

การพัฒนาต้นแบบวิธีการนำร่องในสวนยางพาราด้วยเทคนิคการประมวลผล  
ภาพร่วมกับการติดตั้งเป้าถาวรบนลำต้นไม้

A DEVELOPMENT OF NAVIGATION METHOD FOR RUBBER TREE ORCHARD  
USING AN IMAGE PROCESSING TECHNIQUE WITH MOUNTED  
TARGETS ON THE TREE TRUNKS

วรวิทย์ กิ่งหัน  
WORAWUT KUNGHUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2565  
KMITL-2022-EN-D-058-077

A DEVELOPMENT OF NAVIGATION METHOD FOR RUBBER TREE ORCHARD  
USING AN IMAGE PROCESSING TECHNIQUE WITH MOUNTED  
TARGETS ON THE TREE TRUNKS

WORAWUT KUNGHUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2022  
KMITL-2022-EN-D-058-077

COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาต้นแบบวิธีการนำร่องในสวนยางพาราด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับการติดตั้งเป้าถาวรบนลำต้นไม้
นักศึกษา	นายวรวิทย์ กังหัน
รหัสนักศึกษา	59601321
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพจน์ ตันตราภิววัฒน์

### บทคัดย่อ

ยางพาราเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งมีต้นทุนการผลิตหลักเป็นค่าแรงในการเก็บเกี่ยว การพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับสวนยางพาราจะสามารถช่วยลดต้นทุนได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองแผนสำหรับการนำร่องในสวนยางพาราด้วยระบบอัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับหลักการกล้องรูเข็มซึ่งง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้เซ็นเซอร์ราคาแพง การประมวลผลหาตำแหน่งจะใช้กล้องเพียงตัวเดียวเพื่อจับภาพเป้าหมายสีแดงสองชิ้นซึ่งถูกติดตั้งห่างจากกันในแนวตั้งบนลำต้นของต้นยางพารา โดยที่ระยะห่างของเป้าหมายจะมีผลต่อความแม่นยำต่อตำแหน่งด้วย ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างระยะของเป้าที่ต่างกันคือ 0.5 และ 0.7 เมตร ระยะของเป้าหมายสีแดงทั้งสองส่งผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำร่องของระบบอัตโนมัติในสวนยาง ซึ่งพารามิเตอร์คือตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่ของกล้องขนานกับแนวแถวต้นไม้ม การศึกษานี้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองแผนสำหรับการนำร่องในสวนยางพาราด้วยการประมวลผลภาพซึ่งการทดลองมีการเปรียบเทียบระหว่างในห้องทดลองและพื้นที่เพาะปลูกจริง ระบบการทำแผนที่เกิดข้อผิดพลาดของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) สูงสุด 43.06 มิลลิเมตร ในสภาพแวดล้อมการควบคุมในห้องทดลอง และ 114.57 มิลลิเมตร ในสวนยางพาราจริงจากการทดลองใช้ระบบการประมวลผลภาพเพื่อนำร่องระบบอัตโนมัติที่ความเร็วต่ำผลการทดลองสามารถนำร่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดของข้อผิดพลาดสำหรับการนำร่องถือว่ายอมรับได้สำหรับการนำระบบอัตโนมัติมาใช้งานเช่น การให้น้ำ การใส่ปุ๋ย และการเก็บเกี่ยว

<b>Thesis Title</b>	A development of navigation method for rubber tree orchard using an image processing technique with mounted targets on the tree trunks
<b>Student</b>	Mr. Worawut Kunghun
<b>Student ID.</b>	59601321
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2022
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr.Akapot Tantrapiwat

## **ABSTRACT**

Natural rubber farming is one of the most important industrial crops in Thailand, and its productivity depends greatly on the labor cost of harvest. The development of automatic systems for rubber plantations may result in labor cost reductions. This work aims to develop a mapping model and navigation system for the automation of natural rubber plantations using image processing technology incorporated with a pin-hole camera principle, which is simple and doesn't require expensive sensors. The image processing process uses a single camera to capture two separated red targets mounted vertically on the rubber tree trunk. The distance of the red target will also affect the accuracy of the position. In this study, a comparative experiment was conducted between the two different distances of 0.5 and 0.7 meters. The distances of the two red targets affect the parameters used for navigation of the autonomous system. These parameters are the camera position and movement parallel to the tree row. This study can evaluate the effectiveness of the mapping model for the rubber plantation that was also compared between the laboratory and the actual orchard plantation. The mapping system was able to achieve an RMS maximum error of 43.06 millimeters in a controlled laboratory environment and 114.57 millimeters in an actual plantation site. Experiments of autonomous system at slow speeds can navigate using results from mapping models. The size of the error is acceptable for automatic agricultural tasks such as watering, fertilizing, and harvesting.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพจน์ ตันตราภิญโญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือคำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ แหล่งผู้ให้ข้อมูลสำหรับการปลูกยางพารา และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอบคุณสถานที่สำหรับการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและอุตสาหกรรม ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตลอดจนทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพิพัฒน์ - คุณแม่พองจันทร์ กังหัน และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง และทุกๆ ด้าน ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรวิฑู กังหัน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	6
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	7
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1.1 ลักษณะต้นยางพารา และการปลูกยางพารา	8
2.1.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
3.1 ลักษณะการปลูกของสวนยางพารา	23
3.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต	23
3.1.2 หลักเกณฑ์สำหรับการปลูกยางพารา	23
3.1.3 ขนาดของต้นยางที่สามารถเริ่มกรีดยางได้	23
3.1.4 การวางแผนการปลูกยางพารา	24
3.2 ทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole Theory)	24
3.2.1 พื้นฐานทฤษฎีรูเข็ม	24
3.3 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)[	26
3.3.1 การประมวลผลภาพดิจิทัล	26
3.3.2 การสกัดคุณลักษณะพิเศษจากภาพ (feature extraction)	29
3.3.3 Unsharp mask	31
3.3.4 หลักการทำงานของกล้อง	33

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.5 ส่วนประกอบของกล้อง	33
3.3.6 ความหมายและความสำคัญของความยาวโฟกัส (Focal length)	33
3.3.7 ข้อมูลและคุณสมบัติของกล้องที่เลือกใช้มาทำการทดลอง	33
3.4 LabVIEW myRIO	34
3.4.1 Connector Pinouts	35
3.5 MatLab	37
3.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)	38
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	
4.1 แผนการดำเนินงาน	43
4.2 ลักษณะทางกายภาพของสวนยางพาราสำหรับงานวิจัย	45
4.3 การออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่ในสวนยางพารา	46
4.4 การทำแผนที่สวนยางพารา (Rubber tree orchard mapping)	48
4.5 การแปลงสมการทางคณิตศาสตร์ ด้วยทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model)	50
4.6 Camera visual localization using pinhole model technique	53
4.7 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)	57
4.8 การออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ	62
4.8.1 การออกแบบจำลองเส้นทางเดินของยานพาหนะในห้องปฏิบัติการ	62
4.8.2 การออกแบบต้นยางพาราจำลอง	63
4.9 การออกแบบการทดลองในสวนยางพารา	65
4.9.1 การออกแบบจำลองเส้นทางเดินของยานพาหนะในสวนยางพารา	65
4.9.2 การสร้างเป้าบนลำต้นยางพารา	66
4.10 การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)	67
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
5.1 ผลการทดลองของความแม่นยำในการระบุมุมของกล้อง ในการทำแผนที่ โดยใช้การประมวลผลทางภาพเทียบกับการวัดด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) และความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ $X_T$ และ $L_T$ ที่สัมพันธ์กับมุมกล้องที่ติดตั้ง	75
5.2 ผลการทดลองประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์ $X_T$ และ $L_T$ โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model)	79
5.3 ผลการทดลองประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์ $S_O$ และ $S_T$ โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) เมื่อมุมกล้องมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง	82

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $S_0$ และ $S_T$ บนพื้นที่ทดสอบ โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) ในห้องปฏิบัติ การและในสวนยางพารา	85
5.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ (performance) ของการทำแผนที่ในห้อง ปฏิบัติการ และสวนยางพารา	88
5.6 การทดลองหาค่าความไม่แน่นอนของการระบุระยะของพารามิเตอร์ $L_T$ และ $X_T$ ในห้องปฏิบัติการ	90
5.7 การเอียงของลำต้นเป้าหมายส่งผลต่อผิดพลาดส่งผลต่อพารามิเตอร์ $X_T$	92
5.8 ความสัมพันธ์ของการตั้งค่าการเอียงของมุมกล้อง $\theta$ ที่ติดตั้งที่ผิดพลาด ส่งผลต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง $S_0$ และ $S_T$	95
5.9 ความสัมพันธ์การของระยะการปลูกตามแนวแถว ( $D_R$ )และ พารามิเตอร์ระบุงศาของรถ ( $\theta$ )	97
บทที่ 6 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 เปรียบเทียบลักษณะกานำทางและเทคโนโลยีทางได้การนำทางของระบบอัตโนมัติ	100
6.2 อภิปรายผลการทดลอง	101
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพื่อและสิ่งที่ต้องพัฒนาในอนาคต	104
เอกสารอ้างอิง	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST, 4-7 July 2018	108
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ The 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST, 2-5 July 2019	116
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์วารสาร International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)	123
ภาคผนวก ง. ภาคผนวก ง โค้ดโปรแกรม MATLAB สำหรับการประมวลผลภาพ	145
ภาคผนวก จ. ภาพตัวอย่างการทดลองในห้องปฏิบัติการ และสวนยางพารา	150
ประวัติผู้เขียน	167

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทย	1
1.2 ราคาขางพาราแผ่นรมควันชั้น 3 ในช่วงปี 2542 – 2564	2
2.1 การกำหนดระยะเวลาการต้นปลูขางพารา	10
3.1 Descriptions of Signals on MXP Connectors A and B	36
3.2 Descriptions of Signals on MXP Connectors C	37
3.3 คุณสมบัติการปรับค่าพารามิเตอร์ของอัตราขยายในระบบควบคุมพีไอดี	39
4.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่	54
4.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method)	70
4.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ (PID)	70
5.1 แสดงผลการทดสอบโดยการสอบเทียบมุมของการประมาณด้วยการประมวลผลทางภาพเทียบกับกับเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)	77
5.2 แสดงผลการทดลองที่ 1 ลองประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อกล้องมีความคลาดเคลื่อนในทิศทางขึ้นลง 0 องศา	83
5.3 แสดงผลการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อกล้องมีความคลาดเคลื่อนในทิศทางขึ้น +5 องศา	83
5.4 แสดงผลการทดลองที่ 3 ประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อกล้องมีความคลาดเคลื่อนในทิศทางลง -5 องศา	84
5.5 แสดงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของค่าความผิดพลาดในเชิงสถิติ	88
5.6 แสดงผลการทดลองในสวนขางพาราของค่าความผิดพลาดในเชิงสถิติ	89
5.7 แสดงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในการประมาณค่า $L_T$ และ $X_T$	91
5.8 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดเมื่อมีการประมาณค่า $X_p$ จากการประมวลผลภาพผิดพลาดส่งผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณจากสมการรูเข็ม $X_T$	94
5.9 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของการระบุมุม $\theta$ เทียบกับพารามิเตอร์นำทางพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง $S_o$ และ $S_T$	96
5.10 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของการระบุมุม $\theta$ เทียบกับพารามิเตอร์นำทางพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณจากการประมวลผลทางภาพร่วมกันทฤษฎีกล้องรูเข็ม $X_F$ และ $X_N$	99

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การกรีดยางหน้าสูง และการใส่ปุ๋ยระหว่างแถวของต้นยางพารา	3
1.2 ลักษณะของการปลูกต้นยางพารา	3
2.1 (ก) แนวท่อน้ำภายในเปลือก (ข) การกรีดที่ไม่ถูกต้อง (ค) การกรีดที่ถูกต้อง	8
2.2 (ก) การกรีดยางหน้าสูงโดยใช้บันไดขึ้นไปกรีดที่ระดับ ความสูง 2.5 - 3.0 เมตร กรีดลงโดยใช้มีดเจาะบง (ข) ลักษณะรอยกรีด	9
2.3 (ก) มุมมองของหุ่นยนต์รถสวนผลไม้แสดงการติดตามสวนผลไม้ในแนวแถว (ข) การบังคับเลี้ยวสำหรับเส้นทางเลี้ยวของรถสวนผลไม้	11
2.4 Experimental setup: simulated nursery tree plantation, and calibration platform	12
2.5 Modular structure for a system to guide agricultural vehicle autonomously	12
2.6 Schematic diagram of the robot tractor and its research components; PC, Personal computer; RTK-GPS, real-time kinematic global positioning system; ECU, electronic control unit;RS 232C, recommended standard 232 connector	13
2.7 Flowchart of lines detection and tracking algorithm and INS/Odometry/ LiDAR system	14
2.8 The simulated environment, around tree trunk center and edges	14
2.9 CoroWare Explorer platform with on-board sensors and samples of the ROI for colour and edge detection respectively	15
2.10 Graphical representation of the positions of the trees with respect to the mobile robot in the orchard environment and orchard mapping algorithm	16
2.11 Mobile robot and embedded sensors, crop row tracking operation and Fusion result for crop points detection	17
2.12 Measurement principle of offset and heading angle in the forward FOV and lateral FOV	18
2.13 The Robot System and the navigation path	19
2.14 Representative results of path area segmentation in citrus orchard, patch-based path detection in an orchard	20
2.15 Segmentation of general object recognition	21
2.16 Regression-type Attention Branch Network	21
2.17 Schematic explanation of the Particle filter	22
2.18 Orchard environment model	22

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 การวางแผนการปลูกยางพารา	24
3.2 Pinhole camera geometry. C is the camera center and p the principal point. The camera center is here placed at the coordinate origin. Note the image plane is placed in front of the camera center	24
3.3 Image $(x, y)$ and camera $(x_{cam}, y_{cam})$ coordinate systems	25
3.4 การมองเห็นสีของวัตถุจากตา	26
3.5 การผสมสีแบบบวก	27
3.6 สีปฐมภูมิแบบลบ	27
3.7 ลักษณะค่าในแต่ละจุดภาพของภาพระดับสีเทา	28
3.8 Pixel coordinate	29
3.9 indexed image	30
3.10 RGB image	30
3.11 intensity image	31
3.12 Binary image	31
3.13 schema for Unsharp masking, (ก) original image (ข) The image after Unsharp masking	32
3.14 Logitech HD Pro Webcam C920	33
3.15 NI myRIO-1900	35
3.16 Primary/Secondary Signals on MXP Connectors A, B and C	35
3.17 Block Representation of a PID Controller	38
3.18 ผลตอบสนองของสัญญาณอินพุตทดสอบขั้นบันได	40
4.1 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงาน	43
4.2 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงาน(ต่อ)	44
4.3 ลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการปลูกของสวนยางพารา	45
4.4 การออกแบบลักษณะการทำงานของระบบอัตโนมัติในสวนยางพารา	46
4.5 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model	47
4.6 Vertical vision mapping object plane of the orchard geometry model	48
4.7 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model	48
4.8 Vertical vision mapping object plane of the orchard geometry model	50
4.9 Pinhole camera model for target position estimation	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 Two separate red targets fixed on each rubber tree and projected on the image frame	53
4.11 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model	55
4.12 Vertical vision mapping object plane of the orchard geometry model	56
4.13 Horizontal vision mapping object plane of the orchard for orientation	56
4.14 ลักษณะการทำแผนที่แบบเป้าเดี่ยวติดตั้งบนลำต้นยาพารา	57
4.15 ลักษณะการทำแผนที่แบบเป้าเดี่ยวติดตั้งบนลำต้นยาพารา	58
4.16 การประมวลผลภาพรูปแบบเป้าหมายวงกลม	59
4.17 การประมวลผลภาพรูปแบบเป้าหมายแบบบาร์โค้ด	59
4.18 Image processing methods used in the target detection	60
4.19 Image processing methods used in the target detection	61
4.20 Experimental layout used during laboratory testing	63
4.21 Testing area using world coordinate in the laboratory	64
4.22 Orchard experimental setup in the orchard	65
4.23 Example installation of metal plates on rubber tree trunks	66
4.24 Red targets installed on each rubber tree trunk for testing	66
4.25 (ก) ส่วนประกอบโครงสร้างหลักของยานพาหนะอัตโนมัติสำหรับทดสอบ (ข) ส่วนประกอบของชุดควบคุมของยานพาหนะอัตโนมัติสำหรับทดสอบ	67
4.26 ตัวควบคุม PID แบบขนานสำหรับการควบคุมยานพาหนะอัตโนมัติ	69
4.27 ผลตอบสนองของกระบวนการ	69
4.28 Flowchart ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะอัตโนมัติตามแนวแถวตรง	71
4.29 Front panel ของโปรแกรมทดสอบ	71
4.30 Block diagram ของโปรแกรมทดสอบ	72
4.30 Block diagram ของโปรแกรมทดสอบ (ต่อ)	73
5.1 (ก) Horizontal vision mapping (ข) Vertical vision mapping	76
5.2 ภาพการทดสอบโดยการสอบเทียบมุมของการประมาณด้วยการประมวลผลทางภาพกับ เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)	76
5.3 กราฟการทดสอบโดยการสอบเทียบมุมของการประมาณด้วยการประมวลผลทางภาพเทียบกับ เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)	78

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 กราฟแสดงความไม่แน่นอน (uncertainty) ของ $X_T$ -direction และ $L_T$ -direction ที่ระยะห่างของเป้าหมาย (target length) 0.7, 0.5 and 0.3 เมตร	79
5.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (percent error) ของ $X_T$ -direction ที่ ระยะห่างของเป้าหมาย (target length) 0.7, 0.5 and 0.3 เมตร	80
5.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (percent error) ของ $X_T$ -direction ที่ ระยะห่างของเป้าหมาย (target length) 0.7, 0.5 and 0.3 เมตร	80
5.7 ภาพการทดลองเมื่อกล้องเข้าไปใกล้เป้าหมาย	81
5.8 ภาพตัวอย่างการทดลองมุมกล้อง +5 องศา	82
5.9 ภาพตัวอย่างการทดลองมุมกล้อง -5 องศา	82
5.10 The magnitude of error in area testing for controlled environment (Laboratory testing)	85
5.10 The magnitude of error in area testing for controlled environment (Laboratory testing) (ต่อ)	86
5.11 The magnitude of error in area testing for controlled environment (Orchard testing)	87
5.12 Mapping performance results in laboratory testing	89
5.13 Mapping performance results in orchard testing	90
5.14 Pinhole camera model for target position estimation	91
5.15 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model	91
5.16 Pinhole camera model for target position estimation	92
5.17 ภาพขาวดำ (binary image frame) ของการทดลองที่ $r_o$ เท่ากับ 500 มิลลิเมตร, $r_T$ เท่ากับ 1000 มิลลิเมตร และ $\theta$ เท่ากับ 30 องศา	93
5.18 ลักษณะการประมวลผลผิดพลาดจากสภาพแสงและการเอียงของลำต้นยางพารา	93
5.19 เฟรมภาพเมื่อต้นยางพาราอยู่ไกลสุดของกล้อง	95
5.20 เฟรมภาพเมื่อต้นยางพาราอยู่ใกล้สุดของกล้อง	95
5.21 Horizontal vision mapping object plane of the orchard for orientation	97

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 (ก) ภาพการทดลอง $s_o$ เท่ากับ 500 mm และ $s_r$ เท่ากับ 1000 mm (ข) ภาพการทดลอง $s_o$ เท่ากับ 500 mm และ $s_r$ เท่ากับ 2000 mm. (ค) ภาพการทดลอง $s_o$ เท่ากับ 500 mm และ $s_r$ เท่ากับ 3000 mm (ง) ภาพการทดลอง $s_o$ เท่ากับ 500 mm และ $s_r$ เท่ากับ 4000 mm (จ) ภาพการทดลอง $s_o$ เท่ากับ 500 mm และ $s_r$ เท่ากับ 5000 mm (ฉ) ภาพการทดลอง $s_o$ เท่ากับ 500 mm และ $s_r$ เท่ากับ 6000 mm	98
6.1 (ก) Horizontal vision mapping (ข) Vertical vision mapping	101
6.2 ตัวอย่างพื้นที่ทดลองจริงในสวนยางพารา	102

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$x$	โคออร์ดิเนต $x$
$y$	โคออร์ดิเนต $y$
$z$	โคออร์ดิเนต $z$
$S_T$	ระยะกล้องเป้าหมายขนานกับแถวต้นไม้ (The target-camera distance parallel to the tree row)
$S_o$	ระยะห่างระหว่างกล้องกับแถวต้นไม้ (The target-camera distance parallel to the tree row)
$\theta$	การตั้งค้ำมุมของกล้องที่สัมพันธ์กับแถวต้นไม้
$\theta_c$	มุมการหมุนของกล้องที่สัมพันธ์กับแถวต้นไม้
$\alpha_H$	มุมมองแนวนอนของกล้อง (A horizontal field of view (HFOV))
$\alpha_V$	มุมมองแนวตั้งของกล้อง (A vertical field of view (HFOV))
$h_T$	ความสูงของเป้าหมายในระบบพิกัดโลก (The height of the target in the world coordinate system)
$L_T$	ระยะทางจากเป้าหมายถึงรูเข็ม (The distance of the target to the pinhole)
$X_T$	ระยะห่างของเป้าหมายไปยังศูนย์กลางของเฟรมภาพ (The distance of the target to the center of frame)
$d_c$	ความสูงจากพื้นถึงกล้องในระบบพิกัดโลก (The height of the floor to camera in the world coordinate system)
$H_R$	ความกว้างของเป้าหมาย (The wide of the target)
$X_P$	ความยาวพิกเซลระหว่างจุดศูนย์กลางของภาพกับตำแหน่งของเป้าหมายที่แสดงในเฟรมภาพในแนวนอน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ต้นยางพารา (Para rubber) เป็นพืชชนิดไม้ยืนต้นขนาดกลาง มีความสูงประมาณ 10-20 เมตร สามารถปลูกได้ในทุกภาคของประเทศไทย เดิมพื้นที่ที่มีการปลูกยางส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้และภาคตะวันออก แต่ในปัจจุบันมีการขยายการปลูกเพิ่มขึ้นไปยังภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในปัจจุบันยางพารานับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สร้างรายได้ให้กับประเทศ เป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างรายได้หลักของประเทศไทย นับตั้งแต่ปี 2534 อุตสาหกรรมยางพาราที่ใหญ่ที่สุดอยู่ในประเทศไทย และมีบทบาทสำคัญในฐานะผู้ส่งออกยางรายใหญ่ [1,2] จากสถิติยางประเทศไทย ที่รวบรวมโดยกองการยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จะเห็นว่าปริมาณการส่งออกและปริมาณการใช้ยางพาราในประเทศเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการผลผลิตมีปริมาณที่สูงขึ้น

ตารางที่ 1.1 ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทย

เมตริกตัน Metrictons					
ปี	ปริมาณการผลิต	ปริมาณการส่งออก	ใช้ในประเทศ	สต็อก	ปริมาณนำเข้า
2552	3,164,379	2,726,193	399,415	293,659	3,167
2553	3,252,135	2,866,447	458,637	227,252	6,542
2554	3,569,033	2,952,381	486,745	361,557	4,398
2555	3,778,010	3,121,332	525,052	516,675	3,492
2556	4,170,428	3,664,941	520,628	502,855	1,321
2557	4,323,975	3,770,646	541,003	516,675	1,578
2558	4,473,370	3,749,456	600,491	642,895	2,717
2559	4,536,965	3,594,076	617,269	671,168	2,653
2560	5,131,710	4,443,283	653,243	708,386	2,034
2561	5,083,036	4,507,457	631,635	661,340	1,462
2562	4,736,498	4,035,830	663,084	832,402	1,723

ยางแปรรูปที่มีความสำคัญมาก คือ ยางแท่งและยางแผ่นรมควัน ชั้น 3 (RSS3) โดยยางแท่งเป็นสินค้าส่งออกของไทยที่สร้างมูลค่าสูงสุดในกลุ่มยางพารา ขณะที่แผ่นรมควันชั้น 3 เป็นสินค้าที่ไทยผลิตและส่งออก ยางแผ่นรมควัน ชั้น 3 (RSS3) ซึ่งเป็นยางแปรรูปขั้นต้น ที่ประเทศไทยผลิตได้ส่วนใหญ่ซึ่งมีคุณภาพปานกลาง ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตยางยานพาหนะ ที่ส่งออกมากที่สุด โดยที่ราคายางแผ่นรมควันชั้น 3 ในช่วงปี 2542 – 2564 ค่อย ๆ ปรับราคาสูงขึ้นและมีราคาสูงที่สุดในปี 2554

ตารางที่ 1.2 ราคายางพาราแผ่นรมควันชั้น 3 ในช่วงปี 2542 – 2564

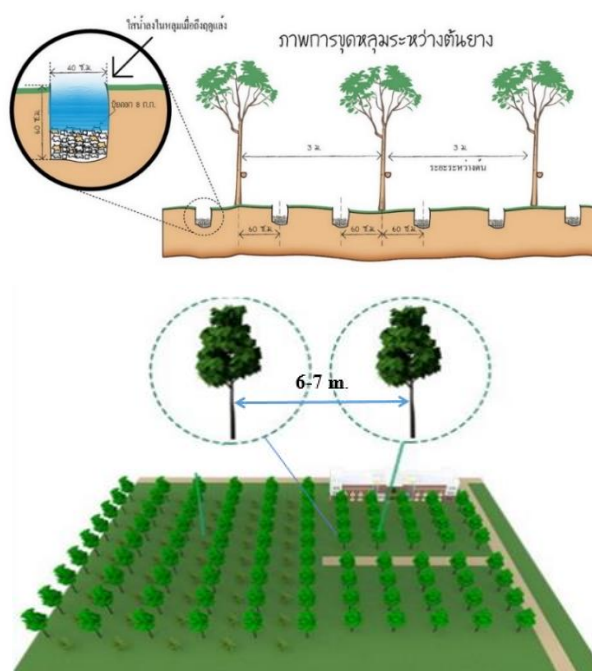
หน่วย : บาท/กิโลกรัม					
ปี	ราคาเฉลี่ย	ปี	ราคาเฉลี่ย	ปี	ราคาเฉลี่ย
2542	18.12	2550	68.90	2558	44.17
2543	25.53	2551	73.66	2559	48.81
2544	20.52	2552	58.47	2560	55.81
2545	27.69	2553	102.76	2561	40.96
2546	37.76	2554	124.16	2562	41.04
2547	44.13	2555	84.15	2563	44.85
2548	53.57	2556	74.75	2564	54.74
2549	66.24	2557	53.93		

อย่างไรก็ตามแม้ว่ายางพาราไทยจะมีส่วนแบ่งทางการตลาดมาก แต่ไทยไม่สามารถเป็นผู้กำหนดราคายางพาราที่ส่งออกได้ เนื่องจากโครงสร้างตลาดที่มีผู้ซื้อน้อยรายและการพึ่งพิงตลาดส่งออกต่างประเทศ ทำให้ราคายางไทยขึ้นอยู่กับราคายางในตลาดโลก โดยเฉพาะการอ้างอิงราคาที่มาจากตลาดล่วงหน้า เช่น Tokyo Commodity Exchange (TOCOM), Singapore Commodity Exchange (SICOM) และ Future Exchange of Thailand (AFET) [3] เมื่อรัฐบาลไม่มีอำนาจในการต่อรองราคายาง ทำให้เกษตรกรเผชิญกับความเคลื่อนไหวของราคายางอันเนื่องมาจากความผันแปรของราคายาง และความไม่แน่นอนเกี่ยวกับรายได้และแนวโน้มต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากนโยบายของภาครัฐ

ซึ่งในรอบหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยได้มีการยกระดับค่าแรงขั้นต่ำให้สูงขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีผลกระทบต่อเกษตรกร นอกจากนี้อุตสาหกรรมของประเทศไทยกำลังประสบปัญหาจากผลกำไรที่ต่ำซึ่งมีต้นทุนในกระบวนการเก็บเกี่ยวน้ำยาง การบำรุงรักษาต้นยางเป็นงานที่ต้องใช้แรงงานคน เพื่อเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรและลดต้นทุนด้านแรงงานคนได้ เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาแก้ไขปัญหาเพื่อลดต้นทุนทางด้านแรงงานคนได้ และยกระดับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตน้ำยางพาราให้มีความทันสมัยขึ้น



รูปที่ 1.1 การกรีดยางหน้าสูง และการใส่ปุ๋ยระหว่างแถวของต้นยางพารา[1]



รูปที่ 1.2 ลักษณะของการปลูกต้นยางพารา[1]

จากปัญหาดังกล่าวการเลือกเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติสำหรับสวนยางพาราเข้ามาช่วยถือเป็นแนวทางที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ โดยส่วนที่สำคัญที่สุดของการออกแบบยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในสวนยางพารา คือ การพัฒนาวิธีการนำร่องในสวนยางพาราต้นแบบในห้องปฏิบัติการโดยควบคุมสถานะสิ่งแวดล้อมและการทดลองไปเปรียบเทียบกับ การทดลองในสวนยางพาราจริง เพื่อใช้สำหรับนำทางของระบบเคลื่อนที่ของยานพาหนะเพื่อใช้ทำภารกิจต่างๆ ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด เนื่องจากความซับซ้อนของภูมิประเทศบนพื้นที่เพาะปลูกที่ ยานพาหนะ ซึ่งต้องเคลื่อนที่ไปในบริเวณตามแนวแถวของสวน นอกจากนี้ปัจจัยที่ทำนายคือการ ออกแบบระบบที่มีต้นทุนต่ำ เพื่อใช้สำหรับเกษตรกร และสวนยางพารามีสถานะแวดล้อมที่ หลากหลายปรับเปลี่ยนไปตามฤดูกาล ซึ่งลักษณะของการนำร่องของระบบอัตโนมัติจะต้อง

ออกแบบให้ใช้ได้กับพื้นที่ของการปลูกต้นยางพาราจริงระบบต้นแบบดังกล่าวที่พัฒนาขึ้นนี้มีการประยุกต์ใช้กล้องเพื่อรับภาพเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ใช่ GPS หรือเซ็นเซอร์ เพื่อลดต้นทุนทางด้านอุปกรณ์สำหรับการสร้างระบบอัตโนมัติ โดยเลือกใช้เทคนิคการประมวลผลทางภาพในการค้นหาลำต้นยางพาราโดยการติดตั้งเป้าแบบถาวรไว้ที่บริเวณลำต้น หลังจากนั้นนำระบบการประมวลผลภาพเพื่อค้นหาเป้าสีแดงที่ติดตั้งบนลำต้นยางพาราและคำนวณความยาวของเป้าสีแดงที่มีหน่วยเป็นพิกเซลสุดท้ายใช้เทคนิคกล้องรูเข็ม (Pinhole camera model) ในการแปลงเป็นตำแหน่งของกล้องที่ติดตั้งบนระบบอัตโนมัติในส่วนเทียบกับลำต้นยางพาราที่ปลูกตามแนวแถวงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นการดึงข้อมูลตำแหน่งของลำต้นของต้นยางพาราด้วยวิธีการประมวลผลทางภาพ โดยได้มีการติดตั้งเป้าหมายที่แยกจากกันสองจุดในระยะห่างติดตั้งไว้บริเวณบนลำต้นยางพารา ใช้เพื่อเทียบระยะห่างของเป้ากับการระยะของความยาวหน่วยพิกเซลบนเฟรมของภาพหลังจากนั้นใช้เทคนิคกล้องรูเข็มร่วมกับโมเดลเรขาคณิตของสวนผลไม้ [3-4] วิธีการที่พัฒนาขึ้นมีความแปลกใหม่โดยได้ตั้งสมมุติฐานคือสามารถใช้ระบบการประมวลผลภาพที่ต้นทุนต่ำแต่ยังคงสามารถมีความแม่นยำที่มีความใกล้เคียงการใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ ความท้าทายสำหรับงานวิจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ภูมิประเทศที่ราบเรียบ ลักษณะต้นยางพาราที่ลำต้นไม่ตรง การปลูกที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างต้นยางพารา และแหล่งกำเนิดแสงที่สว่างที่ไม่คงที่ ระบบการค้นหาแยกแยะเป้าหมายซึ่งเป็นส่วนสำคัญของงานวิจัยดังกล่าวเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ที่ควบคุมได้ที่จะทำการทดลอง และนำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนพื้นที่สวนยางพาราจริงเพื่อที่จะนำข้อมูลการทดลองดังกล่าวเพื่อชดเชยความผิดพลาดของระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อนำไปพัฒนาเป็นระบบนำทางอัตโนมัติในอนาคตอย่างเต็มรูปแบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาโมเดลคณิตศาสตร์สำหรับการทำแผนที่เพื่อใช้ในการนำทางในสวนยางพาราแบบอัตโนมัติ
2. พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการประมวลผลภาพเพื่อตรวจจับเป้าหมายที่ติดตั้งบนต้นยางพารา
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับการประมวลผลทางภาพรวมกับการใช้โมเดลคณิตศาสตร์สำหรับการทำแผนที่สวนยางพาราเพื่อระบุตำแหน่งของต้นยางพาราเทียบกับกล้อง
4. เพื่อทดสอบระยะเป้าถาวรบนลำต้นไม้ที่แยกกัน (separated red targets) ส่งผลต่อโมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับระบุตำแหน่งของกล้อง
5. เพื่อทดสอบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งของกล้องเทียบกับเป้าถาวรที่ติดตั้งบนลำต้นไม้ระหว่างการทดลองในห้องปฏิบัติการเทียบกับการทดลองในสวนยางพารา

### 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

การพัฒนาระบบต้นแบบวิธีการนำร่องนี้ใช้ในสวนยางพารา ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพโดยมีการติดตั้งเป้าถาวรบนลำต้นยางพารา ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถบอกระยะทางบนพื้นดินเทียบระหว่างกล้องที่จะติดตั้งไว้บนระบบอัตโนมัติ กับเป้าถาวรบนลำต้นยางพาราที่มีการปลูกเป็นลักษณะตามแนวแถวโดยแต่ละต้นมีการปลูกห่างกันที่ระยะ 3 เมตร โดยสามารถค้นหาลำต้นยางพาราได้จำนวนสองลำต้นที่อยู่ใกล้กล้องและประมวลผลภาพได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งการพัฒนาระบบต้นแบบวิธีการนำร่องด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดังกล่าวไม่ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์หรืออุปกรณ์ระบุตำแหน่งใดๆ เพื่อทำงานร่วมกับระบบประมวลผลภาพ การทดลองในห้องปฏิบัติการที่คุมสภาวะแสงคงที่ และเป็นพื้นที่ราบเรียบโดยเปรียบเทียบกับ การทดลองในสวนยางพาราจริง โดยพารามิเตอร์ที่ออกแบบเพื่อใช้สำหรับการนำร่องมีสามพารามิเตอร์ซึ่งตั้งสมมุติฐานของความผิดพลาดไว้คือ

1. ระบบสามารถประมาณระยะห่างระหว่างกล้องกับแถวต้นไม้สามารถมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง Root Mean Square (RMS) ของความผิดพลาด ไม่เกิน 15 เซนติเมตร
2. ระบบสามารถประมาณระยะทางจากกล้องเป้าหมายขนานกับแถวต้นไม้สามารถมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง Root Mean Square (RMS) ของความผิดพลาด ไม่เกิน 15 เซนติเมตร
3. ระบบสามารถประมาณมุมการหมุนของกล้องที่สัมพันธ์กับแถวต้นไม้โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้กล้องเว็บแคมรุ่น Logitech c920 ที่มีวิดีโอเฟรมเรท (frame rate) 30 เฟรมต่อวินาที ที่ความละเอียดของภาพ 1280 x 720 พิกเซล
2. การทดลองใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราโมเดลเพื่อทดสอบขนาด 150 มิลลิเมตร ลักษณะลำต้นตรง
3. การทดลองใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราสวนจริงเพื่อทดสอบขนาด 120-160 มิลลิเมตร
4. การทดสอบใช้เป้าหมายสีแดงติดตั้งระยะห่าง 300 มิลลิเมตร 500 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตร ขนาดของเป้าสีแดงขนาด กว้าง 100 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร
5. ระบบการประมวลผลภาพค้นหาเป้าหมายสีแดงที่ติดตั้งบนลำต้นยางพาราไกลสุดที่ระยะ 6,000 มิลลิเมตร
6. พื้นที่ทดสอบเป็นลักษณะพื้นที่ราบเรียบในห้องปฏิบัติการ
7. สภาพแสงในห้องปฏิบัติการอยู่ในช่วง 360-370 LUX
8. สภาพแสงในสวนยางพาราจริงอยู่ในช่วง 350-400 LUX

## 1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ระเบียบวิธีวิจัย สถานที่ทำการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

### ส่วนที่ 1 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบการนำทางต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเกษตรประเภททำงานในร่องสวนจากฐานข้อมูลและแหล่งวิชาการต่างๆ
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะการปลูกต้นยางพาราของสวนยางพาราในประเทศไทย
3. ศึกษาเทคนิควิธีการประมวลผลทางภาพ
4. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกล้องและลักษณะทางกายภาพของสวนยางพาราของประเทศไทย
5. ออกแบบขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม สำหรับการประมวลผลทางภาพ
6. พัฒนาและเขียนโปรแกรม โดย MATLAB ช่วยในการประมวลผลทางภาพ
7. เก็บข้อมูลตำแหน่งจากระบบที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงบนพิกัดพื้นโลก
8. วิเคราะห์และปรับปรุงตัวแปรที่ส่งผลต่อการประมวลผลทางภาพ สำหรับการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ
9. ทดสอบโปรแกรมในห้องปฏิบัติการ และสวนยางพาราจริง
10. วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ และสวนยางพาราเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง และสรุปผลลัพธ์ที่ได้
11. จัดทำรายงานและนำเสนอวิทยานิพนธ์
12. แก้ไขวิทยานิพนธ์และเผยแพร่ผลงานวิจัย

### ส่วนที่ 2 สถานที่ทำการวิจัย

1. ทดสอบและเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการสำหรับตำแหน่งต้นยางพารา

ใช้สถานที่ ;

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อาคาร 44 (อาคารปฏิบัติการและประลองรวม) ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

2. ทดสอบและเก็บข้อมูลสวนยางพาราจริงการสำหรับตำแหน่งต้นยางพารา

ใช้สถานที่ ;

สวนยางพาราตัวอย่างของเกษตรกรที่จังหวัด ฉะเชิงเทรา

สวนยางพาราตัวอย่างของเกษตรกรที่จังหวัด แพร่

### ส่วนที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Lenovo IdeaPad Z510, CPU Core i7 gen 4 (4702MQ) @2.20GHz, RAM 16 GB (DDR3), NVIDIA GeForce GT 740M 2 GB
2. โปรแกรม MATLAB เพื่อประมวลผลทางภาพและทดลองผล
3. แกรมภาษา Python เพื่อทดสอบระบบการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์มินิ
4. แกรมภาษา LabVIEW เพื่อใช้สำหรับการประมวลผลภาพและออกแบบตัวควบคุมระบบรถอัตโนมัติต้นแบบ
5. โปรแกรมออกแบบผลิตภัณฑ์ 3 มิติ SolidWorks เพื่อช่วยออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ
6. ชุดทดลองลำต้นยางพาราในห้องปฏิบัติการโดยผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้โมเดลคณิตศาสตร์สำหรับการทำแผนที่เพื่อใช้ในการนำทางในสวนยางพาราแบบอัตโนมัติ
2. ได้อัลกอริทึมเพื่อใช้สำหรับการประมวลผลภาพเพื่อตรวจจับเป้าหมายที่ติดตั้งบนต้นยางพารา
3. ได้โปรแกรมสำหรับการประมวลผลทางภาพรวมกับการใช้โมเดลคณิตศาสตร์สำหรับการทำแผนที่ระบุตำแหน่งของระบบอัตโนมัติในสวนยางพารา
4. เพื่อลดต้นทุนของพัฒนาเทคโนโลยีการทำแผนที่แทนการใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์
5. สามารถนำกระบวนการทำแผนที่ที่มีความคล้ายคลึงกับการปลูกของยางพาราไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่พัฒนาขึ้นได้

## บทที่ 2

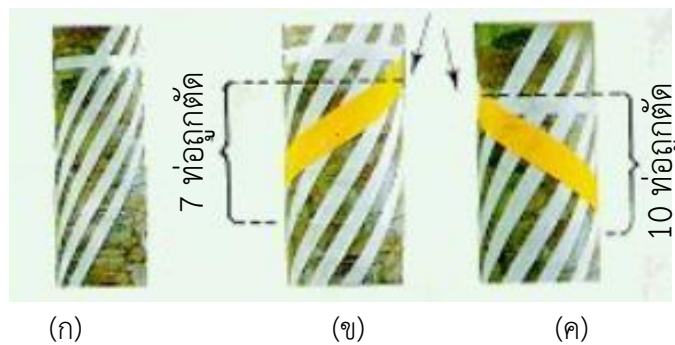
### วรรณกรรมปริทัศน์

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการปลูกต้นยางพาราและลักษณะพื้นที่เพาะปลูกในประเทศไทย, ระบบการประมวลผลทางภาพ (Image Processing) ที่ใช้สำหรับการค้นหาแยกแยะสิ่งที่สนใจบนภาพ การสร้างแผนที่ และการนำทางของระบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคต่างๆ โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ลักษณะต้นยางพารา และการปลูกยางพารา[1-3]

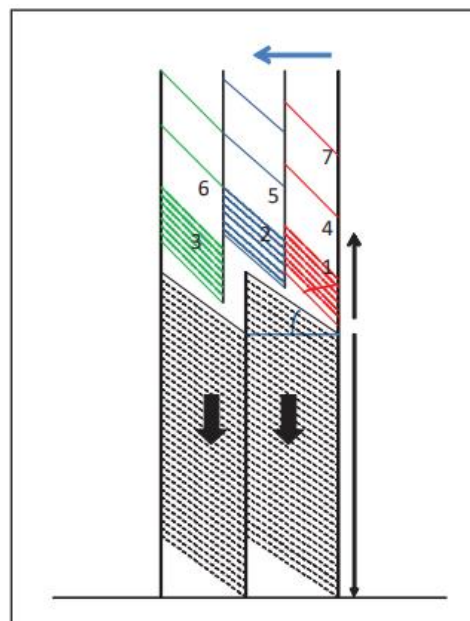
ต้นยางพาราเป็นไม้ยืนต้นที่สามารถอยู่ได้นานหลายปี ทำให้เป็นพืชเศรษฐกิจ พืชชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการสร้างรายได้และมีผลกระทบต่อวิถีชีวิตของประชากรในของประเทศ ไทย โดยเฉพาะในภาคใต้ของประเทศ ต้นยางพาราใช้ระยะเวลาหลังจากปลูกประมาณ 6 ปี ขึ้นไป จึงจะสามารถเปิดกรีดหน้ายางได้ ซึ่งถือว่าเป็นระยะเวลาที่นาน และต้องลงทุนเป็นเงินจำนวนมาก ดังนั้น การเก็บเกี่ยวผลผลิตต้องกระทำอย่างปราณีตและถูกหลักวิชาการ ทั้งนี้เพื่อใช้ประโยชน์จากต้นยางพาราให้ยาวนาน และคุ้มค่ามากที่สุด การกรีดยางแนะนำให้เริ่มเปิดกรีดเมื่อต้นยางพารามีขนาดความยาวรอบลำต้น 50 เซนติเมตร และต้นยางพาราในสวนต้องมีขนาดพร้อมเปิดกรีดได้มากกว่า 70 % ของต้นยางพารายางทั้งหมด และจากเปลือกตรงโคนต้นยางพารานั้นหนากว่าเปลือกส่วนบน ทำให้น้ำยางมากที่สุดตรงโคนต้น ที่ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นของต้นยางพาราเปลือกจะยิ่งบางลง ปริมาณน้ำยางก็จะลดน้อยลง แต่การที่น้ำยางไหลออกมากเกินไป จะเป็นอันตรายแก่ต้นยาง ต้นยางอาจแคะ แกร็น หรือเป็นโรคเปลือกแห้ง จึงควรกรีดให้ได้น้ำยางพอสมควร ควรเริ่มเปิดกรีดที่ระดับความสูง 150 เซนติเมตรจากพื้นดิน รอยกรีดทำมุม 30 องศากับแนวระนาบ และเอียงจากซ้ายบนลงมาขวา ล่าง เพื่อให้ตัดท่อน้ำยางมากที่สุด จะได้ปริมาณน้ำยางที่มากขึ้น เมื่อกรีดตัดท่อน้ำยางที่ระดับความสูงนี้ นอกจากจะสามารถยืดอายุการเก็บผลผลิตได้นานขึ้นแล้วยังเป็นการดูแลรักษาให้ต้นยางพารามีมูลค่าเพิ่มหลังจากการเก็บเกี่ยวน้ำยาง



รูปที่ 2.1 (ก) แนวท่อน้ำยางภายในเปลือก (ข) การกรีดที่ไม่ถูกต้อง (ค) การกรีดที่ถูกต้อง [1]



(ก)



(ข)

**รูปที่ 2.2** (ก) การกรีดยางหน้าสูงโดยใช้บันไดขึ้นไปกรีดที่ระดับ ความสูง 2.5 - 3.0 เมตร กรีดลงโดยใช้มีดเจ้ะบง (ข) ลักษณะรอยกรีด[3]

การกรีดยางหน้าสูงเหนือหน้ากรีดปกติ เป็นส่วนที่ไม่เคยกรีดมาก่อน ต้นยางที่เหมาะสมที่จะกรีดยางหน้าสูง คือ ต้นยางที่กรีดหน้าล่างหมดทั้งเปลือกเดิมและเปลือกงอกใหม่ รวมทั้งต้นยางที่มีหน้ากรีดล่างหรือหน้ากรีดปกติเสียหาย การกรีดยางหน้าสูงจะให้ผลผลิตสูงเนื่องจากต้นยางอายุมากที่ระดับความสูงมากกว่า 1.50 เมตร การแบ่งรอยกรีดเป็น 3 หน้ากรีด กรีดเหนือรอยกรีดเดิม 3 เซนติเมตร เมื่อกรีดหมดปีที่ 1 ให้เปลี่ยนไปกรีดหน้ากรีดที่ 2 และหน้ากรีดที่ 3 ตามลำดับ โดยเวียนหน้ากรีดตามเข็มนาฬิกา คือ ไปทางซ้ายของหน้ากรีดเดิม กรีดรอบลำต้น 3 ปี เปลี่ยนขึ้นไปกรีดรอบที่ 2 เหนือรอยกรีดเดิมหน้าแรก ทิศทางการกรีดยาง กรีดขึ้นสามารถใช้ได้ทั้งมีดเก้าจหรือมีดเจ้ะบง

การวางแผนปลูกยางในพื้นที่ราบ เกษตรกรต้องวางแผนการใช้พื้นที่ให้เหมาะสมกับสภาพบริเวณโดยรอบ เพื่อให้ต้นยางเจริญเติบโตได้ดี สะดวกในการบำรุงรักษาต้นยาง การเก็บผลผลิตในอนาคตและเพื่อความสวยงามของแปลงปลูก เป็นการใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพการกำหนดระยะปลูกที่เหมาะสมและการวางแผนที่ถูกต้องจะช่วยเพิ่มจำนวนหลุมปลูก ได้มากขึ้นและทำให้ต้นยางเจริญเติบโตเร็วสามารถเปิดกรีดได้ตามกำหนดอายุ โดยทั่วไปต้นยางต้นหนึ่งๆ ต้องการพื้นที่ทรงพุ่มเพื่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตที่ต้องไม่น้อยกว่า 20 ตารางเมตร นอกจากนี้เกษตรกรควรคำนึงการใช้พื้นที่ระหว่างแถวปลูกพืชแซม/พืชร่วมยางเพื่อเสริมรายได้ระหว่างต้นยางยังเล็กอยู่ด้วย

การกำหนดแถวหลัก ข้อควรคำนึงในการกำหนดแถวหลัก

1. ควรให้แถวหลักอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตกและขวางทิศทางการไหลของทางน้ำ
2. หากพื้นที่ข้างเคียงเป็นสวนไม้ยืนต้นหรือป่ารกชัฏไม่ควรวางแถวหลักไปในแนวทิศทางนั้น
3. กำหนดแถวหลักให้ห่างจากเขตแดนประมาณ 1.5 เมตร

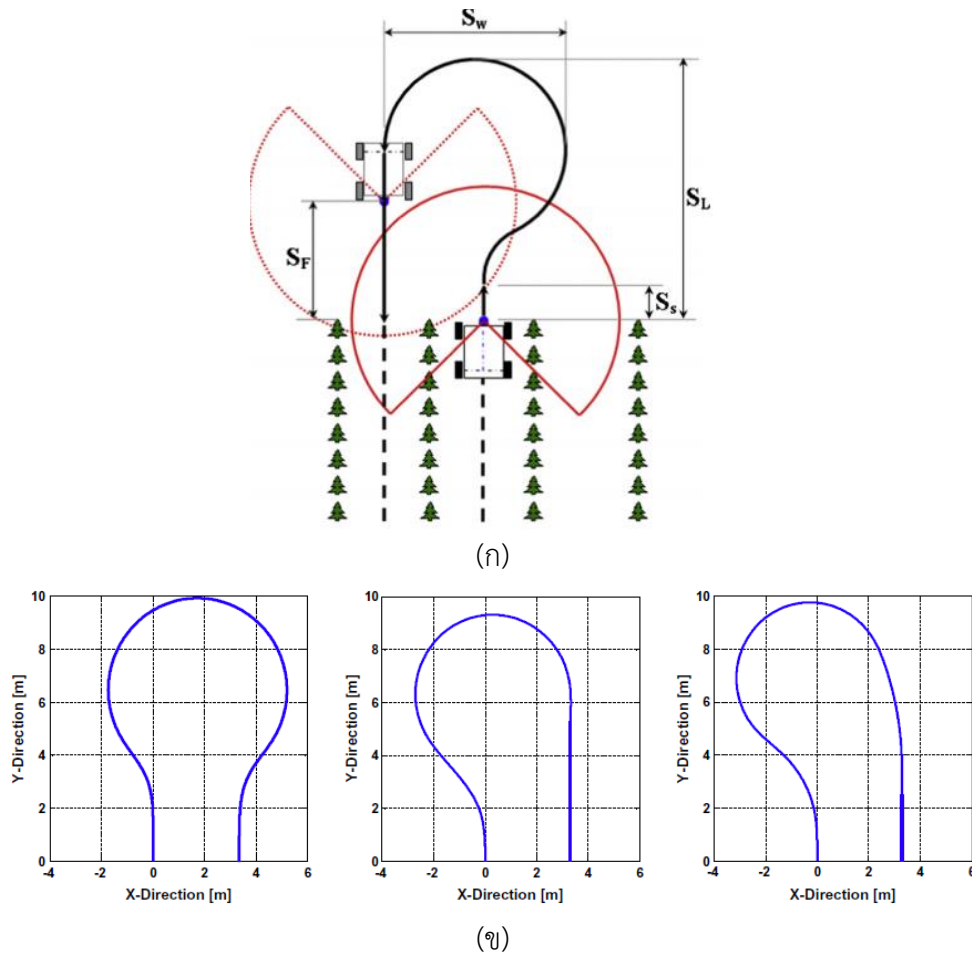
สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง (สกย.) กำหนดระยะปลูกภายในพื้นที่ราบดังนี้

**ตารางที่ 2.1** การกำหนดระยะการต้นปลูกยางพารา

สภาพพื้นที่	ภาคตะวันออก และภาคใต้		ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	
	ระยะปลูก	จำนวนต้น (ต้น/ไร่)	ระยะปลูก	จำนวนต้น (ต้น/ไร่)
พื้นที่ราบ	2.5x8	80	2.5x7	91
	3x7	76	3x6	88
พื้นที่ลาดเอียง	2.5x8	80	2.5x8	80
	3x8	76	3x8	67

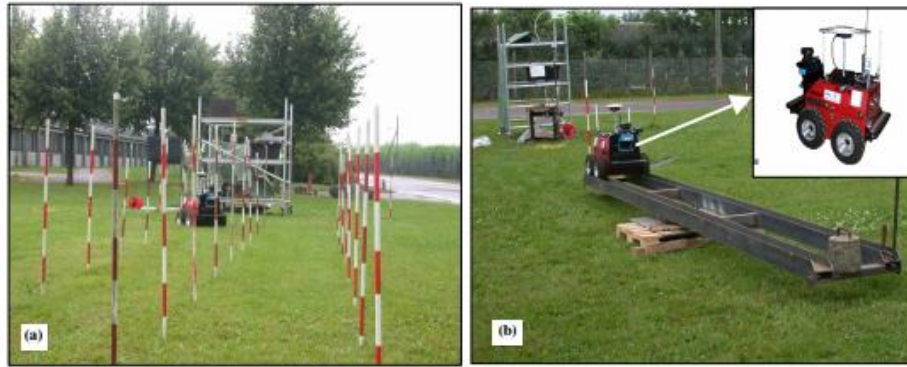
### 2.1.2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Bayar et al. (2558) [4] พัฒนารูปแบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะอัตโนมัติการเกษตร รวมถึงผลกระทบของการเคลื่อนที่ เพื่อคำนวณความเร็วและคำสั่งบังคับเลี้ยว นอกจากนี้ยังสร้างเส้นทางเลี้ยวในแถวสวนผลไม้ วิธีการนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสัญญาณ GPS ซึ่งอาศัยข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์ระนาบและเอ็นโค้ดเดอร์ (encoder) ที่ติดอยู่บริเวณล้อเท่านั้น ระบบดังกล่าวเหมาะสำหรับการใช้งานทางการเกษตรจริงที่ต้นทุนต่ำ ยานพาหนะศึกษาผลกระทบของการลื่นของล้อ และการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่ของยานพาหนะซึ่งเน้นไปที่การบังคับเลี้ยวกลับเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปจนถึงสุดแนวแถวเพื่อบังคับกลับเข้ามายังแนวแถวถัดไป



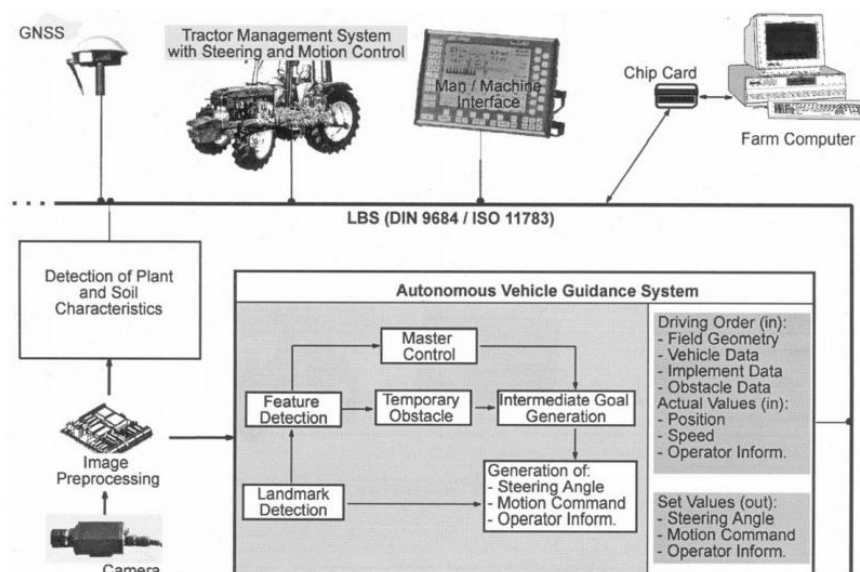
รูปที่ 2.3 (ก)มุมมองของหุ่นยนต์รถสวนผลไม้แสดงการติดตามสวนผลไม้ในแนวแถว (ข)การบังคับ  
 เลี้ยวสำหรับเส้นทางเลี้ยวของรถสวนผลไม้[4]

Khot et al. (2549) [5] เทคนิคการใช้งานร่วมกันระหว่างเซ็นเซอร์ได้รับการพัฒนาสำหรับการประเมินท่าทางการนำทางของอุปกรณ์เคลื่อนที่ หุ่นยนต์ในเรือนเพาะชำต้นไม้จำลอง GPS จลนศาสตร์แบบเรียลไทม์ (RTK-GPS) และไดนามิกเซ็นเซอร์หน่วยวัด (DMU) ถูกใช้เพื่อกำหนดตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ ในขณะที่เครื่องค้นหาระยะด้วยเลเซอร์ถูกใช้เพื่อค้นหาตำแหน่งต้นไม้ภายในช่วงที่เลือก ข้อผิดพลาด RTK-GPS เดิมคือ สร้างแบบจำลองโดยแบบจำลองการถดถอยอัตโนมัติอันดับสอง และสถานะข้อผิดพลาดถูกรวมไว้ใน Kalman แบบขยายการออกแบบตัวกรอง (EKF) ผ่านการกรอง EKF ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อผิดพลาดในทิศทางตะวันออก ลดลงจาก 4.05 เป็น 2.21 เซนติเมตร และจาก 8.27 เป็น 1.89 เซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่อยู่ทางทิศเหนือลดลงจาก 4.64 เป็น 1.81 เซนติเมตร และจาก 11 เป็น 2.16 เซนติเมตร ตามลำดับ ตำแหน่งต้นไม้อ้างอิงทางภูมิศาสตร์ของสวนต้นไม้จริง



