uav-is-comim-back/>
- [7] J. Keller, "Navy orders new batch of unmanned ground vehicle (UGV) robots from QinetiQ for bomb disposal," 20 Oct. 2016 2016.
- [8] D. Gatica-perez, J.-m. Odobez, and G. Lathoud, "T RACKING PEOPLE IN MEETINGS WITH PARTICLES," 2005.
- [9] Q. Mei-bin and Z. Rui, "Moving object localization with single camera based on height model in video surveillance," ... , 2007. *ICBBE 2007. The ...*, no. 60474035, pp. 490-493, 2007.
- [10] C. H. Chen, T. Y. Chen, J. C. Lin, and D. J. Wang, "People tracking in the multi-camera surveillance system," *Proceedings - 2011 2nd International Conference on Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications, IBICA 2011*, pp. 1-4, 2011.
- [11] G. D. C. L. Q. L. Q. Y. Jianqiang Li and M. Zhong, "A Hybrid Path Planning Method in Unmanned," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 65, no.

- 12, pp. 9585-9596, 2016.
- [12] Droneista. (2019). *Hexacopter vs Quadcopter: Understanding Different Kinds Of Drones*. Available: <https://droneista.com/hexacopter/>
- [13] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "Monte Carlo localization for mobile robots," *file:///home/jl/Downloads/05354638.pdfProceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*, vol. 2, pp. 1322-1328, 1998.
- [14] Wikipedia. (2015). *Global Positioning System*. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)
- [15] S. V. Xipeng Wang and E. Olson, "FLAG: Feature-based Localization between Air and Ground," *Proceedings of the {IEEE} International Conference on Robotics and Automation ({ICRA})*, pp. 3178-3184, 2017.
- [16] T. Teixeira, D. Jung, A. Savvides, H. Ave, and N. Haven, "Tasking Networked CCTV Cameras and Mobile Phones to Identify and Localize Multiple People," *10 Hillhouse Ave New Haven, CT*, pp. 213-222, 2010.
- [17] A. T. a. Equipment. *our track record speaks for itself*. Available: [http://www.aspecttechnology.com/thermal\\_Alpha.htm](http://www.aspecttechnology.com/thermal_Alpha.htm)
- [18] M. o. help. *Camera Matching*. Available: [https://learn.foundry.com/modo/902/content/help/pages/rendering/camera\\_matching.html](https://learn.foundry.com/modo/902/content/help/pages/rendering/camera_matching.html)
- [19] M. N. D. Faisal Bukhari "Automatic Radial Distortion Estimation from a Single Image," *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol. 45, no. 1, pp. 31-45, 2013.
- [20] J. H. Juho Kannala, Sami S. Brandt, "Geometric Camera Calibration," *Published in Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, 2008.
- [21] C. A. a. H. R. Max Roser. (2013). *Human Height*. Available: <https://ourworldindata.org/human-height>
- [22] S. Calderara, R. Cucchiara, and A. Prati, "Bayesian-competitive consistent labeling for people surveillance," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 354-360, 2008.

- [23] P. Elinas and J. J. Little, "OMCL: Monte-Carlo localization for mobile robots with stereo vision," *In Proceedings of Robotics: Science and Systems.*, pp. 373-380., 2005.
- [24] D. Montemerlo, S. Thrun, and W. Whittaker, "Conditional particle filters for simultaneous mobile robot localization and people-tracking," *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, vol. 1, no. May, pp. 695-701 vol.1, 2002.
- [25] M. H. T. M. H. Tan and S. Ranganath, "Multi-camera people tracking using Bayesian networks," *Fourth International Conference on Information, Communications and Signal Processing, 2003 and the Fourth Pacific Rim Conference on Multimedia. Proceedings of the 2003 Joint*, 2003.
- [26] W. B. Sebastian Thrun and F. Dieter, "Instructor : Alexander Stoytchev," pp. 39-39, 2005.
- [27] A. Y. Olaf Placha, Prashant Shukla, Prashant Singh and Sourya Dipta Das. (2017). *How we used Kalman filter for detecting Indian road lane at night ?* . Available: <https://medium.com/giscle/how-we-used-kalman-filter-for-detecting-indian-road-lane-at-night-990206c5d668>
- [28] J.-A. Ting, E. T. , and S. S. , "A Kalman Filter for Robust Outlier Detection," *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 6, 2007.
- [29] S. Kwanmuang<sup>1</sup> and a. E. Olson<sup>2</sup>, "Maximum Likelihood Tracking of a Personal Dead-Reckoning System," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6106-6112, 2015.
- [30] W. B. Sebastian Thrun and F. Dieter, "Probabilistic Robotics."
- [31] E. Orhan, "Particle filtering," *Signal Processing ...*, no. 1, pp. 1-6, 2003.
- [32] J. M. Lutin, A. L. Kornhauser, and E. Lerner-Lam, "The Revolutionary Development of Self- Driving Vehicles and Implications for the," *ITE Journal*, no. July, pp. 5-5, 2013.
- [33] V. Novak and G. S.-d. Car, "Google self-driving car 1."
- [34] W. Warren, B. Fajen, and D. Belcher, "Behavioral dynamics of steering, obstacle

avoidance, and route selection," *Journal of Vision*, vol. 1, no. 3, pp. 184-184, 2010.

- [35] S. K. Natchapon Santayakorn, and Arsit Boonyaprapasorn "Increase of Pedestrian Tracking Performance in the Stationary Close-Circuit Camera System Using Mobile Camera System," *The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering (ICoME 2018)*, vol. 9, pp. 446-451, 2018.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัชพนธ์ สันตยากร
วัน เดือน ปี เกิด	6 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนชินนรสวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554 จากนั้นเข้าศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ เอกวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร หลังจบการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีป้องกันประเทศจนถึงปัจจุบัน
ที่อยู่ปัจจุบัน	511/242 ซอยจรัญสนิทวงศ์ 37, ถนนจรัญสนิทวงศ์, แขวงบางขุนศรี, เขต บางกอกน้อย
ผลงานตีพิมพ์	TSME-ICoME 2018