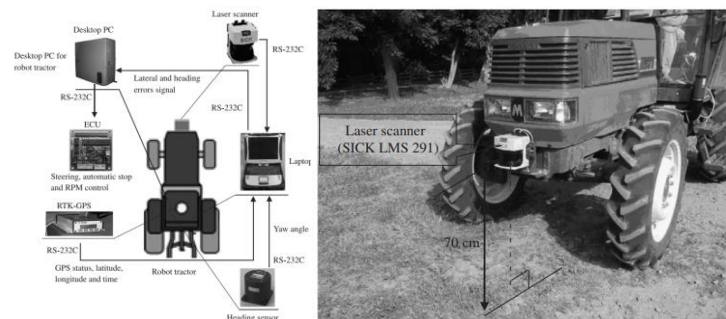
รูปที่ 2.4 Experimental setup: simulated nursery tree plantation, and calibration platform[5]

Keicher et al. (2543) [6] พัฒนาเทคนิคการนำทางอัตโนมัติของยานพาหนะทางการเกษตร หรือเครื่องมือไปสู่การแก้ปัญหาต่างๆ เช่น เซอร์ รวมถึงเซ็นเซอร์แบบกลไก ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (GNSS) แมชชีนวิชัน การระบุตำแหน่งด้วยเลเซอร์อัลตราโซนิกและ geomagnetic สร้างข้อมูลตำแหน่ง ทิศนคติ และทิศทางการเคลื่อนที่เพื่อจัดหาอัลกอริทึมการควบคุม แอคชูเอเตอร์ เช่น วาล์วไฮดรอลิก ใช้เพื่อแปลงข้อมูลคำแนะนำเป็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทาง และมีตัวจับเฟรมหรือตัวรับ GNSS ที่ใช้เพื่อนำทางอุปกรณ์ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้าด้วยความเร็วสูงถึง 3 เมตร/วินาที ไปจนถึงระบบจดจำถนนแบบสองฟากส์ แบบมัลติโปรเซสเซอร์สำหรับรถยนต์อิสระที่ขับเคลื่อนทางหลวงด้วยความเร็ว 130 กิโลเมตร/ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 2.5



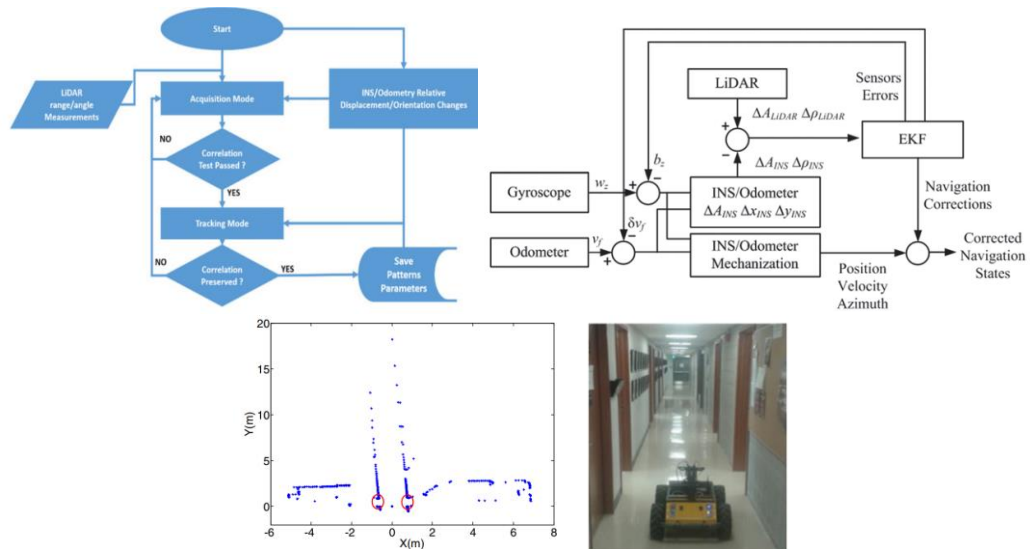
รูปที่ 2.5 Modular structure for a system to guide agricultural vehicle autonomously[6]

O.C. Barawid et al. (2549) [7] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติที่สามารถนำทางรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติเดินทางระหว่างแถวต้นไม้ในแอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์ การศึกษามุ่งเน้นไปที่การรู้จำแนวเส้นตรงของแถวต้นไม้เท่านั้น โดยใช้เครื่องสแกนเลเซอร์เป็นเซ็นเซอร์นำทาง การเกษตรขนาด 52 กิโลวัตต์รถแทรกเตอร์ถูกใช้เป็นแท่นสำหรับติดตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ การแปลง Hough transform ถูกใช้เป็นอัลกอริทึมเพื่อจดจำแถวต้นไม้ วิธีการถดถอยอัตโนมัติขจัดสัญญาณรบกวนเกาส์เซียน (Gaussian) ในข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ ใช้วิธีการเปรียบเทียบเพื่อเลือกตำแหน่งออฟเซตของเครื่องสแกนเลเซอร์ และการประเมินข้อผิดพลาดด้านข้างยังได้กำหนดความเร็วที่เหมาะสมสำหรับรถแทรกเตอร์อีกด้วย โดยได้รับความแม่นยำ 0.11 เมตร ข้อผิดพลาดด้านข้างและ  $1.5^\circ$



รูปที่ 2.6 Schematic diagram of the robot tractor and its research components; PC, personal computer; RTK-GPS, real-time kinematic global positioning system; ECU, electronic control unit; RS 232C, recommended standard 232 connector[7]

Liu et al. (2558) [8] งานวิจัยนี้มีงานก่อนหน้านี้นักใช้วิธีการตรวจจับคุณสมบัติตามเส้นโค้งแบบดั้งเดิมซึ่งมีราคาแพง ในการปรับปรุงแนวทางดังกล่าว บทความนี้ได้ใช้ชุดเซ็นเซอร์ที่ลดลง ซึ่งใช้ไจโรสโคป (Gyroscope) แนวตั้งเพียงตัวเดียว, เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ของล้อ โดยมีการนำอัลกอริทึมดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.7 ระบุเป็น ตำแหน่ง และการระบุการหมุนของยายพาหนะอย่างมีประสิทธิภาพ ชุดเซ็นเซอร์ที่จำนวนน้อยลงและอัลกอริทึมติดตามเส้นที่มีประสิทธิภาพทำให้ระบบที่เสนอเหมาะสำหรับการนำทางในร่ม 2 มิติทั่วไปสำหรับ UGV



รูปที่ 2.7 Flowchart of lines detection and tracking algorithm and INS/Odometry/LiDAR system[8]

N. Shalal et al. (2556) [9] พัฒนาการสร้างแผนที่หรือแบบจำลองสภาพแวดล้อมโดยใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ สวนผลไม้เป็นสภาพแวดล้อมทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เนื่องจากเป็นสภาพแวดล้อมกึ่งโครงสร้าง ซึ่งต้นไม้จะปลูกเป็นแถวตรง งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการดึงคุณลักษณะจากสภาพแวดล้อมของสวนผลไม้มือโดยใช้ระบบวิชั่น (vision system) และเครื่องสแกนเลเซอร์ (laser sensing) เพื่อสร้างแผนที่ของสวนผลไม้มือ โดยการตรวจจับลำต้นของต้นไม้ ในการศึกษา การแบ่งส่วนภาพและวิธีการใช้งานร่วมกับข้อมูลจะใช้สำหรับการสกัดคุณลักษณะการตรวจจับต้นไม้ แผนที่ที่ได้จะประกอบด้วยพิกัดของต้นไม้แต่ละต้นในแต่ละแถว ตลอดจนพิกัดของวัตถุที่ไม่ใช่ต้นไม้อื่นๆ ที่เซ็นเซอร์ตรวจพบ



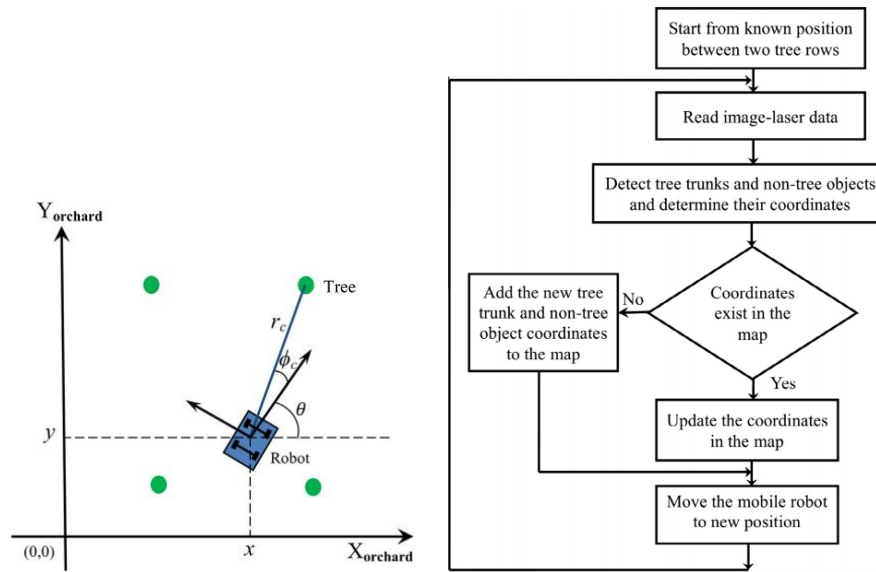
รูปที่ 2.8 The simulated environment, around tree trunk center and edges[9]

N. Shalal et al. (2558) [10] พัฒนาอัลกอริทึมการตรวจจับลำต้นของต้นไม้แบบใหม่โดยใช้การรวมข้อมูลของกล้อง และเครื่องสแกนเลเซอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับ อัลกอริทึมจะตรวจจับต้นไม้ในสวนและแยกแยะระหว่างต้นไม้กับวัตถุที่ไม่ใช่ต้นไม้ (เช่น เสาและต้นไม้ที่รองรับ) เครื่องสแกนเลเซอร์ใช้เพื่อตรวจจับจุดขอบและกำหนดความกว้างของลำต้นของต้นไม้ แสดงดังรูปที่ 2.8 และวัตถุที่ไม่ใช่ต้นไม้ ในขณะที่ภาพถ่ายของกล้องจะใช้เพื่อตรวจสอบสีและขอบขนานของลำต้นของต้นไม้และวัตถุที่ไม่ใช่ต้นไม้ อัลกอริทึมจะปรับพารามิเตอร์การตรวจจับสีโดยอัตโนมัติ อัลกอริทึมสามารถตรวจจับลำต้นของต้นไม้และแยกแยะระหว่างต้นไม้กับวัตถุที่ไม่ใช่ต้นไม้ด้วยความแม่นยำในการตรวจจับ 96.64%



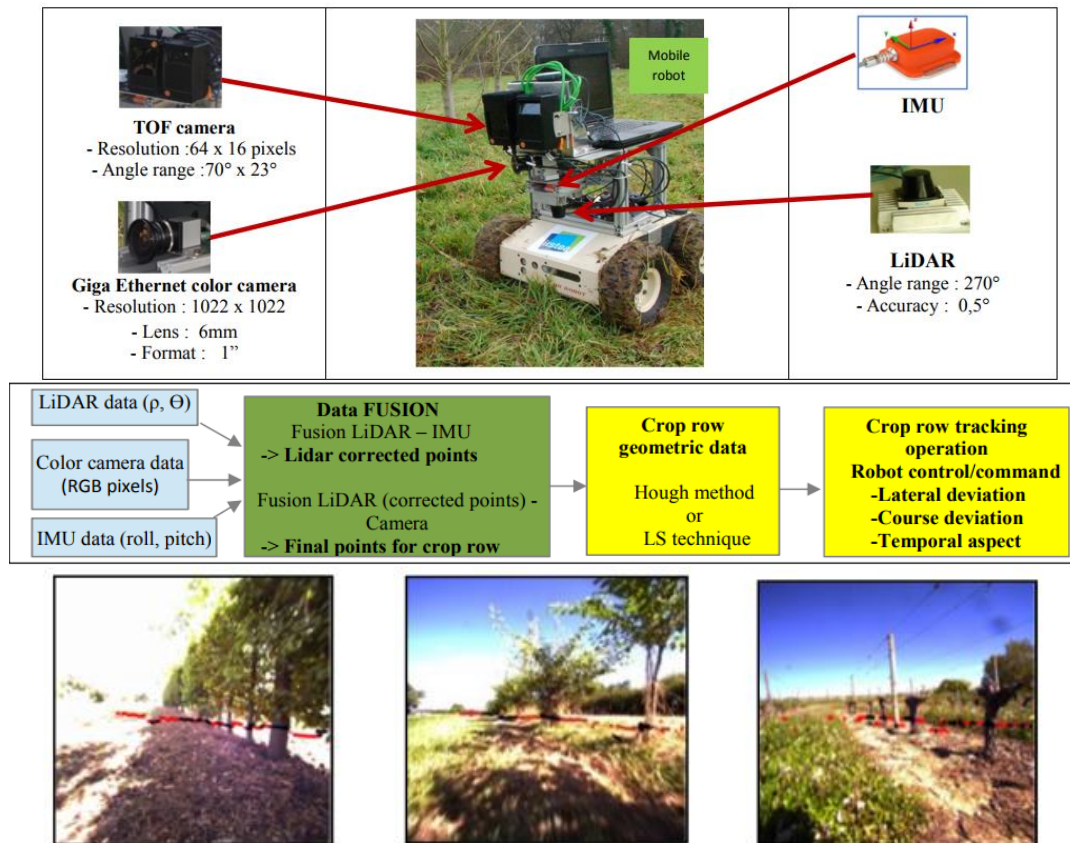
รูปที่ 2.9 CoroWare Explorer platform with on-board sensors and samples of the ROI for colour and edge detection respectively[10]

N. Shalal et al. (2558) [11] พัฒนาอัลกอริทึมการตรวจจับลำต้นของต้นไม้แบบใหม่โดยใช้การรวมข้อมูลของกล้อง และเครื่องสแกนเลเซอร์เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับ [12] การโลคัลไลเซชัน (localisation) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่แม่นยำในสวนผลไม้อาศัยแผนที่สวนผลไม้ที่แม่นยำซึ่งช่วยให้เคลื่อนที่ได้ของหุ่นยนต์เพื่อประเมินตำแหน่งและทิศทาง บทความนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแผนที่สวนผลไม้ในโดยใช้กล้องและข้อมูลเครื่องสแกนเลเซอร์ร่วมกัน แผนที่สวนสุดท้ายประกอบด้วยตำแหน่งของต้นไม้และวัตถุที่ไม่ใช่ต้นไม้ (เช่น เสาและต้นไม้รองรับ) ในแถวต้นไม้ อัลกอริทึมการรวมข้อมูลตาม Kalman Filter ใช้สำหรับการประมาณตำแหน่ง การทดสอบทดลองได้ดำเนินการกับแพลตฟอร์มหุ่นยนต์ขนาดเล็กในของจริงสภาพแวดล้อมสวนผลไม้ อัลกอริทึมโลคัลไลเซชัน (localisation) แสดงดังรูปที่ 2.9 ถูกประเมินเทียบกับตำแหน่ง RTK-GPS เพื่อประเมินประสิทธิภาพหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทาง



รูปที่ 2.10 Graphical representation of the positions of the trees with respect to the mobile robot in the orchard environment and orchard mapping algorithm[11]

B. Benet et al. (2560) [12] พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับยานพาหนะเพื่อการเกษตรที่แม่นยำ ต้องการการนำทางแบบอัตโนมัติเพื่อดำเนินงานต่างๆ เช่น การปลูกการบำรุงรักษาและการเก็บเกี่ยว เช่น พืชผัก ไร่องุ่น หรือพืชสวน หรือสิ่งกีดขวางหน้ารถในแถวพืชผลเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการนำทางอย่างปลอดภัย เซ็นเซอร์ เช่น LiDAR อุปกรณ์หรือกล้อง Time Of Flight (TOF) ข้อมูลเรขาคณิตของสวนใช้ข้อมูลของหน่วยวัดแรงเฉื่อย (IMU) ร่วมกับข้อมูลทางเรขาคณิตของกล้องสี ข้อมูลทำการระบุวัตถุในธรรมชาติโดยใช้เทคนิคการจำแนกสี เช่น Support Vector Machine (SVM) ยานพาหนะทางการเกษตรสามารถใช้ข้อมูลทางเรขาคณิต และสี ในรูปแบบเรียลไทม์เพื่อติดตามพืชผลแถวและตรวจจับสิ่งกีดขวาง แอปพลิเคชันนี้การรับรู้เซ็นเซอร์ที่ฝังอยู่บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจจับและระบุวัตถุทางธรรมชาติในพืชผลทางการเกษตรในพื้นที่เพาะปลูก

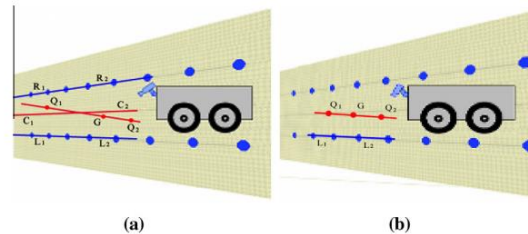


รูปที่ 2.11 Mobile robot and embedded sensors, crop row tracking operation and Fusion result for crop points detection[12]

B. Benet et al. (2555) [13] ออกแบบ และทดสอบตัวแปร FOV (field-of-view) ของระบบวิชั่นช่วยในการนำทางหุ่นยนต์ ได้มีการพัฒนาระบบวิชั่นซึ่งช่วยให้หุ่นยนต์เพื่อการเกษตรสามารถนำทางระหว่างแถวของสวนข้าวโพด โดยใช้อัลกอริทึมการประมวลผลภาพโดยใช้ลักษณะมุมมองในแต่ละรูปแบบโดยได้ทำการเลือกมุมมองเป็น 3 ลักษณะคือ ระยะไกล ระยะใกล้ และระยะด้านข้าง และหุ่นยนต์ใช้การควบคุมรูปแบบ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) การทดสอบกำหนดให้ยานพาหนะเดินทางในแนวตรงในระยะทาง 30 เมตร ในการประเมินประสิทธิภาพการนำทาง โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ RTK-GPS เพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาด

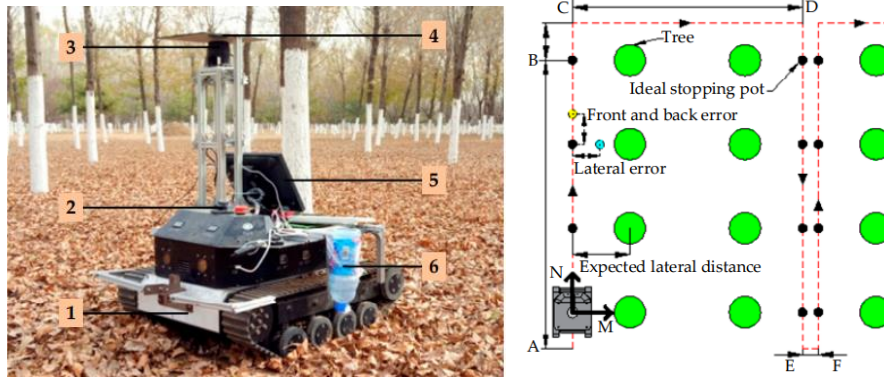


Fig. 2. Robot platform (a) and drive train (b).



### รูปที่ 2.12 Measurement principle of offset and heading angle in the forward FOV and lateral FOV[13]

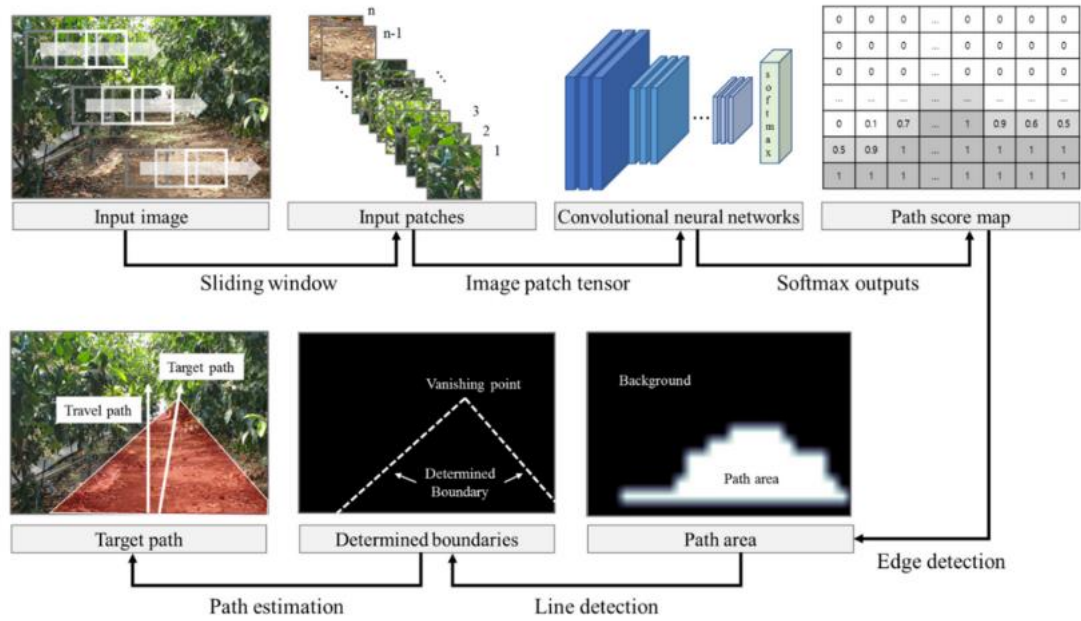
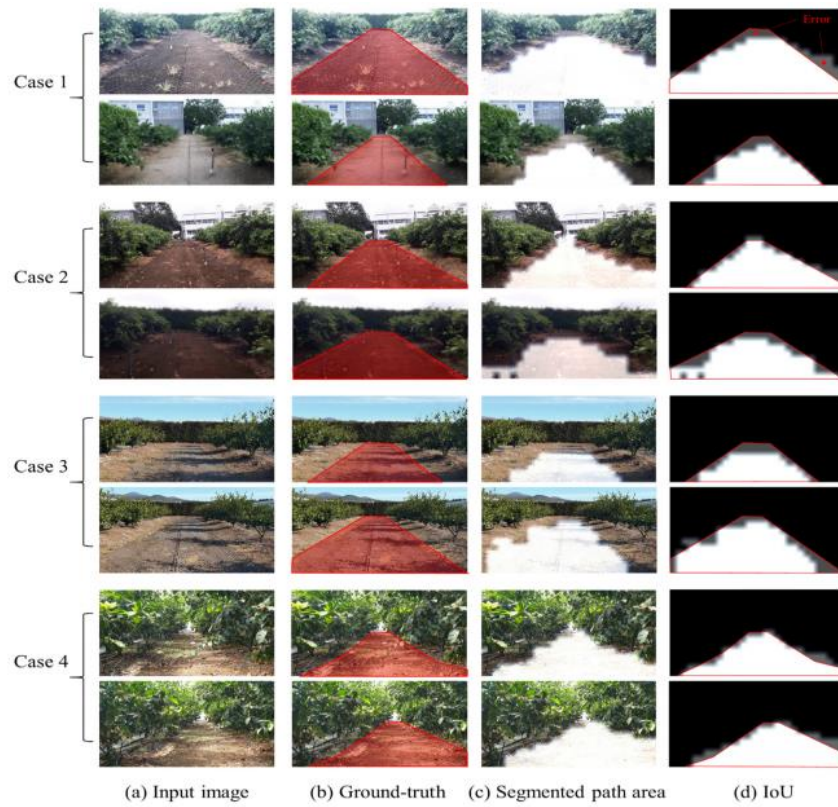
Chunlong Zhang et al. (2562) [14] ในปัจจุบันการกรีดด้วยมือยังคงเป็นวิธีหลักในการได้ยางธรรมชาติ เทคนิคการนำทางอัตโนมัติที่มีความสำคัญที่จะทำให้อุปกรณ์กรีดยางนั้นสามารถทำงานได้ เพื่อให้ตระหนักถึงการนำทางของแพลตฟอร์มกรีดยางอัจฉริยะ ซึ่งลำต้นของต้นไม้ถูกสกัดโดย LiDAR ราคาประหยัด และไจโรสโคป ผ่านวิธีการจัดกลุ่ม เมฆจุดถูกประกอบเป็นวงกลมโดยวิธี Gauss–Newton เพื่อให้ได้ค่าจุดศูนย์กลางของต้นไม้แต่ละต้น จากนั้นจุดศูนย์กลางเหล่านี้จะถูกร้อยผ่านวิธี Least Squares ถึงได้เส้นทางตรงซึ่งถือเป็นเส้นทางนำทางของหุ่นยนต์ นอกจากนี้, อัลกอริทึม Extended Kalman Filter (EKF) ถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้ตำแหน่งของหุ่นยนต์อยู่ในสวนด้วยระยะห่างระหว่างแถวและระยะห่างระหว่างพืช ข้อผิดพลาดของส่วนหัวและข้อผิดพลาดด้านข้างของหุ่นยนต์ โดยการใช้ Fuzzy Controller มาใช้ในการควบคุมการเดินทางของหุ่นยนต์ตามแถวเดี่ยวและ หยุดที่จุดคงที่ เลี้ยวจากแถวหนึ่งไปอีกแถวหนึ่งและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระยะปลูก ระยะห่างระหว่างแถว และเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นไม้ แล้วตามที่รวบรวมมาข้อมูลตำแหน่งของต้นไม้แต่ละต้นจะถูกคำนวณ และสร้างแผนที่ลักษณะทางเรขาคณิตสำหรับที่มีระยะห่างระหว่างแถวและระยะปลูกต่างกัน ที่ความเร็วเริ่มต้น 0.3 เมตร/วินาที ผลปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนด้านข้าง Root Mean Square (RMS) คือ น้อยกว่า 10.32 เซนติเมตร ซึ่งหุ่นยนต์สามารถตอบสนองความต้องการสำหรับการกรีดยางอัตโนมัติของแขนกลได้และข้อผิดพลาดในการหยุดโดยเฉลี่ยคือ 12.08 เซนติเมตร โดยในแผนที่ที่ถูกสร้างด้วยเรขาคณิตข้อผิดพลาดในแนวรัศมี RMS น้อยกว่า 0.66 เซนติเมตร และโรงงาน RMS ข้อผิดพลาดของพื้นที่ (plant spacing errors) เปรียบเทียบระหว่างความผิดพลาดของด้านหน้าและด้านหลังน้อยกว่า 11.31 เซนติเมตร วิธีการนี้มีต้นทุนต่ำ เร็ว และมีเสถียรภาพวิธีแก้ปัญหาสำหรับการนำทางในสวนยางพาราของอุปกรณ์กรีดยางอัตโนมัติ



รูปที่ 2.13 The Robot System and the navigation path[14]

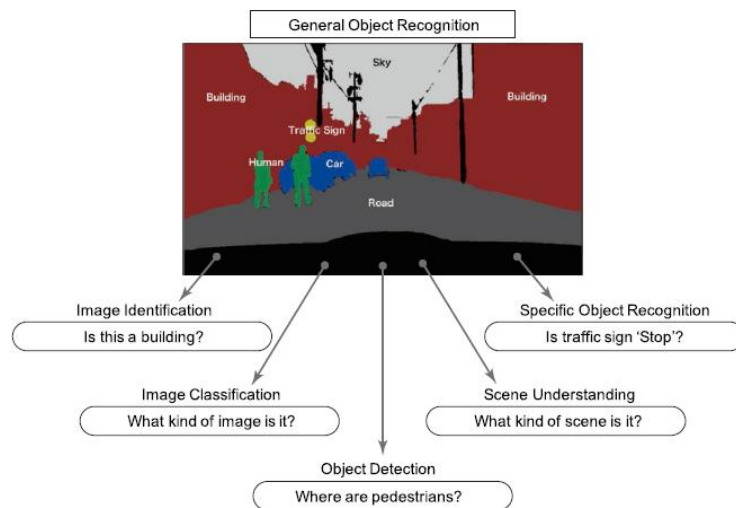
Wan-Soo Kim et al. (2563) [15] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจจับเส้นทางอัตโนมัติในสภาพแวดล้อมกิ่งโครงสร้าง เช่น สวนผลไม้ แนวทางที่เสนอสามารถแบ่งส่วนพื้นที่เส้นทางแบบ perspective นำไปใช้กับงานตรวจจับพื้นที่ประเภทต่างๆในการเกษตร โดยได้ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (CNN) สำหรับการจำแนกรูปภาพเพื่อให้ได้เส้นทางที่แบ่งส่วนพื้นที่ การแบ่งส่วนพื้นที่เส้นทางและการตรวจจับเส้นทางเป้าหมายโดยใช้การกำหนดเส้นเขตแดน สรุปการศึกษานี้มีขั้นตอนเพื่อการใช้งานทางการเกษตร (1) เพื่อการศึกษานำการเรียนรู้เชิงลึกไปใช้กับการตรวจจับเส้นทางบน partial area (patch) ในการเกษตร (2) การใช้วิวของสวนผลไม้ถูกแบ่งตามการจำแนกตาม CNN แบบต้น และสามารถใช้ร่วมกับคอนโวลูชันเลเยอร์ที่มีขนาดเล็กได้ (3) การกำหนดค่าอย่างง่ายด้วยกล้อง RGB เป็นวิชันเซ็นเซอร์เพื่อใช้กับวิธีการของงานวิจัยนี้กับเครื่องจักรในฟาร์มประเภทต่างๆ และยังมีราคาถูกกว่าระบบ LiDAR Scanner

Hironobu Fujiyoshi et al. (2562) [16] งานการรู้จำภาพต่างๆ ได้รับการจัดการในการจดจำภาพก่อนปี 2010 โดยการรวมคุณลักษณะเฉพาะของรูปภาพที่ออกแบบโดยนักวิจัย (เรียกว่าคุณลักษณะที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยมือ) และวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง หลังจากเข้าสู่ปี 2010 อย่างไรก็ตาม มีการเสนอวิธีการจดจำภาพจำนวนมากที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึก วิธีการจดจำภาพที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึกนั้นเหนือกว่าวิธีการที่ใช้ก่อนที่จะมีการเรียนรู้เชิงลึกในการแข่งขันการรู้จำวัตถุทั่วไป ดังนั้น บทความนี้จึงอธิบายว่าการนำ Deep Learning ไปใช้ในด้านารรับรู้ภาพอย่างไร และจะอธิบายแนวโน้มล่าสุดของ Deep Learning-based autonomous

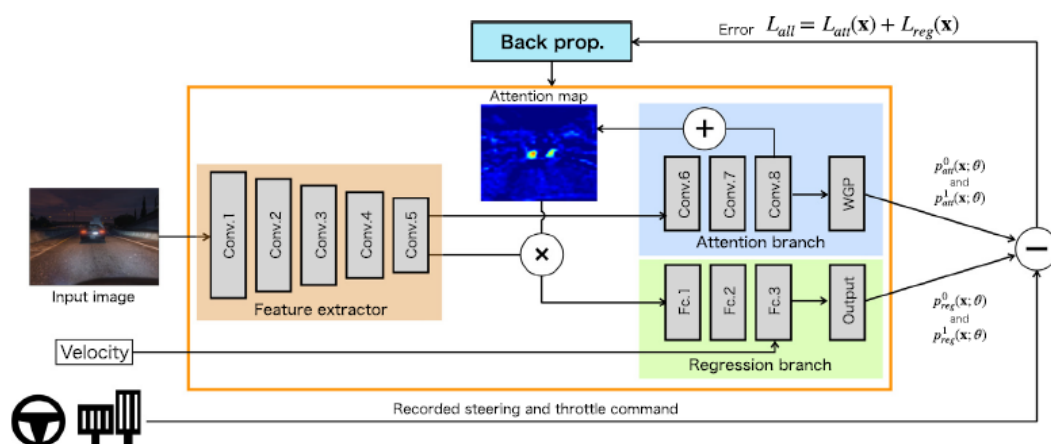


รูปที่ 2.14 Representative results of path area segmentation in citrus orchard, patch-based path detection in an orchard[16]

เอกสารนี้อธิบายวิธีการใช้การเรียนรู้เชิงลึกในงานจดจำภาพและแนะนำเทคโนโลยีการจดจำภาพล่าสุดโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก เทคโนโลยีการจดจำภาพโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกเป็นปัญหาในการค้นหาฟังก์ชันการทำแผนที่ที่เหมาะสมจากข้อมูลจำนวนมากและการทำป้าย(Label) นอกจากนี้ยังสามารถแก้ปัญหาหลายอย่างพร้อมกันได้โดยใช้การเรียนรู้แบบมัลติทาสก์(multitask learning) แนวโน้มในอนาคตไม่เพียงแต่รวมถึง "การรับรู้" สำหรับภาพที่นำเข้า แต่ยังคาดหวังอย่างมากสำหรับการพัฒนาการเรียนรู้แบบ end-to-end และเทคโนโลยีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังเชิงลึกสำหรับการ "การตัดสินใจ" และ "การควบคุม" ของยานยนต์อัตโนมัติ นอกจากนี้ การอ้างอิงเหตุผลในการตัดสินใจสำหรับผลลัพธ์ของการเรียนรู้เชิงลึกและการเสริมแรงเชิงลึกเป็นความท้าทายที่สำคัญในการใช้งานจริง และควรขยายจากการอธิบายด้วยภาพเป็นคำอธิบายด้วยวาจาผ่านการบูรณาการกับภาษาธรรมชาติกำลังประมวลผล

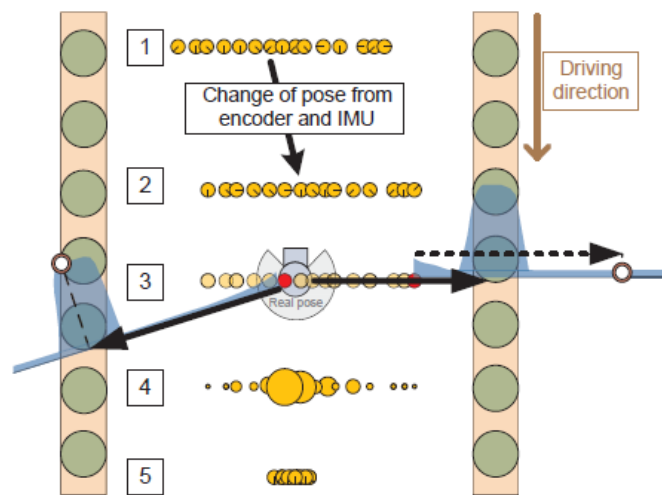


รูปที่ 2.15 Segmentation of general object recognition[17]

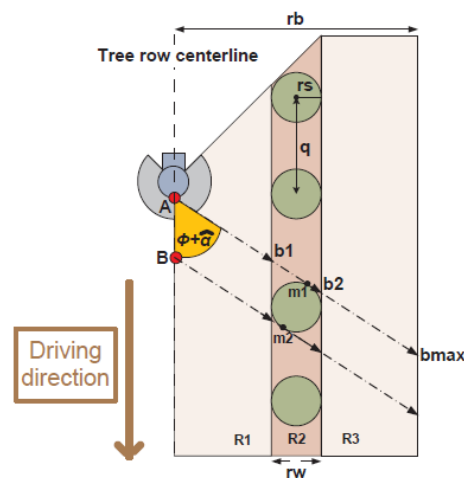


รูปที่ 2.16 Regression-type Attention Branch Network[17]

Hironobu Fujiyoshi et al. (2562) [18] การผลิตผลไม้ในสวนผลไม้ในปัจจุบันต้องใช้แรงงานจำนวนมาก ความกังวลที่เกิดจากต้นทุนแรงงานที่เพิ่มขึ้นและการขาดแคลนแรงงานสามารถบรรเทาได้ด้วยการมีหุ่นยนต์สวนผลไม้อัตโนมัติ งานวิจัยนี้ตรวจสอบความเหมาะสมของอัลกอริทึมการแปลความน่าจะเป็นสองแบบที่ใช้เครื่องสแกน 2D LIDAR สำหรับการนำทางหุ่นยนต์ของแนวแถวในสวนผลไม้ อัลกอริทึมการไล่คัลไลเซชันแรกคือตัวกรอง Particle filter (PF) ที่มีแบบจำลองลำแสงเลเซอร์ และอัลกอริทึมที่สองคือตัวกรอง Kalman filter (KF) ที่มีอัลกอริทึมการตรวจจับเส้น เราประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งสองเมื่อนำทางหุ่นยนต์ด้วยตนเองในสวนแอปเปิ้ล มีการทดลองสองครั้งเพื่อประเมินประสิทธิภาพการนำทางของอัลกอริทึมทั้งสองภายใต้เงื่อนไขที่เปรียบเทียบกันได้ การทดสอบครั้งแรกประเมินความถูกต้องของการนำทาง ในขณะที่การทดสอบที่สองทดสอบความทนทานของอัลกอริทึม



รูปที่ 2.17 Schematic explanation of the Particle filter[18]



รูปที่ 2.18 Orchard environment model[18]

## บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการพัฒนาระบบการนำทางในสวนยางพารา นี้ ได้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่จำเป็น เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบดังกล่าว เพื่อให้ทำงานได้จริงในสวนยางพารา ซึ่งขั้นตอนแรกได้มีการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการประมวลผลทางภาพ หลังจากนั้น จะทำการทดลองในขั้นสุดท้ายในสวนยางพาราจริงในประเทศไทย โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในการออกแบบระบบการนำทางโดยใช้การประมวลผลทางภาพ ดังต่อไปนี้

- 3.1 ลักษณะการปลูกของสวนยางพารา (Rubber tree plantation)
- 3.2 ทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model theory)
- 3.3 การประมวลผลทางภาพ (Image processing theory)
- 3.4 LabVIEW myRIO
- 3.5 MatLab
- 3.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

### 3.1 ลักษณะการปลูกของสวนยางพารา (Rubber tree plantation) [1]

#### 3.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต

จากข้อมูลของสถาบันวิจัยยางกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ของไทยได้ทำการศึกษาผลผลิตของยางพาราพบว่า ผลผลิตยางพาราในแต่ละภาคมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ พันธุ์ยาง ความเหมาะสมของพื้นที่ และการจัดการ รวมถึงปัจจัยทางดินและภูมิอากาศ

#### 3.1.2 หลักเกณฑ์สำหรับการปลูกยางพารา

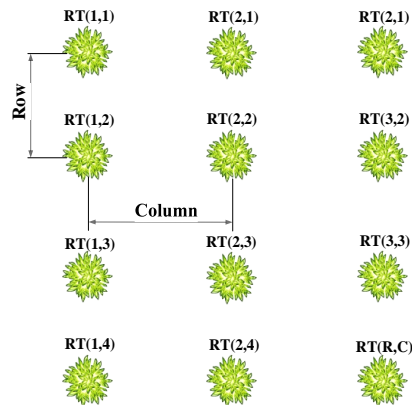
การปลูกยางพาราที่เหมาะสมจำเป็นต้องคำนึงถึงการเลือกพื้นที่การเพาะปลูกพันธุ์ยางที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาการเจริญเติบโตช้า ผลผลิตต่ำ และช่วยเพิ่มความสามารถทนต่อภาวะที่เกิดขึ้นจากความแห้งแล้งและภัยธรรมชาติอื่น ๆ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะของสวนยางพารา เช่น ระยะห่างระหว่างต้นยางที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และการจัดการสวนยาง โดยต้องวางแผนการใช้พื้นที่อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อความสะดวกในการดูแลบำรุงรักษาต้นยาง

#### 3.1.3 ขนาดของต้นยางที่สามารถเริ่มกรีดยางได้

ต้นยางที่สามารถเริ่มทำการกรีดยางได้ครั้งแรกต้องมีอายุประมาณ 5 - 6 ปีขึ้นไป โดยดูจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นยางพาราที่มีขนาดมากกว่า 100-200 มิลลิเมตร ลักษณะของต้นยางพาราส่วนโคนมีขนาดและความหนาของเปลือกมากกว่าลำต้น เมื่อตำแหน่งของความสูงของต้นยางมากขึ้นความหนาของเปลือกยางพาราลดลงซึ่งส่งผลต่อน้ำยางที่ลดลงตามลำดับ

### 3.1.4 การวางแผนการปลูกยางพารา

การวางแผนที่เหมาะสมสำหรับการปลูกรุ่นยางพารา จากการศึกษาโดยใช้พันธุ์พีเอ็ม 24 , พีบี 255 , พีบี 260 เป็นตัวอ้างอิงโดยเป็นพันธุ์ยางพาราที่มีความสูง 1,500-2,000 มิลลิเมตร และมีระยะการปลูกตามแนวแถว (Row) ห่างกัน 3,000 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างแนว (Column) ประมาณ 7,000 มิลลิเมตร แสดงดังรูป

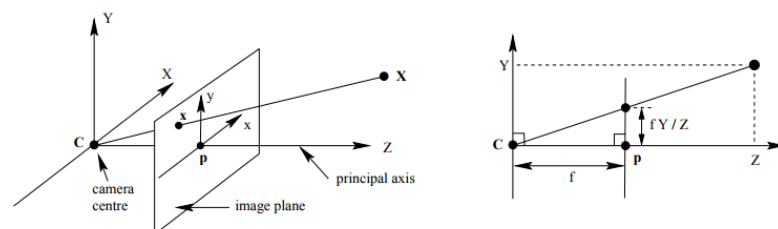


รูปที่ 3.1 การวางแผนการปลูกยางพารา

## 3.2 ทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole Theory) [20-11]

### 3.2.1 พื้นฐานทฤษฎีรูเข็ม

ทฤษฎีรูเข็มเป็นการพิจารณาการฉายภาพศูนย์กลางของจุดบนพื้นที่ของระนาบ ให้ศูนย์กลางของการฉายภาพเป็นแหล่งกำเนิดของระบบพิกัด Euclidean และพิจารณาระนาบ  $Z = f$  ซึ่งเรียกว่าระนาบภาพหรือระนาบโฟกัส (focal) โมเดลกล้องรูเข็มเป็นจุดบนระนาบที่มีพิกัด  $X = (X, Y, Z)^T$  ซึ่งถูกจับคู่กับจุดบนระนาบภาพซึ่งมีเส้นเชื่อมจุด  $X$  กับศูนย์กลางของการฉายภาพ ตรงกับระนาบภาพ แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Pinhole camera geometry. C is the camera center and p the principal point. The camera center is here placed at the coordinate origin. Note the image plane is placed in front of the camera center[20]

จากรูปสามเหลี่ยมที่คล้ายกัน คำนวณจุด  $X = (X, Y, Z)^T$  ถูกจับคู่กับจุด  $(f X / Z, f Y / Z, f)^T$  บนระนาบของภาพ ซึ่งจะได้สมการดังนี้

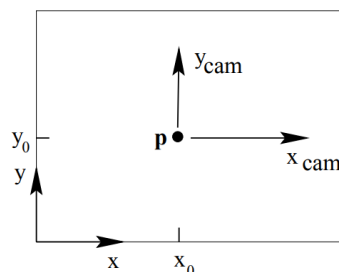
$$(X, Y, Z)^T \rightarrow (fX / Z, f Y / Z)^T \quad (3.1)$$

อธิบายการทำแผนที่การฉายภาพส่วนกลางจากโลกไปยังพิกัดภาพ คือการทำแผนที่จาก IR3 แบบ 3 ช่องของ Euclidean ไปยัง IR2 แบบ Euclidean 2-space ศูนย์กลางของการฉายภาพเรียกว่า ศูนย์กลางของกล้อง เป็นที่รู้จักกันในชื่อที่เรียกว่าศูนย์ออปติคัล เส้นจากจุดศูนย์กลางกล้องที่ตั้งฉากกับระนาบภาพเรียกว่าแกนหลัก และจุดที่แกนหลักไปบรรจบกับระนาบภาพเรียกว่าจุดหลัก ระบายที่ผ่านศูนย์กลางกล้องขนานกับระนาบภาพเรียกว่าระนาบหลักของกล้อง

Central projection โดยการใช้ homogeneous coordinate การฉายภาพส่วนกลางโดยใช้พิกัดที่เป็น homogeneous coordinates หากพิกัดโลก และจุดภาพแสดงด้วยเวกเตอร์ที่เป็นแบบ homogeneous การฉายภาพส่วนกลางจะแสดงอย่างง่าย ๆ เป็นการทำแผนที่เชิงเส้นระหว่างพิกัดที่เป็น homogeneous โดยเฉพาะสมการที่ 3.1 เขียนในรูปของ homogeneous camera projection matrix ได้ดังสมการที่ 3.2

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & & 0 \\ & f & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Principal point offset จากสมการที่ 3.1 ที่มาของพิกัดในระนาบภาพอยู่ที่จุดหลัก ในทางปฏิบัติอาจไม่เป็นเช่นนั้นโดยทั่วไปมีการทำแผนที่ ดังสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Image  $(x, y)$  and camera  $(x_{cam}, y_{cam})$  coordinate systems[20]

โดยที่  $(p_x, p_y)^T$  คือพิกัดของจุดหลัก แสดงดังรูปที่ 3.3 เขียนในรูปของ homogeneous camera projection matrix ได้ดังสมการที่ 3.4

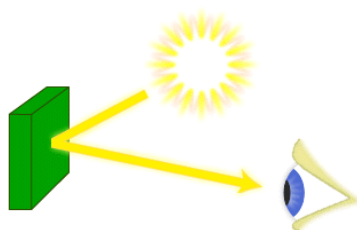
$$(X, Y, Z)^T \rightarrow (fX / Z + p_x, f Y / Z + p_y)^T \quad (3.3)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ & f & p_y & 0 \\ & & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.3 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)[22]

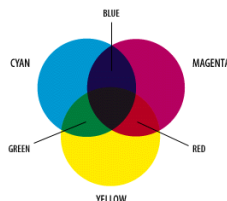
#### 3.3.1 การประมวลผลภาพดิจิทัล

ใช้วิธีการประมวลผลจากภาพดิจิทัล โดยใช้เทคนิคการสกัดคุณลักษณะ (feature extraction) มีขั้นตอนการทำงาน 5 ขั้นตอนหลักคือ การรับข้อมูลภาพเข้ามาในระบบ การเตรียมภาพก่อนทำการประมวลผล (preprocessing) การประมวลผลภาพ (image processing) จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการค้นหาข้อมูล (image retrieval) ขั้นตอนสุดท้าย คือการแสดงผลข้อมูล (display information) ที่ได้จากการค้นคือข้อมูลจากภาพ โดยทฤษฎีสี ในศตวรรษที่ 17 นิวตันพบว่าลำแสงสีขาวของแสงแดดประกอบด้วยรังสีแสงสว่างที่มีสีต่างกันหลายสี เพราะเมื่อให้แสงแดดส่องผ่านแท่งปริซึมแสงจะกระจายออกเป็นสีรุ้งเรียกว่าสเปกตรัมแตเมื่อนำเอาสเปกตรัมเหล่านั้นมาผ่านแท่งปริซึม อันที่ 2 แสงที่จะได้จะกลายเป็นแสงสีขาวเหมือนเดิม เขาจึงสรุปว่าสีรุ้งทั้ง 7 ในสเปกตรัมเป็นสีปฐมภูมิ ถ้าปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวเช่น 650 nm ที่มีปริมาณมากพอกระทบเรตินาในลูกตา ความรู้สึกถึงสีที่ต่างจากสีอื่นจะเกิดขึ้นและสิ่งเร้านั้นจะบอกได้ว่าเรามีกำลังมองเห็นเป็น “ สีแดง ” ดังนั้นสีจึงแสดงออกมาในรูปของความรู้สึกหรือเรื่องราวของการมองเห็น ซึ่งเกิดจากการกระทำของพลังงานที่ความยาวคลื่นใด ๆ ที่กระทำต่อเรตินาของตาคนปกติ ความยาวแตกต่างของความยาวคลื่นจะทำให้เกิดความรู้สึกที่ต่างกันของการมองเห็นสีวัตถุจะมองดูแตกต่างกันเมื่ออยู่ภายใต้แสงสีที่ต่างกัน สีของวัตถุจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแสงที่ตกกระทบวัตถุนั้น การสะท้อนแสงวัตถุและคุณสมบัติในการตอบสนองของตาสีของวัตถุขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการดูดกลืนแบบเลือก



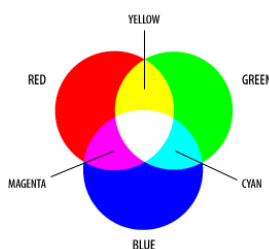
รูปที่ 3.4 การมองเห็นสีของวัตถุจากตา[22]

การดูดกลืนแบบเลือกเป็นผลของสีวัตถุที่แยกอนุภาคของแสงที่ส่องสว่างวัตถุนั้น ส่วนหนึ่งของรังสีจะถูกกลืนไว้แล้วสะท้อนส่วนที่เหลือออกไป เช่น วัตถุที่มีสีเขียวเมื่อถูกส่องด้วยแสงแดดวัตถุนั้นจะดูดกลืนพลังงานในช่วงอื่นไว้อย่างสิ้นเชิงและสะท้อนแสงสีเขียวเข้าตา จึงมองเห็นวัตถุนั้นเป็นสีเขียว เป็นต้น ทฤษฎีการผสมสี แบบลบปริวรรเตอร์ได้ทดลองเกี่ยวกับสีต่าง ๆ และพบว่ามีสีหลักอยู่ 3 สี ที่สามารถนำมาผสมกันเพื่อทำให้เกิดสีรุ้งทั้ง 7 ที่นิวตันได้พบในสเปกตรัมของแสงแดดสีทั้ง 3 ที่ปริวรรเตอร์ เรียกว่าสีปฐมภูมิหรือแม่สีของวัตถุคือ สีแดงเข้ม (magenta) สีเหลือง (yellow) และสีน้ำเงินเขียว (cyan) สีเหล่านี้เรียกว่า สีปฐมภูมิแบบลบ



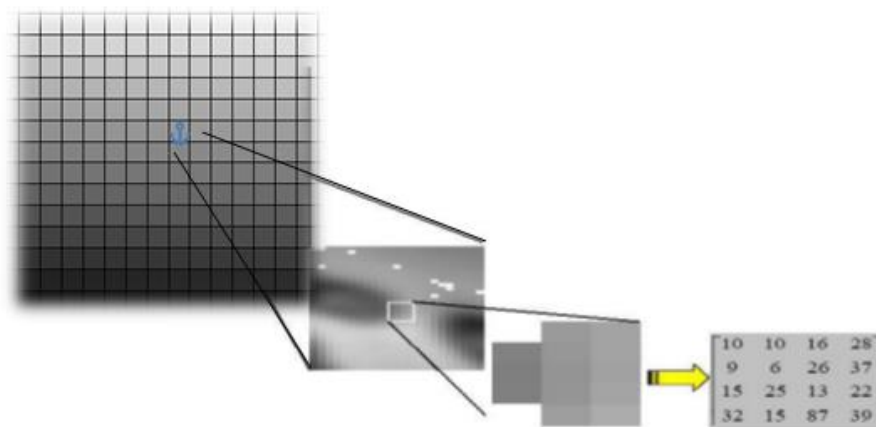
รูปที่ 3.5 การผสมสีแบบบวก [22]

ถ้าเอาสีปฐมภูมิแบบลบคู่ใดคู่หนึ่งมาผสมกันจะเกิดสีทุติยภูมิแบบลบขึ้นมาอีก 3 สี คือ สีแดง (red) เขียว (green) และสีน้ำเงิน (blue) ดังภาพที่ 2.15 แต่เมื่อเอาสีปฐมภูมิทั้ง 3 มาผสมรวมกันในสัดส่วนที่เท่ากันจะได้สีดำ การผสมสีแบบนี้พบได้ในสีน้ำ – สีย้อมทั่วไป ทฤษฎีการผสมสีแบบบวก ในศตวรรษที่ 19 โทมัส ยังได้บัญญัติทฤษฎีที่ว่าแสงสีขาวประกอบด้วยสีปฐมภูมิ 3 สี คือ สีแดง เขียวและน้ำเงิน สีปฐมภูมิลเหล่านี้สามารถผสมกันเพื่อทำให้เกิดสีรุ้งทั้ง 7 ในสเปกตรัมได้ ทฤษฎีนี้ได้รับการยืนยันจากเฮลมโฮลซ์และ แมกซ์เวลล์ เฮลมโฮลซ์ ได้ขยายงานทดลองของยังได้ระบุว่า ภายในลูกตาคนเรามีใยประสาทเกี่ยวกับการมองเห็น 3 กลุ่มแต่ละกลุ่มจะมีความรู้สึกไวต่อแสงปฐมภูมิในแต่ละช่วงต่างกันคือ กลุ่มที่ 1 ไวต่อแสงสีแดง ส่วนกลุ่มที่ 2 ไวต่อแสงสีเขียว และส่วนกลุ่มที่ 3 ไวต่อแสงสีน้ำเงินโดยคิดว่าแสงที่มีสีอยู่ระหว่างสีปฐมภูมิลเหล่านี้ส่องจะตีความหมายออกมาว่าเป็นสีอะไร ตามทฤษฎีนี้แสงสีขาวจะเกิดจากการเร้าความรู้สึกของใยประสาททั้ง 3 กลุ่มเท่า ๆ กันในเวลาเดียวกัน ซึ่งสามารถใช้อธิบาย การรวมกันของสีทางสเปกตรัมได้อีกด้วย การรวมกันของสีของแสง เรียกว่า ขบวนการผสมสีแบบบวกซึ่งตรงข้ามกับทฤษฎีสีของปริวรรเตอร์



รูปที่ 3.6 สีปฐมภูมิแบบลบ[22]

ภาพ (image) ประกอบด้วยกลุ่มของวัตถุที่กำหนดบริเวณต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยกส่วนภาพออกเป็นบริเวณต่าง ๆ ตามบริเวณที่สนใจ (region of interest) ได้ หน่วยพื้นฐานของภาพ เรียกว่า จุดภาพ (pixel) โดยจุดภาพหมายถึง จุดภาพในรูปภาพที่รวมกันเป็นภาพขึ้น มีตำแหน่งพิกัด  $(x, y)$  และค่าความเข้ม (intensity) ของภาพ โดยภาพหนึ่งมีจุดภาพมากมาย และแต่ละภาพที่สร้างขึ้นมีความหนาแน่นของจุดภาพ หรือความละเอียด (ความคมชัด) ที่แตกต่างกันไป จึงใช้ในการบอกคุณสมบัติของภาพ จอภาพ หรือ อุปกรณ์แสดงผลภาพได้ ภาพสี (color image) ภาพในระบบสี RGB คือ เมตริกซ์ ซึ่งแสดงค่าความเข้มของแสงสีแดง (R) 8 บิต สีเขียว (G) 8 บิต และ สีน้ำเงิน (B) 8 บิต ดังนั้นภาพสีในระบบ RGB จะมีจำนวนบิตต่อจุดภาพทั้งหมด 24 บิต ทำให้สามารถแสดงสีได้ถึง 16,777,216 สี ภาพระดับสีเทา (grayscale image) จะอยู่ในรูปแบบของความเข้มแสงในแต่ละจุดภาพ โดยจะมีระดับความเข้มสีเทาคือ 0-255 (8 bit) โดยสีดำจะแทนด้วยค่าตัวเลข 255 สีขาวจะแทนด้วยค่าของตัวเลขคือ 0 รวมทั้งสิ้น 256 ระดับสีถึงแม้ว่าภาพระดับสีเทามีความซับซ้อนมากกว่าภาพ ขาว – ดำ แต่ภาพระดับ สีเทา สามารถให้ข้อมูลได้กว้างขวางมากกว่า ภาพ ขาว – ดำ เนื่องจากภาพระดับสีเทาเกิดจากการแปลงภาพสีในระบบ RGB มาเป็นภาพระดับสีเทา



รูปที่ 3.7 ลักษณะค่าในแต่ละจุดภาพของภาพระดับสีเทา[22]

โดยใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 3.5

$$Gray = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (3.5)$$

Gray = ค่าความเข้มของสีเทาโดยจะมีค่าระหว่าง 0-255

R = ค่าความเข้มของสีแดงโดยจะมีค่าระหว่าง 0-255

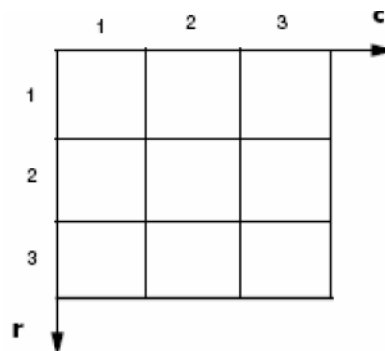
G = ค่าความเข้มของสีเขียวโดยจะมีค่าระหว่าง 0-255

B = ค่าความเข้มของสีน้ำเงินโดยจะมีค่าระหว่าง 0-255

ภาพระดับสีเทา (intensity image or monochrome image or gray image) ภาพระดับสีเทาเป็นภาพที่แสดงค่าความเข้มแสง ณ แต่ละตำแหน่งของจุดภาพภายในภาพ ซึ่งภาพในแต่ละภาพจะมีลักษณะเป็นโทนสีเทา (gray scale) โดยค่าความเข้มแสงที่สามารถแสดงได้ (gray level) จะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้แทนภาพในแต่ละภาพได้จาก  $L = 2^k$  เมื่อ  $L$  คือ ระดับสีเทาและ  $k$  คือ ค่าจำนวนบิตที่ใช้แทนภาพ เช่น ภาพระดับสีเทาขนาด 8 บิตสามารถแสดงค่าระดับสีเทาได้ทั้งหมด 256 ระดับ และค่าที่เป็นไปได้คือ (0-255) ภาพระดับสีเทา (gray level image) หมายถึง ภาพที่มีค่าความสว่างของแต่ละจุดภาพอยู่ในช่วงสีดำ สีเทา เรื่อยไปจนถึงสีขาวซึ่งเป็นค่าความสว่างมากที่สุดสำหรับค่าของระดับสีเทานั้น ปกติแล้วจะเป็นกำลังของ 2 ซึ่งโดยทั่วไปที่ใช้จะเป็น 8 บิต (256 ระดับ) หรืออาจใช้จำนวนบิตมากกว่านี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพที่ความต้องการว่ามากหรือน้อยเพียงใด

### 3.3.2 การสกัดคุณลักษณะพิเศษจากภาพ (feature extraction)

การสกัดคุณลักษณะพิเศษจากภาพ (feature extraction) เป็นวิธีหาจุดเด่นของภาพ เพื่อลดขนาดข้อมูล (dimension) ของภาพ และนำมาเป็นตัวแทนของภาพ โดยกระบวนการแปลงความข้อมูลภาพในการวิเคราะห์ภาพใช้ข้อมูล 3 ประเภท ได้แก่ 1) ข้อมูลเชิงความถี่ (spectral) คือ ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของโทนสี (tone) ในช่วงของความถี่ต่างๆ 2) ข้อมูลเชิงพื้นผิว (textural) คือ การกระจายเชิงพื้นที่ของการเปลี่ยนแปลงโทนสีภายในช่วงความถี่ที่ต่างกัน 3) ข้อมูลเชิงเนื้อหา (contextual) คือ ผลที่ได้มาจากการประมวลผลภาพ ซึ่งความแตกต่างระหว่างข้อมูลเชิงความถี่และข้อมูลเชิงพื้นผิว คือ ข้อมูลเชิงความถี่เน้นไปที่ค่าการหาค่าสีเทาของจุดภาพ ส่วนข้อมูลเชิงพื้นผิวเน้นไปที่การหาค่าระดับเทาซ้ำๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงร่างของภาพ โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทางอย่างรวดเร็วในโครงร่างที่ละเอียด และเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในโครงร่างที่หยาบ สำหรับการวิเคราะห์โครงร่างของภาพ



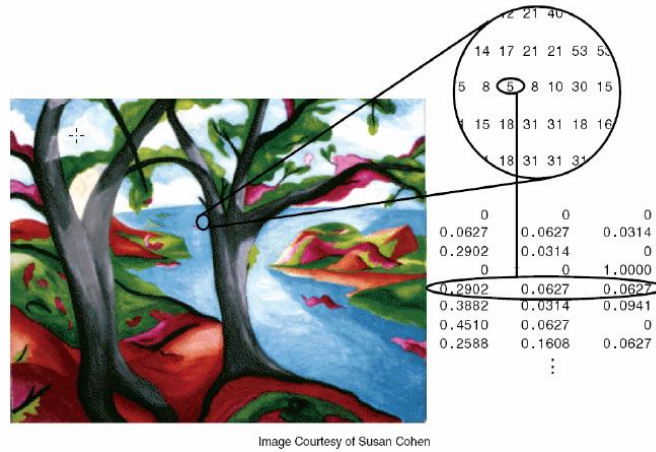
รูปที่ 3.8 Pixel coordinate[22]

ชนิดของภาพ (Type of image) มีทั้งหมด 4 แบบ คือ

- 1) Binary image ภาพขาว-ดำ
- 2) Intensity image ภาพมีสีเทา
- 3) Indexed image ภาพสี
- 4) RGB image ภาพสี

ส่วนประกอบของ pixel coordinate คือ ส่วนแรก r (the row) หรือแถว ซึ่งนับเพิ่มตามแนวลง ส่วนที่สอง c (column) ซึ่งนับเพิ่มไปทางขวา

3.2.2.1 Image type in the image processing toolbox



รูปที่ 3.9 indexed image[22]

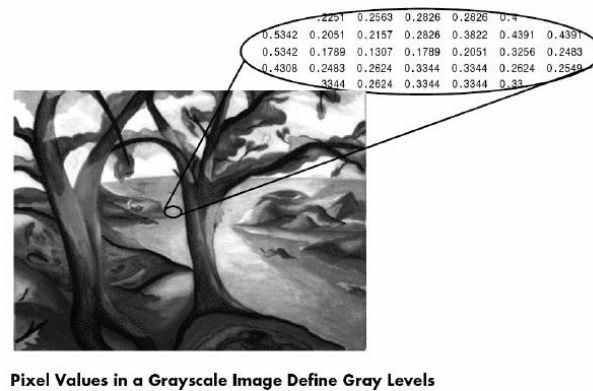
3.2.2.2 Indirect image เป็นภาพสีที่ประกอบไปด้วย array และ color map matrix โดยการใช้ค่าตัวแปร 'X' ซึ่งบรรจุใน array ในการชี้ค่าไปที่ color map ดังแสดงในรูปที่ 3.9



The Color Planes of a Tricolor Image

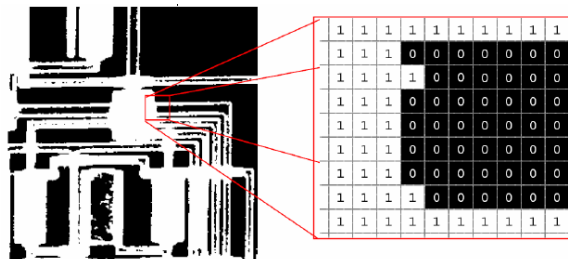
รูปที่ 3.10 RGB image[22]

3.2.2.3 RGB image (true color image) เป็นภาพสีซึ่งเก็บในลักษณะ red, green, blue ในรูป array  $m \times n \times 3$  โดยมี 3array ขนาด  $m \times n$  ทั้งหมดดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.11 intensity image[22]

3.2.2.4 Intensity image เป็นภาพที่มีลักษณะเป็นสีเทา การเก็บข้อมูลใน matrix จะเก็บในรูปจำนวนจริงมีค่าระหว่าง 0 – 1 ซึ่งค่าระหว่างนั้นคือค่าความเข้มของสีเทา เมื่อเป็นสีดำเมื่อเท่ากับ 0 และเป็นสีขาวเมื่อเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 Binary image[22]

3.2.2.5 Intensity image เป็นภาพสีเทาใน data matrix จะมีค่าอยู่ภายในช่วง [0 1] โดย MATLAB จะเก็บ intensity image เป็น 1 matrix ซึ่งแต่ละ element ก็คือ 1 image pixel โดยสมาชิกใน intensity matrix ก็คือค่า intensity or gray level (ความเข้มของภาพที่เป็นสีเทา) ดังแสดงในรูปที่ 3.12

### 3.3.3 Unsharp mask [23]

การทำ Unsharp mask (USM) คือการเพิ่มความคมชัดให้กับภาพ โดยการทำให้เกิดความแตกต่างกัน(contrast) ที่ขอบในแต่ละพิกเซล USM ทำงานโดยเพิ่มคอนทราสต์ของบริเวณขอบๆ บนภาพ ในขณะที่ไม่แตะต้องส่วนอื่นๆ ของภาพจำนวนของความคมชัดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัว คือ

1. ปริมาณคอนทราสต์ที่เกิดขึ้นที่ขอบพิกเซลแต่ละพิกเซล (intensity ใน NC หรือ amount ใน PS) การปรับ intensity นั้นก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของเรา ที่จะเพิ่มให้ภาพมีขนาดความคมชัดขนาดเท่าใด

2. ขอบเขตรัศมีจำนวนของพิกเซลที่อยู่รอบบริเวณขอบของภาพ (halo width ใน NC หรือ radius ใน PS) การปรับ halo width นั้น เพื่อระบุจำนวนพิกเซลที่อยู่รอบบริเวณขอบของภาพ ว่าต้องการให้มีกว้างเพียงเท่าใดภาพที่มีความละเอียดสูง (high resolution) ค่า halo width หรือ radius ก็ควรมีค่าสูงตามไปด้วย แต่ถ้าภาพมีความละเอียดต่ำ ค่า halo width หรือ radius ก็ต้องมีค่าต่ำลงตามเช่นกัน

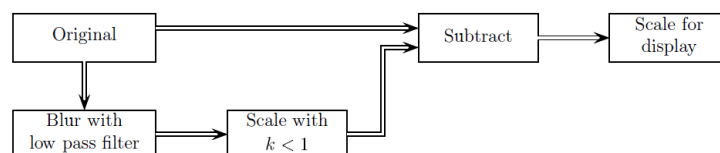
3. ค่ากำหนดความสำคัญระหว่าง พิกเซลทุกพิกเซลกับพิกเซล ที่มีค่าความต่างสีสูง (threshold) การปรับ threshold นั้นเพื่อกำหนดความสำคัญของพิกเซล ถ้าค่า threshold มีค่าเป็นศูนย์ หมายถึงจะไม่พิจารณาถึงพิกเซลที่มีค่าความต่างสีสูงขอบภาพ จะพิจารณาความต่างเท่ากันทุกพิกเซล ดังนั้นจะให้ผลลัพธ์ภาพมีความคมชัดเท่ากันทั่วทั้งภาพ แต่หากเราเพิ่มค่า threshold ขึ้นไป ความคมชัดก็จะปรากฏเฉพาะบริเวณขอบภาพ เพราะพิจารณาเฉพาะพิกเซลที่มีค่าความต่างสูงเท่านั้น การทำ USM นอกจากจะทำให้ภาพมีความคมชัดเพิ่มขึ้นแล้ว ยังได้ประโยชน์ในการที่จะไม่เพิ่มจำนวน noise ให้กับภาพอันเนื่องมาจากการทำ sharpen เพราะได้ใช้ประโยชน์ของ threshold ตามที่กล่าวมาแล้ว การหลีกเลี่ยง noise ที่จะปรากฏขึ้นบนภาพ อาจจะยกเลิกการทำ sharpen ที่ตัวกล้อง โดยการ set sharpen ที่ตัวกล้องเป็น none แล้วมาเพิ่มความคมชัดของภาพโดยการใช้ USM ที่ Nikon capture หรือที่ Photoshop เพื่อเลือกทำความคมชัดเฉพาะขอบ การทำ USM ที่ NC นั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อ color balance ของภาพ เพราะโปรแกรมจะทำ USM เฉพาะ luminosity channel หรือ lightness เหมือนกับที่ทำ USM ใน PS ที่จะต้อง convert ภาพให้อยู่ใน lab mode ก่อน แล้วค่อยเลือกทำ USM ใน luminosity หรือ lightness channel ดังนั้นการทำ USM ใน NC จึงสะดวกกว่ามาก



(ก) original image



(ข) The image after unsharp masking



รูปที่ 3.13 schema for Unsharp masking, (ก) original image

(ข) The image after Unsharp masking[23]

### 3.3.4 หลักการทำงานของกล้อง

หลักการทำงานของกล้องใช้หลักการรูเข็มโดยรับแสงจากวัตถุผ่านรูขนาดเล็กตกกระทบบนฉากรับภาพ โดยที่ภาพที่ตกกระทบบนฉากรับภาพเป็นภาพหัวกลับ ซึ่งกล้องแต่ละประเภทมีความสามารถในการพัฒนาภาพที่แตกต่างกัน ส่วนมากมีการใช้เลนส์ การปรับขนาดรูรับแสง หรือเพิ่มขนาดของแสงให้เข้าตัวกล้องมากขึ้น ทำให้ได้ภาพที่ชัดและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นกว่าการใช้รูรับแสงแบบปกติ

### 3.3.5 ส่วนประกอบของกล้อง

3.3.5.1 ส่วนที่ทำให้เกิดภาพประกอบด้วยเลนส์ที่สามารถเปิด-ปิด เพื่อให้แสงผ่านเข้าไปตกกระทบบนฉากรับภาพโดยสามารถควบคุมเวลาการเปิดปิดได้ผ่านทางชัตเตอร์ (Shutter) ในส่วนของการปรับช่องรับแสงสามารถควบคุมไดอะแกรม (Diaphragm) ที่อยู่ในเลนส์

3.3.5.2 ส่วนไวแสงประกอบด้วยวัตถุไวแสงหรือฟิล์มซึ่งเกิดจากการที่แสงผ่านส่วนที่ทำให้เกิดภาพและตกลงบนวัตถุไวแสงหรือฟิล์ม

### 3.3.6 ความหมายและความสำคัญของความยาวโฟกัส (Focal length)

ความยาวโฟกัส (Focal length) คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางโฟกัสของเลนส์ (Optical center of lens) กับระนาบโฟกัสของภาพหรือฟิล์ม โดยที่ความยาวโฟกัสของแต่ละเลนส์สามารถปรับค่าได้ ส่งผลให้มุมในการรับภาพและช่วงความยาวโฟกัสที่แตกต่างกันโดยที่เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสสั้นสามารถรับภาพได้มุมที่กว้างกว่าและมีความคมชัดของภาพมากกว่า

### 3.3.7 ข้อมูลและคุณสมบัติของกล้องที่เลือกนำมาทำการทดลอง

กล้องที่ใช้คือ Logitech HD Pro Webcam C920 ซึ่งข้อมูลสำคัญที่ต้องใช้เพื่อนำมาคำนวณคือระยะโฟกัส (Focal length) โดยค่าระยะโฟกัสมาจากการคำนวณจากการใช้หลักการรูเข็มในการหาระยะโฟกัสโดยผ่านโปรแกรม



รูปที่ 3.14 Logitech HD Pro Webcam C920

#### 3.2.6.1 Specifications Logitech HD Pro Webcam C920

Max. Resolution: 1080p / 30 fps - 720p / 30 fps

Focus Type: automatic

Built-in Microphone: stereo

Universal Clip Compatible with Tripods for Monitors, LCD Displays or Laptops

Cable Length: 1.5 m

Dimensions:

Height x Width x Depth: 29 mm. x 94 mm. x 24 mm.

Cable Length: 1.5 m

System Requirements:

Compatible with: Works in USB Video Device Class (UVC) mode with compatible video conferencing clients:

Windows 10 or later, Windows 8, Windows 7

MacOS 10.10 or later

Chrome OS

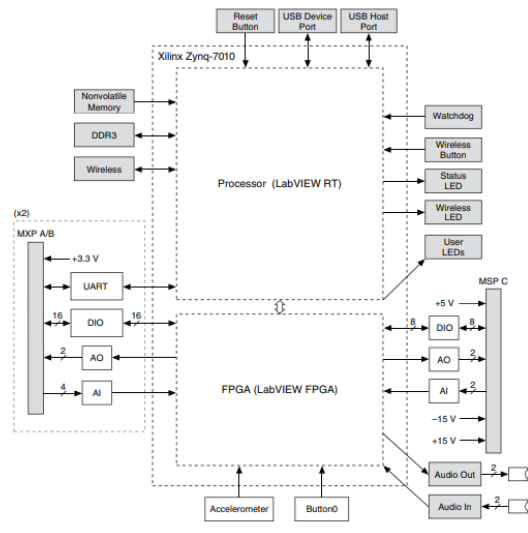
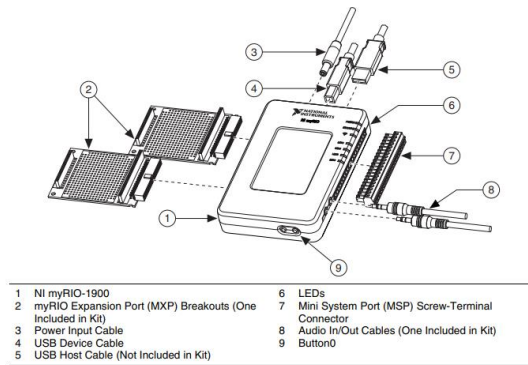
Android v 5.0 or later

USB Port

Internet Connection

### 3.4 LabVIEW myRIO

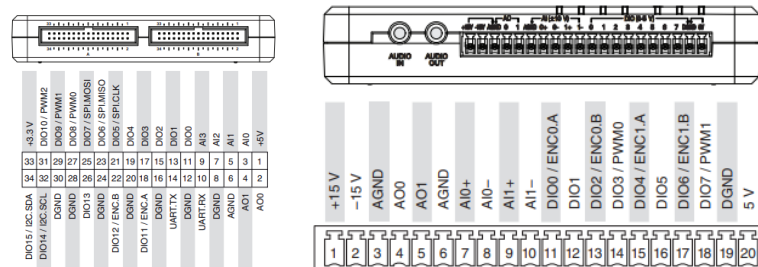
National Instruments myRIO-1900 เป็นอุปกรณ์ I/O (RIO) ที่กำหนดค่าได้แบบพกพาที่สามารถใช้ในการออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ และระบบแมคคาทรอนิกส์ เอกสารนี้ประกอบด้วย pinouts, connectivity information, dimensions, mounting instructions, and specifications สำหรับ NI myRIO-1900 ให้อินพุตแบบอนาล็อก (AI) เอาต์พุตอนาล็อก (AO) อินพุตและเอาต์พุตดิจิทัล (DIO) เสียง และเอาต์พุตกำลังในอุปกรณ์ฝังตัว NI myRIO-1900 สามารถเชื่อมต่อกับโฮสต์คอมพิวเตอร์ผ่าน USB และไร้สาย



รูปที่ 3.15 NI myRIO-1900

### 3.4.1 Connector Pinouts

NI myRIO-1900 Expansion Port (MXP) คอนเนคเตอร์ A และ B มีชุดสัญญาณเหมือนกันสัญญาณจะแยกความแตกต่างในซอฟต์แวร์ตามชื่อตัวเชื่อมต่อ เช่นใน Connector A/DIO1 และขั้วต่อB/DIO1 สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับการกำหนดค่าและการใช้สัญญาณ รูปภาพและตารางต่อไปนี้แสดงสัญญาณบนขั้วต่อ MXP A และ B โปรดทราบว่าหมุดบางตัวมีฟังก์ชันรองและฟังก์ชันหลัก



รูปที่ 3.16 Primary/Secondary Signals on MXP Connectors A, B and C

ตารางที่ 3.1 Descriptions of Signals on MXP Connectors A and B

Signal Name	Reference	Direction	Description
+5V	DGND	Output	+5 V power output.
AI<0..3>	AGND	Input	0-5 V, referenced, single-ended analog input channels. Refer to Analog Input Channels section for more information.
AI<0..1>	AGND	Output	0-5 V, referenced, single-ended analog output. Refer to Analog Output Channels section for more information.
DGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output
+3.3V	DGND	Output	+3.3 V power output
DIO<0..15>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input. Refer to the DIO Line section for more information.
UART.RX	DGND	Input	UART receive input. UART lines are electrically identical to DIO lines.
UART.TX	DGND	Output	UART receive output. UART lines are electrically identical to DIO lines.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital signals, +5 V, and +3.3 V.

ตารางที่ 3.2 Descriptions of Signals on MXP Connectors C

Signal Name	Reference	Direction	Description
+15V/-15V	AGND	Output	+15V/-15V power output.
AI0+/AI0- AI1+/AI1-	AGND	Input	$\pm 10V$ , differential analog input channels. Refer to Analog Input Channels section for more information.
AO<0..1>	AGND	Output	$\pm 10V$ referenced, single-ended analog output channels. Refer to Analog Output Channels section for more information.
DGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output
+5V	DGND	Output	+5 V power output
DIO<0..7>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input. Refer to the DIO Lines section for more information.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital signals, +5 V, and +3.3 V.

### 3.5 MatLab

3.6.1 imread คือ การอ่านรูปภาพจาก graphic file โดยที่ก่อนที่จะอ่านค่าของภาพได้จำเป็นต้องใช้เช่น `color image = imread('capture.jpg');` capture.jpg เป็นชื่อ file ของภาพ

3.6.2 imcrop คือ การตัดรูปภาพจาก graphic file บนตำแหน่งภาพที่ต้องการนำไปประมวลผล เช่น `img = imcrop(imgRGB,[r0 c0 r1 c1]);` โดย 78 78 1140 590 คือ ตำแหน่งที่ต้องการบนภาพ

3.6.3 imshow คือ การแสดงรูปภาพที่จะทำการทดลอง โดยที่ก่อนจะใช้ฟังก์ชันนี้จะต้องทำการใช้ฟังก์ชัน imread ก่อน เช่น `color_image = ([capture.jpg]); imshow (color_image)`

3.6.4 figure, imshow คือการแสดงผลโดยทุกครั้งที่จะแสดงรูปให้ทำการเปิดหน้าต่างใหม่ ไม่ซ้ำหน้าต่างเดิมที่มีอยู่ เช่น `figure, imshow (color_image); color_image` เป็นชื่อตัวแปรที่แทนรูปภาพ

3.6.5 rgb2gray คือ การแปลง ภาพจาก RGB ไปเป็น gray scale หรือภาพสีเทา เช่น `img_g = rgb2gray(img);` โดย img ภาพที่ต้องการแปลงเป็นระดับสีเทา

3.6.6 `img(:,:,1)` คือ การเลือกระดับสี R ในระบบสีของภาพ RGB เพื่อนำมาประมวลผล เช่น `img_R = img(:,:,1)`; โดยที่ 1 แทนระดับสี R, `img_R` เป็นชื่อตัวแปรที่แทนรูปภาพ

3.6.7 `img(:,:,2)` คือ การเลือกระดับสี G ในระบบสีของภาพ RGB เพื่อนำมาประมวลผล เช่น `img_G = img(:,:,2)`; โดยที่ 2 แทนระดับสี G, `img_G` เป็นชื่อตัวแปรที่แทนรูปภาพ

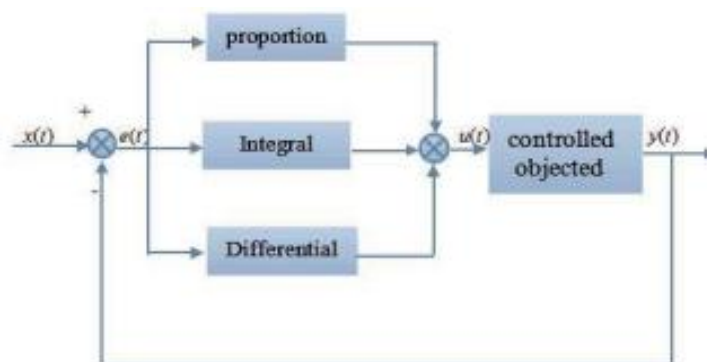
3.6.8 `img(:,:,3)` คือ การเลือกระดับสี B ในระบบสีของภาพ RGB เพื่อนำมาประมวลผล เช่น `img_B = img(:,:,3)`; โดยที่ 3 แทนระดับสี B, `img_B` เป็นชื่อตัวแปรที่แทนรูปภาพ

3.6.9 การทำ unsharp mask (USM) คือการเพิ่มความคมชัดให้กับภาพ โดยการทำให้เกิดความแตกต่างกัน (contrast) ที่ขอบในแต่ละพิกเซล USMทำงานโดยเพิ่มคอนทราสต์ของบริเวณขอบๆ ในภาพ ในขณะที่ไม่ปรับปรุงความคมชัดส่วนอื่นๆ ของภาพ เช่น `H = fspecial('unsharp');`  
`sharpened = imfilter(img_g,H,'replicate');`

3.6.10 `im2bw` คือ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ `th=0.4235` ซึ่งไถ้เลข 0.4235 หรือร้อยละ 42.35 ถ้าเทียบเป็นความเข้มของสีเทาแล้วจะอยู่ที่  $255 \times 0.4235 = 107.9925$  หรือ 108 กล่าวคือถ้าจุดพิกเซลใดมีค่าความเข้มสีเทาต่ำกว่าค่าเทรชโฮลนั้นจะมีค่าเป็น 0 (สีดำ) ในภาพ binary และจุดพิกเซลใดที่มีค่าความเข้มสีเทาสูงกว่าค่าเทรชโฮลนั้น จะมีค่าเป็น 1 (สีขาว) ในภาพ binary หลังจากนั้นจึงแปลงภาพให้เป็น binary

### 3.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)[24]

ด้วยความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ความต้องการการควบคุมที่แม่นยำเพิ่มขึ้น เวลาตอบสนอง ของระบบควบคุมอัตโนมัติและความเสถียรต้องสูงขึ้น การควบคุม PID แบบดั้งเดิมมุ่งเน้นไปที่การควบคุม ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการเชิงเส้น และกระบวนการทางอุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดคือ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในธรรมชาติ การควบคุม PID ไม่สามารถทำการการควบคุมที่แม่นยำของกระบวนการดังกล่าว การควบคุม PID แบบบูรณาการในปัจจุบันมีการใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากโครงสร้างที่เรียบง่าย (simple construction) และทนทาน (robustness) พื้นฐานของ PID การควบคุมคือการดำเนินการควบคุมโดยใช้ proportion , integration และ differential ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 Block Representation of a PID Controller

Control equation for PID Controller คือ

$$e(t) = x(t) - y(t) \quad (3.6)$$

Control law ของ PID controller คือ

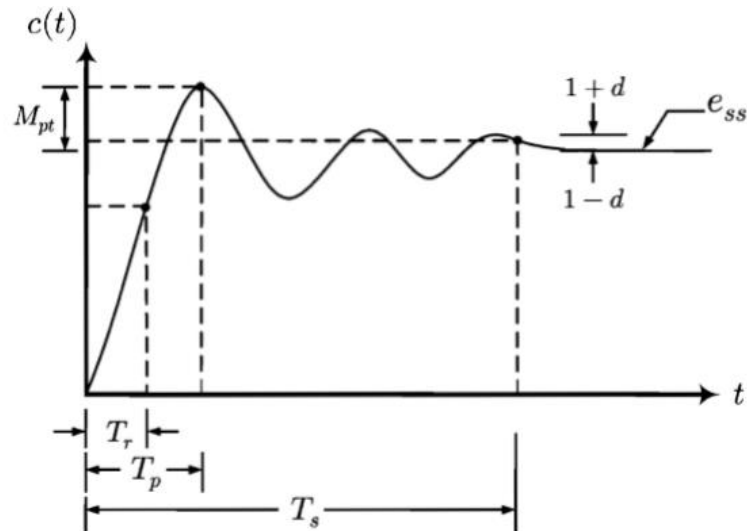
$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d_e(t)}{dx} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $k_p, k_i$  and  $k_d$  คือ proportional gains, integral gains และ derivative gains ตามลำดับ ระบบควบคุมแบบพีไอดี เป็นระบบที่นำผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับ สัญญาณอ้างอิง ซึ่งสัญญาณที่เปรียบเทียบนั้นเรียกว่า ค่าความผิดพลาด (Error) จากนั้นนำค่าความผิดพลาดป้อนกลับไปยังตัวควบคุมของระบบ เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ลู่เข้าสู่ค่าสัญญาณอ้างอิง จากที่กล่าว มา ระบบควบคุมแบบพีไอดีมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System) โดยระบบควบคุมแบบพีไอดีจะประกอบไปด้วย ค่าคงที่อัตราขยายสัดส่วน (Proportional :  $K_p$ ) ค่าคงที่อัตราขยายปริพันธ์ (Integral :  $K_i$ ) และค่าคงที่อัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative :  $K_d$ ) ซึ่งค่าคงที่ทั้ง 3 ค่า จะส่งผลให้ระบบมีผลตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยค่า  $K_p$  จะช่วยลดช่วงเวลาขาขึ้น (Rise Time) ค่า  $K_i$  จะช่วยลดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady State Error) และค่า  $K_d$  ช่วยลดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) และช่วยทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยสามารถแสดงคุณสมบัติการปรับค่าพารามิเตอร์ของอัตราขยายแต่ละตัวได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติการปรับค่าพารามิเตอร์ของอัตราขยายในระบบควบคุมพีไอดี

ค่าพารามิเตอร์	ช่วงเวลาขึ้น ( $T_r$ )	ค่าพุ่งเกิน ( $M_{pt}$ )	ช่วงเวลาเข้าที่ ( $T_s$ )	ค่าความคาดเคลื่อนใน สภาวะคงตัว ( $e_{ss}$ )
( $K_p$ )	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย	ลดลง
( $K_i$ )	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลง
( $K_d$ )	ลดลงเล็กน้อย	ลดลง	ลดลง	ไม่มีผลกระทบ

### 3.6.1 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบควบคุม (Response)



รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองของสัญญาณอินพุตทดสอบขั้นบันได

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบจำลองระบบควบคุม การวิเคราะห์ ผลตอบสนองทำได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตทดสอบเข้าสู่ระบบจำลองผ่านกระบวนการประมวลผล จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่มีต่อระบบ ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไประบบสามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองได้ 2 แบบ คือ การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) จะพิจารณาจากผลตอบสนอง ณ เวลาเริ่มต้นที่สัญญาณอินพุตทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งผลตอบสนองจะเข้าสู่สภาวะคงตัวและค่าส่วนที่พุ่งเกินที่เกิดขึ้นก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว และการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบคงตัว (Steady State Response) จะพิจารณาจากความ คลาดเคลื่อนที่ สภาวะคงตัวของระบบ สามารถแสดงผลตอบสนองของสัญญาณอินพุตทดสอบขั้นบันไดได้ดังรูป 3.18 อธิบายถึงการแสดงผลตอบสนองของสัญญาณอินพุตทดสอบขั้นบันได ซึ่งเป็นผลตอบสนองชั่วคราว โดยสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพของผลตอบสนองชั่วคราวได้ตาม คุณสมบัติตามค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise Time :  $T_r$ ) ช่วงเวลาขาขึ้น คือช่วงเวลาที่ระบบมีการตอบสนอง ขณะที่ป้อนสัญญาณอินพุตเข้าสู่ระบบ ปกติมักจะมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 10% ถึง 90% โดยถ้าระบบที่อยู่ในสภาวะความหน่วงน้อย (Under Damped) จะใช้เวลาขึ้นประมาณจาก 0% ถึง 100% และถ้าระบบที่อยู่ในสภาวะความหน่วงมาก (Over Damped) จะใช้เวลาขึ้นประมาณจาก 10% ถึง 90%

2. ค่าพุ่งเกิน (Overshoot :  $M_{pt}$ ) ค่าพุ่งเกิน คือค่าที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุต ที่สภาวะชั่วคราว และค่าพุ่งเกินนี้ยังสามารถบอกถึงความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมด้วย ซึ่งสามารถวัดได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ที่เทียบจากค่าสุดท้าย

3. ช่วงเวลาสูงสุด (Peak Time :  $T_p$ ) ช่วงเวลาสูงสุด คือช่วงเวลาสูงสุดของผลตอบ สอนองชั่ว คุรุ่ภายหลังจากป้อนสัญญาณอินพุตให้กับระบบ

4. ช่วงเวลาเข้าสู่จุดสมดุล (Settling Time :  $T_s$ ) ช่วงเวลาเข้าสู่จุดสมดุล คือช่วงเวลาที ผลตอบสอนองมีค่าลดลงจนเกือบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหรือลู่เข้าสู่ จุดสมดุล โดยสามารถวัดได้จากค่าที ลดลงจากค่าสุดท้ายประมาณ 2% หรือ 5%

นอกจากการวิเคราะห์ผลตอบสอนองชั่วคุรุ่แล้ว การที่จะบ่งบอกวาระบบมีความเสถียรหรือไม่ นั้นก็มีความสำคัญมากในการออกแบบระบบควบคุม หากระบบ ไม่มีความเสถียรก็จะทำให้ไม่ สามารถ ควบคุมระบบได้ตามความประสงค์ โดยระบบที่ไม่มีความเสถียรนั้นยกตัวอย่างเช่น การ ทำงานของ ระบบมีสัญญาณอื่นจากภายนอกของระบบเข้ามารบกวนระบบแล้วระบบไม่สามารถกลับ เข้าสู่ค่าหนึ่ง หรือเข้าสู่จุดสมดุลได้นั้นแสดงว่า ระบบไม่มีความเสถียร และการที่จะทราบว่าระบบมี ความเสถียร หรือไม่นั้นก็สามารถวิเคราะห์ผลได้จากผลตอบสอนองแบบคงตัว ค่าความคลาดเคลื่อนใน สภาวะคงตัว (Steady – State Error:  $e_{ss}$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว คือค่าของ ผลตอบสอนองของระบบควบคุมที่เวลาผ่านไปนานมาก ภายหลังจากทีมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ อินพุตจนกระทั่งระบบควบคุมเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่หรือเป็นค่าที่บอกถึงความแตกต่างระหว่างค่า สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าสู่ระบบกับสัญญาณเอาต์พุต

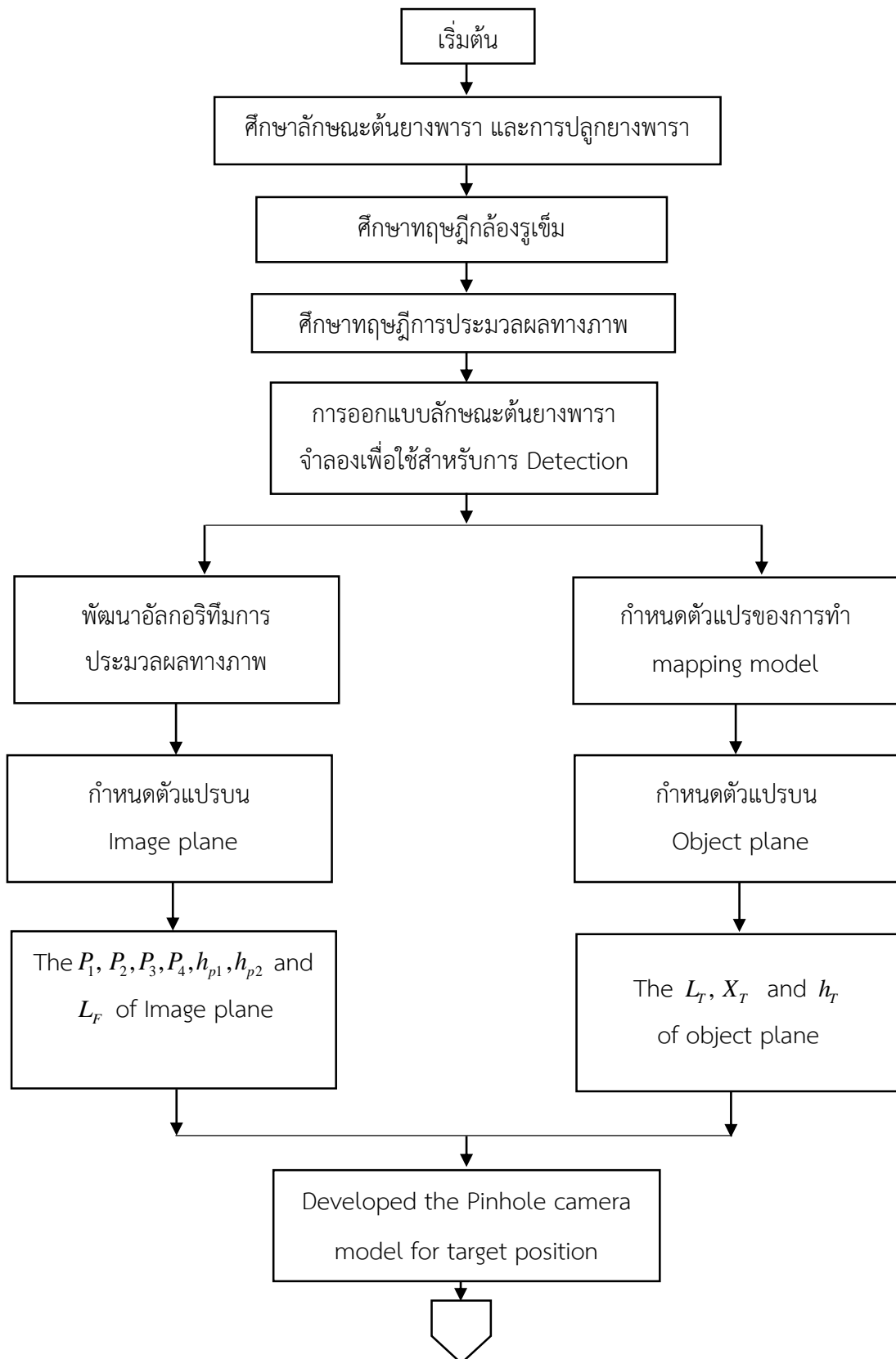
## บทที่ 4

# วิธีดำเนินการวิจัย

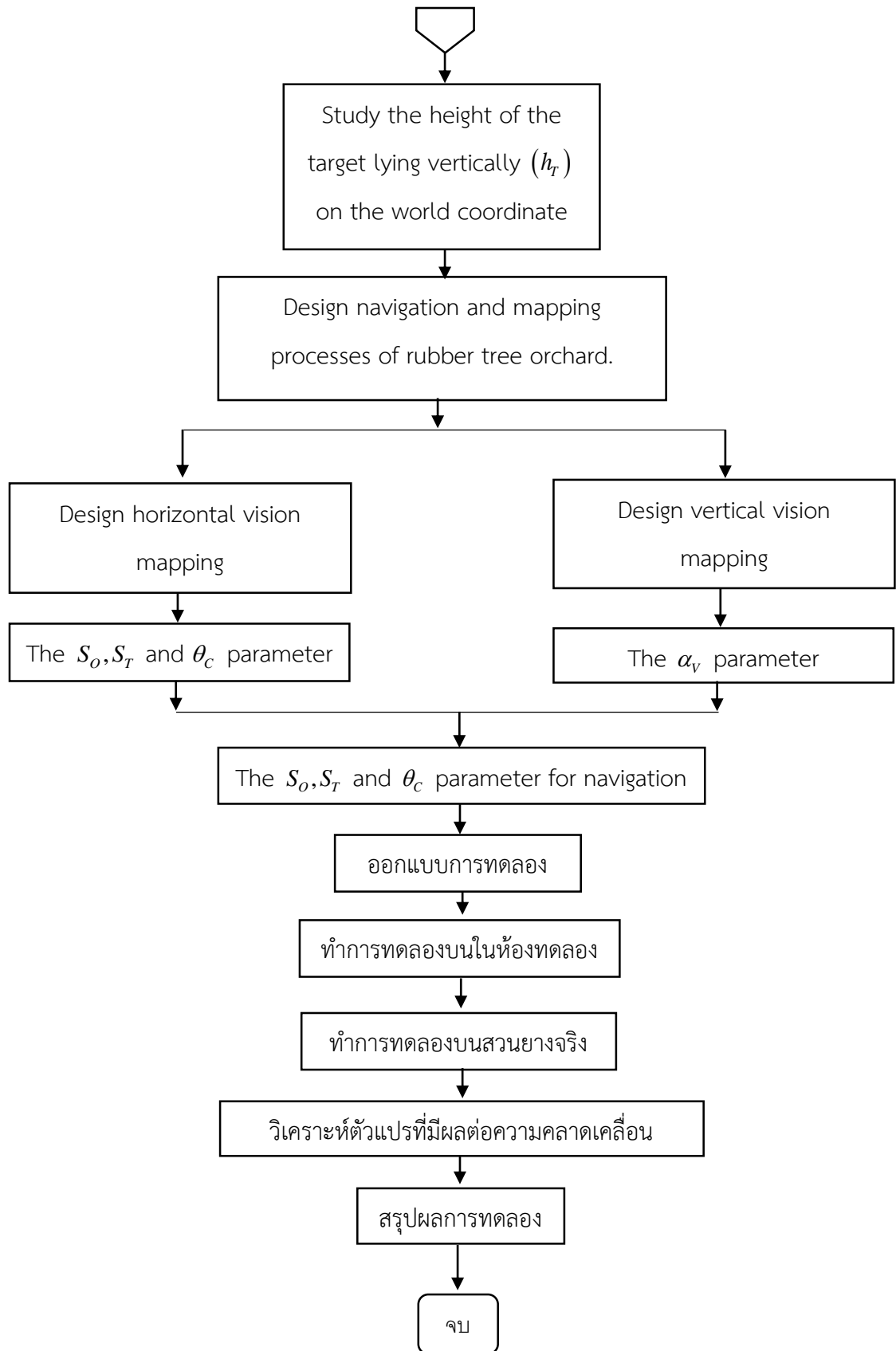
การวิจัยครั้งนี้เป็นการพัฒนาระบบการนำทางในสวนยางพาราโดยการประยุกต์การประมวลผลทางภาพ ซึ่งแบ่งหัวข้อเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

- 4.1 แผนการดำเนินงาน
- 4.2 ลักษณะทางกายภาพของสวนยางพาราสำหรับงานวิจัย
- 4.3 การออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่ในสวนยางพารา
- 4.4 การทำแผนที่สวนยางพารา (Rubber tree orchard mapping)
- 4.5 การแปลงสมการทางคณิตศาสตร์ ด้วยทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model)
- 4.6 Camera visual localization using pinhole model technique
- 4.7 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)
- 4.8 การออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ
  - 4.8.1 การออกแบบจำลองเส้นทางเดินของยานพาหนะในห้องปฏิบัติการ
  - 4.8.2 การออกแบบต้นยางพาราจำลอง
- 4.9 การออกแบบการทดลองในสวนยางพารา
  - 4.9.1 การออกแบบจำลองเส้นทางเดินของยานพาหนะในสวนยางพารา
  - 4.9.2 การสร้างเป้าบนลำต้นยางพารา
- 4.10 การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

## 4.1 แผนการดำเนินงาน

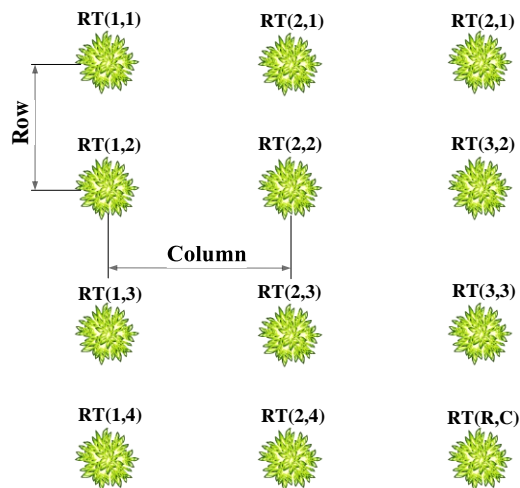


รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงวิธีการดำเนินงาน(ต่อ)

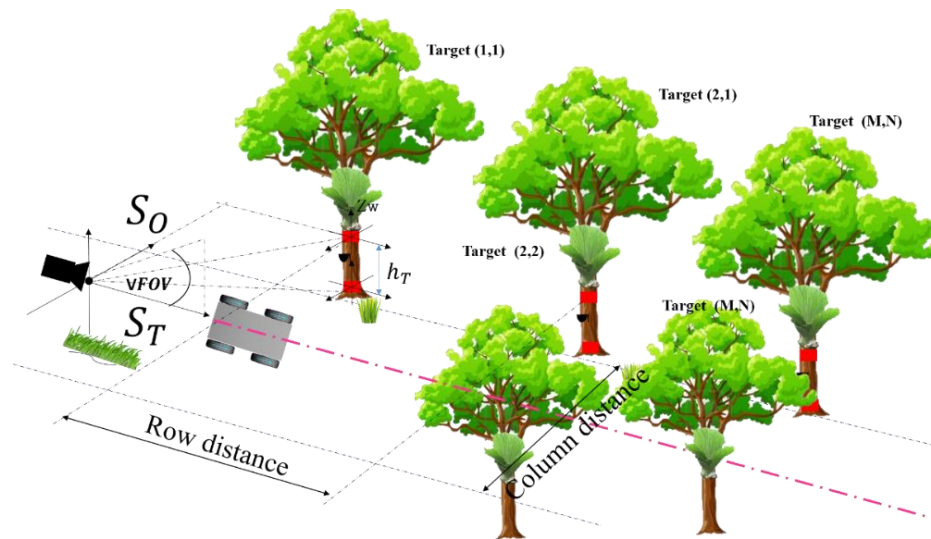
## 4.2 ลักษณะทางกายภาพของสวนยางพาราสำหรับงานวิจัย



รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการปลูกของสวนยางพารา

การยางแห่งประเทศไทยให้คำแนะนำเกษตรกรเกี่ยวกับลักษณะการปลูกต้นยางพารา พันธุ์ยางที่เหมาะสมกับพื้นที่การปลูก การเว้นระยะการปลูกให้เหมาะสมกับภูมิอากาศของแต่ละภูมิภาคที่ปลูก รวมถึงข้อมูลที่สำคัญต่อเกษตรกรสำหรับการปลูกต้นยางพาราในประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สวนยางพารามีรูปแบบเฉพาะ โดยต้นยางจะปลูกในรูปแบบแถว ในบางภูมิภาค เช่น เนินเขาสูงชันหรือตามภูมิภาคที่ราบเรียบ ความหนาแน่นของการปลูกอยู่ที่ประมาณ 80 ต้นต่อไร่ ซึ่งเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่เกษตรกรของไทยปลูกอยู่ที่ 1,600 ตารางเมตร ซึ่งเกษตรกรมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันในสวนยางพารา โดยปกติเกษตรกรเดินระหว่างแถวจนสุด แล้วเดินระหว่างต้นยางพาราเพื่อเก็บเกี่ยวน้ำยางพาราจากต้นยาง รูปแบบการเคลื่อนที่ของระบบอัตโนมัติได้รับการออกแบบให้เข้ากับลักษณะเฉพาะของสวนยางพาราดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยที่ในแต่ละคอลัมน์ต้องมีการ

บำรุงรักษาเป็นประจำเพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการ ระบบอัตโนมัติหรือการทำแผนที่ต้องเลียนแบบรูปแบบลักษณะการทำงานของเกษตรกรชาวสวนยางพารา



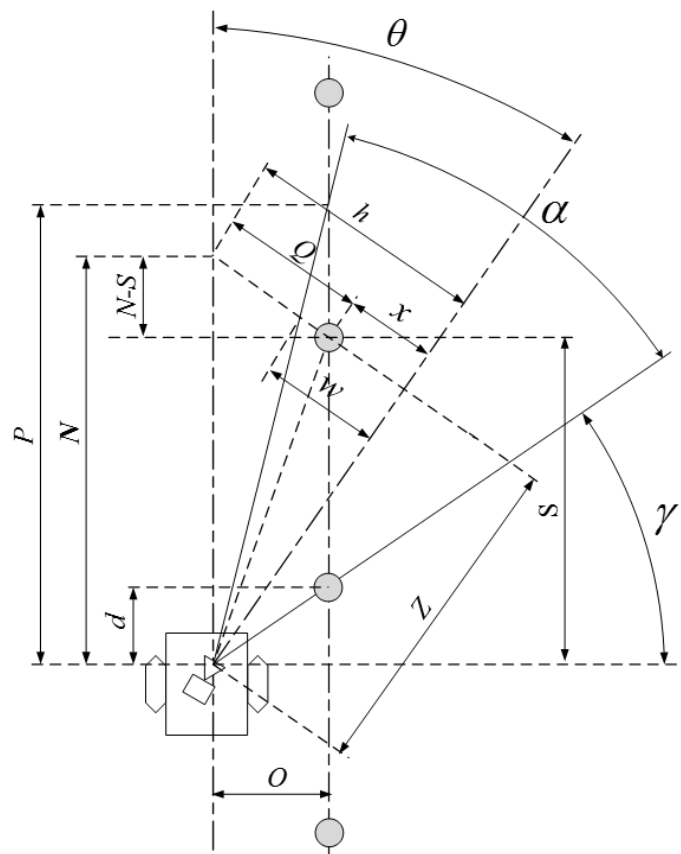
รูปที่ 4.4 การออกแบบลักษณะการทำงานของระบบอัตโนมัติในสวนยางพารา

การสำรวจสวนยางได้ดำเนินการในพื้นที่สวนยางจริง อยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทยภูมิภาคของสวนยางพารามักเป็นที่ราบ แม้ว่าสวนยางพาราบางแห่งปลูกในพื้นที่ลาดเอียงเล็กๆ เช่น เชียงขาตามแนวต้นยางโดยที่ต้นยางแต่ละต้นจะปลูกห่างกันแต่ละต้นในแนวแถว (Row) อยู่ที่ 2.5 ถึง 3 เมตร และแนวหลัก (Column) 6 ถึง 7 เมตร โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นมีตั้งแต่ 120 ถึง 200 มิลลิเมตร บนพื้นที่เพาะปลูก พารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้หลายอย่าง เช่น ความตรงของลำต้น พื้นที่ปลูกที่ขรุขระ และความไม่สม่ำเสมอของแสงอาจส่งผลกระทบต่อระบบนำทางของระบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากระบบดังกล่าวใช้เทคนิคการประมวลผลทางภาพซึ่งมีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลการประมวลผลที่มาก ความตรงของลำต้นของต้นยางเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าคำนวณ โดยค่าเฉลี่ยความเอียงของลำต้นในการทดลองแบบสุ่มคือประมาณ 3-10 องศา การออกแบบจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาลักษณะของสวนยางพาราเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำแผนที่และการประมวลผลทางภาพเพื่อใช้สำหรับการนำทางของระบบอัตโนมัติในสวนยางพารา

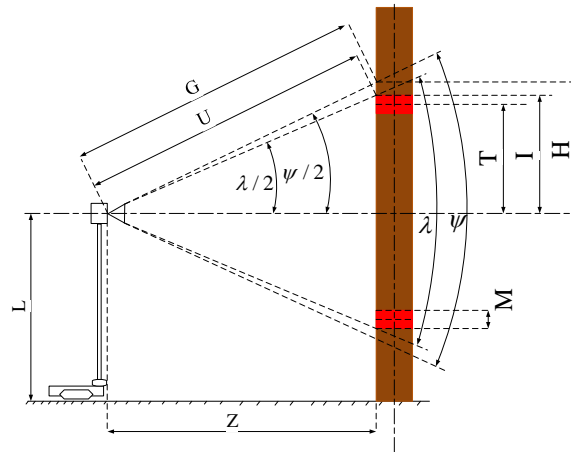
### 4.3 การออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่ในสวนยางพารา

การออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่ในสวนยางพาราตามเส้นทางการปฏิบัติการของสวนยางพารา การทำแผนที่ควรสามารถระบุตำแหน่งต้นยางพาราได้ในระยะที่ห่างระหว่างแถว เพื่อพิจารณาเส้นทางอิสระที่เริ่มต้นโดยวางกล้องไว้ห่างจากต้นยางพาราต้นแรก 1 เมตร ต้นยางพาราต้นที่สองซึ่งอยู่ห่างจากระยะขดเขยแถว 4 เมตร ภาพของต้นยางพาราต้องอยู่ในเฟรมของกล้อง หลังจากที

กล้องเคลื่อนเข้าใกล้ต้นยางพาราต้นแรกมากขึ้น บางส่วนของเป้าหมายบนต้นยางพาราต้นแรกอาจอยู่นอกขอบเขตการรับรู้ของกล้องแล้ว และขนาดเป้าหมายในขณะนี้ไม่สามารถประเมินได้อย่างถูกต้อง ณ จุดนี้ตำแหน่งการทำแผนที่จะขึ้นอยู่กับการเป้าหมายต้นยางพาราต้นที่สอง เมื่อกล้องยังคงเคลื่อนที่ไปยังต้นยางพาราต้นที่สอง ณ จุดหนึ่ง เป้าหมายต้นยางพาราต้นที่สามจะต้องถูกจับภาพไว้จนกว่ากล้องจะเข้าไปใกล้ระยะเมตรสุดท้ายจากต้นยางพาราต้นที่สอง จากนั้นกระบวนการจะทำซ้ำอีกครั้งเมื่อต้นยางพาราต้นที่สองกลายเป็นต้นยางพาราต้นแรก การประมวลผลขั้นตอนนี้ทำงานเหมือนกับการทำแผนที่ที่เป้าหมายถัดไป จากนั้นปล่อยเป้าหมายปัจจุบัน เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการนั้นถูกต้อง เป้าหมายถัดไปควรอยู่ในระยะก่อนที่เป้าหมายปัจจุบันจะถูกยกเลิก ในงานวิจัยนี้ การทำแผนที่ด้วยภาพได้รับการออกแบบสำหรับการตรวจจับระยะห่าง 1-10 เมตร โดยที่มุมมองของการทำแผนที่ที่จะพิจารณาสองมุมมองคือ การทำแผนที่ในมุมมองแนวนอน (horizontal vision mapping) และการทำแผนที่ในมุมมองแนวตั้ง (vertical vision mapping) ได้ออกแบบพารามิเตอร์เพื่อใช้สำหรับการหาสมการทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



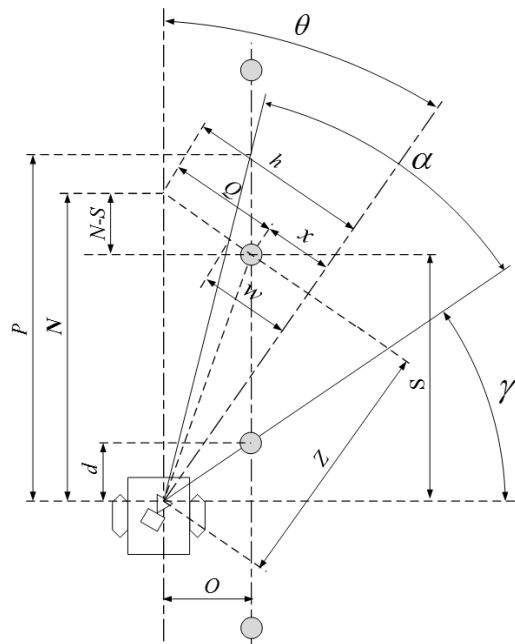
รูปที่ 4.5 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model



รูปที่ 4.6 Vertical vision mapping object plane of the orchard geometry model

#### 4.4 การทำแผนที่สวนยางพารา (Rubber tree orchard mapping)

การทำแผนที่ในสวนยางพาราจะกำหนดตัวแปรสำหรับใช้ในการนำทางดังนี้ ระยะห่างระหว่างกล้องเป้าหมายกับแถวต้นยางพารา ( $S$ ) และระยะออฟเซตระหว่างกล้องกับแถวต้นยางพารา ( $O$ ) เป็นพารามิเตอร์อิสระที่สามารถคำนวณได้โดยการป้อนพารามิเตอร์คงที่ของเป้าหมายและสวนยางพาราร่วมกับทิศทางของกล้องไปที่แถวต้นยางพารา ( $\theta$ ) ซึ่งทราบโดยตำแหน่งในแถวที่กำหนดของสวนยางพารา ระยะทางของกล้องเป้าหมาย ได้มาจากสมการในมุมมองของ HFOV ดังนี้



รูปที่ 4.7 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model

จากรูปที่ 4.7 ได้สมการความสัมพันธ์ในมุมมองของ HFOV ดังต่อไปนี้

$$\frac{h}{Z} = \tan(\theta) \quad (4.1)$$

$$h = Q + x \quad (4.2)$$

$$N^2 = h^2 + Z^2 \quad (4.3)$$

$$(N - S)^2 + O^2 = Q^2 \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.3)

$$N = \sqrt{h^2 + Z^2} \quad (4.5)$$

แทนสมการที่ (4.5) ในสมการที่ (4.4)

$$\left(\sqrt{h^2 + Z^2} - S\right)^2 + O^2 = Q^2 \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.2)

$$Q = h - x \quad (4.7)$$

แทนสมการที่ (4.7) ในสมการที่ (4.6)

$$\left(\sqrt{h^2 + Z^2} - S\right)^2 + O^2 = (h - x)^2 \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.1)

$$h = Z \tan(\theta) \quad (4.9)$$

แทนสมการที่ (4.9) ในสมการที่ (4.8)

$$\left(\sqrt{(Z \tan(\theta))^2 + Z^2} - S\right)^2 + O^2 = (Z \tan(\theta) - x)^2 \quad (4.10)$$

$$S = \sqrt{x^2 + Z^2 - O^2} \quad (4.11)$$

$$O^2 = x^2 + Z^2 - S^2 \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.10)

$$O^2 = (Z \tan(\theta) - x)^2 - \left(\sqrt{(Z \tan(\theta))^2 + Z^2} - S\right)^2 \quad (4.13)$$

แทนสมการที่ (4.13) ในสมการที่ (4.11)

$$S^2 = x^2 + Z^2 - \left[ (Z \tan(\theta) - x)^2 - \left(\sqrt{(Z \tan(\theta))^2 + Z^2} - S\right)^2 \right]$$

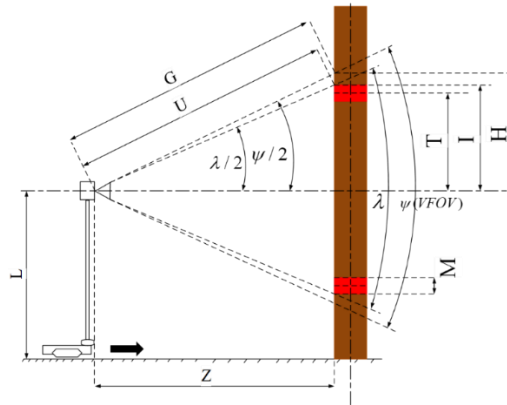
(4.14)

$$\text{เมื่อ } P^2 = S^2 + O^2 = x^2 + Z^2$$

$$\text{เมื่อ } S^2 = P^2 - \left[ (Z \tan(\theta) - x)^2 - \left( (Z \tan(\theta))^2 + Z^2 - 2S\sqrt{(Z \tan(\theta))^2 + Z^2} - S^2 \right) \right]$$

$$S = \frac{P^2 - (Z \tan(\theta) - x)^2 + (Z \tan(\theta))^2 + Z^2}{2\sqrt{(z \tan(\theta))^2 + Z^2}} \quad (4.15)$$

$$O = \sqrt{X^2 + Z^2 - S^2} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.8 Vertical vision mapping object plane of the orchard geometry model

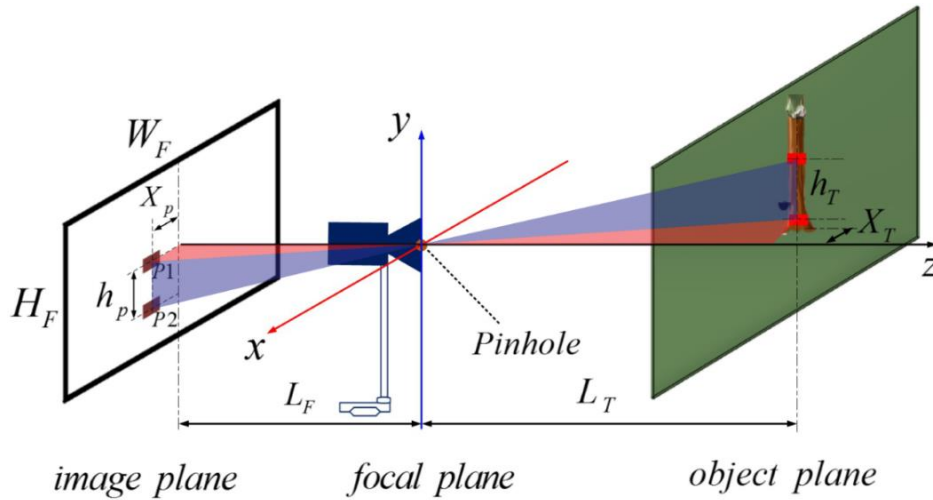
ระยะห่างระหว่างเป้าหมายทั้งสองบนลำต้นของต้นยางพารามีบทบาทสำคัญในการกำหนดระยะทางเป้าหมาย ศึกษาระยะห่างระหว่างเป้าหมายทั้งสองและเปรียบเทียบ โครงร่างของแนวตั้งระหว่างเป้าหมายและกล้องจะแสดงในรูปที่ 4.8 ในการกำหนดค่าของกล้องจะถูกลงในระนาบกลาง และเป้าหมายทั้งสองบนลำต้นของต้นยางพารา มีความสมมาตรในแนวนอนกับระนาบกลาง การกำหนดค่าที่เหมาะสมทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างขนาดภาพแนวตั้งเป็นพิททาโกรัสและเป้าหมายสีแดงสองชิ้นที่ติดตั้งบนต้นยาง กล้องที่ใช้เพื่อให้ได้ภาพดังกล่าวจะต้องสามารถมองเห็นเป้าสีแดงแนวตั้งบนและล่างที่ติดตั้งบนต้นยางได้เมื่อปรากฏภาพบนเฟรมของภาพดังกล่าว กล้องแต่ละรุ่นมีข้อจำกัดในแง่ของมุมมองแนวตั้ง (VFOV) โดยสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของเป้าสีแดงได้ดังสมการ

$$\psi(VFOV) = 2 \tan^{-1} \left( \frac{T + \frac{M}{2}}{Z} \right) \quad (4.17)$$

#### 4.5 การแปลงสมการทางคณิตศาสตร์ ด้วยทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model)

ในการคำนวณตำแหน่งของลำต้นของต้นยางพาราโดยใช้กล้องนี้ ได้มีการพัฒนาและใช้แบบจำลองรูเข็มทั่วไป แสดงดังรูปที่ 4.9 ไดอะแกรมของแบบจำลองรูเข็มที่ประกอบด้วยระนาบ

เป้าหมายที่ฉายผ่านเลนส์กล้องไปยังเซ็นเซอร์ของระนาบภาพ กล้องดิจิทัลใช้เซ็นเซอร์ Charge Coupled Device (CCD) ที่สามารถนำไปใช้กับภาพประเภทอื่นๆ เช่น ภาพเอ็กซเรย์ เป็นต้น



รูปที่ 4.9 Pinhole camera model for target position estimation

แบบจำลองรูเข็มของรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระนาบวัตถุและระนาบภาพตามตำแหน่งของลำต้นของต้นยางพาราที่สัมพันธ์กับกล้อง ระนาบวัตถุมีพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองเรขาคณิตของสวนยางพารา ความยาวออฟเซตระหว่างกล้องและแถวต้นยางพาราบนระบบพิกัดโลกขึ้นอยู่กับการเคลื่อนไหวของเกษตรกรผ่านแถวต้นยางพารา เป้าหมายสีแดงแยกต่างหากที่ติดตั้งอยู่บนลำต้นของต้นยางพาราแต่ละต้นจะระบุตำแหน่งของต้นยางแต่ละต้นในสวนยางพารา เป้าหมายสีแดงถูกบันทึกโดยเว็บแคมดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) และปรากฏบนระนาบของภาพที่แสดงในรูปที่ 4.10 (ข) เมื่อจับเป้าหมายที่มีขนาดที่ทราบแล้ว ตำแหน่งของเฟรมภาพสามารถกำหนดได้จากสัดส่วนของตำแหน่งและขนาดของภาพตามอัตราส่วนของสามเหลี่ยมจากทั้งวัตถุจริงและเฟรมภาพ ตำแหน่งและขนาดของภาพวัดจากจำนวนพิกเซล ใช้แกนตั้งเป็นแกน  $y$  และขนาดกับลำต้นของต้นยางพารา ความกว้างของกรอบรูปภาพถูกใช้เป็นแกน  $x$  ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างลำต้นของต้นยางพาราสองต้น แกน  $z$  ถูกวางในแนวตั้งฉากกับกรอบภาพ ระยะห่างระหว่างกรอบภาพกับจุดโฟกัสของกล้อง ตลอดจนระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสกับลำต้นของต้นยางพารา อยู่บนแกน  $z$  เมื่อจับเป้าหมายที่มีขนาดที่ทราบแล้ว ความยาวจาก  $L_T$  เป้าหมายถึงรูเข็มซึ่งมักจะอยู่ด้านหน้าเลนส์กล้องสามารถกำหนดได้โดย

$$L_T = L_F \frac{h_T}{h_p} \quad (4.18)$$

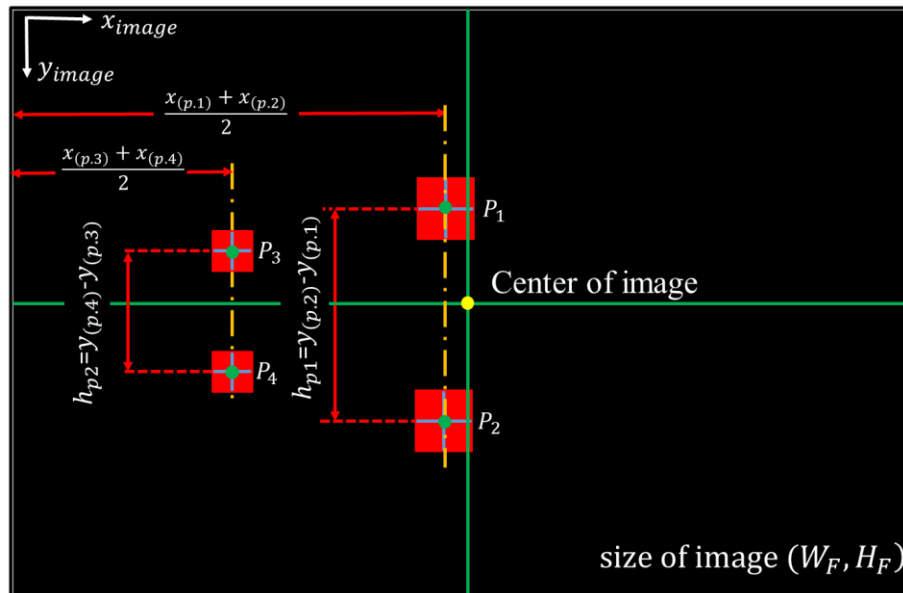
ความยาวระหว่างเลนส์กับระนาบเซ็นเซอร์ของกล้องเขียนเป็น  $L_f$  ความสูงที่ทราบของเป้าหมายที่วางอยู่ในแนวตั้งบนพิคตโลกลนั้นเขียนว่า  $h_T$  ในขณะที่ความสูงของเป้าหมายในกรอบภาพนั้นคือ  $h_p$  ถูกกำหนดโดยจำนวนพิกเซลในทิศทาง  $y$  ของเฟรมภาพ เนื่องจากการใช้สามเหลี่ยมที่คล้ายสำหรับแกน  $x$  ระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงกับเป้าหมายจึงสามารถกำหนดในลักษณะเดียวกันได้ ในเรขาคณิตดังกล่าว จุดอ้างอิงถูกกำหนดไว้ที่กึ่งกลางของการฉายภาพของกล้องดังสมการที่ 4.19 ถูกใช้สำหรับการประมาณระยะทางในทิศทางตามแนวแกน  $X$

$$X_T = X_p \frac{h_T}{h_p} \quad (4.19)$$

โดยที่  $X_T$  ความยาวออฟเซตระหว่างกล้องกับแกวต้นยางพาราในระบบพิคตโลกคือ  $X_p$  ความยาวพิกเซลระหว่างจุดศูนย์กลางของภาพกับตำแหน่งของเป้าหมายที่แสดงในกรอบภาพในแนวนอน สมการที่ 4.18 และ 4.19 ระบุว่าทั้งสองอย่างขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น การกำหนดค่ากล้องและสัดส่วนของภาพ สามารถประมาณระยะทางได้ดีขึ้นโดยการเพิ่มขนาดเป้าหมายแดง กระบวนการกรีดน้ำยางจะดำเนินการบนลำต้นของต้นยางพารา หากวางเป้าหมายเพียงชิ้นเดียวบนลำต้นของต้นยางพาราแต่ละต้น ระยะทางสัมผัสของเป้าหมายนี้จากกล้องจะไม่สามารถเปรียบเทียบและแปลงเป็นระยะทางจริงในระบบพิคตโลกได้ เมื่อกล้องเคลื่อนห่างจากวัตถุมากขึ้น ขนาดของวัตถุจะเล็กลง และเมื่อกล้องเข้าใกล้วัตถุ โดยภาพจะใหญ่ขึ้น จำเป็นต้องมีสองเป้าหมายในการวัดความยาวพิกเซลระหว่างกันโดยใช้ระบบพิคตภาพ ดังนั้น จำเป็นต้องมีสองเป้าหมายที่แยกจากกัน เป้าหมายขนาดใหญ่หนึ่งเป้าหมายในระยะไกล ภาพสวนยางพารา ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ถูกจับไว้บนเฟรมภาพ และประมวลผลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพหลาย จากนั้นจึงระบุตำแหน่งของเป้าหมายสีแดงที่แยกจากกันสองชิ้นบนระนาบภาพ จากนั้นใช้เป้าสีแดงที่แยกออกจากกันเพื่อกำหนดตำแหน่งของต้นยางพาราจริงโดยใช้สมการ 4.18 และสมการ 4.19



(ก) Two separate targets on each rubber tree in an uncontrolled environment of an actual tree orchard



(ข) Position of binary image frame  $(x, y)$  coordinate systems

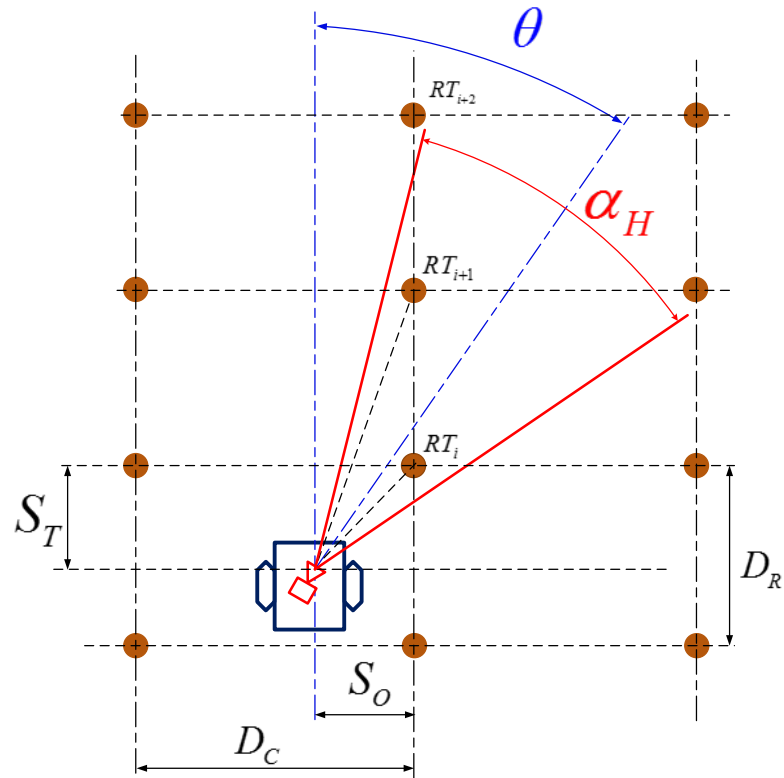
รูปที่ 4.10 Two separate red targets fixed on each rubber tree and projected on the image frame

#### 4.6 Camera visual localization using pinhole model technique

จากสมการของการทำแผนที่บนสวนยางพารา หลังจากนั้นใช้ทฤษฎีรูเข็มเพื่อแปลงจากตำแหน่งบนจุดภาพเพื่อเป็นพารามิเตอร์จริงบนพิภพโลกซึ่งได้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการนำทางไว้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่

Parameter mapping	Localization using pinhole model technique parameter	Description	Unit
$S$	$S_T$	The target-camera distance parallel to the tree row.	mm..
$O$	$S_o$	The offset distance between the camera and the tree row.	mm..
$\theta$	$\theta$	Camera orientation in relation to the tree row.	degree
$\alpha$	$\alpha_H$	A horizontal field of view (HFOV)	degree
$\psi(VFOV)$	$\alpha_V$	A vertical field of view (VFOV)	degree
$2T$	$h_T$	The height of the target in the world coordinate system.	mm..
$Z$	$L_T$	The distance of the target to the pinhole.	mm..
$X$	$X_T$	The distance of the target to the center of frame.	mm..
$L$	$d_c$	The height of the floor to camera in the world coordinate system.	mm..
$M$	$H_R$	The wide of the target	mm..



รูปที่ 4.11 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model

$$S_T = \frac{\left\{ h_T \cdot \left[ L_F \cdot \cos(\theta) + \left| \left( \frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \right| \cdot \sin(\theta) \right] \right\}}{(y_{(p,2)} - y_{(p,1)})} \quad (4.20)$$

ค่า offset distance,  $S_O$  สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S_O = \frac{\sqrt{2} \cdot h_T \cdot \sqrt{L_F^2 + P_i^2 - L_F^2 \cdot \cos(2\theta) + P_i^2 \cdot \cos(2\theta) - 2 \cdot L_F \cdot |P_i| \cdot \sin(2\theta)}}{2 \cdot (y_{(p,2)} - y_{(p,1)})} \quad (4.21)$$

และ

$$P_i = \left( \frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \quad (4.22)$$



$$\alpha_V = 2 \tan^{-1} \left( \frac{(h_T + H_R)}{L_F \cdot \frac{h_T}{h_p}} \right) \quad (4.23)$$

$$\sin(\theta) = \left( \frac{X_F - X_N}{D_R} \right) \quad (4.24)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{X_F - X_N}{D_R} \right) \quad (4.25)$$

เมื่อ

$$X_F = \left( \frac{x_{(p,3)}}{2} + \frac{x_{(p,4)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \left( f \frac{h_T}{h_{p2}} \right) \quad (4.26)$$

$$X_N = \left( \frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \left( f \frac{h_T}{h_{p1}} \right) \quad (4.27)$$

$$\theta_C = \theta_{Set\ of\ camera} - \theta \quad (4.28)$$

$$\theta_C = \theta_{Set\ of\ camera} - \sin^{-1} \left( \frac{h_T \cdot \left( \frac{1}{(y_{(p,4)} - y_{(p,3)})} \cdot (P_{i-1}) - \frac{1}{(y_{(p,2)} - y_{(p,1)})} \cdot (P_i) \right)}{D_R} \right) \quad (4.29)$$

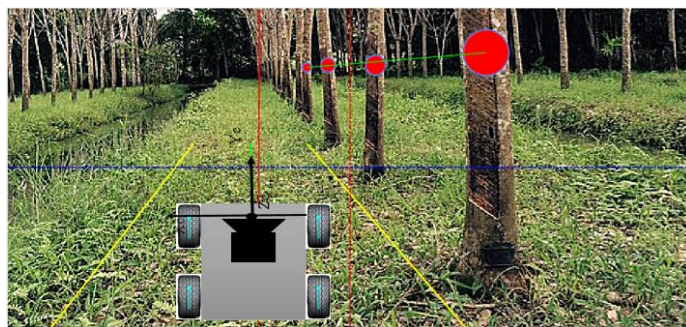
เมื่อ

$$P_i = \left( \frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \quad (4.30)$$

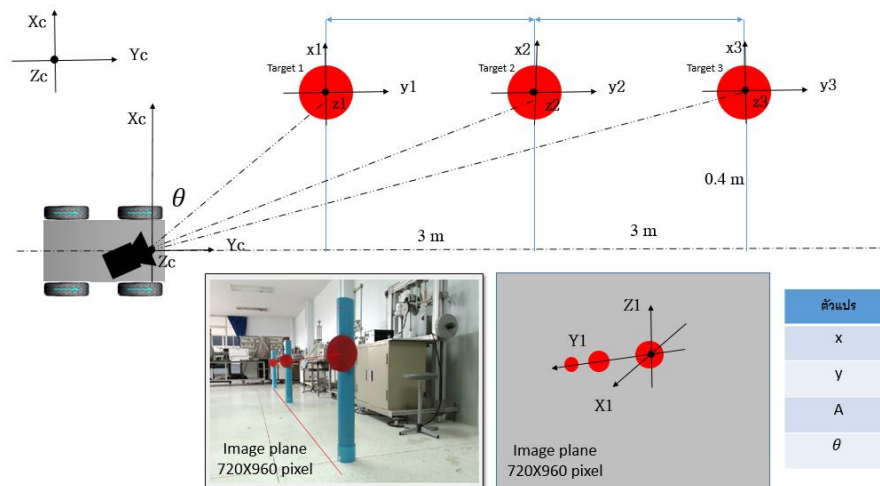
$$P_{i-1} = \left( \frac{x_{(p,3)}}{2} + \frac{x_{(p,4)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \quad (4.31)$$

## 4.7 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)

4.7.1 การออกแบบเป้าหมาย (Target) รูปแบบวงกลมสำหรับการประมวลผลภาพ  
ในการออกแบบรูปแบบเป้าหมายเดี่ยวเพื่อใช้สำหรับการประมวลผลทางภาพนั้นเป้าหมายจะออกแบบในรูปแบบวงกลมเป้าหมายสีแดงซึ่งเป็นสีที่สามารถแยกออกจากสีของสภาวะแวดล้อม ดังรูปที่ 4.14

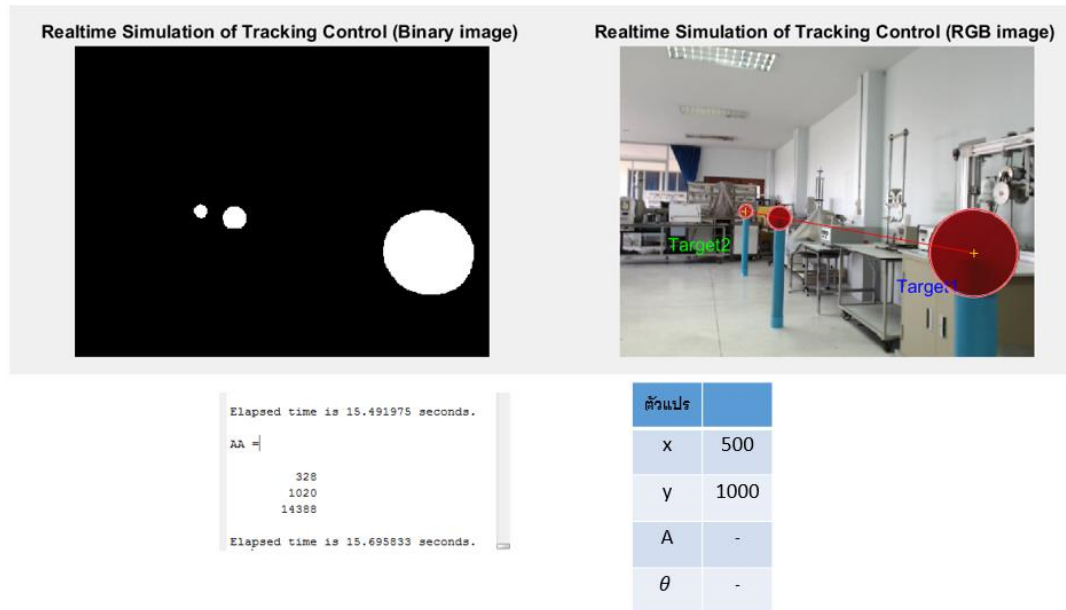


รูปที่ 4.14 ลักษณะการทำแผนที่แบบเป้าเดี่ยวติดตั้งบนลำต้นยาพารา



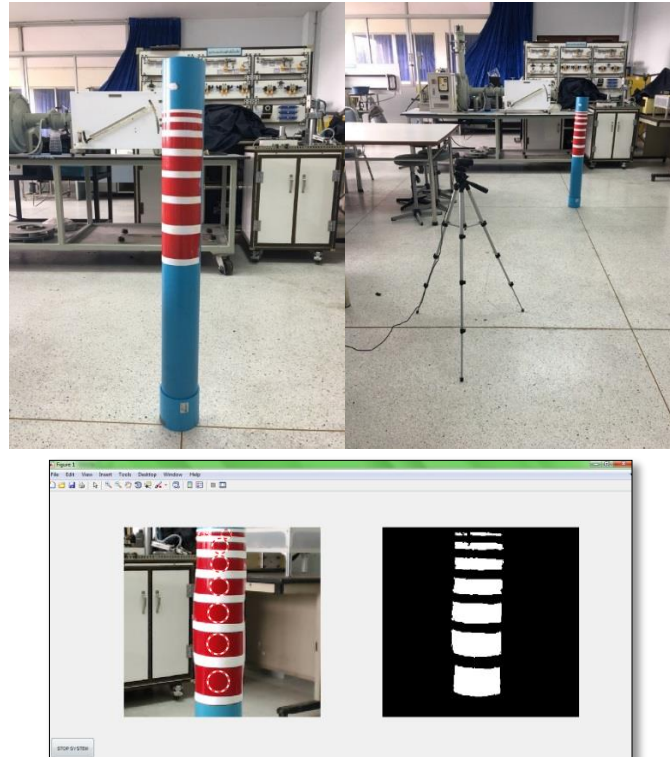
รูปที่ 4.15 ลักษณะการทำแผนที่แบบเป้าเดียวติดตั้งบนลำต้นยาพารา

การออกแบบเป้าหมายรูปแบบวงกลมดังรูปที่ 4.15 เป็นการออกแบบการประมวลผลทางภาพเพื่อให้สามารถระบุเป้าหมายซึ่งเป้าหมายดังกล่าวนั้นคือตำแหน่งของต้นยางพาราจริง กระบวนการในการประมวลผลภาพ รับภาพเป็นรูปแบบ RGB หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็นภาพ สีเทา (grayscale) สุดท้ายแปลงเป็นภาพขาวดำ (binary) เพื่อระบุว่าเป้าหมายใดคือต้นยางพาราที่อยู่ใกล้หรือไกล ซึ่งใช้การนับจำนวนพิกเซล (Pixel) บนพื้นที่สีขาวของแต่ละเป้าหมายโดยถ้ากรณีที่เป้าหมายวงกลมนั้นมีจำนวนพื้นที่สีขาวที่มากที่สุดที่ปรากฏบนเฟรมภาพก็แสดงว่าเป็นเป้าหมายที่อยู่ใกล้กล้องมากที่สุดและพื้นที่สีขาวที่มีขนาดของพื้นที่ที่เล็กลงไปก็จะไกลจากกล้องเป็นลำดับถัดไป ในพื้นที่สวนยางพาราจริงนั้นต้นยางพาราแต่ละต้นจะอยู่ห่างกันต้นละ 3 เมตรเป็นลักษณะการปลูกที่เฉพาะ ข้อดีของการประมวลผลภาพวิธีเป้าหมายวงกลมรูปแบบนี้จะมีการคำนวณการประมวลผลที่ไม่ซับซ้อน แต่เมื่อนำพื้นที่สีขาวมาเปลี่ยนเป็นการเปรียบเทียบระยะว่าเป้าหมายอยู่ห่างจากกล้องเป็นระยะเท่าใด เพื่อใช้ในการเป็นพารามิเตอร์สำหรับการทำแผนที่จะไม่มี ความแม่นยำ เนื่องจากพื้นที่สีขาวมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจากสภาพแสงที่ไม่คงที่ซึ่งจากรูปแบบดังกล่าวได้แนวคิดของการใช้พื้นที่ของสีขาวเพื่อระบุเป็นระยะของกล้องห่างจากเป้าหมายเป็นระยะเท่าใดเมื่อเทียบกับพิกัดบนพื้นโลก



รูปที่ 4.16 การประมวลผลภาพรูปแบบเป้าหมายวงกลม

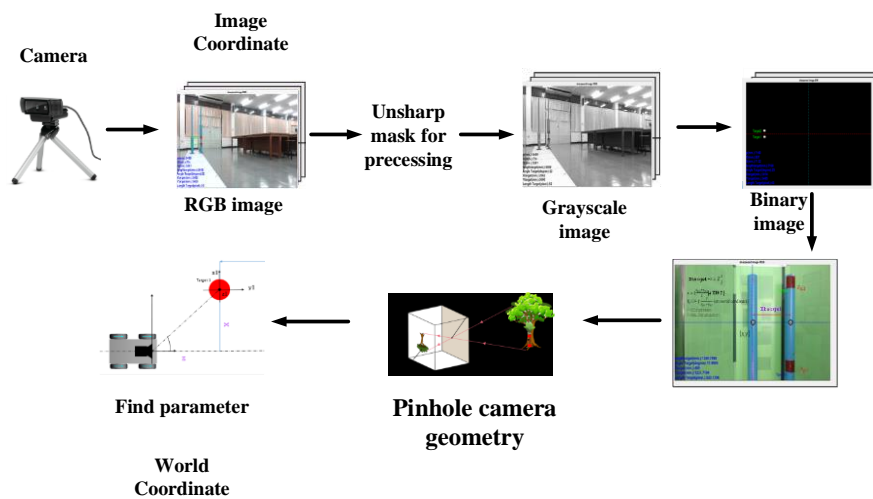
#### 4.7.2 การออกแบบเป้าหมาย (Target) รูปแบบบาร์โค้ดสำหรับการประมวลผลภาพ



รูปที่ 4.17 การประมวลผลภาพรูปแบบเป้าหมายแบบบาร์โค้ด

การออกแบบรูปแบบของการประมวลผลทางภาพของรูปแบบเป้าหมายแบบบาร์โค้ดเป็นลักษณะการออกแบบเป้าหมายที่มีความคล้ายคลึงกับลักษณะของต้นยางพารา โดยที่ขั้นตอนตอนการประมวลผลภาพเพื่อสกัดพื้นที่สีแดงออกมา ซึ่งภาพที่แสดงจะถูกสกัดโดยการ threshold การออกแบบการประมวลผลภาพรูปแบบดังกล่าวเป็นวิธีการที่ไม่สามารถแยกแยะได้เมื่อกำลังมีการเคลื่อนที่ห่างจากเป้าหมายโดยการประมวลผลภาพจะมีความสามารถในการแยกแยะที่ดี คือ เป้าหมายที่ใหญ่มากพอและมีระยะห่างของแต่ละพื้นที่สีขาวมากพอ โดยได้ออกแบบการประมวลผลภาพสำหรับงานวิจัยนี้ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 4.7.3 การออกแบบเป้าหมาย (Target) รูปแบบเป้าหมายที่แยกจากกันสำหรับการประมวลผลภาพ



รูปที่ 4.18 Image processing methods used in the target detection.



(ก) The RGB image frame.

(ข) The pre-processed image frame.



(ค) The grayscale image frame. (ง) The binary image frame.

รูปที่ 4.19 Image processing methods used in the target detection.

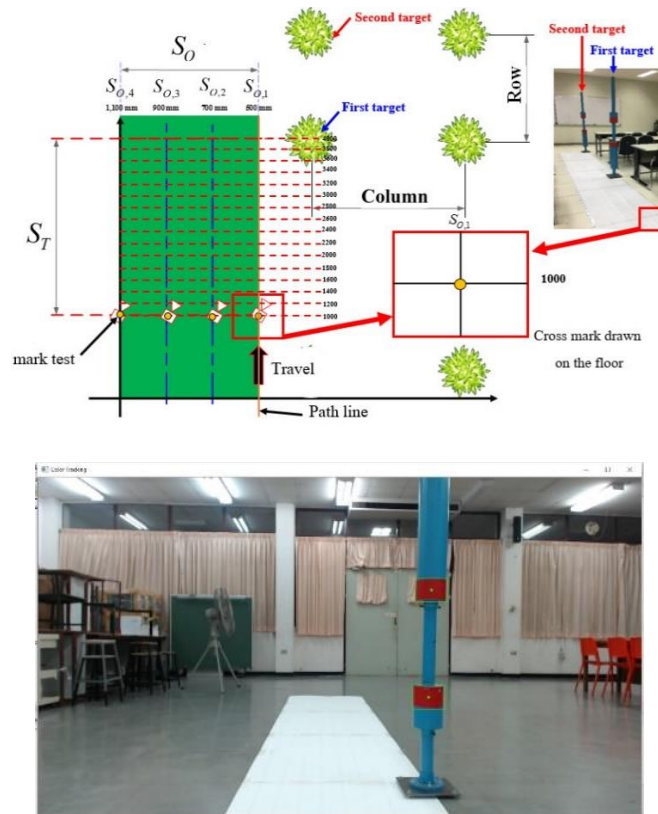
ตำแหน่งของต้นยางพาราสำหรับการทำแผนที่สนามถือเป็นลักษณะทางกายภาพของต้นยางพารา สีของลำต้นของต้นยางพารานั้นใกล้เคียงกับสีของสิ่งแวดล้อมโดยรอบมาก เป้าหมายถูกติดตั้งบนลำต้นของต้นยางพารามีสีที่แตกต่างจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ เป้าหมายสีแดงมีสีที่แตกต่างจากสภาพแวดล้อม ในรูปแบบของ RGB ส่วนประกอบสีแดง-เขียว-น้ำเงินคือ (255, 0, 0) เป้าหมายสีแดงแสดงถึงความแตกต่างของสีหลักเพียงอย่างเดียวที่มองเห็นได้ในสภาพแวดล้อมของสวนยางพารา แม้ว่าสภาพแวดล้อมของสวนยางพาราจะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เป้าหมายสีแดงที่ตรวจพบและใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์สำหรับการประมาณระยะทางของวัตถุในแบบจำลองเรขาคณิตของสวนยางพารา ภาพของเป้าหมายสีแดงที่แยกจากกันถูกบันทึกโดยเว็บแคม ซึ่งเป็นกล้อง Logitech C 920 กล้องนี้สามารถบันทึกวิดีโอแบบเรียลไทม์ที่ความละเอียด 720 × 1280 พิกเซลด้วยอัตราเฟรม 30 FPS, มุมมองแนวนอน (HFOV) 70.42 องศา และมุมมองภาพแนวตั้ง (VFOV) 43.30 องศา แสดงเป้าหมายสีแดงสองชิ้นที่แยกจากกันบนลำต้นของต้นยางพาราในรูปแบบของภาพ RGB ซึ่งเป็นภาพที่มีระบบสีประกอบด้วยสีหลัก ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เป้าหมายสีแดงถูกติดตั้งบนลำต้นของต้นยางพาราในสภาพแวดล้อมจริง และค่าองค์ประกอบสีแดง-เขียว-น้ำเงินไม่สอดคล้องกับทฤษฎีสีค่าส่วนประกอบสีแดง-เขียว-น้ำเงินจริง ในสภาพแวดล้อมจริงมีดังต่อไปนี้: สีแดง 170–255, สีเขียว 50–100 และสีน้ำเงิน 50–200 เนื่องจากสภาพแสงทั่วทั้งสวนยางพาราไม่เท่ากัน ภาพที่ได้รับโดยตรงจากเว็บแคมจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพื่อให้สามารถระบุเป้าหมายได้ดีขึ้น ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อทำให้ภาพคมชัดขึ้น โดยใช้วิธี Unsharp masking system (USM) แต่ละเฟรมของวิดีโอเว็บแคมแบบเรียลไทม์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มความคมชัดของภาพ มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมของสวนยางอยู่ตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ แต่ละภาพจึงมีระดับความสว่างต่างกัน ขนาดขอบของพื้นที่รอบๆ พิกเซลได้รับผลกระทบจากการเพิ่มความคมชัด ค่าที่มากจะทำให้บริเวณขอบกว้างขึ้น ในขณะที่ค่าขนาดเล็กจะทำให้บริเวณขอบแคบลง หลังจากนั้นรูปภาพถูกแปลงเป็นระดับสีเทา ด้วยความเข้มของสีตั้งแต่ 0–255 (8 บิต) รูปภาพจะแปลงค่า RGB เป็นค่าระดับสีเทาโดยดำเนินการผลรวมถ่วงน้ำหนักของส่วนประกอบ R, G และ B หลังจากทีแต่ละพิกเซลในภาพทั้งหมด (720 × 1280 พิกเซล) ถูกแปลงเป็นระดับสีเทาแล้ว ค่ารวมผลรวมแบบถ่วงน้ำหนัก: R มีน้ำหนัก 0.299, G มีน้ำหนัก 0.587 และ B มีน้ำหนัก 0.114 หลังจากกำหนดพื้นที่ของเป้าหมายสี

แดงทั้งสองแล้ว ภาพระดับสีเทาจะถูกแปลงเป็นรูปแบบไบนารีที่มีความเข้มสองระดับคือ 0 และ 1 พิกเซลใดที่มีค่า 0 จะแสดงเป็นสีดำ ในขณะที่พิกเซลใดที่มีค่า 1 จะแสดงเป็นสีขาว ภาพไบนารีกำหนดค่าความเข้มสีเทาอ้างอิงที่เรียกว่าค่าเกณฑ์ ค่านี้ได้มาจากค่าเฉลี่ยที่ 90–115 ระดับสีเทาที่ต่างกันที่เป็นไปได้จากสีดำเป็นสีขาวสำหรับการใช้งานเฉพาะนี้ ความเข้มข้นของสีเทาถูกปรับเมื่อเวลาผ่านไปโดยขึ้นอยู่กับสภาพแสง โดยเฉพาะในพื้นที่เป้าหมายสีแดง ตรวจสอบต้นยางพาราโดยใช้การประมวลผลภาพ ต้นยางพาราจะปรากฏในรูปภาพที่ตำแหน่งต่างๆ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แท้จริงของต้นยางพาราที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของกล้อง จะทำให้กล้องทำมุมสัมพันธ์กับแนวแถวของต้นยาง แสดงให้เห็นภาพไบนารีของต้นยางพารา เป้าหมายชุดแรกใกล้กึ่งกลางของภาพแสดงถึงต้นยางพาราที่อยู่ใกล้กล้อง เป้าหมายชุดที่สองซึ่งอยู่ห่างจากศูนย์กลางของภาพมากขึ้น วิธีการตรวจจับเป้าหมายใช้งานได้ในระยะห่างสูงสุด 6 เมตรจากต้นยางพาราเป้าหมาย ดังนั้นกล้องจึงสามารถเห็นต้นยางพาราเป้าหมายสองต้นและคำนวณระยะห่างระหว่างต้นยางพาราทั้งสองได้ ระบบประมวลผลภาพนี้กำหนดจุดศูนย์กลางของตำแหน่งสีขาวที่แสดงในภาพไบนารี ตำแหน่งสีขาว 2 ตำแหน่งใกล้กึ่งกลางกรอบภาพแสดงถึงลำต้นของต้นยางพาราใกล้กับกล้อง และตำแหน่งสีขาวสองตำแหน่งที่อยู่ไกลออกไปแสดงถึงลำต้นของต้นยางพาราที่อยู่ไกลจากกล้อง ตำแหน่ง  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  และ  $P_4$  ในรูปที่ 4.10 (ข) ยังตำแหน่งถูกใช้ในการคำนวณความยาวพิกเซล ( $h_p$ ) สำหรับสมการที่แสดงแบบจำลองเรขาคณิตของสวนยางพารา

## 4.8 การออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ

### 4.8.1 การออกแบบจำลองเส้นทางเดินของยานพาหนะในห้องปฏิบัติการ

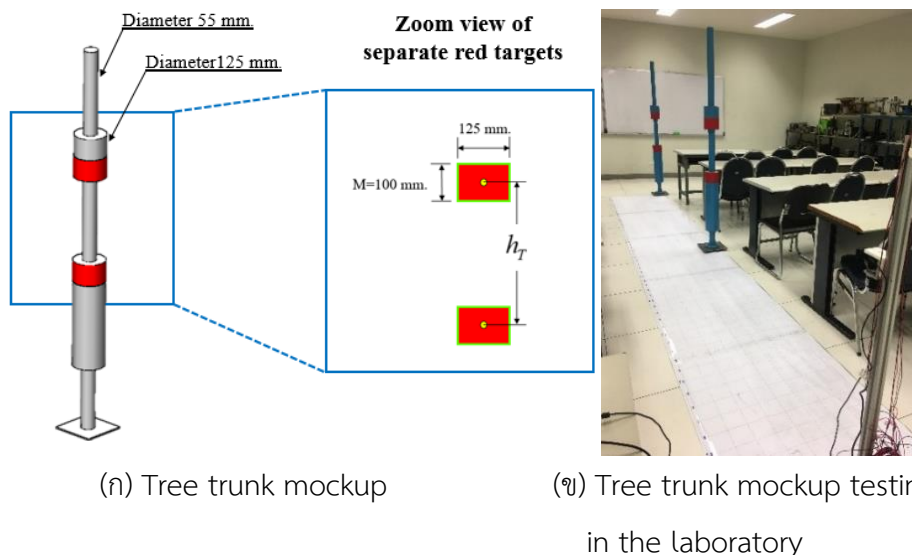
การออกแบบสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยได้มีส่วนประกอบสำหรับการเตรียมพื้นที่สำหรับการทดลองมีส่วนประกอบคือ พื้นที่ทดลองเทียบกับระยะพื้นโลก และต้นยางพาราสำหรับการจำลองจำนวนสองต้นเพื่อใช้ในการจำลองเพื่อเป็นแนวแถวเพื่อใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 Experimental layout used during laboratory testing

#### 4.8.2 การออกแบบต้นยางพาราจำลอง

พารามิเตอร์และอัลกอริทึมการประมวลผลภาพมีความสำคัญต่อการนำทางสวนยางจริง ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลจากห้องปฏิบัติการกับผลจากสวนยางพาราจริงชั้นที่ 1 ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยพารามิเตอร์ที่ควบคุมได้ เช่น ลักษณะความตรงของลำต้นยาง ปริมาณแสงคงที่ และพื้นดินที่ราบเรียบ ชั้นที่ 2 ทำการทดลองในสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งเป็นสวนยางพาราจริงๆ ข้อแตกต่างคือไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ในสวนยางพาราได้ในลักษณะเดียวกับที่ควบคุมพารามิเตอร์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สุ่มเลือกพื้นที่ในแปลงปลูกยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นพื้นที่ทดลอง ในห้องปฏิบัติการ แบบจำลองลำต้นของต้นยางและพื้นที่สำหรับการทดสอบได้รับการออกแบบให้คล้ายกับสวนยางพารา ห้องปฏิบัติการมีต้นยางจำลองลำตัวทำด้วยพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) ลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร และติดตั้งเป้าหมายสีแดงบนต้นยางพาราจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ข) เป้าสีแดงทำจากแผ่นโลหะหนา 0.5 มิลลิเมตร และติดตั้งโดยพันรอบต้นยางพาราจำลอง ความสูงและความกว้างของเป้าสีแดงคือ 100 และ 125 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ เป้าหมายสีแดงทั้งสองยังได้รับการติดตั้งที่ระยะ 500 และ 700 มิลลิเมตร ตามลำดับ เป้าสีแดงที่ติดตั้งควรสอดคล้องกับความสูงของต้นยาง และความสูงที่พิจารณาควรสอดคล้องกับความสูงของพื้นที่กรีดยางจริงบนต้นยางจริง

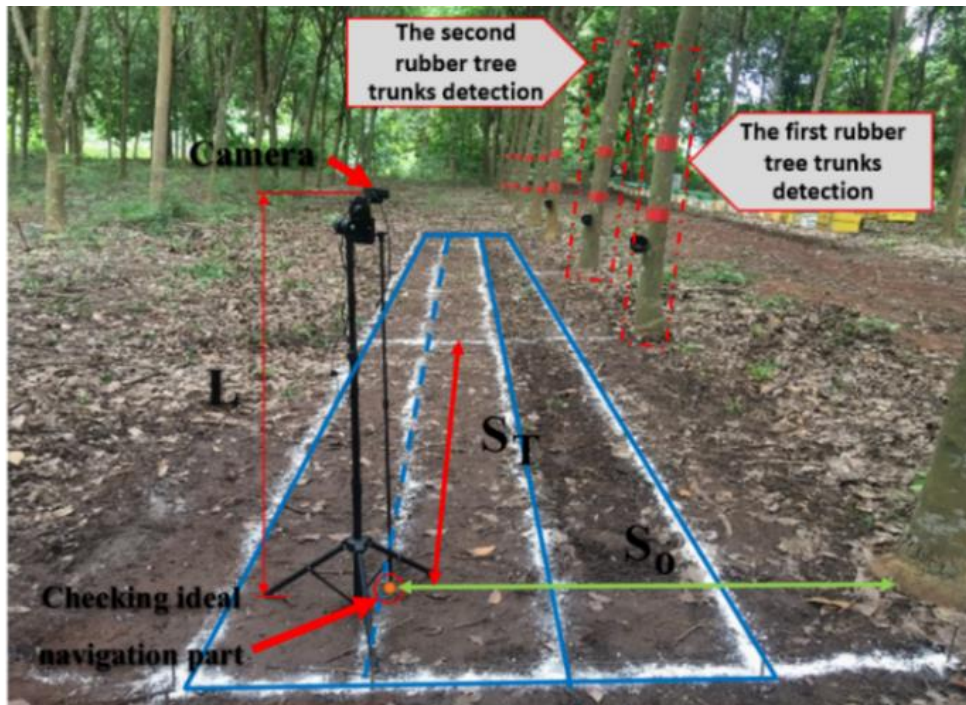


รูปที่ 4.21 Testing area using world coordinate in the laboratory.

การทดลองนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนกล้องไปตามแนวของต้นยางจำลอง การทดลองในห้องปฏิบัติการนี้จะสร้างพื้นที่ทดสอบเสมือนจริงเพื่อกำหนดว่ากล้องควรเคลื่อนที่ไปตามแนวต้นยางพารา สถานที่ทดสอบสร้างขึ้นตามระยะห่างจริงระหว่างชุดของพิกัดบนพื้นที่ราบ ใช้ปากกาทำเครื่องหมายเพื่อวาดตารางลงบนพื้นเป็นลักษณะเป็นช่องกริดดังรูปที่ 4.21 (ข) แสดงการตั้งค่าที่ใช้ในการวัดระยะทางจริงถึงพื้นเพื่อให้ทราบว่ากล้องเคลื่อนที่จากต้นยางเป้าหมายเป็นระยะเท่าใด ระบบพิกัดที่ใช้จะคล้ายกับสวนยางพารา ภายในพื้นที่ทดสอบ  $4 \times 1.1$  เมตร มีการกำหนดตำแหน่ง 64 ตำแหน่งที่แสดงถึงจุดตัดของช่องกริดที่มีช่วงห่าง 0.2 เมตร ประสิทธิภาพการติดตามของวิธีการประมวลผลภาพตามแนวเส้นทางได้รับการประเมินโดยเปลี่ยนการแยกเป้าหมายสีแดงเป็น 0.5 และ 0.7 เมตร ในระหว่างการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้ค่าตำแหน่ง 64 ค่าโดยการประมาณโดยใช้อัลกอริทึมการประมวลผลภาพการทดลองดังกล่าวได้รับการประเมินเพื่อกำหนดข้อผิดพลาดของวิธีการทำแผนที่

## 4.9 การออกแบบการทดลองในสวนยางพารา

### 4.9.1 การออกแบบจำลองเส้นทางเดินของยานพาหนะในสวนยางพารา



รูปที่ 4.22 Orchard experimental setup in the orchard

ทดสอบที่สวนยางพารา ดังแสดงในรูปที่ 4.22 การตั้งค่าระบบพิกัดนั้นคล้ายกับที่อธิบายไว้ในส่วนก่อนหน้า ภายในพื้นที่ทดสอบ  $4 \times 1.1$  เมตร มีการกำหนดตำแหน่ง 64 ตำแหน่งซึ่งแสดงถึงจุดตัดของตารางโดยมีระยะห่าง 0.2 เมตร ต้นยางพาราแต่ละต้นติดตั้งแผ่นโลหะสีแดงสองแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เป้าสีแดงทั้งสองที่แยกจากกันไม่ได้ขัดขวางการเก็บกรีดยาง กล้องถูกตั้งค่าให้รับภาพสำหรับการประมวลผล กล้องถูกติดตั้งไว้ที่กึ่งกลางของเป้าหมายสีแดงทั้งสองที่แยกจากกัน ในพื้นที่สวนยางจริงพื้นดินเป็นพื้นที่ขรุขระ การเตรียมพื้นที่ทดสอบดำเนินการโดยใช้เชือกเส้นเล็กเพื่อสร้างระยะทางในพิกัดจริง วิธีการที่ใช้ในการวัดระยะทางเป็นแบบเดียวกับที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ สวนยางพาราที่เลือกเป็นพื้นที่ทดลอง เป็นสวนยางพาราเชิงเดี่ยว ไม่มีการปลูกพืชชนิดอื่นแทรกระหว่างแถวของต้นยางพารา ตั้งอยู่ในภาคเหนือของประเทศไทย ( $18^{\circ}07'00.0''N$ ,  $100^{\circ}09'00.0''E$ ) การทดลองเกิดขึ้นระหว่างเวลา 07.00-11.00 น. เพื่อให้สอดคล้องกับการเก็บเกี่ยวของการทำเกษตรกรรม

#### 4.9.2 การสร้างเป้าบนลำต้นยางพารา

การออกแบบเป้าหมายสีแดงเพื่อใช้ในการติดตั้งไว้บนตำแหน่งของลำต้นยางพาราแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 Example installation of metal plates on rubber tree trunks

การทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.24 เพื่อวัดความแม่นยำของระบบนำทาง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้การประมวลผลภาพและเรขาคณิตของสวนยางพาราเพื่อเป็นแนวทางสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติในสวนยาง การทดลองนี้ไม่ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ในการนำทาง การศึกษานี้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองในห้องปฏิบัติการกับการทดลองในสวนยางพาราจริง การทดลองจะเน้นไปที่ความสามารถในการเคลื่อนที่บนภาคพื้น และปัจจัยภายนอกที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ เช่น ปริมาณคางที่และไม่แน่นอน สภาพพื้นดินที่ราบเรียบและไม่สม่ำเสมอ และความตรงของต้นยางพารา



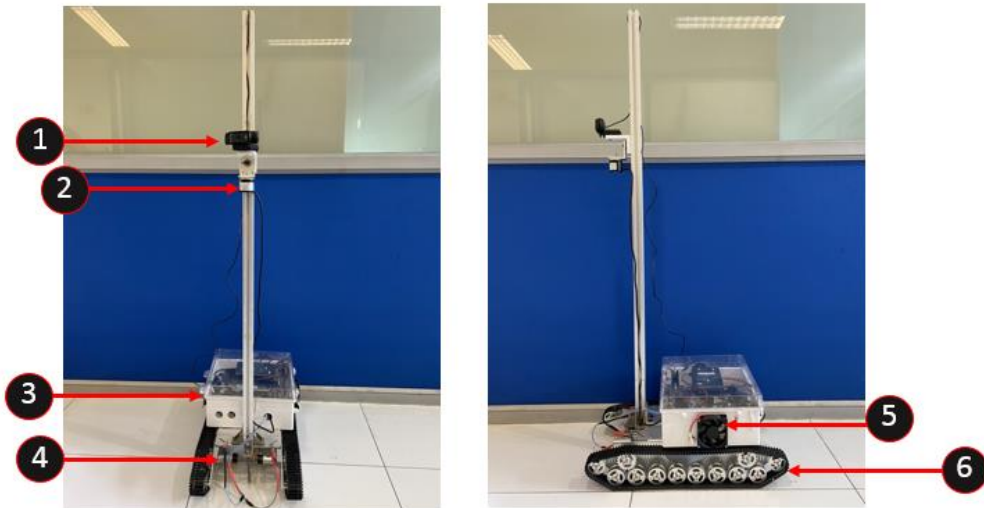
(ก) Rubber tree trunks for actual testing (ข) Trunk mockup for testing in the laboratory

รูปที่ 4.24 Red targets installed on each rubber tree trunk for testing.

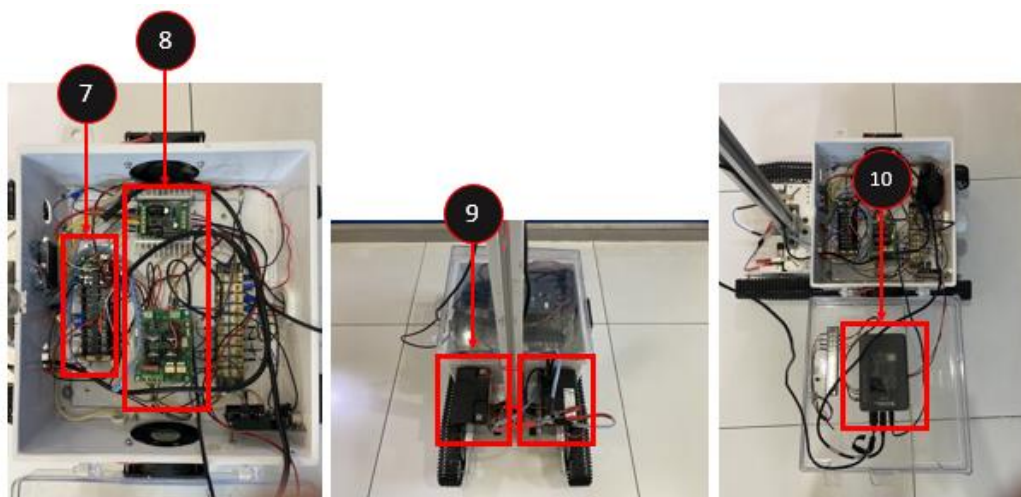
#### 4.10 การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงตัวควบคุมพีไอดี โดยเริ่มต้นจะนำเสนอหลักการพื้นฐานของตัวควบคุมพีไอดี หลังจากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมเพื่อทดสอบการทำแผนทีในสวนยางพารา

##### 4.10.1 ส่วนประกอบของยานพาหนะทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.25 (ก) ส่วนประกอบโครงสร้างหลักของยานพาหนะอัตโนมัติสำหรับทดสอบ

(ข) ส่วนประกอบของชุดควบคุมของยานพาหนะอัตโนมัติสำหรับทดสอบ

จากการออกแบบยานพาหนะอัตโนมัติสำหรับทดสอบเพื่อใช้สำหรับการทดสอบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการนำทางในสวนยางพาราซึ่งมีการทดสอบเครื่องที่ของยานพาหนะในแนวขนานกับแนวแถวของต้นยางพาราโดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 4.25 ซึ่งแต่ละส่วนประกอบมีด้านที่ดังอธิบายต่อไปนี้

1. กล้องเว็บแคม (C920) ทำหน้าที่รับภาพวิดีโอเพื่อใช้ในการประมวลผลภาพ
2. เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ทำหน้าที่ใช้สำหรับวัดมุมการหมุนของกล้องเทียบกับแนวแถวของสวนของยางพารา
3. กล้องควบคุมหลัก ทำหน้าที่ควบคุมระบบของการขับเคลื่อนของยานพาหนะอัตโนมัติ
4. DC มอเตอร์ ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กับชุดล้อขับเคลื่อนของยานพาหนะทั้งซ้ายและขวา
5. พัดลมระบายความร้อน ทำหน้าที่ระบายความร้อนในกล้องควบคุมหลัก
6. สายพานดินตะขาบ ทำหน้าที่ใช้สำหรับเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนพื้นดิน
7. Wiring main ของชุดสายไฟฟ้าควบคุม ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อของชุดสายไฟฟ้าควบคุมและแหล่งจ่ายของระบบควบคุม
8. Motor driver ทำหน้าที่สำหรับควบคุมความเร็วของ DC มอเตอร์สำหรับใช้เป็นต้นกำลังสำหรับชุดขับเคลื่อนสายพานดินตะขาบ
9. แบตเตอรี่ ทำหน้าที่ เป็นแหล่งเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับแหล่งจ่ายให้กับชุดควบคุม
10. Controller (myRIO) ทำหน้าที่เป็นสมองสำหรับควบคุมสั่งการของการควบคุมต่างของยานพาหนะอัตโนมัติ

#### 4.10.2 หลักการและโครงสร้างตัวควบคุมพีไอดี

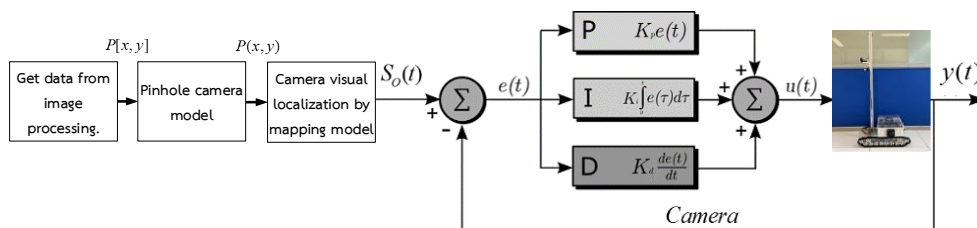
โครงสร้างตัวควบคุมพีไอดีที่นิยมใช้จะมีรูปแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพราะมี ประสิทธิภาพในการควบคุมได้ในวงกว้างและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถออกแบบอัตราขยายตัวควบคุมได้หลากหลายวิธีตามจุดประสงค์ของการควบคุม แต่เมื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติจำเป็นที่จะต้องมีการตัดแปลงโครงสร้างหรือการเพิ่มขีดความสามารถให้ตัวควบคุมพีไอดี เพื่อรองรับการใช้งานในทางปฏิบัติตามจุดประสงค์ของการควบคุม ตัวควบคุมพีไอดีพื้นฐานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-33) และ (4-34) และแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูป 4.26

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d_e(t)}{dx} \quad (4.32)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \quad (4.33)$$

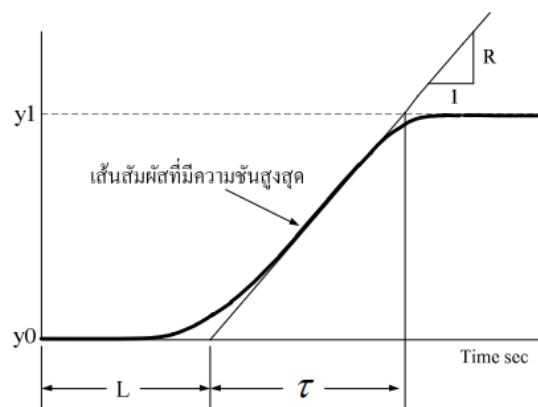
$$e(t) = S_o(t) - y(t) \quad (4.35)$$

เมื่อ  $S_o(t)$  คือ สัญญาณอ้างอิงของการควบคุม,  $y(t)$  สัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ถูกควบคุม และ  $e(t)$  คือค่าความ ผิดพลาดหรือค่าผลต่างของการควบคุมซึ่งเป็นอินพุตของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยสามารถแบ่งตัวแปรของตัวควบคุมออกเป็น 3 แบบ ดังรูปที่ 4.28 ดังนี้  $K_p$  เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมพี,  $K_i$  เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมไอ และ  $K_d$  เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมดี ซึ่งความหมายของตัวแปรทั้ง 3 แบบคือ ตัวแปรพี (P) หมายถึงสัดส่วน (Proportional) โดยพิจารณา ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ตัวแปรไอ (I) หมายถึง อินทิกรัล (Integral) จะพิจารณาผลรวมของค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา และตัวแปรดี (D) หมายถึง อนุพันธ์ (Derivative) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดต่อเวลาพิจารณาตามสมการที่ 4.33



รูปที่ 4.26 ตัวควบคุม PID แบบขนานสำหรับการควบคุมยานพาหนะอัตโนมัติ

สำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมประเภทพีไอดีถูกแนะนำโดยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้าและใช้ได้กับระบบที่มีเสถียรภาพขณะที่ยังไม่มี การควบคุมเท่านั้นเป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์โดยพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอินพุตแบบฟังก์ชันขั้นบันได จะใช้วิธีการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดให้กับกระบวนการ และบันทึกผลตอบสนองของกระบวนการตั้งแต่เริ่มต้นจนผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองของกระบวนการ

สามารถคำนวณค่า  $R$  ได้จากสมการ 4.36 ซึ่งแสดงความหมายพารามิเตอร์ดังรูปที่ 4.27

$$R = \left( \frac{y1 - y0}{\text{control signal value}} \right) / \tau \quad (4.34)$$

การออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีซีเกอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols's Method) วิธีนี้จะพิจารณาจะผลตอบสนองแบบขั้น โดยค่าอัตราขยายพีไอดีจึงขึ้นกับพารามิเตอร์ของ ระบบ ซึ่งได้แก่ค่าเวลาประวิง  $L$  และความชันของผลตอบสนองคือพารามิเตอร์  $R$  ดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method)

ตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	1/RL	-	-
PI	0.9/RL	$K_p / 3.3L$	-
PID	1.2/RL	$K_p / 2L$	$0.5 K_p L$

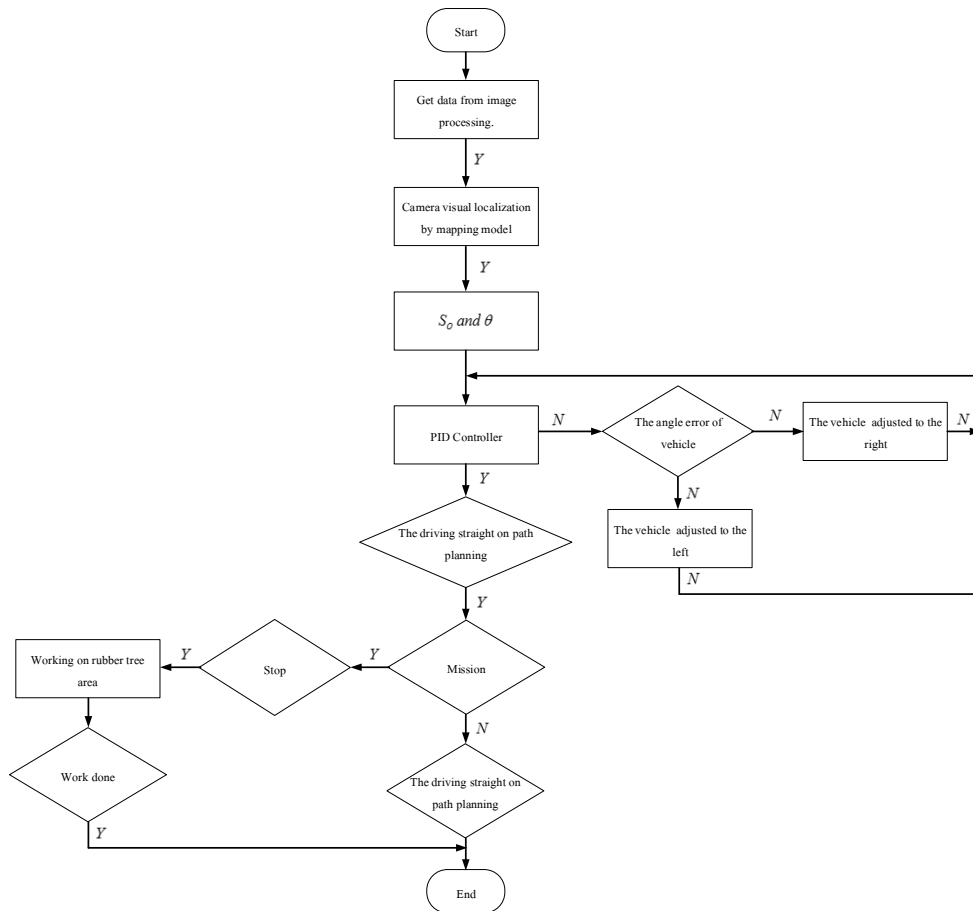
ในส่วนของการทดลองและออกแบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการ ควบคุมระยะของพารามิเตอร์  $S_o$  แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีซีเกอร์-นิโคลส์ (Ziegler-Nichols Method) และการทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

**ตารางที่ 4.3** พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ (PID)

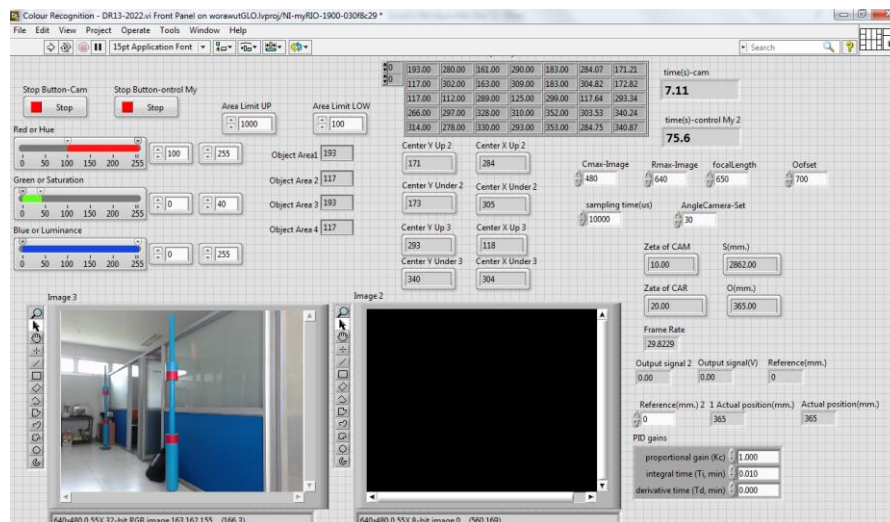
ตัวควบคุม	$K_p$	$K_i$	$K_d$
PID	0.32	-	-

#### 4.10.3 การออกแบบโปรแกรมสำหรับทดสอบ

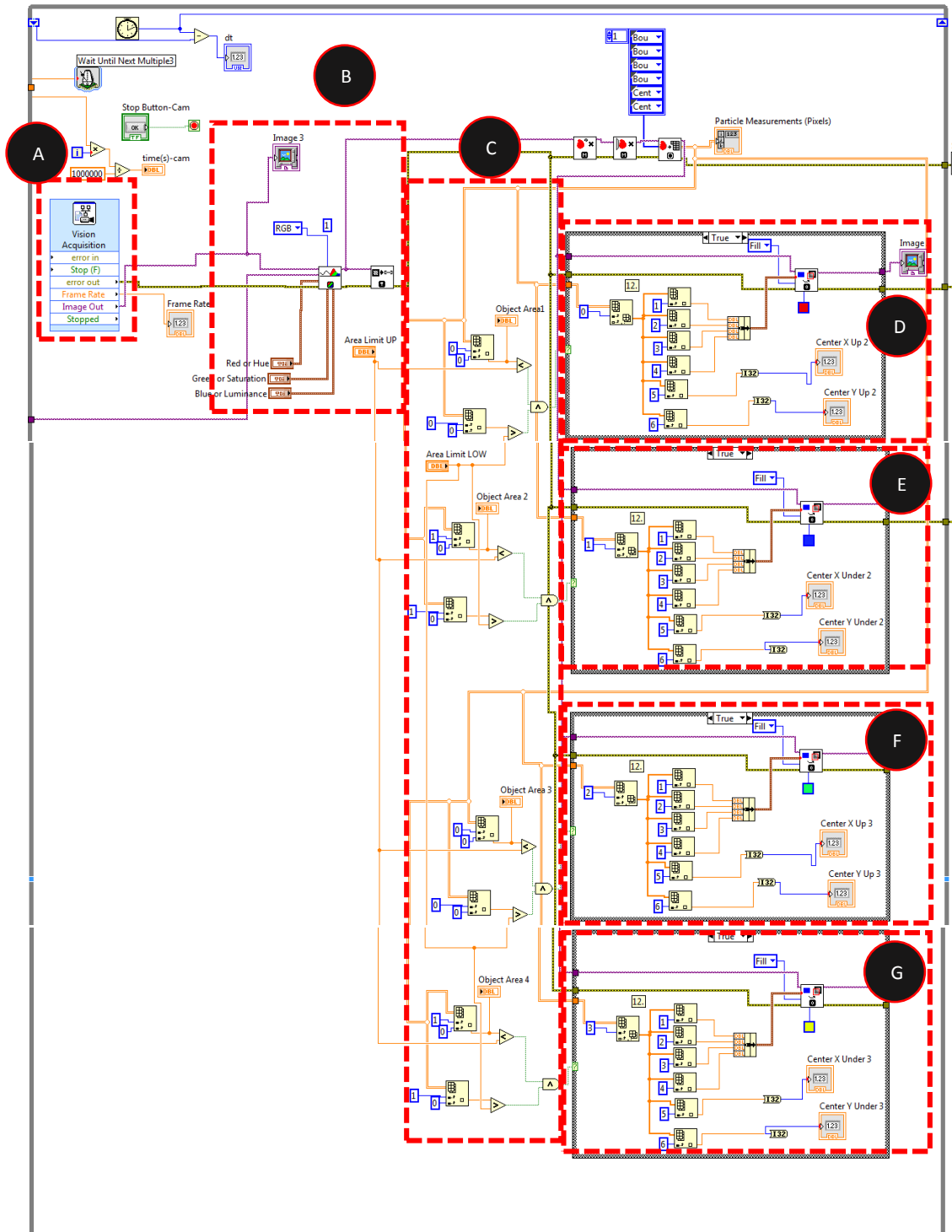
การออกแบบโปรแกรมสำหรับทดสอบโดยใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อออกแบบระบบขับเคลื่อนซึ่งการทดลองดังกล่าวใช้ระบบการทำแผนที่ที่พัฒนาขึ้นโดยมุ่งเน้นไปที่การเคลื่อนที่ในแนวตรงในการเคลื่อนที่ในสวนยางพาราซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่มีภารกิจแสดงดังแผนภาพรูปที่ 4.29 โดยการออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการทดสอบมีสองส่วนคือส่วนที่หนึ่ง Front panel เพื่อใช้ในการป้อนค่าพารามิเตอร์และรวมถึงการแสดงผลสถานะค่าต่างๆ ส่วนที่สองคือ Block diagram เพื่อใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมประมวลผลภาพ และใช้สมการของการทำแผนที่เพื่อประมาณค่าสำหรับการนำทาง



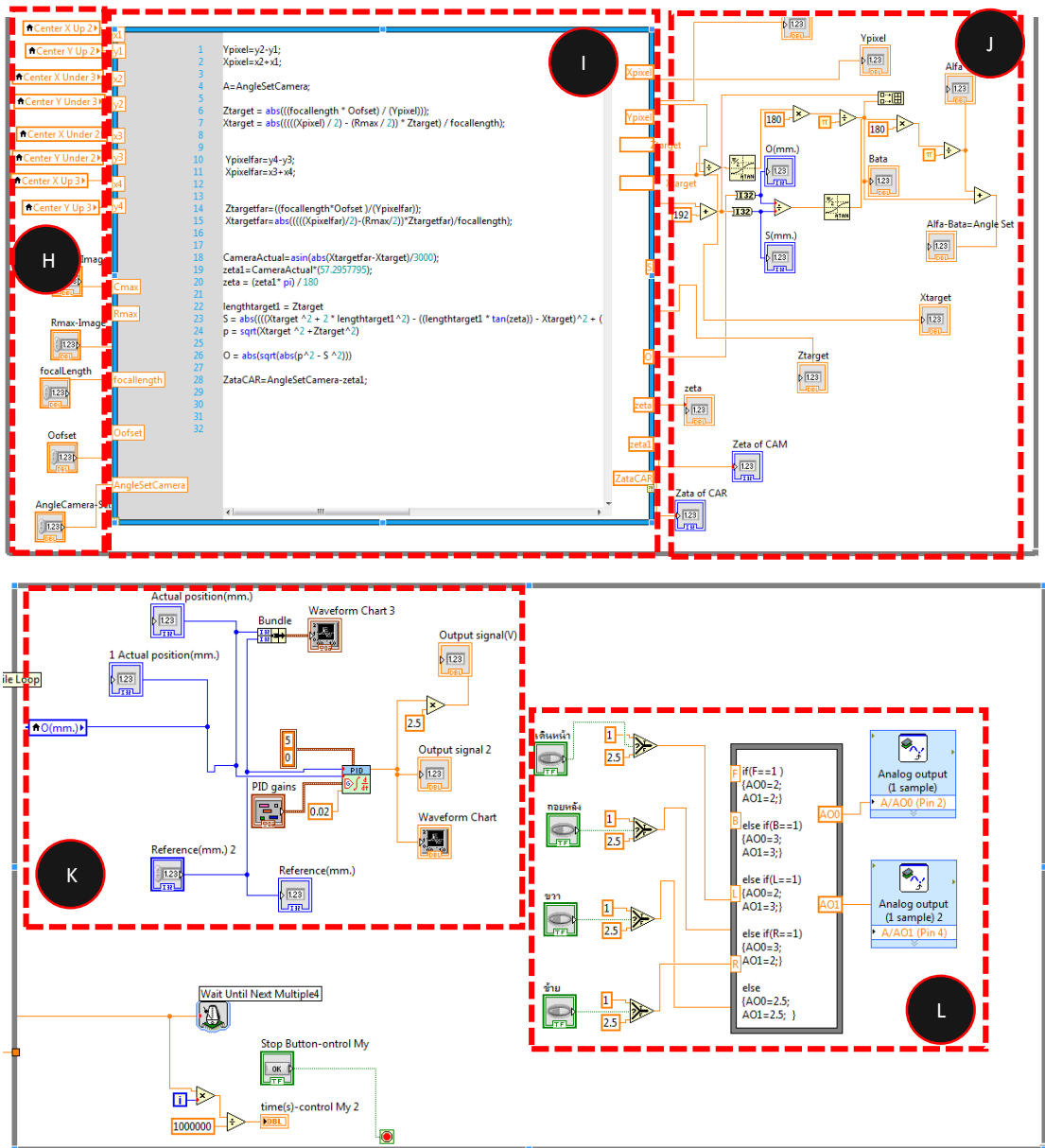
รูปที่ 4.28 Flowchart ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะอัตโนมัติตามแนวแถวตรง



รูปที่ 4.29 Front panel ของโปรแกรมทดสอบ



รูปที่ 4.30 Block diagram ของโปรแกรมทดสอบ



รูปที่ 4.30 Block diagram ของโปรแกรมทดสอบ (ต่อ)

จากรูปที่ 4.30 ได้แบ่งในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW ซึ่งเขียนเป็นรูปแบบ Block diagram ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

- A คือ Vision Acquisition ใช้สำหรับการเรียกกล้องเว็บแคมที่ต่อเข้ากับ controller
- B คือ IMAQ Color Threshold VI การแปลงภาพของรูปภาพ RGB หรือ HSL
- C คือ Arrays and Clusters เป็นการแบ่ง Arrays ของตัวแปรที่ดึงออกจากภาพแบบ real time
- D คือ IMAQ Overlay Rectangle VI ของตำแหน่ง (x,y) กลางเป้าหมายสีแดง P1 ดังรูปที่ 4.8
- E คือ IMAQ Overlay Rectangle VI ของตำแหน่ง (x,y) กลางเป้าหมายสีแดง P3 ดังรูปที่ 4.8
- F คือ IMAQ Overlay Rectangle VI ของตำแหน่ง (x,y) กลางเป้าหมายสีแดง P4 ดังรูปที่ 4.8

G คือ IMAQ Overlay Rectangle VI ของตำแหน่ง (x,y) กลางเป้าหมายสีแดง P2 ดังรูปที่ 4.8

H คือ ตัวแปร input

I คือ MathScript Node ใช้สำหรับประมวลผลของโมเดล mapping

J คือ ตัวแปร output

K คือ PID controller

L คือ Manual control สำหรับควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

สำหรับการพัฒนาระบบการนำทางในสวนยางพาราด้วยวิธีการประยุกต์การประมวลผลทางภาพได้มีผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองโดยแบ่งเป็นหัวข้อตามขั้นตอนในการวิจัย ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดลองของความแม่นยำในการระบุมุมของกล้อง ในการทำแผนที่โดยใช้การประมวลผลทางภาพเทียบกับการวัดด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) และความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์  $X_T$  และ  $L_T$  ที่สัมพันธ์กับมุมกล้องที่ติดตั้ง

5.2 ผลการทดลองประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์  $X_T$  และ  $L_T$  โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model)

5.3 ผลการทดลองประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์  $S_O$  และ  $S_T$  โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) เมื่อมุมกล้องมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง

5.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์  $S_O$  และ  $S_T$  บนพื้นที่ทดสอบ โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) ในห้องปฏิบัติการและในสวนยางพารา

5.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ (performance) ของการทำแผนที่ ในห้องปฏิบัติการ และสวนยางพารา

5.6 การทดลองหาค่าความไม่แน่นอนของการระบุระยะของพารามิเตอร์  $L_T$  และ  $X_T$  ในห้องปฏิบัติการ

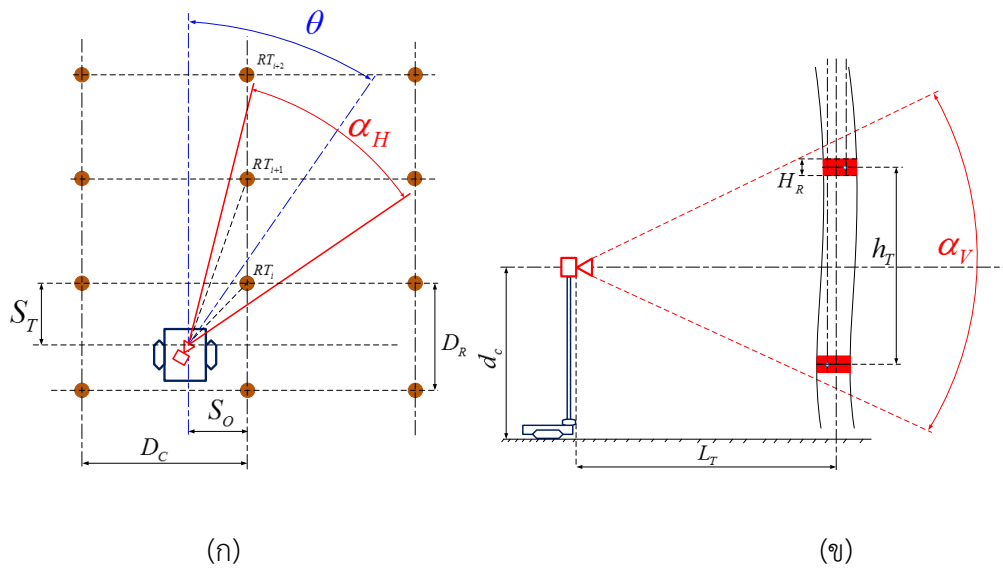
5.7 การเอียงของลำต้นเป้าหมายส่งผลต่อผิดพลาดส่งผลต่อพารามิเตอร์  $X_T$

5.8 ความสัมพันธ์ของการตั้งค่าการเอียงของมุมกล้อง  $\theta$  ที่ติดตั้งที่ผิดพลาดส่งผลต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง  $S_O$  และ  $S_T$

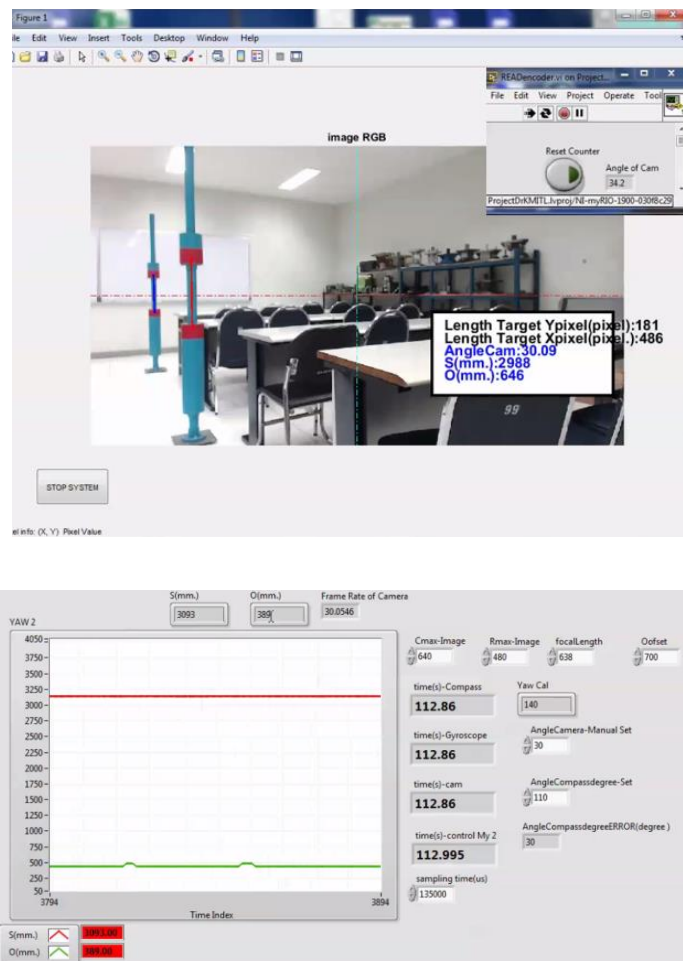
5.9 ความสัมพันธ์ของระยะการปลุกตามแนวแถว ( $D_R$ ) และพารามิเตอร์ระบุงศาของรถ ( $\theta$ )

#### 5.1 ผลการทดลองของความแม่นยำในการระบุมุมของกล้อง ในการทำแผนที่โดยใช้การประมวลผลทางภาพเทียบกับการวัดด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) และความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ $X_T$ และ $L_T$ ที่สัมพันธ์กับมุมกล้องที่ติดตั้ง

การเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบความแม่นยำในการระบุองศาการหมุนของกล้อง จะทำการติดเป้าหมายแต่ละต้นไว้ 2 เป้าหมายแยกจากกัน และติดตั้งกล้องไว้บนยานพาหนะอัตโนมัติที่ระดับความสูงจากพื้นดินเท่ากับกึ่งกลางของเป้าหมายบนต้นยางพารา ดังรูปที่ 5.1(ข) การติดตั้งเริ่มต้นสำหรับตั้งค่ามุมมองของกล้องที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 5.1(ก) เพื่อให้สามารถมองเห็นลำต้นยางพาราได้ไกลที่สุดอยู่ที่ 6-10 เมตร โดยเป็นมุมมองที่จะสามารถปรากฏภาพลำต้นยางพาราบนเฟรมภาพ ซึ่งการสอบเทียบกล้องสำหรับการตั้งค่าเริ่มต้นให้กับมุมของกล้องซึ่งการทดสอบดังกล่าวสำคัญอย่างยิ่งเพื่อที่จะสามารถอธิบายได้ว่ามุมของกล้องที่ถูกประมาณมาจากระบบการประมวลผลภาพนั้นถูกต้อง



รูปที่ 5.1 (ก)Horizontal vision mapping (ข)Vertical vision mapping

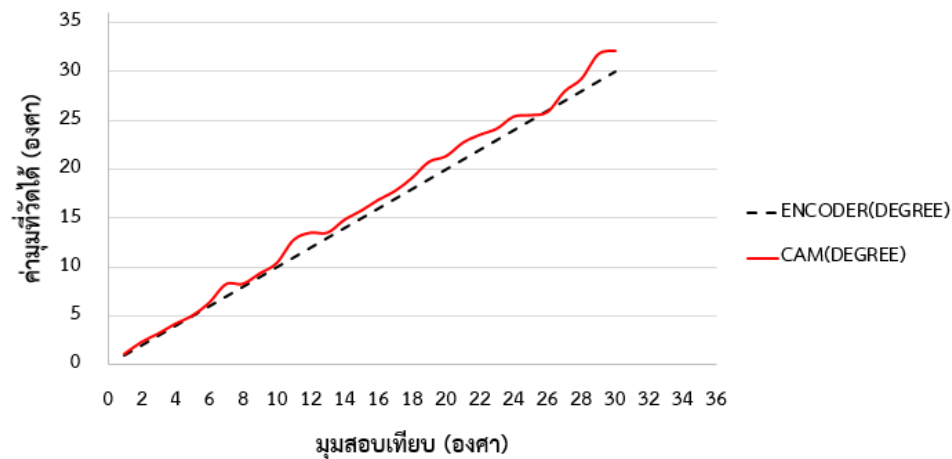


รูปที่ 5.2 ภาพการทดสอบโดยการสอบเทียบมุมของการประมาณด้วยการประมวลผลทางภาพกับเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบมุมของการประมาณด้วยการประมวลผลทางภาพเทียบกับเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

ENCODER (DEGREE)	CAM (DEGREE)	ERROR (DEGREE)	%ERROR
1	1.13	0.13	13.00
2	2.34	0.34	17.00
3	3.21	0.21	7.00
4	4.21	0.21	5.25
5	5.04	0.04	0.80
6	6.34	0.34	5.67
7	8.26	1.26	18.00
8	8.30	0.30	3.75
9	9.36	0.36	4.00
10	10.42	0.42	4.20
11	12.79	1.79	16.27
12	13.52	1.52	12.67
13	13.52	0.52	4.00
14	14.84	0.84	6.00
15	15.78	0.78	5.20
16	16.88	0.88	5.50
17	17.80	0.80	4.71
18	19.13	1.13	6.28
19	20.77	1.77	9.32
20	21.34	1.34	6.70
21	22.72	1.72	8.19
22	23.53	1.53	6.95
23	24.15	1.15	5.00
24	25.39	1.39	5.79
25	25.53	0.53	2.12
26	25.87	-0.13	-0.50
27	27.96	0.96	3.56

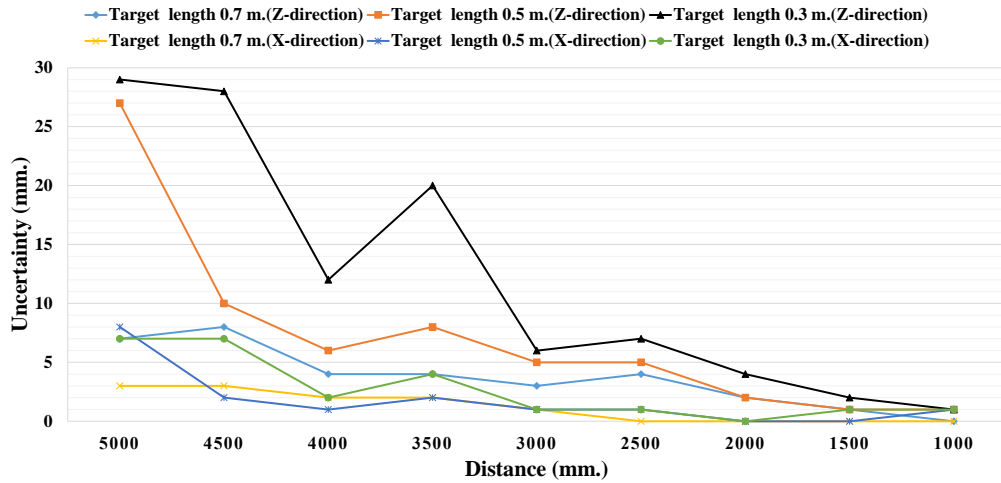
ENCODER (DEGREE)	CAM (DEGREE)	ERROR (DEGREE)	%ERROR
28	29.25	1.25	4.46
29	31.77	2.77	9.55
30	32.11	2.11	7.03



รูปที่ 5.3 กราฟการทดสอบโดยการสอบเทียบมุมของการประมาณด้วยการประมวลผลทางภาพเทียบกับเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

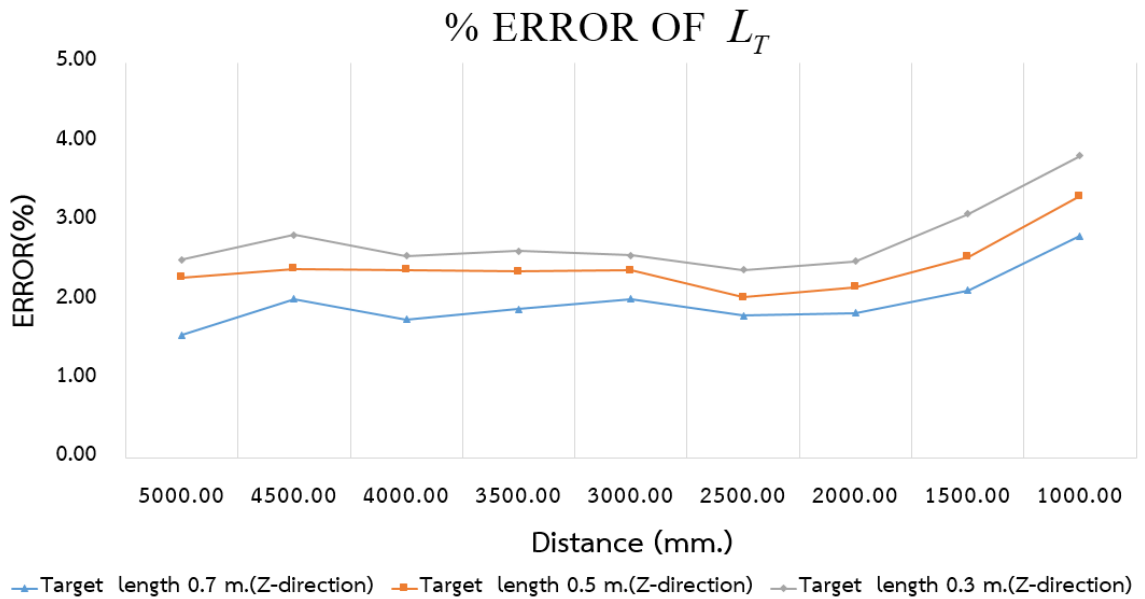
จากการเก็บข้อมูลดังตารางที่ 5.1 การเก็บค่ามุมสำหรับทดสอบความแม่นยำของการประมาณโดยใช้กล้องเพื่อประมาณมุมของกล้อง ( $\theta$ ) เทียบกลับแนวแกนของสวอนยางพารา ดังรูปที่ 5.1 (ก) ซึ่งมุมดังกล่าวเป็นมุมเพื่อตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อให้มุมมองของกล้องสามารถมองเห็นลำต้นยางพาราได้เหมาะสม ซึ่งมุมของกล้องดังกล่าวเมื่อตัวยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน ก็จะทำให้มุมของกล้อง ( $\theta_c$ ) มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับมุมกล้องที่ตั้งไว้ ( $\theta$ ) โดยการทดสอบดังตาราง 5.1 เป็นการทดสอบความแม่นยำในการระบุวาล์วกล้องทำมุมกับแนวแกนซึ่งงานวิจัยไม่มีการใช้งานเซ็นเซอร์ในการระบุการหมุนของตัวรถใช้การประมาณจากวิธีการประมวลผลทางภาพ การทดลองได้ทดสอบมุมช่วงตั้งแต่ 1 ถึง 30 องศา ซึ่งผลการทดลองระบบการประมาณโดยใช้การประมวลผลทางภาพสามารถประมาณมุมของกล้องมีค่าเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 6.92 % เมื่อเทียบกับเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 2.77 องศา และความผิดพลาดน้อยที่สุด 0.04 องศา โดยที่มุมของการหมุนกล้องดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าการวัดค่าการหมุนของยานพาหนะใช้เซ็นเซอร์ หรือเข็มทิศสำหรับการวัดการหมุนของยานพาหนะ ผลจากการทดลองการประมาณโดยการประมวลผลทางภาพจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดน้อย สามารถนำไปใช้ในการประมาณเพื่อนำทางของยานพาหนะได้

## 5.2 ผลการทดลองประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์ $X_T$ และ $L_T$ โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model)

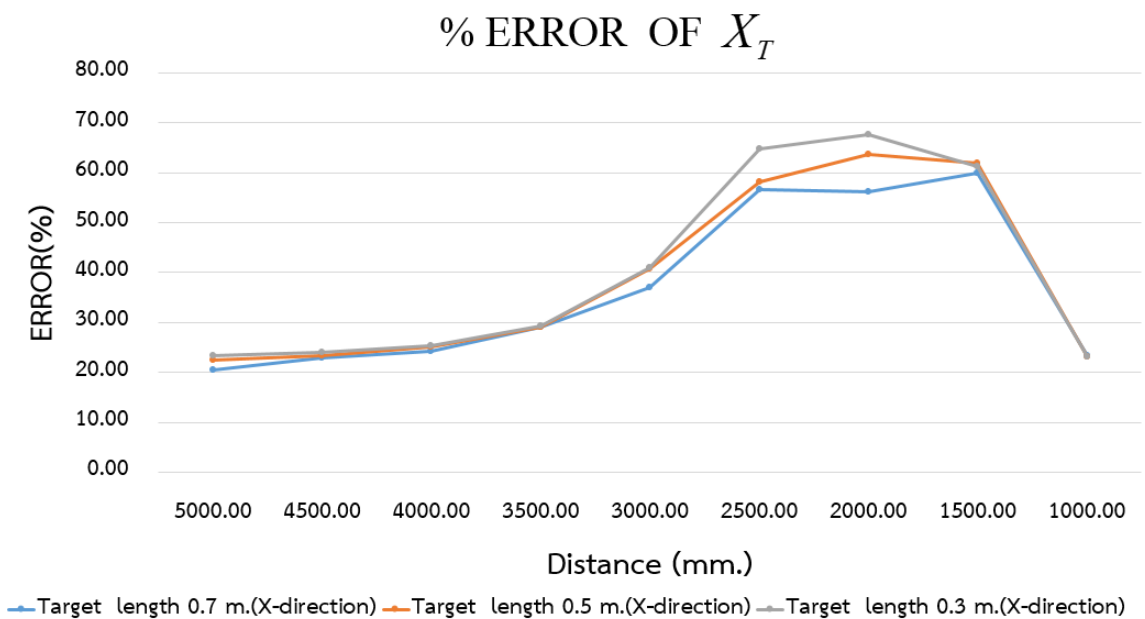


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความไม่แน่นอน (uncertainty) ของ  $X_T$ -direction และ  $L_T$ -direction ที่ระยะห่างของเป้าหมาย (target length) 0.7, 0.5 and 0.3 เมตร

จากรูปที่ 5.4 การประมาณค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) บอกถึงความผกผันของความสามารถในการทำซ้ำของการวัด โดยการบันทึกความผันแปรสูงสุดและต่ำสุดของข้อผิดพลาดในการระบุค่าความไม่แน่นอน การทดลองดังกล่าวได้ทดสอบที่ ระยะห่างของเป้าหมายสีแดง (target length) จำนวน 3 ระยะซึ่งระยะที่เลือกทำการทดสอบนั้นใช้ลักษณะของการกริดยางพาราบริเวณลำต้นซึ่งการติดตั้งเป้าสีแดงจะต้องไม่ไปกระทบกับการกริดยางพาราจริงโดยได้เลือกระยะทดสอบคือ 0.7, 0.5 และ 0.3 เมตร พบค่าความไม่แน่นอนสูงในระยะทางที่ไกลที่สุดจากเป้าหมาย เมื่อกล้องเข้าใกล้เป้าหมาย ความไม่แน่นอนเหล่านี้ก็ลดลง เนื่องจากการรับรู้ของกล้องในระยะทางที่ไกลกว่าจะส่งผลให้ขนาดภาพเป้าหมายเล็กลง สัดส่วนของข้อผิดพลาดของภาพจึงส่งผลต่อการประเมินดังกล่าวโดยหากผลการทดลองที่ระยะห่างของเป้าหมายสีแดงที่ 0.3 เมตรมีค่าความไม่แน่นอนมากที่สุดเมื่อเป้าหมายอยู่ที่ระยะไกลจากกล้อง



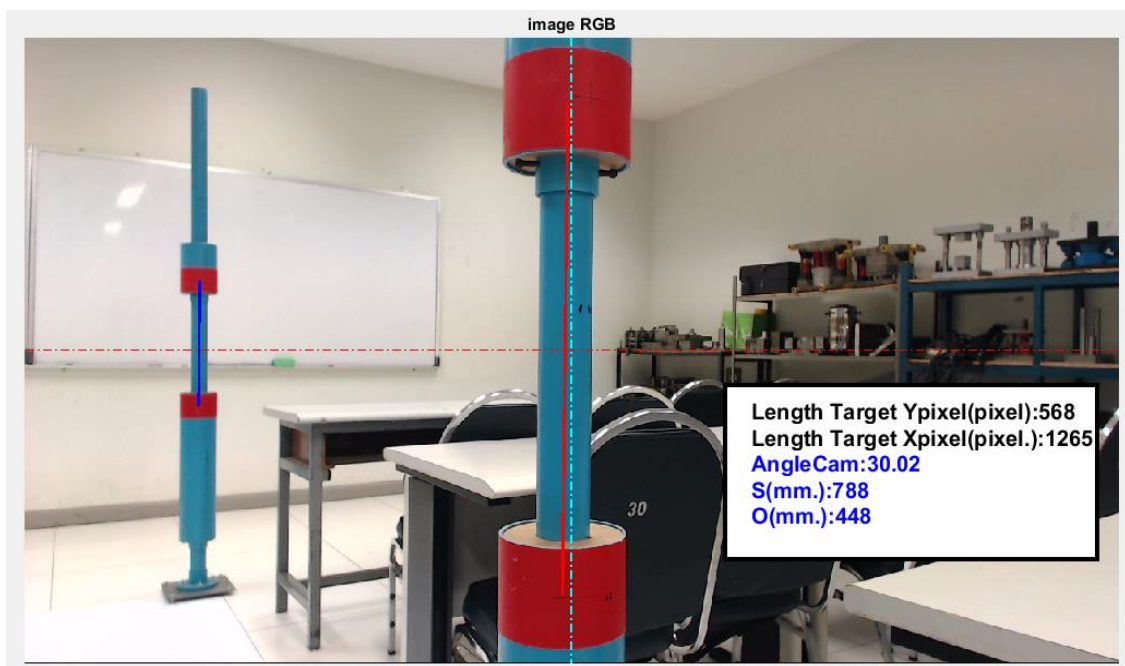
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (percent error) ของ  $L_T$ -direction ที่ ระยะห่างของเป้าหมาย (target length) 0.7, 0.5 and 0.3 เมตร



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (percent error) ของ  $X_T$ -direction ที่ ระยะห่างของเป้าหมาย (target length) 0.7, 0.5 and 0.3 เมตร

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (percent error) ของ  $X_T$ -direction และ  $L_T$ -direction โดยที่พารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณจากการประมวลผลทางภาพและแปลงโดยใช้แบบจำลองรูเข็ม (Pinhole camera model) แสดงเปอร์เซ็นต์ข้อผิดพลาดของ

$X_T$  และ  $L_T$  ที่ได้รับการทดลองการทำแผนที่ จะเห็นได้ว่าข้อผิดพลาด  $L_T$  นั้นน้อยมาก และมีความคล้ายคลึงกันตลอดช่วงการทดสอบ เนื่องจากทั้ง  $X_T$  และ  $L_T$  คำนวณโดยขนาดภาพที่มีความยาวเป้าหมาย  $h_T$  ระยะห่างระหว่างกล้องกับเป้าหมาย ดังนั้นข้อผิดพลาดดังกล่าวจะรักษาสัดส่วนของความผิดพลาดไว้ อย่างไรก็ตาม สำหรับค่า  $X_T$  เปอร์เซ็นต์ข้อผิดพลาดจะมากกว่ามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะห่างของกล้องอยู่รอบๆ ช่วงกลางแสดงผลจากตำแหน่งเป้าหมายในภาพ เมื่อกล้องเคลื่อนเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น ตำแหน่งของเป้าหมายจะย้ายจากด้านหนึ่งของเฟรมไปยังอีกด้านหนึ่ง รอบช่วงกลาง ตำแหน่งของเป้าหมายอยู่ใกล้กับศูนย์กลางเฟรมซึ่งเป็นจุดอ้างอิงของการวัด  $X_T$  เมื่อค่า  $X_T$  มีขนาดเล็กส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของข้อผิดพลาดเพิ่มขึ้นและอีกประการซึ่งภาพที่เกิดขึ้นเป้าหมายสีแดงทั้งสองอยู่บริเวณขอบของเฟรมภาพซึ่งเกิดลักษณะของภาพงอโค้ง (distortion) เนื่องจากชนิดของเลนส์กล้องแต่ปัญหาดังกล่าวยังคงสามารถเป็นไปได้จากผลการทดลองยังคงสามารถนำไปใช้ในการสร้างแผนที่ได้ซึ่งการทำงานจริงในสวนยางพาราผู้ออกแบบสามารถชดเชยสิ่งผิดพลาดนี้ได้หรือ การทำทางในแนวแถวยังสามารถเป็นไปได้



รูปที่ 5.7 ภาพการทดลองเมื่อกำลังเข้าใกล้เป้าหมาย

5.3 ผลการทดลองประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์  $S_o$  และ  $S_T$  โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) เมื่อมุมกล้องมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง



รูปที่ 5.8 ภาพตัวอย่างการทดลองมุมกล้อง +5 องศา



รูปที่ 5.9 ภาพตัวอย่างการทดลองมุมกล้อง -5 องศา

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่ 1 ลองประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อกล้องมีความคลาดเคลื่อนในทิศทางขึ้นลง 0 องศา

รายละเอียดการทดสอบ	พารามิเตอร์	Maximum error (mm.)	Average error (mm.)	RMS error (mm.)	Standard deviation
The angle error is 0 degree and separate targets is 700 mm. (Orchard testing)	$S_o$	31.00	6.19	13.76	2.52
	$S_T$	20.00	-0.71	18.14	0.71

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อกล้องมีความคลาดเคลื่อนในทิศทางขึ้น +5 องศา

รายละเอียดการทดสอบ	พารามิเตอร์	Maximum error (mm.)	Average error (mm.)	RMS error (mm.)	Standard deviation
The positive angle error is 5 degree and separate targets is 700 mm. (Orchard testing)	$S_o$	83.00	7.90	29.43	5.81
	$S_T$	16.00	-10.52	22.26	0.76

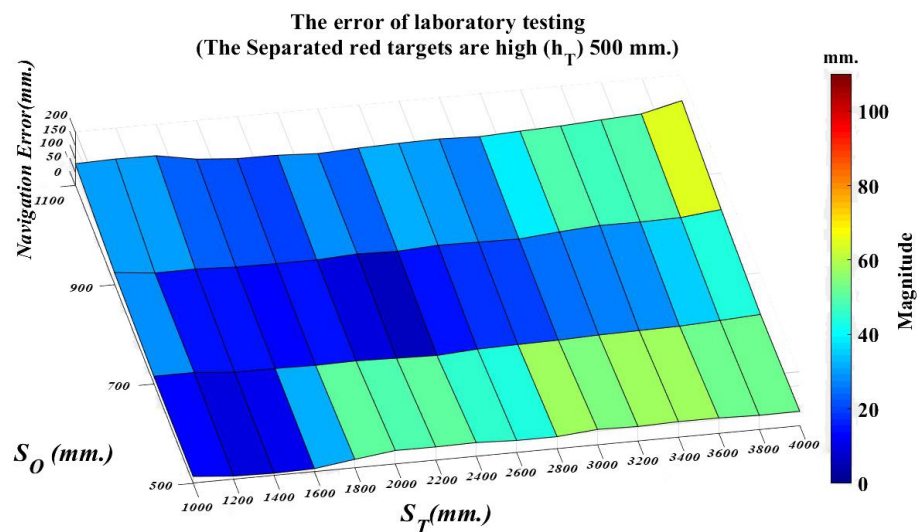
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองที่ 3 ประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อกล้องมีความคลาดเคลื่อนในทิศทางลง -5 องศา

รายละเอียดการทดสอบ	พารามิเตอร์	Maximum error (mm.)	Average error (mm.)	RMS error (mm.)	Standard deviation
The negative angle error is 5 degree and separate targets is 700 mm. (Orchard testing)	$S_o$	38.00	2.43	20.95	4.26
	$S_T$	21.00	-10.19	20.36	0.54

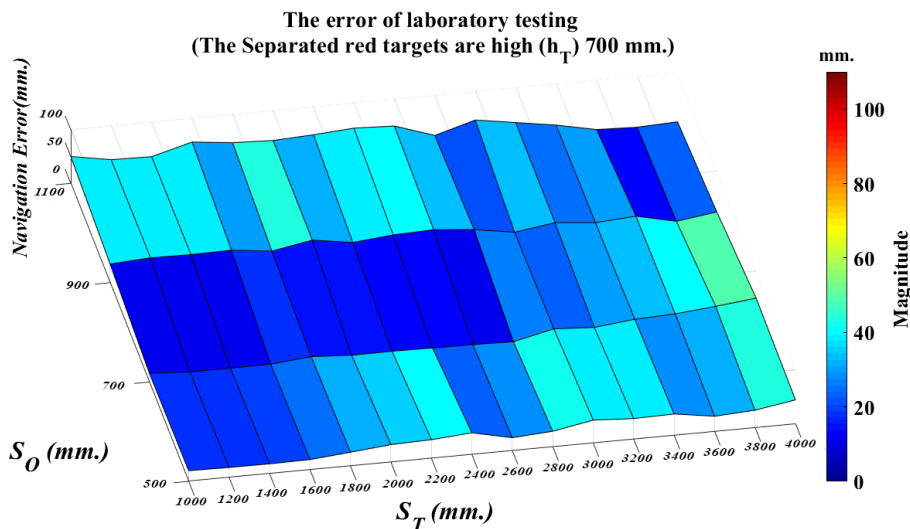
จากการทดลองการประเมินความแม่นยำของพารามิเตอร์  $S_o$  และ  $S_T$  โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) โดยการทดลองดังกล่าวคือ เมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ตามแนวแถว โดยเลือกทดสอบระยะตั้งแต่ 1 ถึง 5 เมตร ซึ่งลักษณะพื้นที่จริงพื้นดินในสวนยางพาราไม่ราบเรียบ การทดลองจำเป็นต้องมีการทดสอบซึ่งใช้พารามิเตอร์เพื่อวัดประสิทธิภาพของการทำแผนที่เมื่อมุมกล้องมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงเมื่อเจอลักษณะภูมิประเทศในสวนยางพาราจริง โดยได้ทำการทดลองที่ 1 คือมุมต้องทำมุม 0 องศาขนานกับพื้นดิน การทดลองที่ 2 คือกล้องทำมุมเงย +5 องศากับแนวขนานกับพื้นดิน และการทดลองที่ 3 คือกล้องทำมุมก้ม 5 องศากับแนวขนานกับพื้นดิน โดยตารางที่ 5.2 ซึ่งมุมกล้องทำมุมกับพื้น 0 องศา โดยการทดสอบใช้ค่าเป้าหมาย (separate targets) 700 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเป้าหมายที่มีความสามารถแยกแยะในระยะไกลได้ดีที่สุดจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ดังกล่าว ผลของการศึกษาความผิดพลาดของพารามิเตอร์  $S_o$  ในการทดลองที่ 1 ได้ผลการทดลองคือ มีความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error) เท่ากับ 31 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) เท่ากับ 13.76 มิลลิเมตร การทดลองที่ 2 ได้ผลการทดลองคือ มีความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error) เท่ากับ 83 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) เท่ากับ 29.43 มิลลิเมตร และการทดลองที่ 3 ได้ผลการทดลองคือ มีความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error) เท่ากับ 38 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) เท่ากับ 20.95 มิลลิเมตร ผลการทดลองทั้งสามการทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมของกล้องที่ไม่ขนานกับพื้นโลกของการทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3 มีความผิดพลาด RMS เมื่อเทียบกับกล้องที่การทดลองที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 11.43 มิลลิเมตร และ ผลของการศึกษาความผิดพลาดของ

พารามิเตอร์  $S_T$  ในการทดลองที่ 1 ได้ผลการทดลองคือ มีความความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) เท่ากับ 18.14 มิลลิเมตร การทดลองที่ 2 ได้ผลการทดลองคือ มีความความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error) เท่ากับ 16 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) เท่ากับ 22.26 มิลลิเมตร และการทดลองที่ 3 ได้ผลการทดลองคือ มีความความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error) เท่ากับ 21 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMS) เท่ากับ 20.36 มิลลิเมตร ผลการทดลองทั้งสามการทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมของกล้องที่ไม่ขนานกับพื้นโลกของการทดลองที่ 2 และ การทดลองที่ 3 มีความผิดพลาด RMS เมื่อเทียบกับกล้องที่การทดลองที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 3.17 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อนำค่าความผิดพลาดนี้มาวิเคราะห์ถือว่ายังเป็นไปได้สำหรับการนำไปใช้สำหรับการนำทางในสวนยางพาราจริงได้

**5.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของ  $S_o$  และ  $S_T$  พารามิเตอร์บนพื้นที่ทดสอบ โดยใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีรูเข็ม (Pinhole model) ในห้องปฏิบัติการและสวนยางพารา**



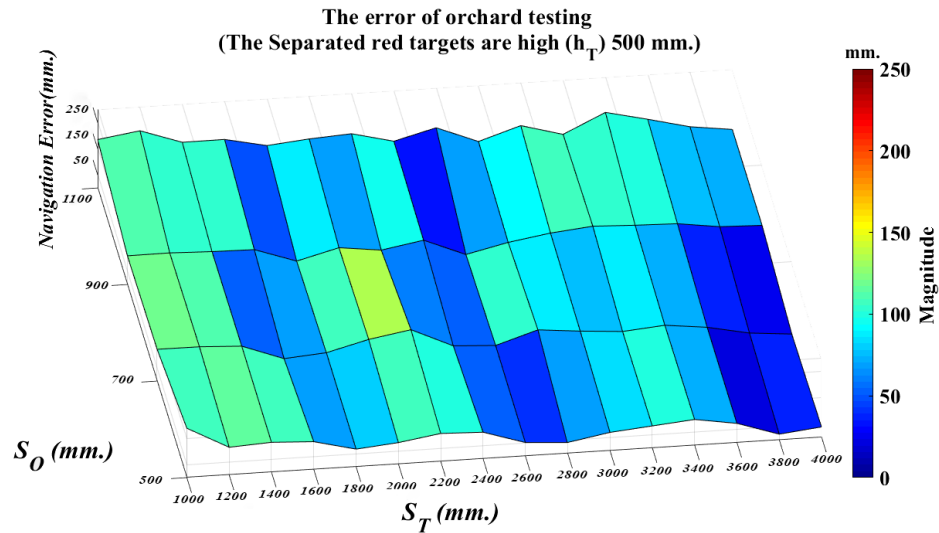
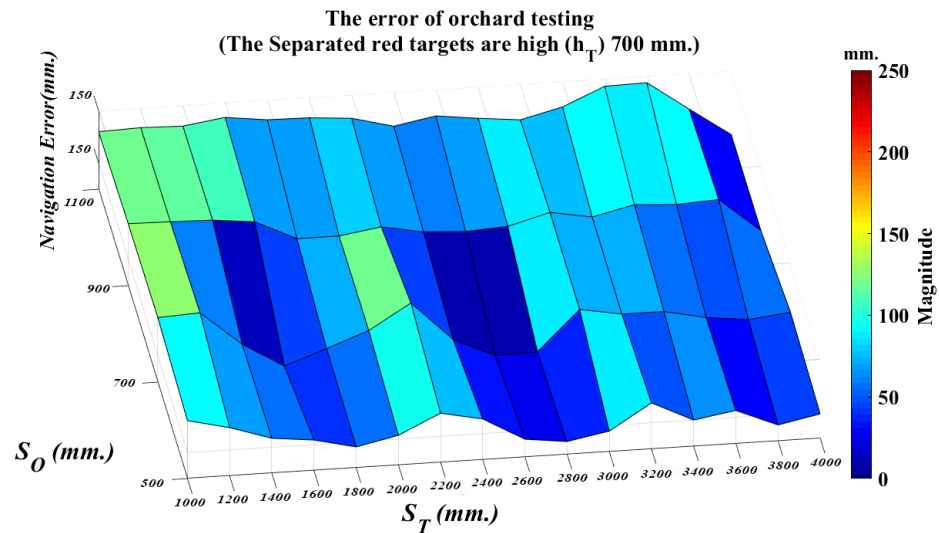
(ก) The two red targets ( $h_T$ ) separated by 500 mm.



(ข) The two red targets ( $h_T$ ) separated by 700 mm.

รูปที่ 5.10 The magnitude of error in area testing for controlled environment (Laboratory testing) (ต่อ)

จากสมการที่ใช้สำหรับการทำแผนที่ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งถูกสร้างจากเรขาคณิตของสวอนยาพารา การเปรียบเทียบช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัจจัยจริงที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดของการทำแผนที่ได้ ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 แสดงประสิทธิภาพของอัลกอริธึมการประมวลผลภาพในการทำแผนที่สวอนยาพารา โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในห้องปฏิบัติการและในสวอนยาพาราจริง เห็นได้อย่างชัดเจนว่าข้อผิดพลาดของระบบอัลกอริธึมการประมวลผลภาพมีความแตกต่างกันทั่วทั้งพื้นที่ทดสอบ โดยการกำหนดเป็นพื้นที่ทดสอบเพื่อประเมินผิดพลาดโดยการแบ่งพื้นที่ทดสอบออกเป็นพิกัดกริด (Grid Coordinates) ในพื้นที่ตัวอย่าง และข้อผิดพลาดของแต่ละตำแหน่งพื้นที่ข้อผิดพลาดแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นแนวโน้มของค่าความผิดพลาดในพื้นที่ทดสอบ และรวมข้อมูลจากจุดข้อผิดพลาด 46 จุดในพื้นที่ทดสอบตัวอย่างคือ 4.4 ตารางเมตร ขนาดของค่าความผิดพลาดจะแสดงเป็นกราฟสามมิติโดยมีพารามิเตอร์แกน  $S_T$ ,  $S_O$  และแกนข้อผิดพลาดรูปที่ 5.10 แสดงขนาดของข้อผิดพลาดในการทดสอบซึ่งแบ่งเป็นพื้นที่สำหรับสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม (การทดสอบในห้องปฏิบัติการ) ความสูงของเป้าหมาย (The two red targets separated ( $h_T$ )) คือ 500 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตร ตามลำดับกราฟพื้นที่ข้อผิดพลาดที่มีลักษณะเรียบแสดงว่ามีข้อผิดพลาดที่คงที่

(ก) The two red targets ( $h_r$ ) at a height of 500 mm.(ข) The two red targets ( $h_r$ ) separated by 700 mm.

รูปที่ 5.11 The magnitude of error in area testing for controlled environment  
(Orchard testing)

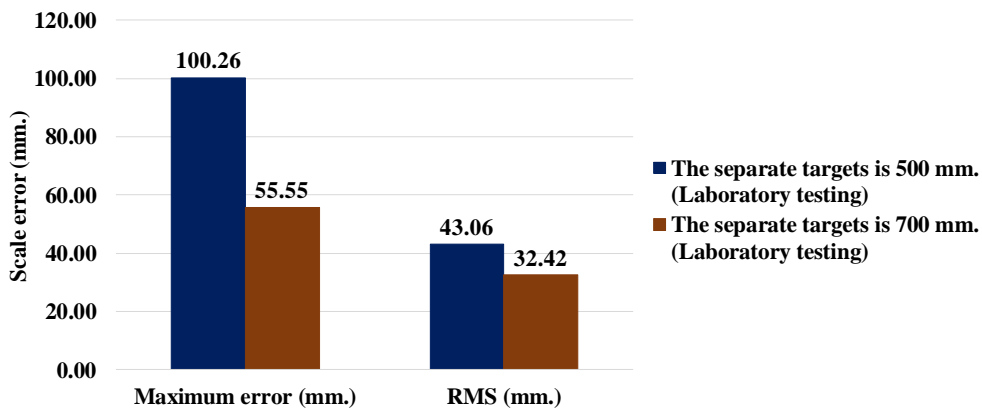
ขนาดของข้อผิดพลาดแตกต่างกันไปตามตำแหน่งที่ตรวจวัดจำนวน 46 ตำแหน่ง ในพื้นที่ทดสอบ เมื่อความสูงของเป้าหมายเป็น 700 มิลลิเมตร ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าเมื่อความสูงของเป้าหมายเป็น 500 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.10(ก) และ 5.10(ข) ตามลำดับ การทดลองแสดงให้เห็นว่าในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม (การทดสอบในห้องปฏิบัติการ) มีลักษณะของค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้สำหรับการใช้สำหรับการทำแผนที่ โดยการทดลองเปรียบเทียบกับ การทดลองในสวนยางจริงเพื่อแสดงว่าปัจจัยต่างๆ ส่งผลต่อระบบการทำแผนที่ดังกล่าว โดยการทดลองดังรูปที่ 5.11 แสดง

พื้นที่ข้อผิดพลาดสำหรับสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ (การทดสอบสวนยาพารา) มีค่าความผิดพลาดจำนวน 46 ตำแหน่ง มีขนาดของค่าความผิดพลาดแตกต่างจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 5.11(ก) และ 5.11(ข) ค่าความผิดพลาดแตกต่างกันไปในแต่ละจุดวัดในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุม ปัจจัยหลักที่เพิ่มข้อผิดพลาดคือสภาพแสงที่ไม่เสถียรในช่วงเวลาต่างๆ ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ข้อผิดพลาดเฉลี่ยมากขึ้นเมื่อความสูงของเป้าหมายคือ 500 มิลลิเมตร และมีขนาดเล็กลงเมื่อความสูงของเป้าหมายคือ 700 มิลลิเมตร พื้นที่ข้อผิดพลาดสำหรับการนำทางโดยใช้ระบบประมวลผลภาพแสดงให้เห็นว่าการทำแผนที่ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีสภาพแสงที่ต่างกันเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม ต้นยางจริงที่นั่นไม่ตรงเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของต้นไม้และซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ในขณะที่ต้นยางพาราที่จำลองในห้องปฏิบัติการนั้นมีความตรงเนื่องจากได้ถูกสร้างมาจากท่อพลาสติก พารามิเตอร์ที่ใช้เพื่อแสดงประสิทธิภาพของวิธีการทำแผนที่คือความคลาดเคลื่อนสูงสุดและค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

## 5.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ (performance) ของการทำแผนที่ในห้องปฏิบัติการและสวนยาพารา

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของค่าความผิดพลาดในเชิงสถิติ

	N	Minimum error (mm.)	Maximum error (mm.)	RMS (mm.)	Mean of error(mm.)	Standard deviation of error
The separate targets is 500 mm. (Laboratory testing)	64	5.73	100.26	43.06	38.34	19.75
The separate targets is 700 mm. (Laboratory testing)	64	3.86	55.55	32.42	29.77	12.93

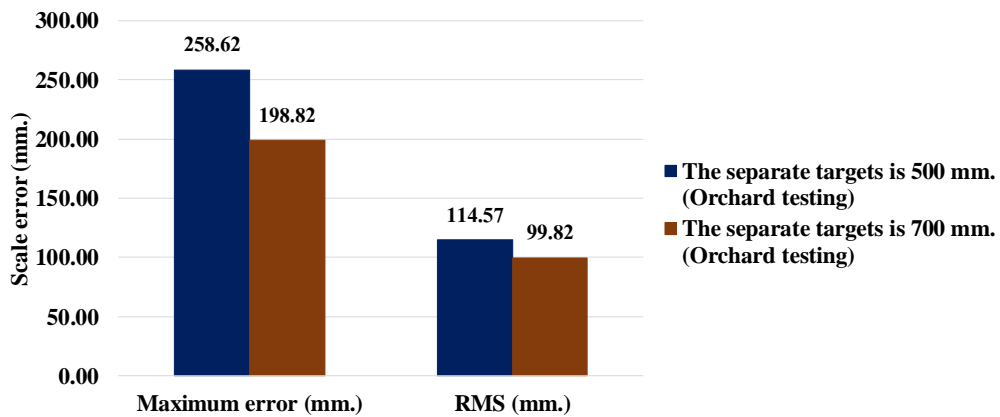


รูปที่ 5.12 Mapping performance results in laboratory testing.

ประสิทธิภาพของระบบแผนที่แสดงในรูปที่ 5.12 ระบุว่าเมื่อกำลังอยู่ไกลจากเป้าหมายทดสอบเกิดข้อผิดพลาดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อกำลังอยู่ใกล้เป้าหมาย ในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมห้องปฏิบัติการข้อผิดพลาดในการทำแผนที่นั้นน้อยกว่าในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมกล้องเคลื่อนไปตามแถว และค่า RMS ของประสิทธิภาพการทำแผนที่โดยใช้การทดสอบสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม ความยาวระหว่างเป้าหมายทั้งสองที่ 500 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตร วัดความแตกต่าง RMS จาก 43.06 มิลลิเมตร และ 32.42 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบเป้าหมายทั้งสองที่มีความยาวต่างกันซึ่งมีผลการทดลองมีความแตกต่างอยู่ที่ 1.33 เท่า ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด ในขณะที่ความยาวของเป้าหมายทั้งสองมีข้อผิดพลาดสูงสุดที่ 100.26 มิลลิเมตร และ 55.55 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองในสวนยางพาราของค่าความผิดพลาดในเชิงสถิติ

	N	Mini mum error (mm.)	Maximum error (mm.)	RMS (mm.)	Mean of error (mm.)	Standard deviation of error
The separate targets is 500 mm. (Orchard testing)	64	20.92	258.62	114.57	103.52	49.48
The separate targets is 700 mm. (Orchard testing)	64	9.33	198.82	99.82	87.05	49.23



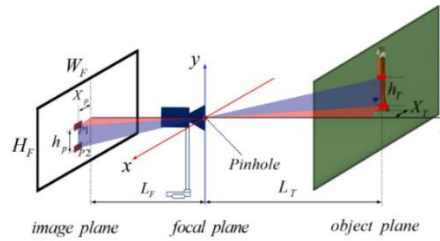
รูปที่ 5.13 Mapping performance results in orchard testing.

ในรูปที่ 5.13 สำหรับกรณีทดสอบสวนยางพาราค่า RMS ถูกคำนวณจากเป้าหมายที่แตกต่างกันสองแบบคือความยาวระหว่างเป้าหมาย 500 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตร โดยผลการทดลองได้ค่า RMS คือ 114.57 มิลลิเมตร และ 99.82 มิลลิเมตร ตามลำดับ เห็นได้ว่าข้อผิดพลาดจากระยะเป้าหมายที่เล็กกว่า คือ 500 มิลลิเมตร ส่งผลให้มีค่าของความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าที่ระยะเป้าหมายที่ 700 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาข้อผิดพลาดสูงสุดทั่วทั้งพื้นที่ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ระยะเป้าหมาย 500 มิลลิเมตร ทำให้เกิดข้อผิดพลาดที่ 258.62 มิลลิเมตร ในขณะที่ระยะเป้าหมาย 700 มิลลิเมตร ได้ข้อผิดพลาดสูงสุด 198.82 มิลลิเมตร ในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมข้อผิดพลาดจะมีความแปรผันน้อยกว่าตลอดทั้งระนาบของกราฟผลการทดสอบ ในขณะที่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมความผันผวนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความผิดพลาดถือว่ายอมรับได้ของข้อผิดพลาดในการนำทางเป็นภาพ 2 มิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถชดเชยความผิดพลาดในอนาคตได้ในขณะที่ยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติในสวนยางพารา

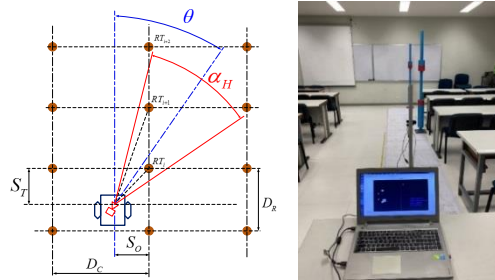
## 5.6 การทดลองหาค่าความไม่แน่นอนของการระบุระยะของพารามิเตอร์ $L_T$ และ $X_T$

### ในห้องปฏิบัติการ

จากพารามิเตอร์  $L_T$  และ  $X_T$  ดังรูปที่ 5.14 ในการทดสอบภายใต้สภาวะแสงที่คงที่ในห้องทดสอบและต้นลำต้นโมเดลที่ความตรง โดยที่พารามิเตอร์ดังกล่าวได้ถูกประมาณมากจากการประมวลผลทางภาพร่วมกับสมการกล้องรูเข็ม (Pinhole model) ซึ่งพารามิเตอร์นี้มีความอ่อนไหวต่อลักษณะพารามิเตอร์ เช่น สภาพแสง ลักษณะพื้นที่เรียบ ความตรงของลำต้นยางพาราโมเดลจำเป็นต้องศึกษาและเข้าในการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าวเพื่อให้สามารถทราบประสิทธิภาพของการประมาณค่าก่อนที่จะนำไปป้อนให้กับสมการทางคณิตศาสตร์ของสวนยางพาราเพื่อหาตัวแปรที่ใช้สำหรับการนำทางคือพารามิเตอร์  $s_o$  และ  $s_r$  ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 Pinhole camera model for target position estimation



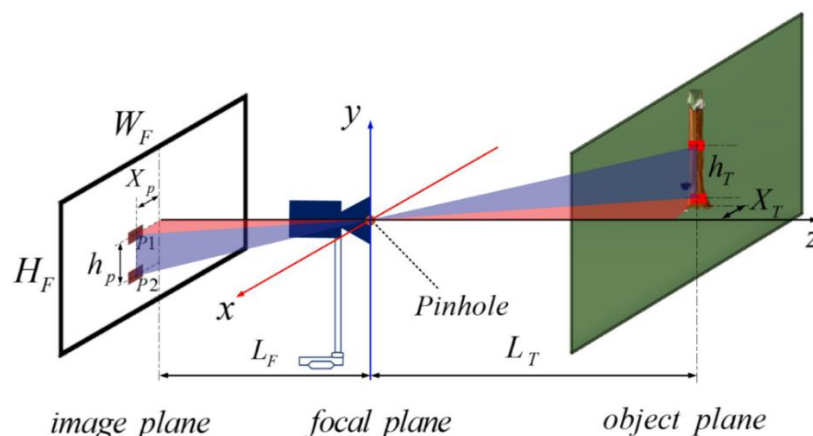
รูปที่ 5.15 Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model.

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองในห้องปฏิบัติการในการประมาณค่า  $L_T$  และ  $X_T$

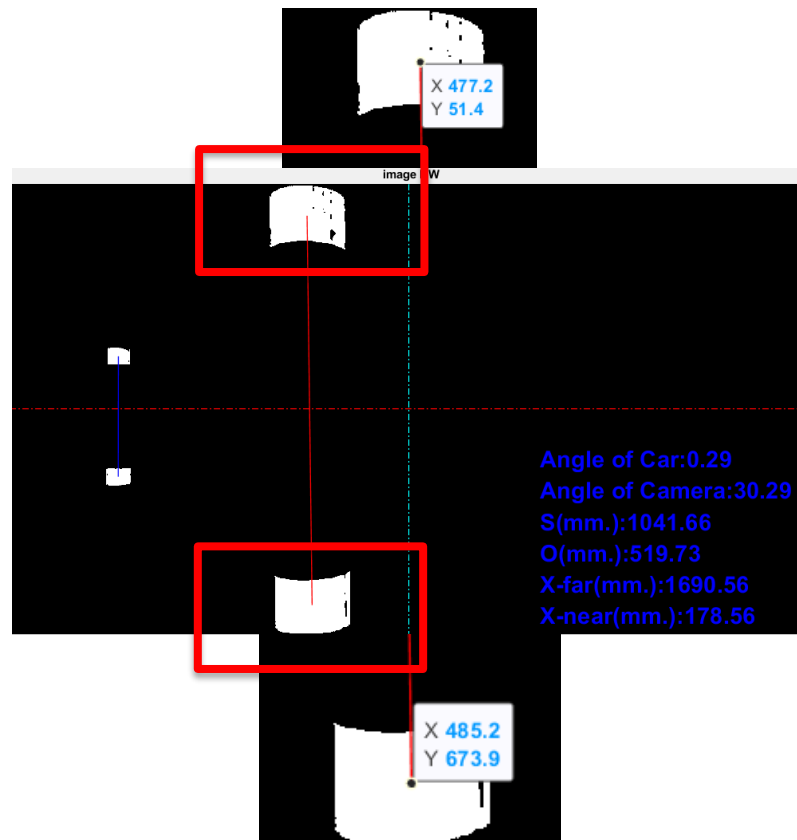
The separate targets is 700 mm., and $S_o$ is 500 mm. (Laboratory testing)	$S_T$ (mm.)	N	Minimum (mm.)	Maximum (mm.)	Mean (mm.)	Standard deviation
$L_T$	1,000	50	1,101.85	1,102.33	1,102.06	0.10
	2,000	50	1,871.31	1,873.24	1,872.24	0.43
	3,000	50	2,799.81	2,807.73	2,803.25	1.99
	4,000	50	3,632.99	3,643.06	3,638.16	2.72
	5,000	50	4,464.51	4,483.21	4,475.04	3.96
	6,000	50	5,360.64	5,398.20	5,379.85	8.29
$X_T$	1,000	50	178.36	178.60	178.51	0.04
	2,000	50	649.48	650.23	649.79	0.17
	3,000	50	1,205.35	1,209.60	1,206.83	0.91
	4,000	50	1,731.93	1,737.11	1,734.40	1.36
	5,000	50	2,239.95	2,249.73	2,245.33	2.09
	6,000	50	2,670.48	2,688.65	2,679.73	4.08

โดยที่พารามิเตอร์  $L_T$  และ  $x_T$  ได้ถูกทดสอบและเก็บค่าการทดลองในห้องปฏิบัติการมีการเก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 50 ค่าที่ถูกดึงจากโปรแกรมประมวลผลด้วยที่ควบคุมปริมาณแสงในห้องทดลองเท่ากับ 360-370 Lux โดยการทดสอบได้เก็บตั้งค่าทดลองไว้จำนวน 6 การทดลอง การทดลองที่ 1 คือกำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $s_T$  เท่ากับ 1,000 มิลลิเมตร และ  $D_r$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร การทดลองที่ 2 คือกำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $s_T$  เท่ากับ 2,000 มิลลิเมตร และ  $D_r$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร การทดลองที่ 3 คือกำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $s_T$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร และ  $D_r$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร การทดลองที่ 4 คือกำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $s_T$  เท่ากับ 4,000 มิลลิเมตร และ  $D_r$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร การทดลองที่ 5 คือกำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $s_T$  เท่ากับ 5,000 มิลลิเมตร และ  $D_r$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร และการทดลองที่ 6 คือกำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $s_T$  เท่ากับ 6,000 มิลลิเมตร และ  $D_r$  เท่ากับ 3,000 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมสภาวะต่างๆเพื่อที่จะสามารถศึกษาพารามิเตอร์ดังกล่าวได้โดยมีผลดังตารางที่ 5.7 โดยผลการทดลองดังตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อที่ระยะเมื่อกล้องเคลื่อนที่ไกลจากเป้าหมายจะส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด 8.29 ซึ่งเป็นเนื่องจากจากเมื่อกล้องอยู่ไกลเป้าหมายจะทำให้ระยะ  $h_T$  ที่ปรากฏบนเฟรมภาพสั้นลงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของความยาวที่มีหน่วยเป็นพิเซลเล็กน้อยส่งผลให้การประมาณค่า  $L_T$  และ  $x_T$  มีการเปลี่ยนแปลงที่มากอย่างไรก็ตามจะสังเกตว่าเมื่อกล้องเข้าใกล้ที่ระยะ 1,000 มิลลิเมตร นั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่า 0.1 และ 0.04 ตามลำดับ

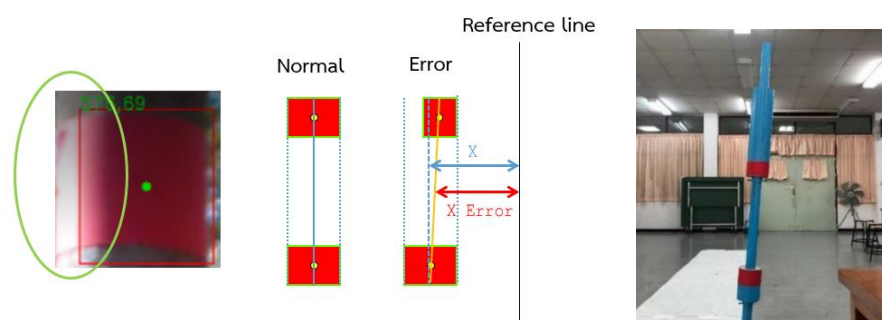
### 5.7 การเอียงของลำต้นเป้าหมายส่งผลต่อผิดพลาดส่งผลต่อพารามิเตอร์ $x_T$



รูปที่ 5.16 Pinhole camera model for target position estimation



รูปที่ 5.17 ภาพขาวดำ(binary image frame) ของการทดลองที่  $S_O$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $S_T$  เท่ากับ 1,000 มิลลิเมตร และ  $\theta$  เท่ากับ 30 องศา



รูปที่ 5.18 ลักษณะการประมวลผลผิดพลาดจากสภาพแสงและการเอียงของลำต้นยางพารา

จากตัวอย่างการทดลองดังรูปที่ 5.17 เมื่อกล้องเคลื่อนที่เข้าหาลำต้นยางพาราจำลองที่ระยะ 1,000 มิลลิเมตร โดยการทดลองดังกล่าวบ่งชี้เพื่อที่จะทดลองโดยในทางปฏิบัติต้นยางพาราไม่สามารถเจริญเติบโตตรงในแนวตั้งและการประมวลผลภาพที่ผิดพลาดดังรูปที่ 5.18 ได้โดยปัญหา

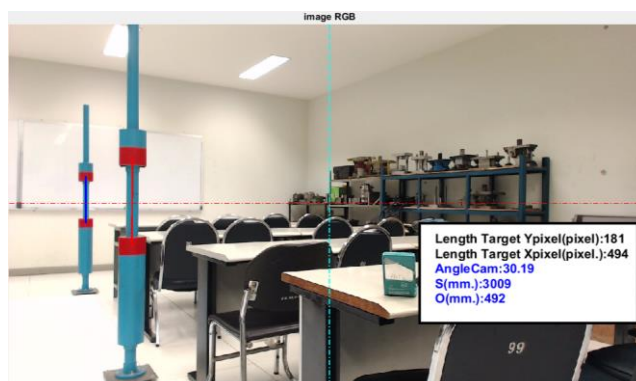
ดังกล่าวจำเป็นต้องทราบถึงข้อจำกัดดังกล่าวจากรูปที่ 5.16 คือ Pinhole camera model โดยที่พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการนำทางของระบบอัตโนมัติคือ  $X_T$  ซึ่งจะถูกละเปลี่ยนเป็นพารามิเตอร์สำหรับการนำทาง  $S_o$  และ  $S_T$  โดยการแปลงจากสมการทางคณิตศาสตร์ของสวอนยางพาราที่พัฒนาขึ้นโดยที่พารามิเตอร์  $X_T$  ถูกประมาณมาจากการประมวลผลทางภาพแล้วหลังจากนั้นนำตำแหน่งจุดศูนย์กลางในทิศทางแกน  $X$  บนเฟรมภาพของเป้าสีแดงบนล่างทั้งสองที่ทำการแปลงเป็นภาพขาดดำดังรูปที่ 5.17 มาทำการหาค่าเฉลี่ยแล้วหลังจากนั้นใช้สมการรูเข็ม (Pinhole camera model) ซึ่งถ้ากรณีที่ลำต้นยางพารามีการเอียงจะส่งผลให้การประมาณค่าผิดพลาดโดยการทดลองเพื่อประเมินตั้งค่าเมื่อการประมาณ  $X_p$  ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวได้จากการประมวลผลภาพการทดลองที่  $S_o$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร,  $S_T$  เท่ากับ 1,000 มิลลิเมตร และ  $\theta$  เท่ากับ 30 องศา ซึ่งเป็นเป้าหมายที่ใกล้กล้องมากที่สุดสำหรับการทำภารกิจต่างๆรอบลำต้นยางพาราจำเป็นอย่างมากที่จะต้องตรวจสอบความผิดพลาดแสดงดังตารางที่ 5.8 โดยการอธิบายความสัมพันธ์ของความผิดพลาดเมื่อ  $X_p$  โดยที่ได้ทดลองจากค่าการประมาณของตัวอย่างการทดลองโดยการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยได้เปลี่ยนให้ค่า  $X_p$  มีความผิดพลาดเริ่มที่ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยกำหนดให้ค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นทีละ 5 เปอร์เซ็นต์จนกำหนดสูงสุดที่ 50 เปอร์เซ็นต์การทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์  $X_p$  เพิ่มขึ้นทีละ 5 เปอร์เซ็นต์จะส่งผลให้พารามิเตอร์  $X_T$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณขึ้นบนระยะจริงบนพื้นมีค่าผิดพลาด 8 มิลลิเมตร ดังตาราง

**ตารางที่ 5.8** แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดเมื่อมีการประมาณค่า  $X_p$  จากการประมวลผลภาพผิดพลาดส่งผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมาณจากสมการรูเข็ม  $X_T$

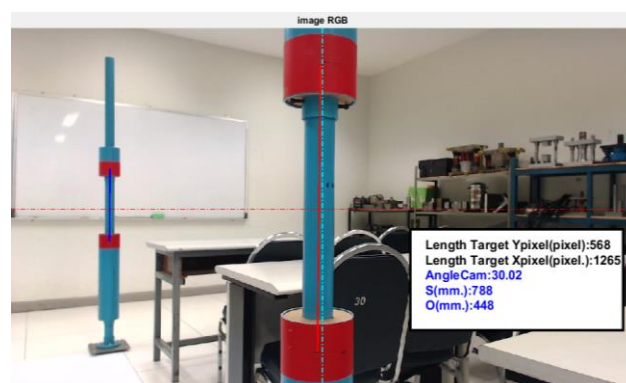
Error(%)	$X_p$ error(pixel)	$X_T$ (mm.)	error of $X_T$ (mm.)
50	79.40	84.40	8
45	87.34	92.84	
40	95.28	101.27	8
35	103.22	109.71	
30	111.16	118.15	8
25	119.10	126.59	
20	127.04	135.03	8
15	134.98	143.47	
10	142.92	151.91	8
5	150.86	160.35	

## 5.8 ความสัมพันธ์ของการตั้งค่าการเอียงของมุมกล้อง $\theta$ ที่ติดตั้งที่ผิดพลาดส่งผลต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง $S_O$ และ $S_T$

จากการออกแบบการติดตั้งกล้องบนระบบอัตโนมัติจำเป็นที่จะต้องเอียงมุมกล้องเข้าหาแนวแถว 30 องศา เพื่อให้สามารถมองเห็นลำต้นยางพาราได้อย่างเหมาะสมคือลำต้นยางพาราต้นที่สองที่อยู่ใกล้สุดบนเฟรมภาพดังรูปที่ 5.19 นั้นจะอยู่ขอบซ้ายสุดของภาพและเมื่อกล้องมีเคลื่อนที่ตามแนวแถวต้นยางพาราเข้าไปใกล้บริเวณต้นยางพาราที่ใกล้กล้องที่สุดโดยการออกแบบการหยุดของระบบอัตโนมัติในการทำภารกิจเช่น กรีดน้ำยางพารา การใส่ปุ๋ย หรือ การซ่อมบำรุงบริเวณรอบต้นยางพารานั้นออกแบบให้อยู่รอบๆบริเวณลำต้นในรัศมี 1 เมตร โดยเมื่อกล้องเคลื่อนที่เข้าไปใกล้จะมีการหยุดโดยที่ลำต้นยางพาราที่ปรากฏบนเฟรมภาพนั้นจะเคลื่อนที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของภาพดังรูปที่ 5.20 ซึ่งการบอกค่าการเอียงของมุมกล้องนั้นถูกประมวลผลมาจากกระบวนการประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นโดยการออกแบบในห้องทดลองจะวางลำต้นยางพาราที่ระยะห่างเท่าๆกันคือ 3 เมตรและวางในแนวตั้งเสมอ ควบคุมสภาวะแสงคงที่



รูปที่ 5.19 เฟรมภาพเมื่อต้นยางพาราอยู่ใกล้สุดของกล้อง



รูปที่ 5.20 เฟรมภาพเมื่อต้นยางพาราอยู่ใกล้สุดของกล้อง

โดยที่การประมวลผลต้องใช้ลำดับขงพาราจำนวนสองต้นเพื่อมาคำนวณว่ากล้องดังกล่าวทำมุมกับแนวแกนโดยในทางการทดลองเมื่อมุมกล้องผิดพลาดจำนวน 1 องศาโดยที่มุมของกล้องจะถูกประมวลผลจากระบบการประมวลผลทางภาพเมื่อระบบมีความละเอียดของการระบุมุมดังกล่าวมีความละเอียดน้อยกว่า 1 องศาทำให้เกิดความผิดพลาด ส่งผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง  $S_o$  และ  $S_T$  ดังตารางที่ 5.9

**ตารางที่ 5.9** แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  เทียบกับพารามิเตอร์นำทางพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง  $S_o$  และ  $S_T$

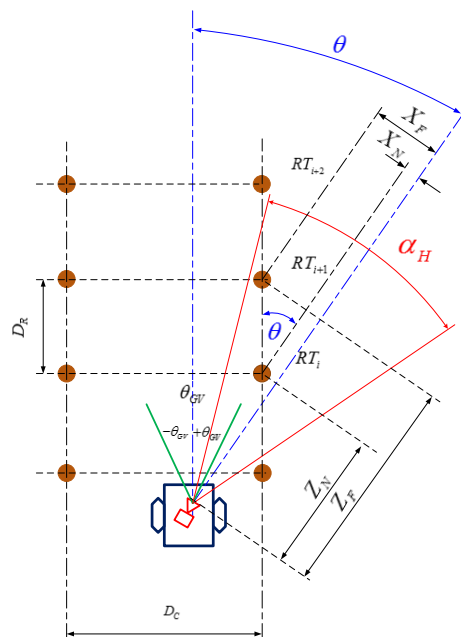
	Zeta step size	$S_o$	$S_T$	zeta step size	$S_o$	$S_T$
	29.0	464	1,963	30.1	504	1,953
	29.1	468	1,962	30.2	508	1,952
	29.2	472	1,961	30.3	512	1,951
	29.3	472	1,960	30.4	512	1,951
	29.4	481	1,959	30.5	516	1,950
	29.5	485	1,958	30.6	520	1,949
	29.6	485	1,958	30.7	523	1,948
	29.7	489	1,957	30.8	527	1,947
	29.8	493	1,956	30.9	531	1,946
	29.9	497	1,955	31.0	534	1,945
N	10	10	10	10	10	10
AVG(mm.)		480.60	1,958.90		518.70	1,949.20
S.D.		11.13	2.60		10.01	2.66
Maximum error of 1 degree (mm.)		33	8		30	8

จากการทดลองดังกล่าวเมื่อระบบมีความผิดพลาดของมุม  $\theta$  ปริมาณ 1 องศา โดยได้ทดลองปรับเปลี่ยนความละเอียดของมุมที่ได้จากการประมาณโดยกระบวนการประมวลผลทางภาพเปลี่ยนแปลงครั้งละ 0.1 องศาผลการทดลองเมื่อมีการทดสอบ เมื่อมุม  $\theta$  มีการเปลี่ยนแปลง จาก 29.0-29.9 องศา ผลค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์  $S_o$  และ  $S_T$  เท่ากับ 480.60 มิลลิเมตร และ 1958.90

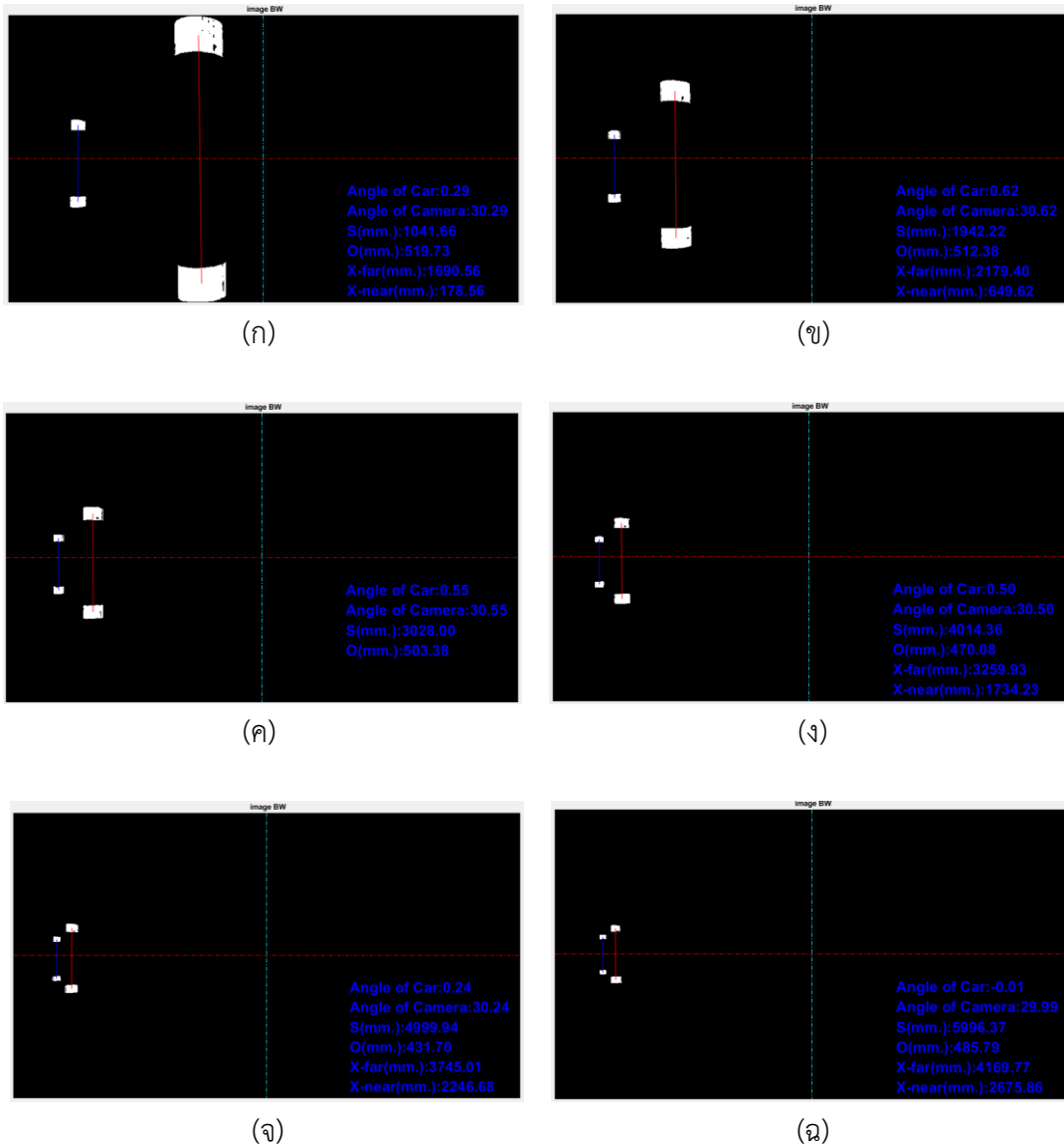
มิลลิเมตร ตามลำดับ และมุม  $\theta$  มีการเปลี่ยนแปลง จาก 30.1-31.0 องศา ผลค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์  $S_o$  และ  $S_T$  เท่ากับ 518.70 มิลลิเมตร และ 1,949.20 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเมื่อมุม  $\theta$  มีการเปลี่ยนแปลง 1 องศา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์  $S_o$  และ  $S_T$  สูงสุด 33 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ

### 5.9 ความสัมพันธ์ของระยะการปลูกตามแนวแถว ( $D_R$ ) และพารามิเตอร์ระบุงศาของรถ ( $\theta$ )

สำหรับการทดลองดังกล่าวเพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของการระบุงมุมเมื่อเทียบกับแนวแถวซึ่งการประมาณมุมที่กระทำกับแนวแถวดังกล่าวแทนการหมุนของตัวระบบอัตโนมัติโดยการประมาณมุม  $\theta$  ดังกล่าวจะถูกประมวลผล ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของระบบอัตโนมัติจะเคลื่อนที่ตามแนวแถวให้ตรงแต่ในทางการทดลองดังกล่าวเพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของค่าความผิดพลาดของการประมาณมุมของระบบอัตโนมัติเทียบกับแนวแถวเมื่อระยะการปลูก  $D_R$  ไม่เท่ากันในแปลงปลูกจริงโดยที่การปลูกตามแนวแถวที่ไม่เท่ากันจะส่งผลต่อการประมาณระยะ  $X_F$  และ  $X_N$  ดังรูปที่ 5.21 ผิดพลาดเนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวได้ถูกประมวลผลจากภาพซึ่งภาพนั้นก็จะถูกเก็บจากการถ่ายภาพต้นยางพาราด้านบน เพื่อนำพารามิเตอร์มาคำนวณหามุม  $\theta$  ที่กระทำกับแนวแถวโดยใช้ระยะของพารามิเตอร์  $X_F$  และ  $X_N$  จากการประมวลผลทางภาพร่วมกันทฤษฎีกล้องรูเข็มซึ่งการประเมินดังกล่าวได้ทำการประมาณความผิดพลาดเปรียบเทียบระยะที่กล้องอยู่ไกลเป้าหมายมากที่สุดเท่ากับ 6,000 มิลลิเมตร และกล้องอยู่ใกล้เป้าหมายมากที่สุดเท่ากับ 1,000 มิลลิเมตร ซึ่งการเปรียบเทียบได้ทดลองความผิดพลาดผลต่างของพารามิเตอร์  $X_F$  และ  $X_N$  ดังตารางที่ 5.10 โดยกำหนดให้มีค่าความผิดพลาดระหว่าง 5-50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.21 Horizontal vision mapping object plane of the orchard for orientation



รูปที่ 5.22 (ก) ภาพการทดลอง  $s_o$  เท่ากับ 500 mm. และ  $s_T$  เท่ากับ 1,000 mm. (ข) ภาพการทดลอง  $s_o$  เท่ากับ 500 mm. และ  $s_T$  เท่ากับ 2,000 mm. (ค) ภาพการทดลอง  $s_o$  เท่ากับ 500 mm. และ  $s_T$  เท่ากับ 3,000 mm. (ง) ภาพการทดลอง  $s_o$  เท่ากับ 500 mm. และ  $s_T$  เท่ากับ 4,000 mm. (จ) ภาพการทดลอง  $s_o$  เท่ากับ 500 mm. และ  $s_T$  เท่ากับ 5,000 mm. (ฉ) ภาพการทดลอง  $s_o$  เท่ากับ 500 mm. และ  $s_T$  เท่ากับ 6,000 mm.

ตารางที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  เทียบกับพารามิเตอร์นำทางพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณจากการประมวลผลทางภาพร่วมกันทฤษฎีกล้องรูเข็ม  $X_F$  และ  $X_N$

The separate targets is 700 mm., and $S_O$ is 500 mm. (Laboratory testing)	$S_T$ (mm.)	N	Minimum (mm.)	Maximum (mm.)	Mean (mm.)	Standard deviation
$X_N$	1,000	11	178.56	267.84	223.20	29.61
	2,000	11	649.62	974.43	812.03	107.73
	3,000	11	1,085.32	1,627.98	1,356.65	179.98
	4,000	11	1,734.23	2,601.35	2,167.79	287.59
	5,000	11	2,246.68	3,370.02	2,808.35	372.57
	6,000	11	2,675.86	4,013.79	3,344.83	443.74
$X_F$	1,000	11	1,690.56	2,535.84	2,113.20	280.35
	2,000	11	2,179.40	3,269.10	2,724.25	361.41
	3,000	11	2,565.61	3,848.42	3,207.01	425.46
	4,000	11	3,247.83	4,871.75	4,059.79	538.59
	5,000	11	3,745.01	5,617.52	4,681.26	621.04
	6,000	11	4,169.77	6,254.66	5,212.21	691.48
$\theta$	1,000	11	30.27	49.11	39.30	6.23
	2,000	11	30.00	49.90	39.81	6.46
	3,000	11	29.57	47.74	38.31	6.01
	4,000	11	30.30	49.18	39.35	6.24
	5,000	11	29.96	48.52	38.87	6.13
	6,000	11	29.87	48.33	38.73	6.10

จากผลการทดสอบแสดงดังตาราง 5.10 ความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  เทียบกับพารามิเตอร์นำทางพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณจากการประมวลผลทางภาพร่วมกันทฤษฎีกล้องรูเข็ม  $X_F$  และ  $X_N$  โดยเมื่อพารามิเตอร์ดังกล่าวผิดพลาดในช่วง 5-50 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้ การประมาณผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์  $X_F$  และ  $X_N$  ทุก 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้การประมาณมุมผิดพลาดไม่เกิน 3 องศา ซึ่งการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าการกระจายอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นค่าความผิดพลาดของการประมาณมุม  $\theta$  มีคงที่โดยการทดสอบดังกล่าวเพื่อให้ทราบเมื่อการปลูกต้นยางพาราไม่เท่ากันตามแนวแถวจะส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดของการประมาณ  $X_F$  และ  $X_N$  ดังกล่าว และส่งผลให้การประมาณทิศทางของระบบอัตโนมัติผิดพลาดด้วย

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์บทนี้กล่าวถึง ข้อเสนอสรุปจากผลการทดลองของการพัฒนาต้นแบบวิธีการนำร่องในสวนยางพาราด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพพร้อมกับการติดตั้งเป้าถาวรบนลำต้นไม้ประโยชน์ที่ได้รับในการนำไปใช้ รวมถึงการเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีต่างๆ ที่นำมาใช้สำหรับการนำทางสำหรับการทำการเกษตรรูปแบบสวน รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาต่อยอดในอนาคต

#### 6.1 เปรียบเทียบลักษณะการนำทางและเทคโนโลยีทางได้การนำทางของระบบอัตโนมัติ

มีงานวิจัยหลายเรื่องที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีเพื่อค้นหาวัตถุในสภาพแวดล้อมของสวน ในแต่ละรูปแบบมีความเฉพาะทางด้านภูมิศาสตร์ มีการใช้เทคโนโลยีต่างๆ เช่น เครื่องสแกนเลเซอร์ เช่น เซอร์ LiDAR, GPS, การประมวลผลภาพ และปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยวิธีที่แม่นยำที่สุดคือการใช้ระบบเทคโนโลยี เซอร์ เซอร์ แต่ระบบดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบที่ค่อนข้างสูง จากข้อมูลในการสืบค้นในส่วนของตัวแทนจำหน่ายประมาณ 90–13,000 USD ราคาเหล่านี้อ้างอิงโดยแบรนด์ SICK's Sensor Solutions ซึ่งเป็นผู้นำด้านเซ็นเซอร์อัจฉริยะและโซลูชันแอปพลิเคชันต่างๆ และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ราคาขึ้นอยู่กับแม่นยำหรือความผิดพลาดของระบบ ความสามารถของระบบในการค้นหาวัตถุ และความสามารถทางเทคนิคอื่นๆที่จำเป็นสำหรับระบบนำทาง เมื่อนำมาใช้กับยานพาหนะเพื่อการเกษตรแบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ จึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายสูงสำหรับการออกแบบและพัฒนาระบบอัตโนมัติ ในส่วนของเทคโนโลยีการประมวลผลภาพที่มีต้นทุนในการออกแบบและพัฒนาระบบที่ถูกกว่านั้นมีการนำไปใช้กับโซลูชันทางวิศวกรรมที่หลากหลาย ถึงแม้ระบบประมวลผลภาพมีความแม่นยำน้อยกว่าเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการประมวลผลภาพก็มีข้อเสียอีกประการหนึ่ง เมื่อเจอสภาพแสงที่ไม่คงที่ส่งผลโดยตรงต่อการประมวลผลทางภาพการศึกษาก่อนหน้านี้เปรียบเทียบผลดังนี้

1. เปรียบเทียบงานวิจัยที่เหมือนกันคือการพัฒนาของระบบอัตโนมัติในสวนยางพาราของ Chunlong Zhang ที่ College of Engineering China Agricultural University ซึ่งการพัฒนาของระบบดังกล่าวใช้ 2D LiDAR and a Gyroscope ในการระบุตำแหน่งของยานพาหนะเทียบกับแนวแถวของต้นยางพารา งานวิจัยของ Jinlin Xue ที่ College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, China ได้นำเสนอค่าความผิดพลาดต่ำสุดคือ Maximum error 29 cm., Average error 2.25 cm. RMS error 10.31 cm. และ Standard deviation 10.07 cm.

2. เปรียบเทียบงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันงานวิจัยของ Jinlin Xue ที่ College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, China คือมีการเคลื่อนที่ตามแนวแถวซึ่งใช้กล้องเพียงตัวเดียว ได้นำเสนอการออกแบบระบบอัตโนมัติที่ใช้ในร่องสวนข้าวโพดซึ่งระบบดังกล่าวต้องการควบคุมให้ระบบอัตโนมัติ อยู่กึ่งกลางของร่องสวนข้าวโพดซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอค่าความผิดพลาดต่ำสุดคือ Maximum error 13.9 mm., Average error 3.5 mm., RMS error 31.2 mm. และ Standard deviation 7.5 mm.

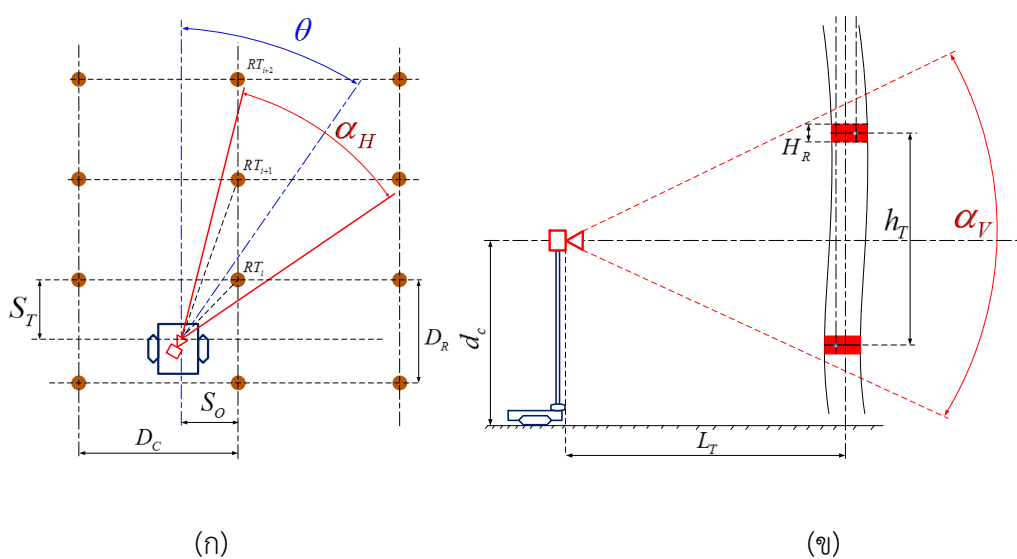
3. การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวมีในห้องปฏิบัติการค่าความผิดพลาดต่ำสุดคือ Maximum error 100.26 mm., Average error 38.34 mm., RMS error 43.06 mm. และ Standard

deviation 19.75 mm. ส่วนยางพาราจริงค่าความผิดพลาดต่ำสุดคือ Maximum error 258.62 mm., Average error 103.52 mm., RMS error 114.57 mm. และ Standard deviation 49.48 mm.

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เทคโนโลยี AI ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาวัตถุในภาพ มีข้อดีหลายประการ รวมถึงการจัดข้อกำหนดสำหรับขั้นตอนการประมวลผล อย่างไรก็ตามข้อเสียคือต้องใช้รูปภาพจำนวนมากเพื่อฝึกโมเดลให้ทำงานในสภาพแวดล้อมที่กำหนดอย่างเหมาะสมโดยการใช้ปัญญาประดิษฐ์ยังมีข้อจำกัดหลายอย่างเมื่อนำมาใช้กับสภาพสวนที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา เช่นทางด้านลักษณะของต้นหญ้าหรือลักษณะของพื้นดินที่ไปไม่มีการหล่นร่วงในลักษณะสวนรวมถึงลักษณะของต้นยางพาราที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลด้วย

งานวิจัยนี้มีความแปลกใหม่การใช้การประมวลผลทางภาพโดยการติดตั้งเป้าถาวรบนต้นยางพาราเพื่อค้นหาลำต้นของต้นไม้เพื่อไม่ต้องการใช้เซ็นเซอร์ช่วยสำหรับค้นหาลำต้นไม้ในแนวแถวใดๆ ซึ่งงานวิจัยก่อนหน้านี้จะมีการใช้เซ็นเซอร์เช่น LiDAR หรือ Laser scanner เพื่อค้นหาลำต้นของต้นไม้และไม่มีการทำภารกิจหรือหยุดระหว่างการเคลื่อนที่ตามแนวแถว และผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีค่าความผิดพลาดของระบบต้นแบบวิธีการนำร่องในสวนยางพาราด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับการติดตั้งเป้าถาวรบนลำต้นไม้มีค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบดังกล่าวมีผลของค่าความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกันกับการใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ งานวิจัยที่พัฒนาขึ้นมีข้อดีคือค่าใช้จ่ายสำหรับระบบอัตโนมัติในสวนมีราคาถูก และใช้ฮาร์ดแวร์ในการประมวลผลขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ ถึงแม้ค่าความผิดพลาดจะมากกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์แต่การเคลื่อนที่ในแนวแถวของสวนระบบอัตโนมัติจะใช้ความเร็วที่ต่ำ ข้อเสียคือระบบที่พัฒนาขึ้นมีความอ่อนไหวกับสภาพแสง ซึ่งสภาพแสงในสวนยางพาราในแต่ละจุดมีปริมาณแสงที่ไม่เท่ากันแต่ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้งานระบบประมวลผลทางภาพที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการนำร่องของระบบอัตโนมัติได้

## 6.2 อภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 6.1 (ก) Horizontal vision mapping (ข) Vertical vision mapping



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างพื้นที่ทดลองจริงในสวนยางพารา

วิธีการทำแผนที่สวนยางพาราจากงานวิจัยนี้ได้ประมาณตำแหน่งของกล้อง โดยสัมพันธ์กับระยะทางเป้าหมาย ( $s_p$ ) ตามแนวต้นไม้ และระยะออฟเซต ( $s_o$ ) ถึงแนวต้นไม้ แสดงดังรูปที่ 6.1 ระยะทางที่ตรวจวัดได้ทั้งสองพารามิเตอร์นี้สามารถใช้เพื่อนำทางในสวนยางพาราด้วยระบบอัตโนมัติบนพื้นที่เพาะปลูกจริงได้แสดงดังรูปที่ 6.2 ข้อผิดพลาดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ เกิดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ภูมิประเทศที่ราบเรียบบนพื้นดินในสวนยางพารา ตำแหน่งเป้าหมายหรือระยะในการปลูกไม่สม่ำเสมอ แสงสว่างไม่คงที่ตลอดพื้นที่การทดสอบและข้อผิดพลาดจากพารามิเตอร์ที่แปลงมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งเรขาคณิตในสวนยางพารา แต่การนำรูปแบบการทำแผนที่เพื่อใช้ในการนำทางของยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติในสวนยางพารายังคงเป็นไปได้จากการทดลอง

1. การทดลองกับสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมในห้องทดลอง ความยาวระหว่างเป้าหมายทั้งสองที่ 500 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตร วัดความแตกต่าง RMS จาก 43.06 มิลลิเมตร และ 32.42 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบเป้าหมายทั้งสองที่มีความยาวต่างกัน ผลการทดลองมีความแตกต่างอยู่ที่ 1.33 เท่า ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด ในขณะที่ความยาวของเป้าหมายทั้งสองมีข้อผิดพลาดสูงสุดที่ 100.26 มิลลิเมตร และ 55.55 มิลลิเมตร ตามลำดับการทดลอง กับสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมในสวนยางพารา ความยาวระหว่างเป้าหมายทั้งสองที่ 500 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตร วัดความแตกต่าง RMS จาก 114.57 มิลลิเมตร และ 99.82 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบเป้าหมายทั้งสองที่มีความยาวต่างกัน ผลการทดลองมีความแตกต่างอยู่ที่ 1.15 เท่า ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด ในขณะที่ความยาวของเป้าหมายทั้งสองมีข้อผิดพลาดสูงสุดที่ 258.62 มิลลิเมตร และ 198.82 มิลลิเมตร ตามลำดับการทดลองจะเห็นได้ว่าความแตกต่างทั้งสองการทดลองมีค่า RMS ใกล้เคียงกัน แต่ค่าความผิดพลาดในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ควบคุมจะมีความผิดพลาดมากกว่าอยู่ที่ 6 เท่า

2. ผลการทดลองระบบโดยใช้เป้าหมายสองลำดับสำหรับการประมาณมุมของกล้องเทียบกับแนวของต้นยางพาราที่ปลูก โดยใช้การประมวลผลทางภาพสามารถประมาณมุมของกล้องมีค่าเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 6.92 % เมื่อเทียบกับเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 2.77 องศา และความผิดพลาดน้อยที่สุด 0.04 องศา

3. การทดลองหาค่าความไม่แน่นอนของการระบุระยะของพารามิเตอร์  $L_T$  และ  $x_T$  ในห้องปฏิบัติการ โดยที่พารามิเตอร์  $L_T$  และ  $x_T$  ได้ถูกทดสอบและเก็บค่าการทดลองในห้องปฏิบัติการมีการเก็บข้อมูลซ้ำจำนวน 50 ค่าที่ถูกดึงจากโปรแกรมประมวลดังกล่าว โดยที่ควบคุมปริมาณแสงในห้องทดลองเท่ากับ 360-370 Lux กำหนดระยะพารามิเตอร์  $s_0$  เท่ากับ 500 มิลลิเมตร และ  $s_T$  ตั้งแต่ 1,000 มิลลิเมตร ถึง 6,000 มิลลิเมตร เมื่อกำลังมีการเคลื่อนที่ไกลสุดส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อกำลังอยู่ไกลเป้าหมายส่งผลให้ขนาดความยาวของเป้าที่ประมาณจากการประมวลผลทางภาพบนเฟรมภาพนั้นสั้นลง และส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของความยาวพิกเซลเพียงเล็กน้อยทำให้พารามิเตอร์  $L_T$  และ  $x_T$  มีการเปลี่ยนแปลงตามแต่การทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของพารามิเตอร์  $L_T$  เท่ากับ 8.29 มิลลิเมตร และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของพารามิเตอร์  $x_T$  เท่ากับ 4.08 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นไปได้สำหรับการนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำร่องในสวนยางพารา  $s_0$  และ  $s_T$  ได้

4. การเอียงของลำต้นเป้าหมายส่งผลต่อผิดพลาดส่งผลต่อพารามิเตอร์  $x_T$  โดยที่พารามิเตอร์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากใช้การประมวลผลทางภาพร่วมกับทฤษฎีกล้องรูเข็มในการประมาณค่าดังกล่าว โดยกำหนดให้ตั้งค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นทีละ 5 เปอร์เซ็นต์ กำหนดสูงสุดที่ 50 เปอร์เซ็นต์ การทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์  $x_p$  เพิ่มขึ้นทีละ 5 เปอร์เซ็นต์จะส่งผลให้พารามิเตอร์  $x_T$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณขึ้นบนระยะจริงบนพื้นมีค่าผิดพลาด 8 มิลลิเมตร ซึ่งพารามิเตอร์  $x_p$  ดังกล่าวได้ถูกประมาณมาจากการประมวลผลภาพ โดยใช้ตำแหน่งของเป้าสีแดงบนเฟรมภาพซึ่งเป็นการทดสอบเมื่อลำต้นยางพาราไม่สามารถควบคุมให้ตรงได้ พารามิเตอร์  $x_p$  ใช้การเฉลี่ยของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเป้าบนล่างตามแนวคอลัมน์บนเฟรมภาพ ความผิดพลาดเพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดของค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์  $x_T$  นำไปใช้ในการคำนวณของสมการทางคณิตศาสตร์ของสวน และประมาณค่า  $s_0$  และ  $s_T$  ที่ใช้สำหรับนำร่องของระบบอัตโนมัติ

5. ความสัมพันธ์ของการตั้งค่าการเอียงของมุมกล้อง  $\theta$  ที่ติดตั้งผิดพลาดส่งผลต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำทาง  $s_0$  และ  $s_T$  จากการทดลองดังกล่าวเมื่อระบบมีความผิดพลาดของ มุม  $\theta$  ปริมาณ 1 องศา โดยได้ทดลองปรับเปลี่ยนความละเอียดของมุมที่ได้จากการประมาณโดยกระบวนการประมวลผลทางภาพให้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 องศา ผลการทดลองเมื่อมีการทดสอบโดยมุม  $\theta$  เปลี่ยนแปลง 1 องศา ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์  $s_0$  และ  $s_T$  สูงสุด 33 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับเนื่องจากมุม  $\theta$  ดังกล่าวต้องมีการตั้งค่าให้กล้องเอียงทำมุมกับแนวแถวโดยหันมุมกล้องเข้าหาต้นยางพารา มุมกล้องดังกล่าวจะต้องทำการตั้งค่าเริ่มต้นให้ถูกต้องเท่ากับ 30 องศา การทดลองความสัมพันธ์ดังกล่าวเพื่อให้ทราบถึงกรณีมุมกล้องมีความผิดพลาดแล้วส่งผลต่อพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการนำร่อง  $s_0$  และ  $s_T$

6. ความสัมพันธ์การของระยะการปลูกตามแนวแถว ( $D_R$ ) และพารามิเตอร์ระบุงศาของรถ ( $\theta$ ) เมื่อระยะการปลูก  $D_R$  ไม่เท่ากันในแปลงปลูกจริง โดยที่การปลูกตามแนวแถวที่ไม่เท่ากันจะส่งผลต่อการประมาณระยะ  $X_F$  และ  $x_N$  ความสัมพันธ์ของความผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  เทียบกับพารามิเตอร์นำทางพารามิเตอร์ที่ถูกประมาณจากการประมวลผลทางภาพ ร่วมกับทฤษฎีกล้องรูเข็ม  $X_F$  และ  $x_N$  เมื่อพารามิเตอร์ดังกล่าวผิดพลาดในช่วง 5-50 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้ การประมาณผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  เมื่อมีความผิดพลาดของพารามิเตอร์  $X_F$  และ  $x_N$  ทุก 5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้การประมาณค่ามุมผิดพลาดไม่เกิน 3 องศา ในการปลูกต้นยางพาราตามแนวแถวซึ่งไม่สามารถปลูกได้ระยะที่กำหนดเท่ากันทุกต้น การหาความสัมพันธ์ดังกล่าวเพื่อให้สามารถบอกข้อผิดพลาดการเก็บข้อมูลของระยะปลูกจากสวนยางพาราจริง

เกษตรกรปลูกระยะห่างของต้นยางพาราอยู่ไม่เกิน 200 มิลลิเมตร เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของการปลูกที่ผิดพลาดอยู่ที่ 6.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อนำเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระยะปลูก เทียบกับเปอร์เซ็นต์ของการผิดพลาดของพารามิเตอร์  $X_F$  และ  $X_N$  นั้นทำให้การประมาณผิดพลาดของการระบุมุม  $\theta$  อยู่ไม่เกิน 3 องศา ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่งานวิจัยนี้เมื่อนำระบบดังกล่าวนำไปใช้งานจริงในสวนยางพารา

### 6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพื่อและสิ่งที่ต้องพัฒนาในอนาคต

การศึกษาในอนาคตสามารถออกแบบยานยนต์อัตโนมัติโดยใช้ระบบนำทางที่สามารถเคลื่อนที่ในทางลาดชัน หรือพื้นที่ขรุขระ เพื่อศึกษาผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ต่อความแม่นยำของตำแหน่งแบบเรียลไทม์ ระบบนำทางจำเป็นต้องชดเชยความไม่แน่นอนของข้อผิดพลาดของภูมิประเทศรูปแบบสวนยางพารา อัลกอริธึมสวนต้นยางพาราได้รับการพิสูจน์จากงานวิจัยแล้วสามารถนำไปใช้กับสภาพแวดล้อมของสวนยางพาราจริงได้ถึงแม้ข้อผิดพลาดจะมาก แต่ยังถือว่าสามารถนำทางได้ในความเร็วที่ต่ำของยานพาหนะอัตโนมัติ และงานวิจัยในอนาคตต้องมีการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวที่มีต้นทุนต่ำ เพื่อการพัฒนาระบบดังกล่าวให้มีต้นทุนต่ำและเกษตรกรสามารถซื้อได้ในราคาถูก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rubber Authority of Thailand, **Rubber Research Institution of Thailand**, *Thai rubber statistics*, from <http://www.rubber.co.th>, accessed October 8, 2021.
- [2] **การยางแห่งประเทศไทย**, from <https://elearning.raot.co.th/>, accessed June 16, 2022.
- [3] C. Musikavong and S.H. Gheewala, **Ecological footprint assessment towards eco-efficient oil palm and rubber plantations in Thailand**, *Journal of Cleaner Production*, Songkhla, Thailand, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, vol. 140, part 2, pp.581-589, 2017.
- [4] G. Bayar, M. Bergerman, A. B. Koku and E. I. Konukseven, **Localization and control of an autonomous orchard vehicle**, *Computers and Electronics in Agriculture*, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Dumlupinar Bulvari, Cankaya, Turkey, vol.115, pp.118-128, 2015.
- [5] Lav R. Khot, L. Tang, S. Blackmore and M. Nørremark, **Navigational Context Recognition for an Autonomous Robot in a Simulated Tree Plantation**, *Bioresource and Agricultural Engineering*, Iowa State University, USA., vol. 49, no.5, pp.1579-1588, 2006.
- [6] R.Keicher and H. Seufert, **Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe**, *Computers and Electronics in Agriculture*, Department of Agricultural Engineering, Justus Liebig University Giessen, Germany, vol.25, issue 1-2, pp.169-194, 2000.
- [7] O.C. Barawid Jr., A.Mizushima, K.Ishii, Noboru Noguchi, **“Development of an Autonomous Navigation System using a Two-dimensional Laser Scanner in an Orchard Application,”** *Biosystems Engineering*, Bio-production Engineering, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9, Nishi 9, Kita Ku, Sapporo, Japan, vol. 96, no.2, pp.139-149,2006.
- [8] S.Liu, M.M.Atia, T. B. Karamat and A.Noureldin, **A LiDAR-Aided Indoor Navigation System for UGVs**, *The journal of navigation*, College of Automation, Harbin Engineering University, China, vol. 68, no.2, pp.253-273, 2015.
- [9] N. Shalal, T.Low, C.McCarthy, N.Hancock, **A preliminary evaluation of vision and laser sensing for tree trunk detection and orchard mapping**, *Proceedings of*

*Australasian Conference on Robotics and Automation*, University of New South Wales, Sydney Australia, 2013.

- [10] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy and N. Hancock, **Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part A: Tree detection**, *Computers and Electronics in Agriculture*, Faculty of Health, Engineering and Sciences, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland, Australia, vol.119, pp.254-266, 2015.
- [11] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy and N. Hancock, **Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part B: Mapping and localisation**, *Computers and Electronics in Agriculture*, Faculty of Health, Engineering and Sciences, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland, Australia, vol.119, pp.267-278, 2015.
- [12] B. Benet and R. Lenain, **Multi-sensor fusion method for crop row tracking and traversability operations**, *Proceedings of AXEMA-EURAGENG Conference*, Paris, France, 2017.
- [13] J. Xue, L. Zhang and T.E. Grift, **Variable field-of-view machine vision based row guidance of an agricultural robot**, *Computers and Electronics in Agriculture*, College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, China, vol.84, pp.85-91, 2012.
- [14] Chunlong Zhang, Liyun Yong, Ying Chen , Shunlu Zhang, Luzhen Ge, Song Wang and Wei Li , **A Rubber-Tapping Robot Forest Navigation**, *Sensors Journal*, College of Engineering, China Agricultural University, Beijing, China, vol.19, 2019.
- [15] Wan-Soo Kim, Dae-Hyun Lee, Yong-Joo Kim, Taehyeong Kim, Rok-Yeun Hwang and Hyo-Jai Lee, **Path detection for autonomous traveling in orchards using patch-based CNN**, *Computers and Electronics in Agriculture*, Department of Biosystems, Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea, vol.175, 2020.
- [16] Fujiyoshi, H., Hirakawa, T., Yamashita, T., **Deep learning-based image recognition for autonomous driving**. *JATSS Research* ,2019
- [17] Blok, P.M., van Boheemen, K., van Evert, F.K., IJsselmuiden, J., Kim, G.H. **Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter**. *Comput. Electron. Agric.*, 157, 261–269, 2019.

- [18]R. Hartley and A. Zisserman, **Multiple View Geometry in Computer Vision 2rd ed.**, *Cambridge University*, pp.153-177, 2003.
- [19]E. Trucco and A. Verri, **Introductory techniques for 3-D computer vision**, 2rd ed., Prentice Hall , 1998, pp.15-29.
- [20]วรวิทย์ กิ่งหั่น. 2557. **การตัดแยกเกรดมาตรฐานยางพาราแผ่นรมควัน โดยใช้วิธีการประมวลผลด้วยภาพ**. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [21]Alasdair McAndrew. **An Introduction to Digital Image Processing with Matlab Notes for SCM2511 Image Processing 1**. School of Computer Science and Mathematics Victoria University of Technology
- [22] Jian Guo<sup>1</sup> and Guoqiang Wu<sup>1</sup> Shuxiang Guo<sup>1, 2</sup>. (2015). **Fuzzy PID Algorithm-based Motion Control for the Spherical Amphibious Robot**. International Conference on Mechatronics and Automation , 1584-1588.

**ภาคผนวก ก**

**บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ**

**The 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Applied Sciences and  
Technology, ICEAST, 4-7 July 2018**

Conference Proceedings



# iceast 2018

The 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering,  
Applied Sciences and Technology



"Exploring Innovative Solutions  
for Smart Society"

Swissôtel Resort Phuket Patong Beach  
Phuket, Thailand

July 4-7, 2018

[iceast2018@kmitl.ac.th](mailto:iceast2018@kmitl.ac.th)

[www.iceast.org](http://www.iceast.org)





# iceast 2018

The 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering,  
Applied Sciences and Technology

**"Exploring Innovative Solutions for Smart Society"**

July 4-7, 2018  
Swissôtel Resort Phuket Patong Beach, Phuket, Thailand

The International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) was inaugurated in 2007 to provide opportunities for enhancing collaboration and exploring current interdisciplinary topics. The ICEAST conferences were held in the past in 2007, 2012 and 2013. To continue the conference mission, the fourth ICEAST conference will be held at Swissôtel Resort Phuket Patong Beach in Phuket, Thailand during July 4-7, 2018. The accepted conference papers will be published in MATEC Web of Conference (indexed by SCOPUS) and the proceedings volume in IEEE Xplore Digital Library (indexed by EI Compindex and SCOPUS).

In addition to the technical program, participants will have the opportunity to enjoy the many charms of Phuket which is one of the World's top tourism destinations. The Organizing Committee hopes that this conference will provide not only outstanding technical knowledge but also enjoyable experience for the participants.

**Honorary Chair**

- Suchatvee Suwansawat (KMITL, Thailand)

**General Chair**

- Komsan Maleesee (KMITL, Thailand)

**Co-Chairs**

- Somsak Choomchuay (KMITL, Thailand)
- Chuwong Phongcharoenpanich (KMITL, Thailand)

**International Committee**

- Tadashi Ariga (Tokai University, Japan)
- Pannapa Changpetch (Bentley University, USA)
- Hsun-Yi Chen (National Taiwan University, Taiwan)
- Chen-Yang Cheng (National Taipei University of Technology, Taiwan)
- Hector Gabriel Allende Cid (Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso, Chile)
- Giuseppe Di Fatta (University of Reading, UK)
- Tomotaka Homae (National Institute of Technology, Toyama College, Japan)
- Kwei-Long Huang (National University of Taiwan, Taiwan)
- Nobutaka Ito (Chiang Mai University, Thailand)
- Namhun Kim (Ulsan National Institute of Science and Technology, South Korea)
- Mettaya Kitiwan (Tohoku University, Japan)
- Yoshikazu Miyanaga (Hokkaido University, Japan)
- Yasuyuki Miyazawa (Tokai University, Japan)
- Baorong Ni (Fukuoka Institute of Technology, Japan)
- Takao Onoye (Osaka University, Japan)
- Jun Sato (National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)
- Satoru Seto (National Institute of Technology, Ishikawa College, Japan)
- M. Shamsuzzaman (University of Sharjah, UAE)
- Yoshiro Takeichi (National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)
- Munehiro Tanaka (Saga University, Japan)
- I Gede Agus Widyadana (Petra Christian University, Indonesia)
- Kuniaki Yajima (National Institute of Technology, Sendai College, Japan)
- Nerda Zura Zaibidi (Universiti Utara, Malaysia)

**Technical Committee**

- Sompob Polmai (KMITL, Thailand)
- Surapan Airphalboon (KMITL, Thailand)
- Yutthapong Rangsaneri (KMITL, Thailand)
- Watchara Chatwiriyia (KMITL, Thailand)
- Jaruwat Charoensuk (KMITL, Thailand)
- Apinan Namkanisorn (KMITL, Thailand)
- Sawai Pongswatd (KMITL, Thailand)
- Arthit Petchsathon (KMITL, Thailand)
- Ekkapong Cheevitsopon (KMITL, Thailand)
- Panmanas Sirisomboon (KMITL, Thailand)
- Ranon Jientrakul (KMITL, Thailand)
- Sorawat Chivapreecha (KMITL, Thailand)
- Pearawut Yutthagowith (KMITL, Thailand)
- Vanvisa Chutchavon (KMITL, Thailand)
- Montree Sirirachyanun (KMUTNB, Thailand)
- Nantakrit Yodpijit (KMUTNB, Thailand)
- Sukanya Praesomboon (KMUTNB, Thailand)
- Banhan Lila (BUU, Thailand)
- Supphachan Rajsiri (MU, Thailand)
- Anupun Terd Wongworakul (KU, Thailand)
- Anirut Chaljaruwanich (CMU, Thailand)
- Wassanai Wattanutchariya (CMU, Thailand)
- Wasawat Nakkiew (CMU, Thailand)
- Chusit Pradabpet (ARU, Thailand)

**Technical Program Chairs**

Track 1

- Kannachai Kanlayasiri (KMITL, Thailand)
- Tossapol Klatcharoenpol (KMITL, Thailand)

Track 2

- Worapong Tangsirat (KMITL, Thailand)
- Monsak Pimsarn (KMITL, Thailand)

Track 3

- Vasu Udompetaikul (KMITL, Thailand)
- Jedsada Chalshome (KMITL, Thailand)

Track 4

- Somsak Choomchuay (KMITL, Thailand)
- Wiboon Promphanich (KMITL, Thailand)

**General Secretary**

- Chaowalit Hamontree (KMITL, Thailand)

**Important Dates**

Paper Submission Deadline	February 28, 2018
Notification of Acceptance	April 30, 2018
Final Paper Submission Deadline	May 15, 2018
Early Registration Deadline	May 15, 2018
Conference Date	July 4-7, 2018

**Call for Papers**

**Track 1** - Industrial Engineering, Materials and Manufacturing  
**Track 2** - Mechanical, Mechatronics and Civil Engineering  
**Track 3** - Food, Chemical and Agricultural Engineering  
**Track 4** - Telecommunications, Computer Science, Instrumentation and Control, Electrical and Electronic Engineering

**Publications**

Accepted papers will be published in the Proceedings of ICEAST 2018 and

- (Track 1-3) MATEC Web of Conference (indexed by SCOPUS).
- (Track 4) Proceedings volume to be included into IEEE Xplore Digital Library. (The IEEE provides SCOPUS with all of the IEEE Xplore Digital Library content so that the bibliographic information (what is seen on an abstract page in IEEE Xplore, including the abstract) can be made visible.)

**Registration Rate (THB)**

	Early Registration	Standard Registration
Regular Paper	12,000	14,000
Student Paper	8,000	9,000
Additional Paper	8,000	9,000
Participant	5,000	6,000

iceast2018@kmitl.ac.th  
www.iceast.org



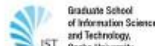












PID	Track	Title	Author	Page
283	1	Lipid-based nanocarriers to enhance skin permeation and antioxidant activity of centella asiatica extract	Boonnada Pamornpathomkul Worranan Rangsimawong Theerasak Rojanarata Praneet Opanasopit Chuleerath Chaiyodsilp Tanasait Ngawhirunpat	166
284	4	Design of MPPT based fuzzy logic for solar-powered unmanned aerial vehicle application	Heri Suryatmojo Ronny Mardiyanto Dedet Candra Riawan Eko Setijadi Sjamsjul Anam Yuda Putra	170
285	2	Study of fatigue crack initiation location of wheel and rail under rolling contact using finite element method	Apichai Jaifu Suthep Raeon Monsak Pimsam	174
286	1	Estimation of residual life of a cutting tool used in a machining process	Sourath Ghosh Sukanta Kumar Naskar Nirmal Kumar Mandal	178
292	1	Bendability and failure mechanisms of dual phase steel under air-bending at elevated temperatures	Natthasak Pornputsiri Kannachai Kanlayasiri	182
293	2	CO <sub>2</sub> concentration from turbocharged common rail diesel engine dually fueled with compressed biomethane gas controlled at optimum ratio	Niti Kammuang-Lue Matas Bhudtiyatane	186
296	1	Indirect test methods for the mechanical characterization of building stones	Giulia Forestieri	190
297	3	Ultrasonic-assisted extraction of gallic acid and isoquercetin from aspergillus niger fermented tri-phala waste	Teerin Chysirichote Pattarabhorn Pakaweerachat	194
299	3	Formulation and preparation method of pine sawdust-based food for ruminants	Gerardo Espinosa-Garza Imelda Loera-Hernandez Natella Antonyan	198
300	2	Causes of delay on highway construction projects in Thailand	Pornsirichotirat Thapanont Charoenpornpattana Santi Xinghatiraj Pruethipong	202
301	4	Development of a vision based mapping in rubber tree orchard	Worawut - Kunghun Akapot - Tantrapiwat	206
302	2	Improvement of dynamic characteristics of manipulator driven by a gas-liquid phase-change actuator using an antagonistic drive	Tomonori Kato Kenya Higashijima Yusuke Kuradome Kohei Noguchi Manabu Ono	210
304	3	Detection and enumeration of the dangerous foodborne pathogens in cooked food that causes food poisoning and infectious diseases	Sumonthip Kongtunjanphuk	214
307	2	Numerical simulation of porous media combustion for high temperature heat exchanger	Panu Iamsakulpanich	218

# Development of a vision based mapping in rubber tree orchard

Worawut Kunghun  
Mechanical Engineering Department  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute  
of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
59601321@kmitl.ac.th

Akapot Tantrapiwat  
Mechanical Engineering Department  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute  
of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
Akajanpao@gmail.com

**Abstract**— A mapping method for rubber tree orchard was developed using an image processing. Because of high labor cost and continuous dropped price of natural rubber in the past years, the rubber tree farmers are struggled to maintain profit and their productions. Automation technology in agriculture can be a solution to cut down the production cost which comprises of a large share in harvesting labor expense. To create such automation, the autonomous and orchard mapping are the first challenges. Due to the natural rubber industry is popular in particular part of the world, mostly in South East Asia, the vision mapping and autonomous on rubber tree orchards have not been done widely. This research aims to develop a model of vision mapping system which is suitable to the rubber tree plantations based on the common farming platform in Thailand. The vision model was designed to use single camera capturing calibrated targets which were placed on the rubber tree trunks. The length of the target from the captured image was then calculated in order to estimate the distance and position of the camera in relation to the orchard geometry. Because the larger size of the targets results in higher accuracy, however one large single target is not practical for installation on the trees, two separated targets technique was created. Three different lengths, 0.3, 0.5, and 0.7 meters, of separated targets were examined during the experiments. Percent error distances of target to camera, Z-direction, and target to center of camera, X-direction, were evaluated and also their uncertainties. The results have shown that largest target gave small error uncertainties, but the percentages of errors are quite similar among all sizes of targets. Because the sizes of the errors are proportion to the sizes of the targets, the percentage errors therefore adapt to the sizes of the targets. The experiments were carried out at 1-5 meter distances between target and camera that were set to cover the normal 3 meter distance between tree rows. It showed that the vision mapping can perform at about 8 cm repeatability in z-direction and about 13 cm in x-direction. This magnitude of errors seems to be large but it is actually practical for the orchard autonomous which is usually designed for low speed vehicle working on a large area.

**Keywords**—Computer vision; Tree detection; Mapping; Rubber tree orchard

## I. INTRODUCTION

According to statistics from the Thailand Trading Market of agricultural products in 1999-2014, natural rubber was one of the main agricultural products that generates high revenue for

the South East Asia, especially Thailand and Malaysia. In 2015, the quantity of the production was more than 3,749,456 metric tons. Based on movements in the rubber price at The Hat Yai Central Rubber Market in the southern of Thailand, the average price of Rib Smoked Sheet-3 (RSS3) was THB 86.19-46.41/kg in 2017 [1-3], and it tends to be decreased because of the over production. The rubber industry has been struggled due to low profit and high labor cost. In the process of the production, harvesting latex sap is a tedious work and uses a lot of labors. To minimize the production cost, automation in rubber tree orchard is the most promising technology.

Automation and orchard mapping have been studied and experimented for many applications. Y.R. Chen et al. had used machine vision applications in agriculture can be categorized into three main areas which are nondestructive measurement, visual for navigation, and behavioral surveillance [4]. N. Shalal et al. developed the recent research on novel tree trunk detection algorithm using a camera and laser scanner data fusion which had been conducted in order to enhance the detection capability. The laser scanner was used to detect the edge points, determining the width of the tree trunks and non-tree objects, while the camera images were used to verify the colour and the parallel edges of the tree trunk and non-tree objects [5]. J. Xue et al. had developed a novel variable field-of-view machine vision method allowing an agricultural robot to navigate between rows in cornfields. Guidance lines were detected using an image-processing algorithm, employing morphological features in a far, near and lateral field of view, and the robot was guided along these lines using fuzzy logic control [6]. W. Ali et al. were developed a classification based tree trunk detection method for autonomous navigation of forest vehicles in forest environments. They used integration of colour and texture to segment the images into tree trunks and background objects [7]. B. He et al. did show an algorithm to generate a navigation path in an orchard for a harvesting robot based on machine vision. A horizontal projection method adopted to dynamically recognize the main tree trunk's area from orchard images. Border crossing points between the tree trunks and the ground were detected by scanning the trunks areas and these points were divided into two clusters on both sides [8]. The prior works, cited above, paid considerably less attention to mission between the trees. The mapping use for navigation only in the tree rows in the orchard.

These techniques were suitable for orchards with consistent maintenance of the path between tree rows. For the rubber tree orchard, it is possible to permanently mount targets on the tree trunks and use them as the guidance for the autonomous system. This method reduces the complication of terrain image processing and allows the mapping occurred right at the trees. When this vision mapping is applied to an automatic operation such as latex collecting robot, it can guide the robot approaching the targets directly. With this configuration, a vision mapping technique for rubber tree orchard was created.

In this research, the vision model was developed according to the controlled parameters such as flat terrain, consistent target position, bright and constant light source. Although the actual rubber tree orchards and working conditions can be very different from one to another, it is best to explore all basic parameters and geometries before taking them to the realistic environments. To understand important factors which define the orchard mapping, typical orchard configurations were investigated, and a simple vision model was developed.

II. ORCHARD CONFIGURATION AND VISION MODEL

Orchard Configuration

Typical rubber tree orchard is planted in row and column pattern which is suitable for farming operation. The distance between rows is usually 3 meters and 6-7 meters for the columns. With this density, there are about 80 trees in one Rai, a usual land size measurement in Thailand that is equivalent to 1600 square meters. Normally the former would work in the orchard by walking between the tree rows and changing to another column at the end of the rows. The autonomous mapping path therefore was designed to fit for such trail. Fig.1 shows the layout of rubber tree orchard and the planning trail.

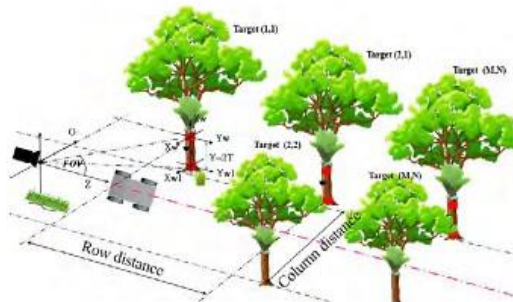


Fig. 1. Orchard configuration.

Based on the orchard operating trail, the mapping should be able to locate trees at a greater distance between the rows. Consider the autonomous path is started where the camera is placed at 1 meter away from the first tree, the second tree, which is 4 meters away by the row offset, must be now in the frame of the camera. After the camera moves closer to the first tree, portions of the target on the first tree may already stay out of the camera frame perception, and the target size now cannot be correctly evaluated. At this point the

mapping position relies on the second tree target. When the camera continues to move toward the second tree, at certain point, the third tree target must be captured until the camera approaches the last meter away from the second tree. Then the process repeats again as the second tree now becomes the first tree. This processing loop works like mapping next target then letting go the current one. To make sure that the loop is secure, the next target should be located for a distance before the current one is dismissed. In this research the vision mapping was designed for 1-5 meter distance detection.

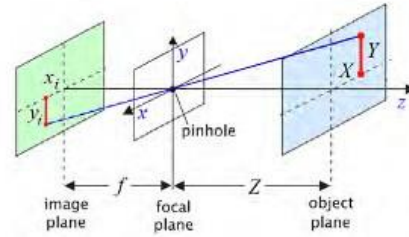


Fig. 2. Pinhole model for target position estimations.

Vision Model

The vision model used for mapping the rubber trees was developed based on the common pinhole model [9-10] as shown in Fig.2. By capturing a known size target the image position and size, which were measured by the number of pixels, can be used to determine the position of the target. In this setup, the vertical axis on the image plane is assigned to y-axis, and it placed at the direction parallel to the tree trunk. The x-axis is the horizontal direction of the image frame. These make the z-axis perpendicular to the image frame. By capturing known target length on the y-axis, the distance Z from target to the pinhole, which usually located at the front lens of the camera, can be determined by:

$$Z = f \frac{Y}{y_i} \tag{1}$$

where  $f$  is the focal length of the camera,  $Y$  is the calibrated length of the target, and  $y_i$  is the size of the target image in y-direction. In x-direction, the same principle was applied, and the distance between target and a reference point, which was set at the center of the camera projection, can be evaluated by:

$$X = x_i \frac{Y}{y_i} \tag{2}$$

where  $x_i$  is the distance between target image and the center of the frame in the horizontal direction. It can be seen that both  $X$  and  $Z$  pose estimation depend greatly on the proportion of target image and the actual target size. Therefore larger target would result better distance estimation. However, placing one large single target on the tree is not practical due to the latex taping process has to be made on the tree trunk. To solve this, two separated targets were placed at a distance to resemble a large target.

By positioning two separated targets on the tree trunk with a distance equivalent to a large target size, higher accuracy of the pose estimation can be achieved. Fig.3 shows the example separated targets image that was tested on a tree trunk replica. Based on the average rubber tree diameter, 20 centimeters, three different target distances, 0.3, 0.5 and 0.7 meters, were used to evaluate the mapping accuracy and performance.

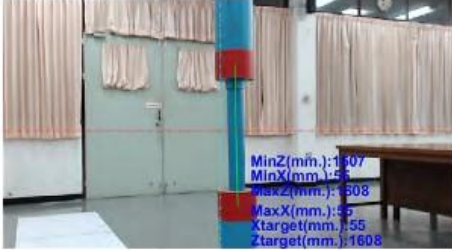


Fig. 3. Separate targets on the test pole resembled rubber tree trunk.

#### Vision Mapping to Orchard Geometry

The target positions obtained from the pinhole vision model can only tell the locations of the trees in relation to the camera. To map the camera path, these positioning data must be converted to the geometry of the orchard. Fig.4 shows the horizontal plane of a rubber tree row which is mapped by the camera on an autonomous vehicle. The target positioning data obtained from the pinhole model can be converted to the camera positioning on the orchard by the relationship of three parameters which are target-camera distance parallel to the tree row ( $S$ ), offset distance between camera and tree row ( $O$ ), and camera orientation relative to the tree row ( $\theta$ ).

The offset distance between camera and tree row is set for continuous path alongside the tree row, while the distance of camera to the target in parallel to the tree row tell how far away from the target. It can be determined from the camera orientation and the camera pose estimation; i.e.

$$S = \frac{X^2 + 2Z^2 - (Z \tan(\theta) - X)^2 + (Z \tan(\theta))^2}{2\sqrt{(Z \tan(\theta))^2 + Z^2}} \quad (3)$$

From this equation, it can be seen that with a specific camera orientation, the target distance,  $S$ , can be written in relation to the camera pose estimation without the offset distance between camera and tree row. It means that the target distance can be first estimated by the pose estimation, and later the offset distance can be found by:

$$O = \sqrt{X^2 + Z^2 - S^2} \quad (4)$$

Note that the camera pose estimation,  $X$  and  $Z$ , provide two correlations between three orchard mapping factors,  $S$ ,  $O$ , and  $\theta$ . Therefore, to obtain the value of the remaining two parameters, one must be identified. If this orchard mapping method is applied to an autonomous system, an acceleration sensor or electronic compass may be used for feeding in the camera orientation,  $\theta$ . Then the position of the camera relative to the orchard geometry can be mapped.

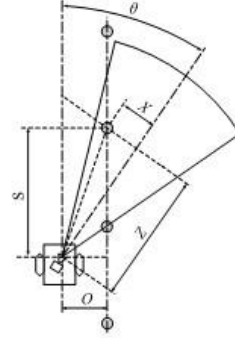


Fig. 4. Mapping orchard geometry in horizontal plane.

### III. EXPERIMENT

#### Experimentation Setup

The vision mapping test was carried out on a replica of rubber tree orchard in a controlled environment. By using cylinder posts with 150 millimeter diameter as the tree trunk mockup, two red color bands were strapped on each post with a vertical distance defined as the target length. Three different lengths, 0.3, 0.5, and 0.7 meters, of the separated targets were used. The mockup posts were placed in a row with 3 meter space between them. The test area was marked by a grid in order to validate the actual location of the camera which was placed on a trolley to maintain its altitude and orientation.

The camera used in this experiment has a horizontal field of view angle (HFOV) at  $70.42^\circ$  and vertical field of view angle (VFOV) at  $43.30^\circ$  with a resolution of  $720 \times 1280$  pixels. The target identifying method was made by first capturing the image frame in RGB format. Then, the image input was pre-processed by the unsharp-mask procedure. It is a technique used for improving the edge of the images. After that, the image was filtered out for the main three primary colors, Red, Green, and Blue. Because the Red target color was selected to be distinctive from the common orchard background. The Red value from the image was then sorted out and converted into the Gray-Scale format image. Lastly, the target areas in image were classified by a threshold gain, and the image was set to binary image that the target was presented in white on black background.

Once all targets were found in the image, they were calculated for their sizes and locations of their centers. These information were used in order to pair them in the vertical arrangement. Virtual lines were then created and linked between centers of the targets. The number of pixels on each line was the  $y_i$ , which was used to determine all other mapping parameters as what already described previously. By placing camera on a known location assigned by the parallel distance to the target ( $S$ ) and the target row offset ( $O$ ), the image processing program determined the average values of  $X$  and  $Z$  for 10 samplings. The values were then compared to the actual values of  $X$  and  $Z$ . These errors and their uncertainties were monitored.

### Results and Discussion

Fig.5 has shown the percent errors of X and Z obtained from the mapping experiments. It can be seen that the Z errors were minimal, and they were similar throughout the test ranges. Because both X and Z were calculated by the image size of target length, Y, the distance between the camera and the target affected these values proportionally, and so the errors maintain these proportions. However, for X value, the percent errors were much greater, especially when the camera distances were placed around the mid ranges. These performances were the results from target positions in the image. When the camera moved closer to the target, the location of target moved from one side of the frame to another. Around the mid ranges, the positions of target were close to the frame center which is the reference point of the X measurement. As the X got smaller, the percent of error in comparison to the X got bigger.

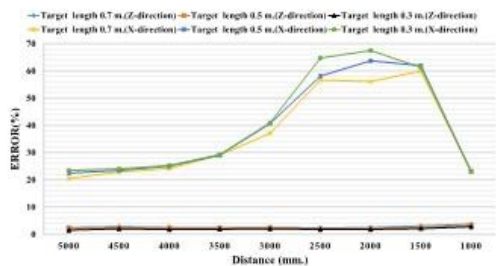


Fig. 5. The percent error of X-direction and Z-direction at target length 0.7, 0.5 and 0.3 meter.

The uncertainty pose estimation tells the inversion of repeatability of the measurement. By recording the maximum and minimum variations of the errors in the reading, the uncertainties can be evaluated. High values of the uncertainty were found at the longest distance from the target. As the camera approached the target, these uncertainties were reduced. Because the camera perception at the greater distance would result in smaller target image size, the fraction of image error affected greater amount in the pose evaluation.

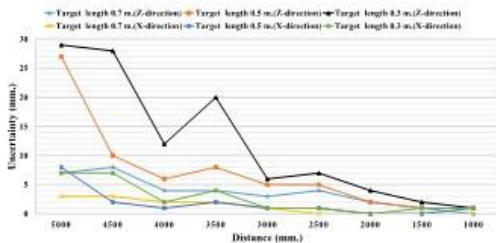


Fig. 6. The uncertainty of X-direction and Z-direction at target length 0.7, 0.5 and 0.3 meter.

### IV. CONCLUSIONS

The vision mapping for rubber tree orchard was successfully evaluated. It has shown that the pinhole methodology was effectively applied to estimate the position of

the camera using a known target size as the reference. The experiment showed that different target sizes result in different uncertainties of the measurements. However the percentages of error had small differences throughout the test range. The maximum errors of Z and X can be converted to the location errors in the tree orchard geometry, and it has shown the accuracy of 8 centimeters in z-direction and 13 centimeters in x-direction. Although this amount of error seem to be large, the mapping method is still feasible. Because the autonomous system for agriculture can be designed for low speed applications, the vast area of the orchard can give marginable space for compensations. Moreover this mapping evaluation was only done by a 1-Megapixel camera, but the mapping performance can be much improved by using higher resolution camera.

### REFERENCES

- [1] Rubber Authority of Thailand, "Rubber Research Institution of Thailand," Thai rubber statistics, Retrieved from <http://http://www.rubber.co.th>.
- [2] C. Musikavong, S.H. Gheewala, "Ecological footprint assessment towards eco-efficient oil palm and rubber plantations in Thailand," Journal of Cleaner Production, Songkhla, Vol. 140 part 2, Thailand, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, 2017, pp 581-589.
- [3] J. Xue, L. Zhang, and T.E. Grift, "Rubber-based farming system in Thailand," Journal of Rural Development, Vol.21, Asian Institute of Technology, Department of Natural Resources Management (NRM), Thailand, 2012, pp 85-113.
- [4] Y.R. Chen, K. Chao, and M.S. Kim, "Machine vision technology for agricultural applications," Journal Computers and Electronics in Agriculture, Songkhla, Vol. 36, Instrumentation and Sensing Laboratory, Henry A. Wallace Beltsville Agricultural Research Center, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Beltsville, 2002, pp 173-191.
- [5] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy, and N. Hancock, "Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion - Part A: Tree detection," Computers and Electronics in Agriculture, Vol.119, Faculty of Health, Engineering and Sciences, University of Southern Queensland, Toowoomba, Queensland, Australia, 2015, pp 254-266.
- [6] J. Xue, L. Zhang, and T.E. Grift, "Variable field-of-view machine vision based row guidance of an agricultural robot," Computers and Electronics in Agriculture, Vol.84, College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, China, 2012, pp 85-91.
- [7] W. Ali, F. Georgsson, and T. Hellstrom, "Visual tree detection for autonomous navigation in forest environment," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 560 - 565, June 2008 [proceedings of 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Eindhoven University of Technology Eindhoven, The Netherlands, p. 560 - 565, 2008].
- [8] B. He, G. Liu, Y. Ji, Y. Si, and R. Gao, "Auto recognition of navigation path for harvest robot based on machine vision," Computer and Computing Technologies in Agriculture IV, pp.138-148, October 2010 [proceedings of 4th IFIP TC 12 Conference, CCTA 2010 Nanchang, China, October 22-25, 2010, p. 138-148, 2010].
- [9] R. Hartley, A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed., Cambridge University, 2003, pp.153-177.
- [10] E. Trucco, A. Verri, Introductory techniques for 3-D computer vision, 2nd ed., Prentice Hall, 1998, pp.15-29.

## ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ

The 5<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Applied Sciences and  
Technology, ICEAST, 2-5 July 2019



2-5 July 2019  
[www.iceast2019.org](http://www.iceast2019.org)



#### Session 4: Acoustic and Music Engineering 1

Session chair: *Kittipitch Meesawat*

Room: A

- 08:30-08:50 Paper ID 149: A Similarity Measure of Musical Notes Based on Psychoacoustics of Loudness and Pitch Perception  
*Chukiet Sodsri, Thailand*
- 08:50-09:10 Paper ID 78: A Subtractive Synthesis of Khlui Sound using Asymmetrical Triangle Waveform Excitation Signal and Multi-Factor Warped Filters  
*Kittipitch Meesawat, Thailand*
- 09:10-09:30 Paper ID 188: Brake Squeal Noise Investigation of Disc-Pad Assembly using Normal Mode Analysis  
*Chak Chantalakhana, Meechai Sriwiboon, Nipon Tiempan, Kritsana Kaewlob, Thailand*
- 09:30-09:50 Paper ID 161: Viscoelastic Modelling and Parameter Identification of Elastomer under Dynamic Excitation  
*Niwat Moonpa, Kasem Janma, Thailand*
- 09:50-10:10 Paper ID 100: Confinement of acoustic fields in a honeycomb phononic crystal slab  
*Paul H. Otsuka, Ryota Chinbe, Motonobu Tomoda, Osamu Matsuda, Yukihiro Tanaka, Oliver B. Wright, Japan, Sihan H. Kim, Heonsu S. Jeon, Korea, Sorasak Danworaphong, Thailand, Istvan Veres, Austria*

#### Session 5: Mechanical, Mechatronics and Civil Engineering 1

Session chair: *Unnat Pinsopon*

Room: B

- 08:30-08:50 Paper ID 99: The Enhancement of Pool Boiling Heat Transfer by Passive Technique using Rotating Blades Applied on the Nucleation Sites  
*A. Suriyawong and S. Saisorn, S. Wongwises, Thailand, A. Kawahara, Japan,*
- 08:50-09:10 Paper ID 60: Fundamental Analyses and Observations of Liquid Droplet on Aluminum Surface for Heat Exchangers  
*N. Charoensuk, C. Sae-kung, J. Charoensuk, A. Treetong, V. Lilavivat Thailand, S. Hirai, Japan*
- 09:10-09:30 Paper ID 194: Navigation of autonomous vehicle for rubber tree orchard  
*Worawut Kunghum, Akapot Tantrapiwat, Phudit Chaidilokpattanakul, Thailand*
- 09:30-09:50 Paper ID 7: Development and Control of Rotary Inverse Pendulum by LQR with Integral Action  
*Surachat Chantarachit, Thailand*

## Navigation of autonomous vehicle for rubber tree orchard

Worawut Kunghun\*, Akapot Tantrapiwat, Phudit Chaidilokpattanakul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

**Abstract.** This research has studied the navigation of autonomous vehicles in rubber tree orchards. It was emphasised on the rubber tree plantation in Thailand. Due to the high labour costs in the rubber industry and the demand for natural rubber has continued to decline over the past several years. The farmer were struggled to reduce the labour costs in production. The development of autonomous vehicle technology in rubber plantation can be a way to ease the production costs, such as reducing the amount of labour in fresh latex harvesting. This work was aimed to develop algorithm of a vision system for replacement of expensive sensors used in typical autonomous vehicles. The vision system model was implemented using only one camera installed on the vehicle to search for calibrated targets which were put on the rubber tree trunk. There were two important parameters, tree row offset and target distance, which were concerned when determining the performance of the autonomous vehicle in the rubber tree orchards. In order to evaluate the accuracy of the system, a set of experiments was conducted at a distance of 1-5 meters between the target and the camera. The results were compared between the controlled environment in the laboratory and the uncontrollable environment in the real rubber plantation.

### 1 Introduction

Automatic vehicles in rough terrain are one of the major trends in control research. Such vehicles can be used widely in agriculture applications which lead to the solutions of modern agriculture development. Less labor and resource are required for the automation system in agriculture. This technology can also replace human limitations and reduce operating cost. This research interests on the application of the ground vehicle automatically for agriculture in the rubber plantation. The rubber industry in Thailand has been struggled due to low profit and high labour cost [1]. In the process of the production, harvesting latex sap is a tedious work and uses a lot of labour. To minimize the operating cost, automation in the rubber tree orchard is one of the most promising technologies to resolve the problem.

The autonomous vehicle and orchard navigation system have been studying for many applications. Z. Wang et al. developed Machine vision assessment of mango orchard in the current orchard and season, the correlation coefficient of determination between machine vision estimates of panicle area and multi-view panicle count and fruit yield per tree [2]. C. Pirat et al. had developed vision Based navigation for the scalability analysis of the ESA Autonomous Transfer Vehicle Guidance, Navigation & Control (GNC) performances and the Russian docking system. This paper used a single monocular camera on the chaser satellite and various sets of Light-Emitting Diodes (LEDs) on the target vehicle ensure the observability of the system throughout the approach trajectory [3]. G. Bayar et al.

had developed a model-based control method for an autonomous agricultural vehicle that operates in tree fruit orchards. In the paper, they proposed an either state estimation or path following, relying instead only on data from a planar laser probability of a successful turn from one row into another, while respecting the maximum steering rate limits [4]. X. Zhang et al. did show an algorithm to the crop row detection for precision agriculture and automatic navigation. This research used a crop row detection method which was proposed for maize fields based on images acquired from a vision system. During the procedure of crop row detection, the position clustering algorithm and shortest path method were applied successively to confirm the final clustered feature point set [5]. W. Kungkun et al. had developed the vision model to use a single camera capturing calibrated targets based on the common pinhole model which were placed on the rubber tree trunks for study the errors and their uncertainties were monitored [6].

The prior works cited above did not focus on the operation between the trees rows. Most of the current researches of autonomous vehicle navigation systems had been using a laser scanner which is expensive and not practical for farming applications. In the rubber tree orchard, it is possible to permanently mount calibrated targets on the tree trunks and use them as the guidance for the autonomous vehicle system. The targets on the tree trunks for guidance the autonomous vehicle system will be easily searched by image processing technique. This method reduces the complication of terrain image processing and allows the mapping can be done with less

\* Corresponding author: [S9601321@kmitl.ac.th](mailto:S9601321@kmitl.ac.th)

performance computer platform. The same vision mapping technique can also applies to automatic navigation in other similar applications or other types of tree orchards.

This paper is aimed at finding ways to develop and implement vision system into the agriculture of natural rubber tree farming. The goal of this research is to develop an algorithm to autonomously guide a robotic vehicle platform along a rubber tree orchard row. There are two parameters important for navigation in the rubber tree orchard, target-camera distance parallel to the tree row and an offset distance between camera and tree row. This paper presents the test on real conditions in rubber plantations, which variations in the uncontrollable nature or the amount of light source that affects the parameters for navigation in the rubber tree row.

## 2 Orchard configuration and vision navigation to orchard geometry

### 2.1 Configuration of rubber tree orchard

The rubber tree orchard plantations usually have 3 meters row distance and 6-7 meters column distance. For the typical area of the plantation, it will use about 1600 square meters for 80 trees [1]. Rubber plantation farmers do harvest and rubber tree planting, etc. They work by walking along columns. Each column requires regular maintenance to facilitate daily work. The autonomous vehicle should therefore replicate the running path same as the work of the farmer.

The rubber tree orchard used in this research is well maintained and one of the rows was randomly selected as a test row. This experiment was conducted on a real rubber plantation located in Chachoengsao province, eastern of Thailand. The vision navigation was designed for 1-5 meter distance between row to row in the tree orchard. The sizes of rubber tree trunks were about 120-millimeter in diameter. In the actual orchard, it was found that there were several uncontrollable parameters which can affect the navigation performance. These include the straightness of rubber tree trunk, rough plantation areas of rubber trees and the amount of inconsistent light in each period. The effect of these parameters was compared with the system performance when working in controllable environment in laboratory.

### 2.2 Horizontal and vertical vision navigation to orchard geometry

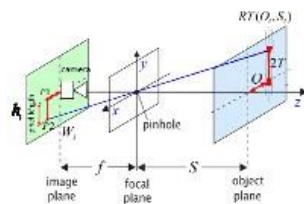


Fig.1 Pinhole model for the target position estimations [7].

The vision model used for finding the rubber trees was developed based on the common pinhole model [7] as shown in Fig.1.

By capturing a known size target the image position and pixel length between P1 and P2, which were measured by the number of pixels, can be used to determine the position of the separated red target on the image plane as shown in Fig.2.

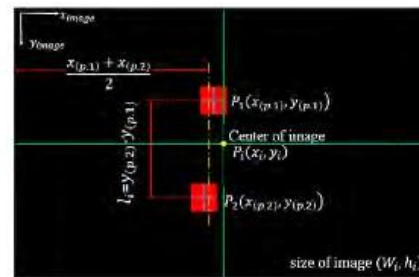


Fig.2 The position of binary image plane (x, y) coordinate systems

The target positions obtained from the pinhole vision model can only tell the positions of the trees in relation to the camera. To plan the camera path, these positioning data must be converted to the vertical vision navigation to orchard geometry model. Fig.1 shows the vertical plane of a rubber tree which is the target for the camera installed on an autonomous vehicle. The vertical vision navigation is very important because finding the separated red targets on the rubber tree to define as a region of interest (ROI) on an image plane. The image plane shown in Fig.2 is the picture retrieved from a webcam. Two red dots are detected as the targets. Then the center of both targets is identified as a position of rubber tree on image plane. Pixel position column on image plane  $x_{(p,1)}$  and  $x_{(p,2)}$  are the pixel coordinates in a column of image plane, when  $y_{(p,1)}$  and  $y_{(p,2)}$  are the pixel coordinate in the row of image plane. A pixel length distance  $l_i$  is calculated between pixel positions of  $y_{(p,1)}$ ,  $y_{(p,2)}$  and  $P_i(x_i, y_i)$  is the center of image plane. This position data obtained from the pinhole model can be converted to the camera positioning on the orchard by the relationship of the vertical vision navigation on object plane.

The vertical model as shown in Fig.3 in the world coordinate is another significant angle for tracking separated Red target at install to rubber tree trunk. By estimate the optimum angles  $\lambda$  and distance  $H$ , it can be derived as shown in equation 1 and 2 where the parameter of  $M=0.1$  meters is the size of a single target. The view angle vertical field of view (VFOV) of the camera is  $\psi = 43.30^\circ$ . The distance between the centers of red target to center of separated target is  $T=0.35$  meters. The distance between centers of

separated target to high edge of red target is  $I = 0.4$  meters, and  $f$  is the focal length of the camera.

$$\lambda = 2 \tan^{-1} \left( \frac{T + \left(\frac{M}{2}\right)}{f \cdot \frac{2 \cdot T}{(l_i)}} \right) \quad (1)$$

$$H = \sqrt{\left( \frac{f \cdot \frac{2 \cdot T}{(l_i)}}{\cos\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right)^2 - \left( f \cdot \frac{2 \cdot T}{(l_i)} \right)^2} \quad (2)$$

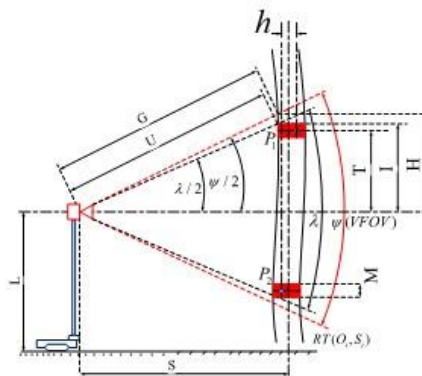


Fig.3 The vertical vision navigation object plane to orchard geometry model.

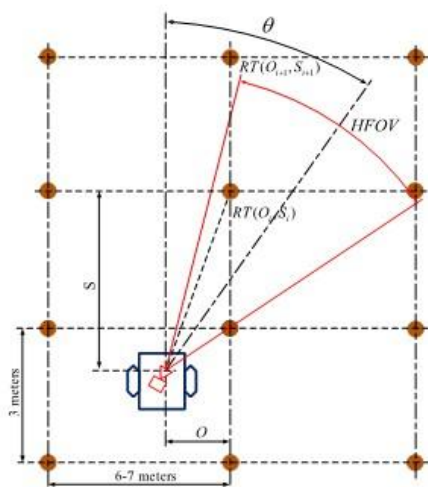


Fig.4 The horizontal vision navigation object plane to orchard geometry model.

From this position P1 and P2 on image plane as shown in Fig.2, the target positioning data on the image plane obtained from the pinhole model can be converted to the camera positioning on the real orchard by the

relationship of two parameters. It can be seen that it can estimate target-camera distance parallel to the tree row (S), offset distance between camera and tree row (O).

$$S = \frac{\{2 \cdot T \cdot f \cdot [f \cdot \cos(\theta) + \xi \cdot \sin(\theta)]\}}{f \cdot (l_i)} \quad (3)$$

$$O = \frac{2\sqrt{2} \cdot T \cdot f \cdot \sqrt{f^2 + \xi^2 \cdot f^2 \cdot \cos(2\theta) + \xi^2 \cdot \cos(2\theta) - 2 \cdot f \cdot \xi \cdot \sin(2\theta)}}{2 \cdot f \cdot (l_i)} \quad (4)$$

When:

$$\xi = \left( \frac{x_{(P1)}}{2} + \frac{x_{(P2)}}{2} - \frac{W}{2} \right) \quad (5)$$

### 3 Experimentation Setup

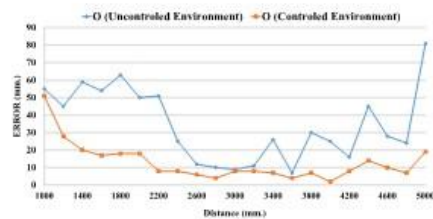
In this research, the experiment was made to compare between the controlled environment and the uncontrolled environment. By using actual rubber tree posts with 120 millimeters diameter, the camera used in this experiment has vertical field of view angle (VFOV) at 43.30° and a horizontal field of view angle (HFOV) at 70.42° for determining the region of Interest (ROI) on the image. The webcam Logitech C920 captured the images of the rubber tree with the size of 720x1280 pixels RGB image resolution on the world coordinate system as shown in figure 3. This dimension was based on the rubber tree trunk at the diameter of 120 millimetres. Each rubber tree was mounted with two red color bands with a vertical distance defined by the target length 0.7 meters. The target identifying method was made by capturing all frame rate the image frame in RGB format. Then, the image input was pre-processed by the kernel filter procedure this method is to eliminate the high frequency noise that is in the image or reduce the variance in the image to make the image more detailed. Because the Red target colour was selected to be distinctive from the common rubber tree orchard background. After that, the target areas in image were classified by a low level gain and high level gain on HSV format. The Red value from the image was then sorted out and the image was set to binary image that the target was presented in white on black background. The target distance is 0.7 meters, to assess the accuracy and efficiency of parameter for navigation.



Fig.5 Detection of separate targets on the rubber tree on the uncontrolled environment of actual tree orchard

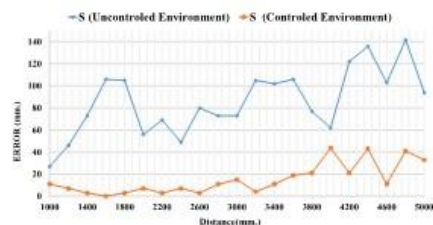
## 4 Results

Fig.6 has shown the magnitude errors of O obtained from the navigation experiments by comparison between the controlled environment and uncontrolled environment. It can be seen that magnitude errors target row offset (O) in the controlled environment were minimal when comparing to uncontrolled environment and they were small throughout the test ranges. Because the area of the rubber plantation is different from the lighting conditions from the controlled environment, the rubber tree is not straightened the surface of the rubber plantation not flat terrain.



**Fig.6** The magnitude error of the target row offset (O) for uncontrolled and controlled environment.

The magnitude errors of the distance parallel to the target (S) Fig.7 when the camera locates in the longest distance from the target of the test is highly error compared the camera near to the target. In a controlled environment have the result of a constant magnitude error throughout the distance for testing. But the experiment for the uncontrolled environment throughout the test distance by the average is considered to have an error that is still acceptable.



**Fig.7** The magnitude error of the distance parallel to the target (S) for uncontrolled and controlled environment.

## 5 Conclusions

In this research, the navigation of autonomous vehicle for rubber tree orchard was successfully evaluated for the magnitude of errors. It has shown that the methodology was effectively applied to estimate the distance parallel to the tree row (S) and offset distance between camera and tree row (O) using a two separated targets as the reference for estimating parameters in the actual rubber tree orchard. The experiment showed that different environment results in twice the accuracy of

S and O parameters. By the maximum errors of O and S can be converted to the location errors in the tree orchard geometry, and it has shown the accuracy of 8.1 centimetres in the O - direction, 14.6 centimetres in the S - direction for uncontrolled environment and 5.1 centimetres in the O - direction, 4.1 centimetres in the S-direction for controlled environments. Though O-direction and S-direction of error seem to be large, the Navigation of autonomous vehicle for rubber tree orchard method is still feasible. The next step will be to design an automatic car using a camera system for navigation in the rubber plantation.

## References

1. Rubber Authority of Thailand, "Rubber Research Institution of Thailand," Thai rubber statistics, Retrieved from <http://www.rubber.co.th>.
2. Z. Wang, J. Underwood and K. B. Walsh, "Machine vision assessment of mango orchard flowering," Journal Computers and Electronics in Agriculture, Vol.151, Centre for Intelligent Systems, Central Queensland University, Australia, 2018, pp 501-511.
3. C. Pirat, F. Ankersen, R. Walker and V. Gass, "Vision Based Navigation for Autonomous Cooperative Docking of CubeSats," Acta Astronautica, Vol.146, European Space Agency and Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), Station 13, 1015, Lausanne, Switzerland, 2018, pp 418-434.
4. G. Bayar, M. Bergerman, A. B. Koku and E. i. Konukseven, "Localization and control of an autonomous orchard vehicle," Computers and Electronics in Agriculture, Vol.115, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Dumlupinar Bulvari, Cankaya, 06800 Ankara, Turkey, 2015, pp 118-128.
5. X. Zhang, X. Li, B. Zhang, J. Zhou, G. Tian, Y. Xiong and B. Gu, "Automated robust crop-row detection in maize fields based on position clustering algorithm and shortest path method," Computers and Electronics in Agriculture, Vol.154, College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, Jiangsu, PR China, 2018, pp 165-175.
6. W. Kunghun and A. Tantrapiwat, "Development of a Vision Based Mapping in Rubber Tree Orchard," International Conference on Engineering Applied Sciences and Technology (IEEE), Mechanical Engineering Department Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand, 2018.
7. R. Hartley, A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed., Cambridge University, 2003, pp.153-177.

**ภาคผนวก ค**

**บทความที่ได้รับการตีพิมพ์วารสาร**

**International Journal of Innovative Computing,**

**Information and Control (IJICIC)**

## A RUBBER TREE ORCHARD MAPPING METHOD VIA IMAGE PROCESSING

WORAWUT KUNGHUN AND AKAPOT TANTRAPIWAT

Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
1, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
{ 59601321; akapot.ta }@kmitl.ac.th

Received November 2021; revised March 2022

**ABSTRACT.** *This research was carried out in order to evaluate the performance of a computer visual mapping method using permanent targets mounted on the tree trunks as the distinctive marks to the environment. Two targets per tree trunk were used to create sufficient target perception from a distance. The computer vision uses the known distance between these two targets to determine the location of the camera using pin-hole camera principle. The system was designed based on configurations of the rubber tree orchard which is one of the main industrial crops in South East Asia. A set of experiment was carried out on both laboratory and real plantation site. With different parameters and setup, the mapping system was able to achieve the RMS maximum error 43.06 mm in laboratory control environment and 114.57 mm in actual site. This magnitude of error was considered acceptable in low accuracy autonomous operation in automatic agricultural tasks such as watering, fertilization and harvest. Several aspects regarding parameters in the mapping method setup and the outcome were discussed and compared.*

**Keywords:** Mapping, Navigation, Rubber tree orchard, Image processing

**1. Introduction.** Rubber tree is a perennial plant that can live for over two years, making it a perfect cash crop. This particular plant plays a major role in generating income and has a huge impact on the lifestyles of the population of rural areas in Thailand, specifically in the southern part of the country. Moreover, since 1991, Thailand has been the largest rubber producer in the world, and it plays a significant role as the main exporter of rubber [1,2]. The demand for rubber has increased, which has affected the price; based on movements in the rubber prices at the Hat Yai Central Rubber Market, located in the southern part of Thailand, the average price of ribbed smoked sheets-3 (RSS3) in 2021 was 45-70 THB/kg. Over the past few decades, the price has increased steadily, which led, in February 2009, to the highest average price for RSS3: 146 THB/kg. The RSS3 price, from 2002-2011, grew by around 15 percent per year. In fact, rubber prices depend considerably on the global market and futures markets such as the Tokyo Commodity Exchange (TOCOM), the Singapore Commodity Exchange (SICOM), and the Future Exchange of Thailand (AFET) [3]. Therefore, the Thai government does not have the power to control or influence rubber prices. Even though Thailand is the largest rubber producer in the world, it still has little or no bargaining power due to variations in rubber prices and uncertainties about the income level of farmers and labor cost trends. In addition, Thailand's rubber industries are struggling due to low profits and high labor costs. Moving on to the process of production, harvesting latex sap is tedious work that requires large amounts of manpower, and the rubber trees must be maintained.

DOI: 10.24507/ijicic.18.04.xxx

To minimize these workloads and the costs associated with production, automation for the rubber tree orchards will be increasingly involved in the agricultural system. The most important part of designing an autonomic vehicle that can be used in rubber tree orchards is designing a navigation system to allow the vehicle to move around. This is considered one of the most important factors due to the complicated topography of the plantations that the vehicle needs to traverse. Moreover, it is also challenging to design a low-cost system that is affordable for farmers. Therefore, choosing the right navigation technology is critical; this research will now describe the various navigation system technologies that have been adopted to solve this problem.

In recent years, sensors, global positioning systems (GPSs), LiDAR, laser scanners, and ultrasonic geometrical measurements have been employed in automatic vehicles for agricultural systems. These technologies have been improved to further study the autonomous navigation of robots in rough topography. Autonomous navigation and orchard mapping have been studied and tested for many applications. Bayar et al. developed a novel model-based control strategy for a self-driving agricultural vehicle that works in fruit tree orchards. The method relies on data from a planar laser scanner, as well as wheel and steering encoders, for location estimation and path following, unlike other methods that use data from GPS signals [4]. In a simulated tree plantation nursery, Khot et al. developed a sensor fusion technique for determining the navigational posture of a skid-steered mobile robot. The robot's location and orientation were determined using real-time kinematic GPS (RTK-GPS) and dynamic measurement unit (DMU) sensors [5]. Keicher and Seufert also designed an agricultural vehicle guidance system. Several sensors, including mechanical, global navigation satellite system (GNSS), machine vision, laser triangulation, ultrasonic, and geomagnetic sensors, were used to generate position, attitude, and direction-of-movement information for control algorithms [6]. For simpler terrain configurations and using fewer sensors, Barawid Jr. et al. created an automatic guidance system capable of guiding an autonomous vehicle between tree rows in real time. They used a laser scanner as a navigation sensor and concentrated primarily on the straight-line detection of tree rows [7]. Liu et al. developed a tightly coupled integrated navigation system for unmanned ground vehicles (UGVs) that integrates two-dimensional (2D) LiDAR, an inertial navigation system (INS), and odometry. An efficient LiDAR-based line-feature detection/tracking technique is developed to assess the relative changes in the orientation and displacement of the vehicle [8]. Li et al. reviewed guidance technology research for agricultural autonomous vehicles and mapping; GPS, machine vision, dead-reckoning sensors, laser-based sensors, inertial sensors, and geomagnetic direction sensors are some examples of the most commonly used techniques. To extract features and important data, they applied computational approaches to sensor information. The locations of the sensors and their accuracy were used to control the actuators in the steering and driving system for navigation [9]. Other approaches have used modern camera and image processing methods to perform mapping or to determine the location of a vehicle in an orchard. Shalal et al. showed that a machine vision system can be used as an alternative to navigation. However, the working environment or surroundings, including variations in the precise locations of the objectives, have an impact on this system. Furthermore, camera calibration, image analysis, and the feature extraction of navigation parameters are used to compensate for factors such as the lack of bright, and constant light sources. All of these factors make the implementation of autonomous vehicles in the agricultural setting more complex. When it is time for autonomous vehicles to get to work, they can easily move between tree rows. One of the most extensively used techniques for locating trees in a row is the data fusion of vision systems and laser scanners or LiDAR [10-12]. Benet and Lenain demonstrated that autonomous vehicles could recognize natural items

blocking or surrounding them, such as tree trunks, grass, and leaves. When navigation is performed using the fusion of sensor and camera data, detection is critical for safety reasons. When the vehicles encounter barriers, they must either cross or avoid them, with the exception of a large solid object; in this case, the vehicles must stop [13]. For a specific type of plantation, Xue et al. developed a novel, variable-field-of-view machine vision method that enables agricultural robots to travel between rows in cornfields. The method uses an image processing algorithm to recognize directed lines and engaging morphological characteristics in far, near, and lateral fields of view. Fuzzy logic control is used by the mobile robot to allow it to maneuver along the guided lines [14]. For rubber tree plantations, Zhang et al. developed a rubber-tapping robot with autonomous navigation and a gyroscope to collect information on a rubber forest. The sparse point cloud data of tree trunks are extracted using low-cost LiDAR and a gyroscope using the clustering method. The autonomous automobile traverses a given lateral distance along one row, stopping at fixed points, turning from one row to another, and gathering data on plant spacing, row spacing, and tree diameters [15]. Pirat et al. developed a method using a single monocular camera to distinguish LED signals from reflected sunlight. The innovative and simple formulation of the measurement equations allows the unambiguous identification of rotations from data translation between the target and chaser docking ports. The performance of lateral control by docking two CubeSats has an accuracy of less than 1 cm [16]. The method of using a camera with a fabricated vision environment therefore seems to be an alternative that allows one to obtain better accuracy without the use of multiple sensors. The method was tested in our previous, preliminary study in order to determine the parameters and configuration of a rubber tree plantation using the pin-hole camera method [17,18]. Although methods using high-performance sensors along with a digital camera are effective, other approaches using modern AI technology can be used to enhance the image processing of the images from the camera, and they make it unnecessary to use expensive sensors. Kim et al. created path detection for autonomous orchard travel. A patch-based convolutional neural network (CNN) is used in the proposed approach for image classification to achieve path area segmentation, which involves cropping image patches from an input image with a sliding window and generating a path score map with a four-layer CNN for tree and path classification, path area segmentation, and target path detection with boundary line determination [19]. Shin et al. developed practical preprocessing strategies for effective deep neural network training. A deep convolutional neural network extracts and detects the features of a region in an image for road crack detection and then classifies the image based on the features [20]. Fujiyoshi et al. demonstrated how deep learning is applied to each picture identification task, as well as describing deep learning-based autonomous driving and the associated problems [21]. Blok et al. validated the applicability of two probabilistic localization algorithms for in-row robot navigation in orchards using a 2D LiDAR scanner. This study focused on an orchard robot's in-row navigation and did not discuss autonomous turning or obstacle and headland detection [22]. While previously mentioned works either involve the use of advanced sensors or complicated image processing with artificial intelligence (AI) technology, which requires large datasets, other approaches utilize additional objects in the environment, such as targets or marks that are set up in the work field. These methods are effective when they are applied to certain types of environments, such as rubber tree orchards in which the trees are fully grown and the pattern of the plantation is suitable. Targets that are mounted on tree trunks can be easily maintained and made distinct from the surrounding environment. This simplifies image processing across a wide variety of landscapes and allows mapping to be done by using the trees directly.

In this research, the rubber tree orchard and plantation were studied. Their configurations were used to establish proper materials and methods for the computer visual mapping system. The mapping method using two permanent targets mounted on each tree trunk and the pin-hole camera principle was analyzed and implemented. This led to the establishment of orchard geometry and coordinate system in relation to the target positioning obtained from computer vision which used a series of image processing techniques to extract the targets from the environment. The geometry parameters were then examined and assigned their optimum values in experimentation which were done in both laboratory controlled environment and the actual plantation sites. The performance of the mapping system determined by average errors was measured and compared with different parameter setup.

## 2. Materials and Methods.

**2.1. Rubber tree plantation.** Rubber research and development are controlled by the Rubber Authority of Thailand, which advises local rubber farmers. As shown in Figure 1, rubber tree orchards have unique configurations, with trees typically planted in a row and column pattern. On certain terrains, such as steep hills or along a flat terrain, this pattern can be varied, but this is rare. The planting density is around 80 trees per Rai, which is the typical Thai farming area unit; it is equivalent to 1,600 m<sup>2</sup>. Each farmer has a different system of working in the orchard. Normally, farmers walk between the rows until they end, and then they walk between the columns for systematic collection. The ground vehicle path was designed to fit perfectly with each rubber tree orchard's unique characteristics, as shown in Figure 1(a). Sap is harvested from rubber trees by workers walking along the columns. Each column requires regular maintenance to simplify the daily collection process. The autonomous or mapping system must imitate this pattern. The plantation surveys were conducted on actual rubber plantation in Phrae Province, Northern Thailand. The orchard terrains are often flat, although some of the rubber farms may be grown in small inclined areas such as a foothill. Along the tree row, each tree is usually planted 3 m away from another. The diameters of the tree trunks varied from 120 to 200 mm. On a plantation site, many uncontrollable parameters such as the trunk straightness, rough planting sites, and the inconsistency of the light can affect

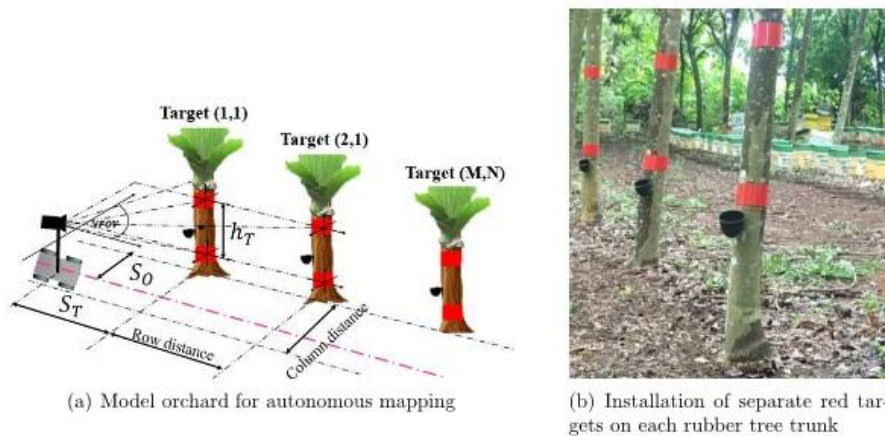


FIGURE 1. Rubber tree orchard

the navigation system. The straightness of the rubber tree trunk was an uncontrollable parameter affecting the calculations, where the mean stem inclination in randomized trials was approximately 3-10 degrees. These parameters were examined and compared when the system was tested in the laboratory in a controlled environment [17]. The orchard used in this research had conditions similar to those found in most rubber tree plantations in Thailand and Southeast Asia. The sap collecting container, shown in Figure 1(b), is placed higher than the ground level to hold the sap from the rubber tapping process. Traditionally, these containers are made of ceramic material, but plastic is now used as well. These containers can be used as one of the targets on the tree trunk if their colour and size are suitable. However, in this research, the targets were made by strapping two bands made out of sheet metal and painted red around the trunk, as shown in Figure 1(b). Both target straps were 100 mm wide and wound around the trunk's circumference. Other factors need to be considered when choosing the target material and the placement of the targets. These targets remain unprotected on the tree trunks for a long time; they may become dirty and covered by moss or weed. It is very important to keep the targets clean so that they can be detected by the camera, as shown in Figure 1(b). The size of the target is related to the ability of the camera to detect the target from a distance. Placing one large target on the tree trunk was not feasible, and two separate targets were used instead. There were two target distances used in this study, 500 and 700 mm. These two distances were obtained from the initial study. In that work, it was found that too small a distance between the two targets will result in less precision when the targets are further away from the camera. On the other hand, a distance that is too large causes parts of the targets to be out of frame when the camera is placed close to the targets. In the preliminary study, three target distances, 300, 500, and 700 mm, were studied. It was found that 300 mm was not a practical target distance due to the space limitations of the tree trunk; there must be enough space to allow the sap to be harvested. Moreover, a target distance of 700 mm will allow a camera with a vertical field of view (VFOV) of 43.30 degrees and a resolution of  $720 \times 1280$  pixels to detect both targets in the image frame when the camera is about 1 m away from the tree trunk.

**2.2. Camera visual localization using pinhole model technique.** To compute the position of the tree trunk using the camera, the common pinhole model was developed and used [17,18]. Figure 2 shows a diagram of the pinhole model comprising the target planes projected through the camera lens onto the sensors of the image plane. Modern digital cameras use Charge Coupled Device (CCD) sensors that can also be applied to other

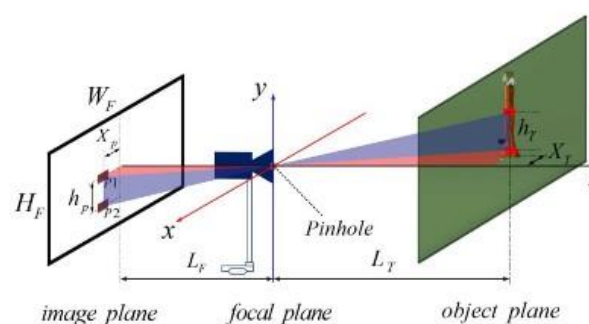
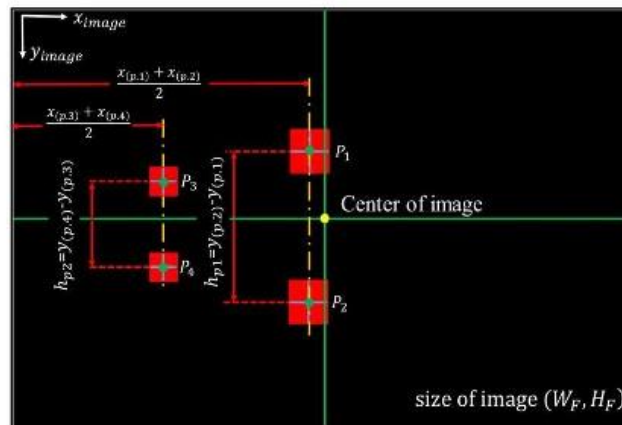


FIGURE 2. Pinhole camera model for target position estimation

types of images, such as X-ray images, scanned photographs from enlarged negatives, and scanned photographic negatives. The pinhole model of Figure 2 shows the relationship between the object plane and image plane according to the position of the tree trunk relative to the camera. The object plane has a parameter that is necessary for creating an orchard geometry model. The offset length between the camera and the tree row on the world coordinate system is based on farmers' movement through the tree rows. The separate red targets installed on each tree trunk specify each rubber tree trunk's position in the orchard. The red targets were recorded by a webcam, as shown in Figure 3(a), and they appear on the image plane shown in Figure 3(b). When a target of a known size is captured, the position of the image frame can be determined from the proportions of the



(a) Two separate targets on each rubber tree in an uncontrolled environment of an actual tree orchard



(b) Position of binary image frame  $(x, y)$  coordinate systems

FIGURE 3. Two separate red targets fixed on each rubber tree and projected on the image frame

image position and size according to the ratio of the triangles from both actual objects and image frames. The image position and size were measured in terms of the number of pixels. The vertical axis was used as the  $y$ -axis, and it was parallel to the tree trunk. The width of the image frame was used as the  $x$ -axis, which represented the distance between the tree trunk and another tree. The  $z$ -axis was placed perpendicular to the image frame. The distance between the image frame and the camera focal point, as well as the distance between the focal point and the tree trunk, lay on the  $z$ -axis. When a target of a known size is captured, the length  $L_T$  from the target to the pinhole, usually located in front of the camera lens, can be determined by

$$L_T = L_F \frac{h_T}{h_p} \quad (1)$$

The length between the lens and the sensor plane of the camera is written as  $L_F$ . The known height of the target lying vertically on the world coordinate is written as  $h_T$ , while  $h_p$ , as the height of the target in the image frame, is determined by the number of pixels in the  $y$ -direction of the image frame. Because a similar triangle was also applied for the  $x$ -axis, the distance between the reference point and the target can be determined in the same manner. In this geometry, the reference point was set at the center of the camera projection. Equation (2) was used for distance estimation in the  $x$ -direction:

$$X_T = X_p \frac{h_T}{h_p} \quad (2)$$

where  $X_T$  is the offset length between the camera and the tree row in the world coordinate system and  $X_p$  is the pixel length between the center of the image and the position of the target shown in the image frame in the horizontal direction. Equations (1) and (2) indicate that both  $X_T$  and  $L_T$  significantly depend on other factors, such as the camera configuration and the proportions of the image from the camera frame. Better distance estimation can be achieved by increasing the target size. The latex tapping process is performed on the tree trunk. If only one target is placed on each tree trunk, the relative distance of this target from the camera cannot be compared and converted to actual distances in the world coordinate system. When the camera moves further away from the object, the object's size becomes smaller, and when the camera approaches the object, the image becomes larger. It is necessary to have two targets to measure the pixel length between them using the image coordinate system. Thus, two separate targets were required; they resemble one large target at a distance. The orchard images, as shown in Figure 3(a), were captured and processed via a series of image processing techniques, and the positions of the two separate red targets on the image plane were then located. These two extracted red patches were then used to determine the actual tree position using Equations (1) and (2). Figure 3(b) shows the primary targets P1 and P2 on the image plane near the camera, and the secondary targets P3 and P4 are further from the camera. The camera follows the pathway of the rubber tree in Figure 3(a) and selects the nearest rubber tree trunk as its primary target.  $h_{p1}$ , as the pixel length in the  $y$ -direction, is found from the image frame and used to calculate the target-camera distance ( $S_T$ ) and the positions P1, P2 and P3, P4 in the  $x$ -direction; the average is needed because the tree trunk is not perfectly straight. The secondary targets used to identify the camera's orientation were obtained from Equation (6). The positioning data, as shown in Figure 3(b) on the image frame, must be converted into an orchard geometry model for vertical vision navigation to determine the camera direction. After the orchard image was captured, all red target images were extracted and converted to binary images, as described previously. It is important to establish the relationships between

the red patches in the images. Targets at greater distances produce smaller red patches, while each tree provides a pair of targets. The binary image displays the number of red patches in the frame, as shown in Figure 3(b). The mid-point between the red patches was recognized as the position of the rubber tree in the vertical image plane. In Figure 3(b), the horizontal positions, in pixels, of the targets in the image planes  $x_{(p,1)}$ ,  $x_{(p,2)}$ ,  $x_{(p,3)}$  and  $x_{(p,4)}$  are the pixel coordinates in the  $x$ -direction, while  $y_{(p,1)}$ ,  $y_{(p,2)}$ ,  $y_{(p,3)}$  and  $y_{(p,4)}$  are the vertical pixel positions in the  $y$ -direction. The height of a pixel  $h_{p1}$  can be calculated using the pixel positions  $y_{(p,1)}$  and  $y_{(p,2)}$ , which correspond to the far tree trunk, while the height  $h_{p2}$  can be calculated using the pixel positions  $y_{(p,3)}$  and  $y_{(p,4)}$ , which correspond to the nearer tree trunk.  $h_{p1}$ , as the pixel length in the  $y$ -direction, is shown in an image frame. The two separate red targets appear on the image nearest to the center of the image frame as P1 and P2 for the further targeted trees, as shown in Figure 3(b). The upcoming targeted tree trunk will then move closer to the center of the image frame. The conversion of positions P1 and P2, using information acquired by the pinhole model to determine the camera's position in the plantation site, can also be performed using the relationship between the horizontal vision navigation and the object plane. Figure 4 illustrates the horizontal model in the world coordinate system; this is also one of the vital angles for tracking the two separate red targets fixed on the rubber tree trunk. These two red targets were constructed of 0.35-mm-thick metal material to prevent damage from the humid environment, as shown in Figure 3(a). The red target plates had a width of 100 mm and were installed around the rubber tree trunk. To navigate the camera through the orchard, new coordinate parameters were established that are related to the tree row and column geometry. As stated earlier, rubber collection is usually conducted along the tree rows. Therefore, the navigation and mapping processes were created using the same configuration. Figure 4 shows the target-camera distance parallel to the tree row ( $S_T$ ) and the offset distance between the camera and the tree row ( $S_O$ ) as independent parameters that can be calculated by inputting the target and orchard fixed parameters together with the camera orientation in relation to the tree row ( $\theta$ ). The camera pinhole method can locate the target regardless of the orchard geometry. When the primary and secondary targets, known by their positions in a given row of the orchard, were captured and their positions in the image frame were determined, the target-camera distance,  $S_T$ , was obtained from Equation (3):

$$S_T = \frac{\{h_T \cdot [L_F \cdot \cos(\theta) + |(\frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2})| \cdot \sin(\theta)]\}}{(y_{(p,2)} - y_{(p,1)})} \quad (3)$$

In the same manner, the offset distance,  $S_O$ , was calculated using the following equations:

$$S_O = \frac{\sqrt{2} \cdot h_T \cdot \sqrt{L_F^2 + P_i^2 - L_F^2 \cdot \cos(2\theta) + P_i^2 \cdot \cos(2\theta) - 2 \cdot L_F \cdot |P_i| \cdot \sin(2\theta)}}{2 \cdot (y_{(p,2)} - y_{(p,1)})} \quad (4)$$

and

$$P_i = \left( \frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \quad (5)$$

The camera orientation relative to the tree row,  $\theta$ , is a fixed parameter in Figure 4 and should be assigned a proper value. If this angle is too small, the camera will point along the tree row and the targets will enter the image frame from a far distance. In other words, the targets will enter the image frame too soon. This will result in difficulty evaluating the size of the targets because they are too small. By contrast, if  $\theta$  is too large, the camera will point in the direction of the tree column or perpendicular to the tree row. The target will enter the image frame too slowly. In other words, the camera has

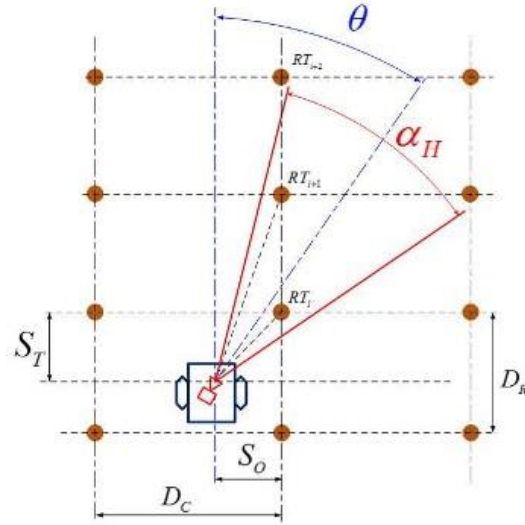


FIGURE 4. Horizontal vision mapping object plane of the orchard geometry model

to move closer to the target before it can enter the image frame. This configuration will decrease the ability of the method to determine the camera's distance from the targets. When navigating the camera along the tree row, it is impossible to maintain the camera orientation at all times. Alternate angles of the camera will affect the target detection, as previously described. It is more convenient to establish a dependent parameter that can identify the orientation of the camera relative to the initial fixed angle. The relative orientation  $\theta_C$  can be used as the navigating orientation, and it is determined based on the orchard and target fixed parameters together with the fixed orientation,  $\theta$ , as shown by Equation (6). The target perception ability and orchard mapping ability are greatly dependent on  $\theta$ . In reverse, the optimal  $\theta$  should be chosen depending on the camera's field of view in the horizontal direction, the orchard row and column distances, and the target height in the vertical direction.

$$\theta_C = \theta - \sin^{-1} \left( \frac{h_T \cdot \left( \frac{1}{(y_{(p,4)} - y_{(p,3)})} \cdot (P_{i-1}) - \frac{1}{(y_{(p,2)} - y_{(p,1)})} \cdot (P_i) \right)}{D_R} \right) \quad (6)$$

when

$$P_i = \left( \frac{x_{(p,1)}}{2} + \frac{x_{(p,2)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \quad (7)$$

$$P_{i-1} = \left( \frac{x_{(p,3)}}{2} + \frac{x_{(p,4)}}{2} - \frac{W_F}{2} \right) \quad (8)$$

As mentioned earlier, the distance between the two targets on the tree trunk plays an important role in the determination of the target distance. The distances between the two targets were studied and compared. The configuration of the vertical layout between the targets and the camera is shown in Figure 5. In this configuration, the camera is placed

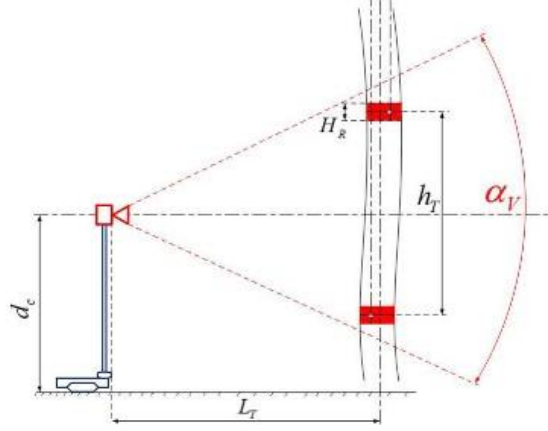


FIGURE 5. Vertical vision mapping object plane of the orchard geometry model

in the middle plane, and both the targets on the tree trunk are horizontally symmetric to the middle plane. The ideal configuration provides a relationship between the vertical image size in pixels and the two red targets installed on the rubber tree. The camera used to obtain such images must be able to cover the upper and lower vertical red targets mounted on the rubber tree. Each camera model has limitations in terms of its vertical field of view (VFOV). The length parameter  $L_T$  represents the distance of the target to the pinhole and the height of the target in the world coordinate system is written as  $h_T$ . This is a variable that must be calculated to ensure that the two red targets will both appear in the image; it can be estimated using Equation (9):

$$\alpha_V = 2 \tan^{-1} \left( \frac{(h_T + H_R)}{L_T \cdot \frac{h_T}{h_p}} \right) \quad (9)$$

**2.3. Image processing.** The location of rubber trees for field mapping is considered the physical appearance of the rubber tree. The color of the trunk of the rubber tree is very similar to the color of the surrounding environment. As previously described, the targets were mounted on the tree trunks. The image areas of these targets, classified as the region of interest (ROI), had a different color than the surrounding environment. The red target has a different color than the environment, as shown by the hexadecimal RGB code of this color. The red-green-blue components are (255, 0, 0). The red target represents the only major color difference visible in the environment, although the environment of the rubber plantation changes with the seasons. The detected red targets were also used to calculate the image frame's height parameter for object distance estimation in the orchard geometry model using Equations (3) and (4). Images of the separate red targets were recorded by a webcam, a Logitech C 920 camera. This camera can record real-time video at a resolution of  $720 \times 1280$  pixels with a frame rate of 30 FPS, a horizontal field of view (HFOV) of 70.42 degrees, and a vertical field of view (VFOV) of 43.30 degrees. Figure 6(a) shows the two separate red targets on the tree trunk in the form of an RGB image, which is an image with a color system composed of the three primary colors: red, green, and blue. The red target is installed on a tree trunk in a real-world environment, and the red-green-blue component values do not conform to color theory. The actual red-green-blue component

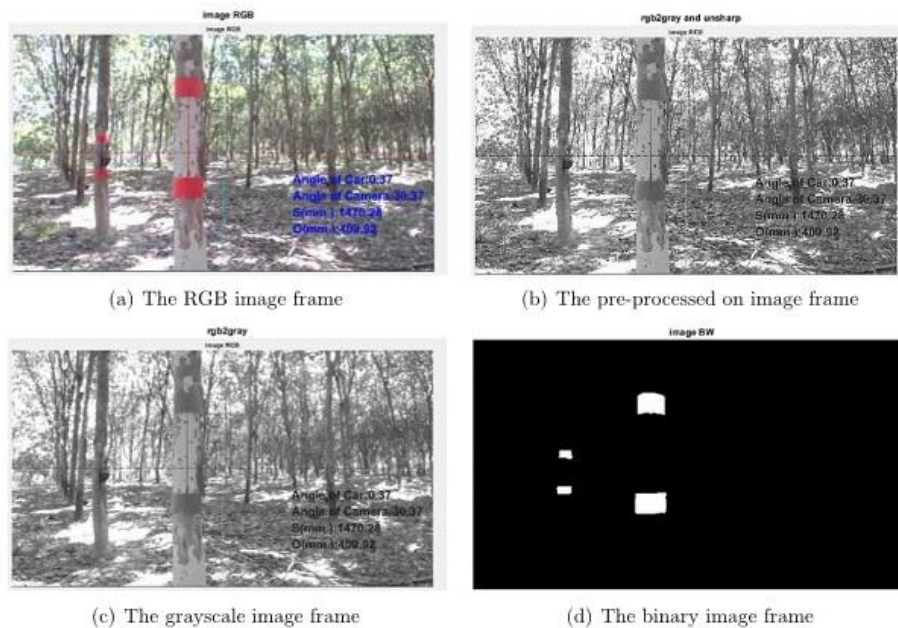


FIGURE 6. Image processing process detects the separated red targets

values in the actual environment are the following: red 170-255, green 50-100, and blue 50-200. This is because lighting conditions throughout the orchard are not equal. The images received directly from the webcam required enhancement to better identify the targets. A series of image processing techniques were used to sharpen the images. These methods include the unsharp masking system (USM). As shown in Figure 6(a), each frame of the received real-time webcam video has a different brightness level, so we need to increase the sharpness of the images. At a frame rate of 30 FPS, we use the snap image processing technique. There are changes in both the laboratory and orchard environments at all times. As a result, each image has a different brightness level at the beginning of the image processing pipeline. Figure 6(b) shows an image that has been sharpened by increasing the contrast at the edges of each pixel using the USM technique with a Gaussian low-pass filter with a standard deviation of 1. This argument controls the size of the region around the edge pixels that is affected by the sharpening. A large value sharpens wider regions around the edges, whereas a small value sharpens narrower regions around the edges. The image was also converted into grayscale, as shown in Figure 6(c), with a color intensity from 0-255 (8 bit). The image frame converts RGB values to grayscale values by performing a weighted sum of the R, G, and B components. The coefficients used in calculation of grayscale values are identical to the luminance calculation which is a part of ITU-R BT.601-7 in the recommendation of International Telecommunication Union Radio communication Sector (ITU-R). These values were determined and rounded into three decimal places. After each pixel in the entire image ( $720 \times 1280$  pixels) has been converted to grayscale, Rec.ITU-R BT.601-7 calculates a weighted sum: R has a weight of 0.299, G has a weight of 0.587, and B has a weight of 0.114. After the areas of the two red targets were determined, the grayscale images were converted into a binary

form containing two intensities, 0 and 1. Any pixel with the value of 0 was displayed in black, while any pixel with a value of 1 was shown in white. The binary image defines a referenced gray intensity value known as the threshold value. As shown in Figure 6(d), this value was obtained by averaging at 90-115 possible different shades of gray from black to white for this specific application. The gray concentration was adjusted over time depending on the lighting conditions, especially in the red target area. The rubber tree is detected using the image processing and conversion process described previously; the rubber tree appears in the image frame at various positions depending on the actual location of the rubber tree relative to the camera's position. The size of the target on the rubber tree that can be detected depends on the distance from the target to the camera. In fact, the image processing pipeline in use can detect many targets in the real rubber plantation area. However, the two targets, or trees, that are closest to the camera will be used to map the camera's position. The sizes of the largest targets in the two frames are determined and compared to all binary images of the area so that the target as close to the camera as possible can be selected from the total number of targets. Mapping the locations of trees in the rubber plantation allows us to locate the camera because the rubber plantation is laid out in a row pattern, and the camera moves along the rows of rubber trees in order to be able to see the targets. Therefore, it is necessary to mount the camera so that it faces toward a given rubber tree, which will result in the camera being at an angle relative to the row line of the rubber tree, as shown in Figure 4. Figure 6(d) depicts a binary image of a rubber tree. The first set of targets near the center of the image represents a rubber tree near the camera. The second set of targets, further away from the center of the picture, represents a rubber tree that is further away from the camera. The target detection method only works for a maximum distance of 6 m from the target rubber tree, so the camera can see two target trees and calculate the distance between them. This image processing system determines the center of the white positions shown in the binary image, as depicted in Figure 6(d). The two white positions near the center of the image frame represent the tree trunk near the camera, and the two white positions that are further away represent the tree trunk that is further from the camera. The positions P1, P2, P3, and P4 in Figure 3(b) are also shown in Figure 6(d); these positions were previously used to calculate the pixel length ( $h_P$ ) for the equation representing the orchard geometry model.

**3. Experimentation.** It is important to test the mapping system's performance and accuracy; the parameters  $S_O$  and  $S_T$  in the image processing algorithm are important for navigating real rubber plantations. Experiments were performed to compare the results from the laboratory and the results from a real rubber tree orchard. First, experiments were performed in the laboratory with controllable parameters, such as upright rubber tree trunks, a constant amount of light, and flat surface areas. Second, experiments were performed in an uncontrollable environment, a real rubber tree orchard. The difference is that the parameters in the actual rubber tree orchard cannot be controlled in the same way that parameters used in the laboratory can be controlled. The area in the natural rubber plantation to be used as the experimental area was randomly selected. In the laboratory, the rubber tree trunk mockup and areas for testing were designed to be similar to the rubber tree orchard. The laboratory had a replica of a rubber tree; the trunk was made of plastic, as shown in Figure 7(a). The trunk had a diameter of 125 mm, and the red targets were installed on the replica tree, as shown in Figure 7(b). The red targets were made of 0.5-mm-thick sheet metal and installed by wrapping them around the mockup tree. The height and width of the red target are 100 and 125 mm, respectively. Furthermore, the two red targets were installed at distances of 500 and 700 mm, respectively. The

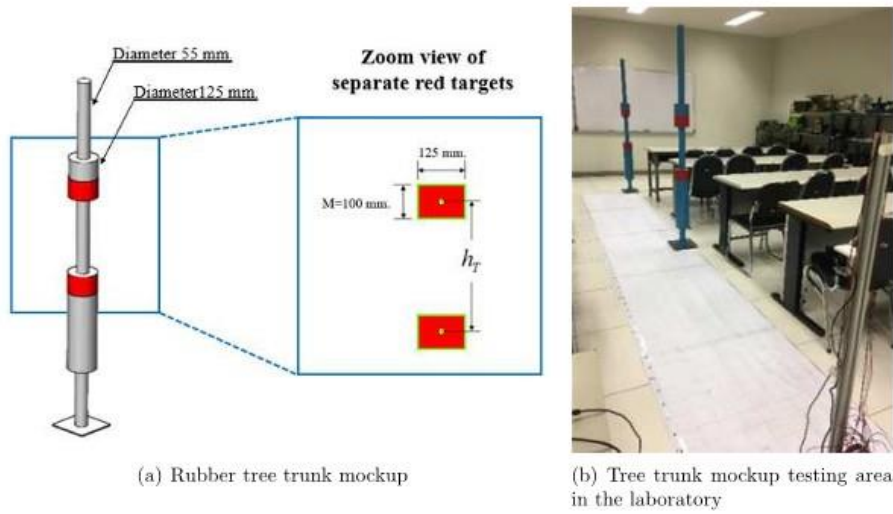


FIGURE 7. Testing area using world coordinate in the laboratory

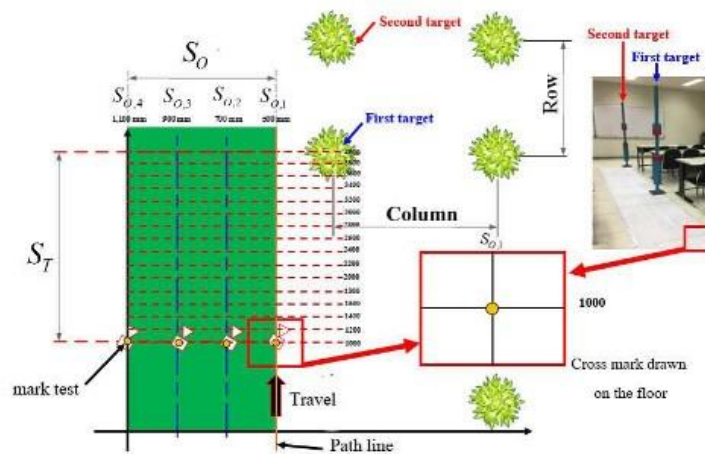


FIGURE 8. Experimental layout used during laboratory testing

installed red targets should be consistent with the height of the rubber tree, and the heights considered should be consistent with the height of the actual rubber tapping area on a real rubber tree. The experiment involves moving the camera along the rows of simulated rubber trees. This lab experiment creates a virtual test area to determine how the cameras should move along the line of trees. The test site is built based on the actual distance between sets of coordinates on a flat area; a marking pen was used to draw a tile grid on the floor. Figure 7(b) shows the setup used to measure the actual distance to the ground to know how far the camera moves from the target rubber tree. The coordinate system used is similar to that of the rubber tree orchard in the previous section (Figure 8).

Inside the  $4 \times 1.1$  m test area, 64 positions representing grid intersections with intervals of 0.2 m were designated. The vehicle velocity system will be designed in the future with a speed of approximately 0.2-0.3 m/s, which is a reasonable movement speed for a vehicle working in a rubber plantation. In the experimental setup depicted in Figure 8, the tracking performance of the image processing method along the path line was evaluated by changing the separation of the red targets to 0.5 and 0.7 m. In the course of the laboratory experiments, 64 position values were obtained by approximation using an image processing algorithm. Such experiments are evaluated to determine the error of the mapping method. The proposed marking system had a satisfactory performance in the laboratory, and it was then tested at a rubber tree orchard, as shown in Figure 9(a). The coordinate system setup was similar to that described in the previous section. Inside the  $4 \times 1.1$  m test area, 64 positions representing grid intersections, with intervals

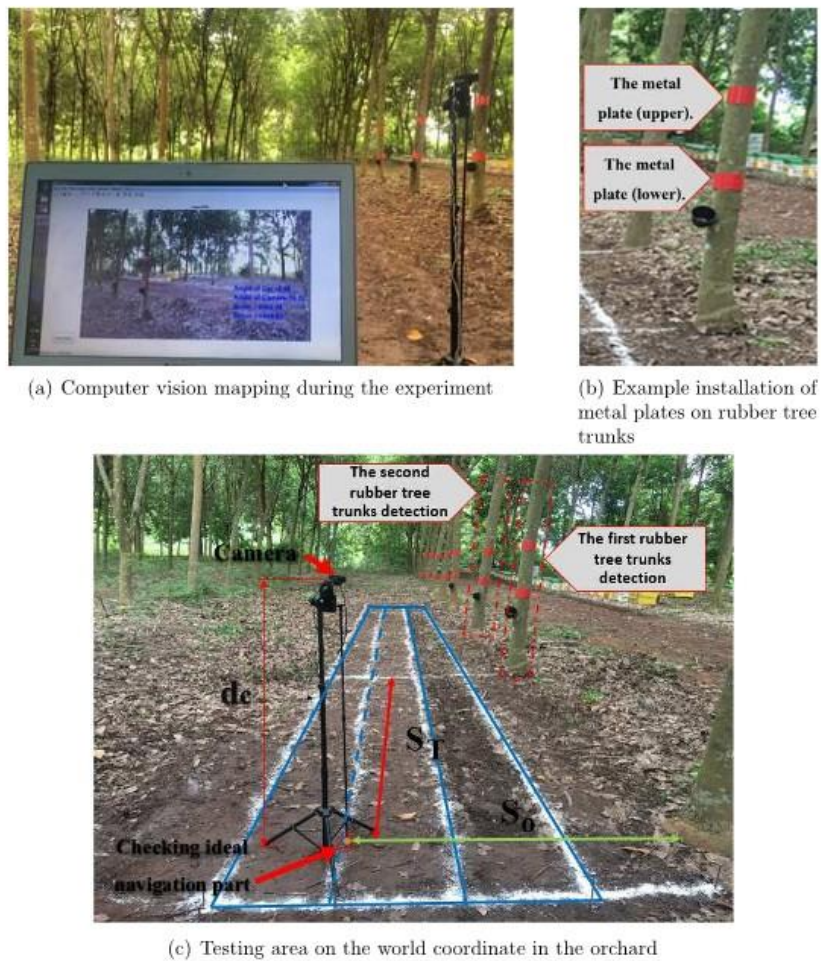


FIGURE 9. Orchard experimental setup in the orchard

of 0.2 m, were designated. Each rubber tree was equipped with two red metal plates, as shown in Figure 9(b). The two separate red targets did not interfere with rubber tapping collection. As shown in Figure 9(c), the camera was set up to receive images for processing. The camera was installed at the center of the two separate red targets. In a real rubber plantation, the ground is rough, with uneven platform conditions in the test area. Preparation of the test area was performed by using a small string to create real distances in real-world coordinates. The method used to measure the distances was the same as that used in the laboratory experiments, as shown in Figure 8. A plantation in Northern Thailand (18°07'00.0"N, 100°09'00.0"E) was selected as the testing site. The experiments took place between 7:00 and 11:00 am to be consistent with harvesting and to allow the rubber planters to carry out various tasks. The experiments shown in Figure 10 are meant to measure the accuracy of the navigating system, which involves using image processing and the orchard geometry to guide autonomous vehicles in rubber tree plantations. The trials are not dependent upon the use of sensor technology for navigation. This study carried out a comparison between a laboratory experiment and an experiment in a real rubber field. The experiment will focus on navigability and controllable and uncontrollable external factors, such as stable and unstable quantities, flat and uneven ground conditions, and the straightness of the rubber trees. Therefore, the effects of these factors must be tested so that the errors caused by the tested parameters will be known in the future. The variables  $S_O$  and  $S_T$  were the variables that we needed to test by comparing laboratory experiments with experiments at real rubber plantation sites; these experiments will measure the error of the developed system. From Equations (1) and (2), there are two variables,  $X_p$  and  $h_p$ , that are directly obtained from the mapping process, and the following environmental effects must be considered: lighting conditions, the resolution of the camera, and the flatness of the ground. These must be woven together to ensure that such a system can still perform mapping, which in turn can be used for the navigation of the system in the future. The goal of this system is to reduce costs for farmers and perform actual navigation.

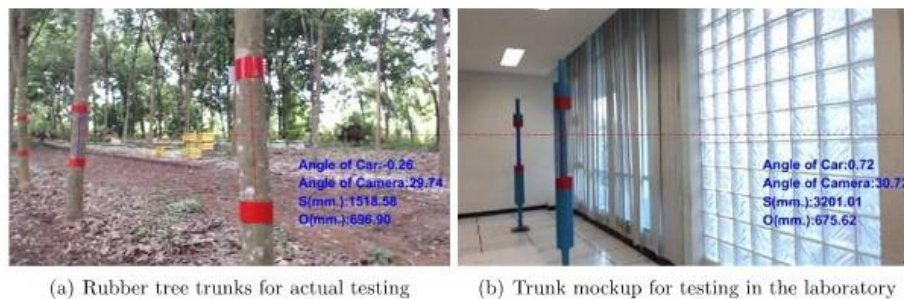


FIGURE 10. Red targets installed on each rubber tree trunk for testing

**4. Results and Discussion.** From Equations (3) and (4), the variables  $S_O$  and  $S_T$  are used for mapping; these equations are generated from the orchard geometry model. Comparing them allows us to analyze the real factors that caused the obtained errors. The results, as shown in Figure 11 and Figure 12, track the performance of the image processing algorithm in mapping a rubber tree orchard. This is a comparison of the system's performance in the laboratory and on the plantation. It can be clearly seen that the magnitude of the error of the image processing algorithm system was different

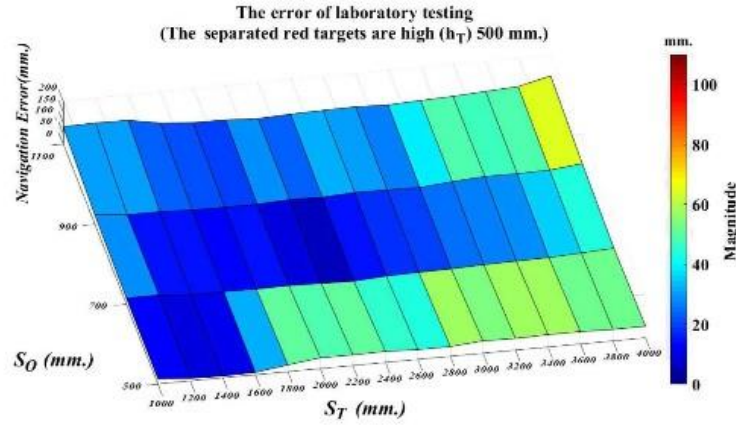
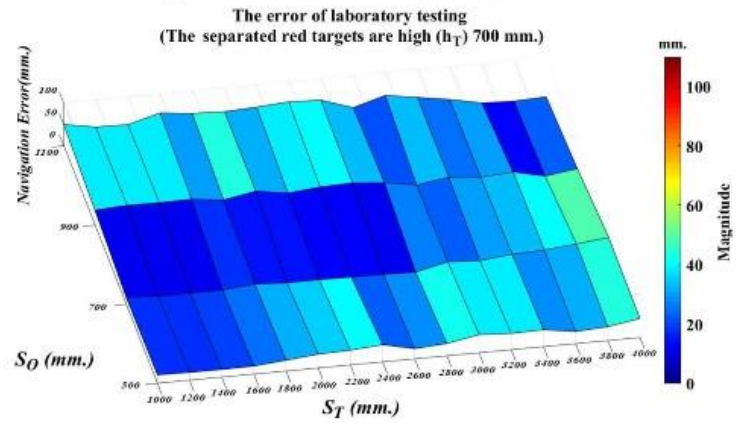
(a) The two separate red targets  $h_T$  by 500 mm(b) The two separate red targets  $h_T$  by 700 mm

FIGURE 11. (color online) The magnitude of error in area testing for controlled environment (laboratory testing)

throughout the testing area. We propose using error space indicators from area navigation in the rubber tree orchard to estimate the error space of navigating using the image processing system. We define an error space indicator to evaluate the quality of the area grid and the position error. The parameters used to measure  $S_O$  and  $S_T$  were tested using the value of the magnitude of the space error. The error space is shown in Figure 11 and Figure 12. These figures show the trend of error values in the test area, and they include data from 46 error points in an area of  $4.4 \text{ m}^2$ . The magnitudes of the error values are displayed in 3-D graphs with  $S_O$ ,  $S_T$ , and mapping error axes.

Figure 11 shows the magnitude of error in area testing for a controlled environment (laboratory testing). The heights of the targets are 500 mm and 700 mm, respectively. The error space is smooth, indicating a constant error. However, the magnitude of the error varies across the 46 measured positions in the test area. When the target height is

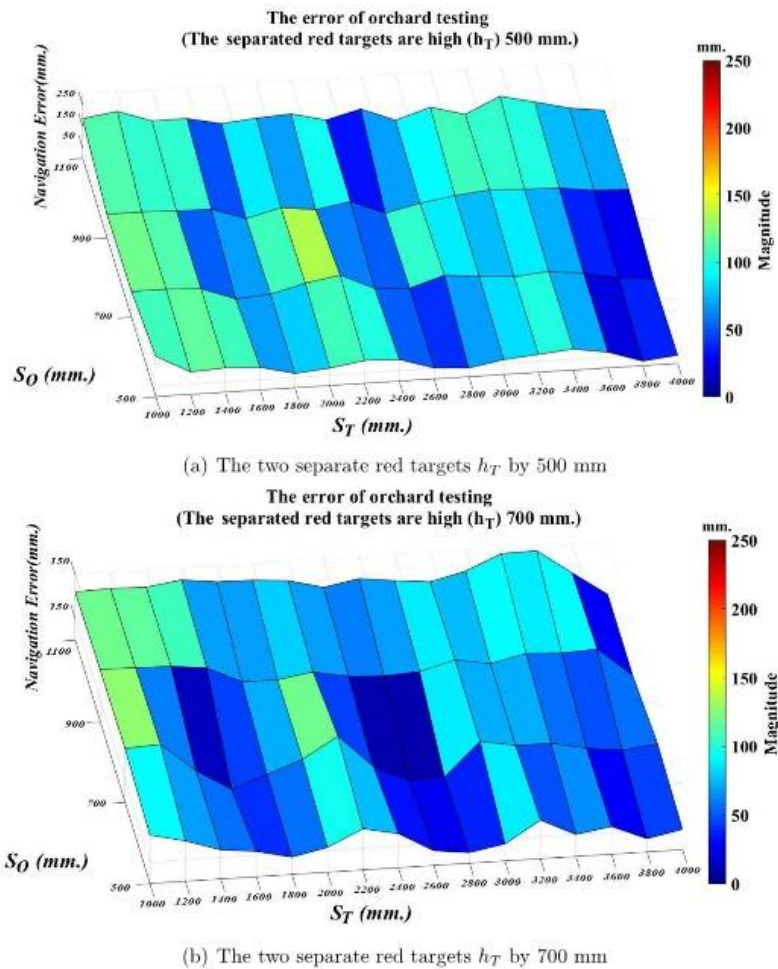


FIGURE 12. (color online) The magnitude of error in area testing for controlled environment (orchard testing)

700 mm, the error values are smaller than when the target height is 500 mm, as shown in Figures 11(a) and 11(b), respectively. The experiment shows that in a controlled environment (laboratory testing), the method performs in a satisfactory manner. This experiment was compared with an experiment in a real rubber tree orchard to show how different factors affect the mapping system. Figure 12 shows the error space for an uncontrolled environment (orchard testing). The error values at the 46 locations differ in size from those of the laboratory experiment, as shown in Figures 12(a) and 12(b). The error values for the rubber tree orchard are different at each measurement point. In an uncontrolled environment, the main factor that increases the error is the unstable lighting conditions at different times. The results are consistent with laboratory experiments: the average error is greater when the height of the target is 500 mm and

it is smaller when the height of the target is 700 mm. The error space for navigation using the image processing system shows that the presented strategy allows one to obtain accurate solutions in an efficient way. The reason behind this is related to the rubber tree plantation site, since it has different lighting conditions when compared to the controlled environment. The real rubber tree shown in Figure 10(a) is not perfectly straight, while the mockup in the laboratory shown in Figure 10(b) is perfectly straight. The performance of the navigating system was tested by using two different length between the separated red targets: 500 and 700 mm. The parameters used to demonstrate the efficiency of the method are the maximum error and the root mean square error, which represents the mean squared error in the experimental area. The performance of the mapping system shown in Figure 13 indicates that when the camera was far from the test target, more errors occurred compared to when the camera was near the target. In a controlled environment such as the laboratory, the navigation error was much smaller than in an uncontrolled environment. The camera moved along one row and the root mean square error (RMS) of the mapping performance was calculated using controlled environment tests. The length between the two targets at different separation lengths of 500 and 700 mm were measured RMS difference from 43.06 mm and 32.42 mm, respectively, showing that the method had excellent path tracking performance. The RMS was used to compare the two targets with different separated lengths 500 mm is 1.33 times more than 700 mm. The maximum error was coherent with the root mean square error, while the two different separate lengths gave maximum errors of 100.26 mm and 55.55 mm, respectively. As shown in Figure 14, for the orchard testing case, the RMS was calculated for the two different target separation lengths of 500 and 700 mm, and was obtained at 114.57 mm and 99.82 mm respectively. It can be seen that the error from smaller target distance, 500 mm, results in 115% greater than the average error obtained from target distance at 700 mm. When considering the maximum errors throughout the test area, as shown in Figure 12, the 500 mm target distance produced error at 258.62 mm, while the 700 mm target distance gave 198.82 mm of the maximum error. In a controlled environment, the errors had smaller variation throughout the test plane, while in an uncontrolled environment, the fluctuation seems to increase significantly, but the error values were considered acceptable. From the experimental results shown in Figure 13 and Figure 14, we predicted the trend of the navigation error as a 2D image. This will allow us to compensate for future errors as the autonomous vehicle moves through the rubber tree orchard.

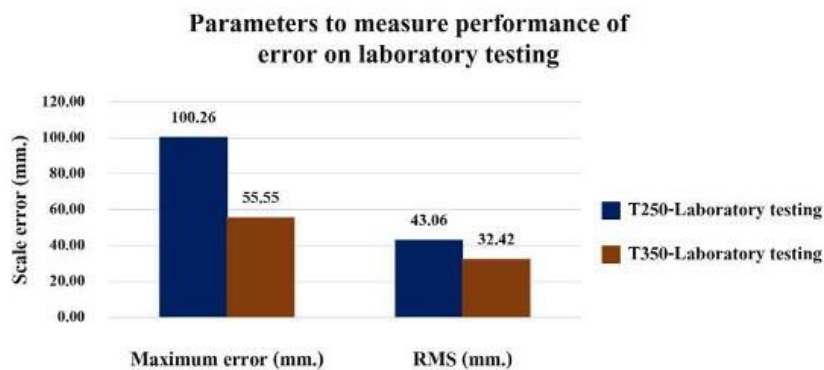


FIGURE 13. Mapping performance results in laboratory testing

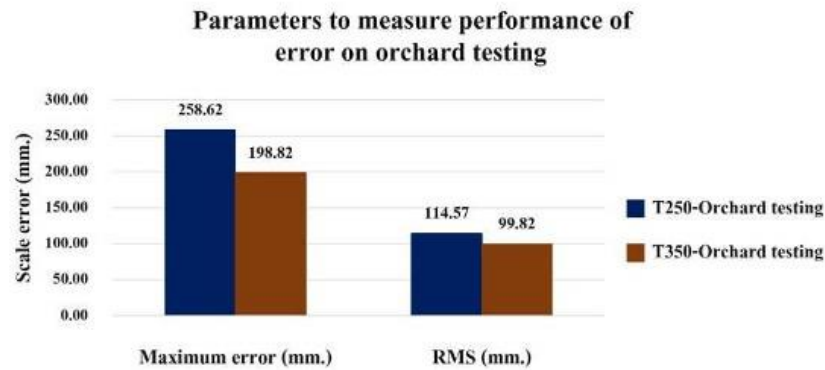


FIGURE 14. Mapping performance results in orchard testing

5. **Conclusion.** Previous researches used the following technologies to find objects in an orchard environment: sensor technology, such as laser scanners and LiDAR sensors, GPS, image processing, and artificial intelligence (AI). Then, the location of the object was converted periodically for navigation. The most accurate approach is to use a sensor technology system, but the cost is relatively high, approximately 90-13,000 USD. These prices are referenced by the brand SICK's Sensor Solutions, which is a leader in sensor intelligence and application solutions, and they are widely used in this industry. The price depends on the accuracy of the system, the ability of the system to search for objects, and other technical capabilities that are necessary for a navigation system for an autonomous agricultural vehicle. This would result in the cost being high for autonomous systems. Image processing technology has been applied to a variety of engineering solutions. Compared to sensor technology, image processing can be used to develop a very cheap navigation system. An image processing system is less accurate than sensor technology. However, image processing technology has another disadvantage. It needs to be tested in an environment that can be used to adjust the threshold variable. Previous studies have presented an error rate of no more than 15 cm in the image processing pipeline [14]. To extract the ROI from the image processing system, image conversion techniques are used. The location of the object of interest is then displayed. Computers are now cheaper and more efficient, which is why AI technology is used to find objects in images [19,21]. AI technology provides a number of advantages, including the elimination of the requirement for a processing procedure; however, the disadvantage is that we have to use large number of images to properly train the model to perform in a given environment. We propose the method described in this research because, when compared to previous methods, it has the following advantages: the cost of using it for automation in the orchard is cheap, and it uses less processing hardware and software. When compared to sensor technology, this method does have a larger error value. Although this error seems to be large, the mapping method is still feasible. Because an autonomous system for agriculture can be designed for low-speed tasks, the vast area of an orchard can also provide marginal space to compensate for this magnitude of errors.

The orchard mapping method from this research has effectively estimated position of the camera in relation to the target distance ( $S_T$ ) along the tree row and the offset distance ( $S_O$ ) to the tree row. These two measured distances can be used to navigate through the orchard by a suitable autonomous system. In the actual plantation site, the errors were

double in comparison to the laboratory experiment. It was caused by the uncontrollable environment, such as flat terrain, consistent target position, bright and constant light sources, and the errors from the parameters that were converted to cooperate with the geometrical position in the rubber tree orchard. The magnitudes of errors in the  $S_T$ -direction and  $S_O$ -direction were large, but effective navigation of the autonomous vehicle in the rubber tree orchard was still feasible. Future studies can design autonomous vehicles using a navigating system that accounts for hills and uneven ground to study the effect of movement velocity on real-time position accuracy. The navigating system needs to compensate for terrain uncertainty. The rubber tree orchard algorithm was shown to be consistent with the actual rubber tree orchard environment and showed promise for reliable mobile robot localization and navigation in the future.

#### REFERENCES

- [1] Rubber Authority of Thailand, Rubber Research Institution of Thailand, *Thai Rubber Statistics*, <http://www.rubber.co.th>, Accessed on October 8, 2021.
- [2] C. Musikavong and S. H. Gheewala, Ecological footprint assessment towards eco-efficient oil palm and rubber plantations in Thailand, *Journal of Cleaner Production*, vol.140, no.2, pp.581-589, 2017.
- [3] A.Romyen, P. Sausue and S. Charenjiratragul, Investigation of rubber-based intercropping system in Southern Thailand, *Kasetsart Journal of Social Sciences*, vol.39, no.1, pp.135-142, 2018.
- [4] G. Bayar, M. Bergerman, A. B. Koku and E. I. Konukseven, Localization and control of an autonomous orchard vehicle, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.115, pp.118-128, 2015.
- [5] L. R. Khot, L. Tang, S. Blackmore and M. Nørremark, Navigational context recognition for an autonomous robot in a simulated tree plantation, *Bioresource and Agricultural Engineering*, vol.49, no.5, pp.1579-1588, 2006.
- [6] R. Keicher and H. Seufert, Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.25, nos.1-2, pp.169-194, 2000.
- [7] O. C. Barawid Jr., A. Mizushima, K. Ishii and N. Noguchi, Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application, *Biosystems Engineering*, vol.96, no.2, pp.139-149, 2006.
- [8] S. Liu, M. M. Atia, T. B. Karamat and A. Noureldin, A LiDAR-aided indoor navigation system for UGVs, *The Journal of Navigation*, vol.68, no.2, pp.253-273, 2015.
- [9] M. Li, K. Imou, K. Wakabayashi and S. Yokoyama, Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol.2, no.3, pp.1-16, 2009.
- [10] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy and N. Hancock, A preliminary evaluation of vision and laser sensing for tree trunk detection and orchard mapping, *Proc. of Australasian Conference on Robotics and Automation*, University of New South Wales, Sydney Australia, 2013.
- [11] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy and N. Hancock, Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part A: Tree detection, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.119, pp.254-266, 2015.
- [12] N. Shalal, T. Low, C. McCarthy and N. Hancock, Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion – Part B: Mapping and localisation, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.119, pp.267-278, 2015.
- [13] B. Benet and R. Lenain, Multi-sensor fusion method for crop row tracking and traversability operations, *Proc. of AXEMA-EURAGENG Conference*, Paris, France, 2017.
- [14] J. Xue, L. Zhang and T. E. Grift, Variable field-of-view machine vision based row guidance of an agricultural robot, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.84, pp.85-91, 2012.
- [15] C. Zhang, L. Yong, Y. Chen, S. Zhang, L. Ge, S. Wang and W. Li, A rubber-tapping robot forest navigation, *Sensors Journal*, vol.19, 2019.
- [16] C. Pirat, F. Ankersen, R. Walker and V. Gassa, Vision based navigation for autonomous cooperative docking of CubeSats, *Acta Astronautica*, vol.146, pp.418-434, 2018.
- [17] W. Kunghun and A. Tantrapiwat, Development of a vision based mapping in rubber tree orchard, *Proc. of the 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST2018)*, Phuket, Thailand, pp.206-209, 2018.

- [18] W. Kunghun, A. Tantrapiwat and P. Chaidilokpattanakul, Navigation of autonomous vehicle for rubber tree orchard, *Proc. of the 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST2019)*, Luang Prabang, Lao PDR, pp.252-255, 2019.
- [19] W.-S. Kim, D.-H. Lee, Y.-J. Kim, T. Kim, R.-Y. Hwang and H.-J. Lee, Path detection for autonomous traveling in orchards using patch-based CNN, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.175, 2020.
- [20] Y. Shin, M. Kim, K.-W. Pak and D. Kim, Practical methods of image data preprocessing for enhancing the performance of deep learning based road crack detection, *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, vol.11, no.4, pp.373-379, 2020.
- [21] H. Fujiyoshi, T. Hirakawa and T. Yamashita, Deep learning-based image recognition for autonomous driving, *IATSS Research*, vol.43, no.4, pp.244-252, 2019.
- [22] P. M. Blok, K. van Boheemen, F. K. van Evert, J. IJsselmuiden and G.-H. Kim, Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.157, pp.261-269, 2019.
- [23] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd Edition, Cambridge University, 2003.
- [24] E. Trucco and A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, 2nd Edition, Prentice Hall, 1998.

### Author Biography



**Worawut Kunghun**, currently a Lecturer at the Robotics and Automation Engineering Department, Panyapiwat Institute of Management, is now pursuing his Ph.D. degree at the Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. He has more than 10 year experience in teaching and research in mechanical engineering relating mechanical design and automatic control systems.



**Akapot Tantrapiwat** received his Ph.D. in 2009 from Lehigh University, Pennsylvania, USA. He is currently working as a full time assistant professor at the Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His field of interests includes mechanical design, manufacturing and automation, AI technology in mechanical applications.

## ภาคผนวก ง

โค้ดโปรแกรม MATLAB สำหรับการประมวลผลภาพ

## ภาคผนวก ง

## การเขียนโปรแกรมเพื่อเก็บค่าพิกัดการทำงานจากการทดลอง

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all; close all; clc;
a = imaqhwinfo;
camera_name = char(a.InstalledAdaptors(end));
camera_info = imaqhwinfo(camera_name);
camera_id = camera_info.DeviceInfo.DeviceID(end);
resolution = char(camera_info.DeviceInfo.SupportedFormats(end));
vid = videoinput('winvideo', 1, 'MJPG_1280x720');
set(vid, 'FramesPerTrigger', Inf);
set(vid, 'ReturnedColorspace', 'rgb')
vid.FrameGrabInterval = 1;
src = getselectedsource(vid);
src.FocusMode = 'manual';
src.Focus = 10;
src.FrameRate = '30.0000';
ts = 0.0005;
i=0;
t=0;
avg=0;
Stop=1;
uicontrol('Style','Pushbutton','String','STOP SYSTEM','Position',[50 50
100 50],...
'Callback','Stop=0;')
start(vid)
while Stop
    img= getsnapshot(vid);
    H = fspecial('unsharp');
    sharpened = imfilter(img,H,'replicate');
    data=sharpened;
    gray1=rgb2gray(data);
    diff_im = imsubtract(data(:,:,1),gray1);
    diff_im = medfilt2(diff_im, [3 3]);
    diff_im = im2bw(diff_im,0.085);
    diff_im = bwareaopen(diff_im,150);
    bw = bwlabel(diff_im, 8);
    stats = regionprops('table',bw,'Centroid',...
'MajorAxisLength','MinorAxisLength','Orientation','Area','ConvexArea','Boun
dingBox');
    figure(1);
    imshow(img),imshow(img),title(' image RGB '), impixelinfo
    Area=stats.Area
    centers = stats.Centroid;

    diameters = mean([stats.MajorAxisLength stats.MinorAxisLength],2);
    [C,R] = size(data);
    Rmax=max(R)/3;
    Cmax=max(C);
    if (isempty(centers))
        x = zeros(2,1,'uint32');
        y = zeros(2,1,'uint32');

```

```

elseif not(isempty(centers))
    x=centers(:,1);
    y=centers(:,2);
end
[rr cc] = size(y);
[rrr ccc] = size(x);
AA=rr;
AAA=rrr;
BB=cc;
BBB=ccc;
for xx = 1:rr;
    for yy = 1:cc;
        if AA==2 && BB==1
            Ypixel=abs(max(y)-min(y));
            Xpixel=abs(max(x)+min(x));
            hold on
                line([min(x)
,max(x)], [min(y),max(y)], 'Color', 'g', 'LineWidth', 1);
            hold off
                elseif AA==4 && BB==1
                    Ypixel=abs(y(4,1)-y(3,1));
                    Xpixel=abs(x(4,1)+x(3,1));
                    hold on
                        line([x(1,1) ,x(2,1)], [y(1,1)
,y(2,1)], 'Color', 'b', 'LineWidth', 1);
                        line([x(3,1) ,x(4,1)], [y(3,1)
,y(4,1)], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1);
                    hold off
                else
                    Ypixel=0;
                    Xpixel=0;
                end
            end
        end

end
offset =500;
folcal=980;
Ztarget=((folcal*offset)/(Ypixel)); % offset on car 265 mm
Xtarget=abs((((Xpixel)/2)-(Rmax/2))*Ztarget)/folcal;
Xpixelfar=abs(x(1,1)+x(2,1));
Ypixelfar=abs(y(1,1)-y(2,1));
Ztargetfar=((folcal*offset)/(Ypixelfar));
Xtargetfar=abs((((Xpixelfar)/2)-(Rmax/2))*Ztargetfar)/folcal;
if( Xtargetfar==0 && Xtargetfar==0);
    AngleCam=0;
elseif ( Xtargetfar>0 && Xtargetfar>0);
    AngleCam=asin(abs(Xtargetfar-Xtarget)/3000);
else
    AngleCam=0;
end
AngleCamDegree=AngleCam*(57.2957795);
zeta=(AngleCamDegree*pi)/180;
u(i+1)=Ztarget;
uu(i+1)=Xtarget;
uuu(i+1)=zeta;
[r c] = size(u);
for xx = 1:r;
    for yy = 1:c;
        if c>11
            Zavg=(u(r,c)+u(r,c-1)+u(r,c-2)+u(r,c-3)+u(r,c-4)+u(r,c-
5)+u(r,c-6)+u(r,c-7)+u(r,c-8)+u(r,c-9))/10;

```

```

        MaxZavg=[u(r,c);u(r,c-1);u(r,c-2);u(r,c-3);u(r,c-4);u(r,c-
5);u(r,c-6);u(r,c-7);u(r,c-8);u(r,c-9)];
        [MaxZ] = max(MaxZavg);
        [MinZ] = min(MaxZavg);

        else
            Zavg=u(r,c) ;
            MaxZ=0;
            MinZ=0;
        end
    end

end

[r1 c1] = size(uu);
for xx = 1:r1;
    for yy = 1:c1;
        if c>11
            Xavg=(uu(r,c)+uu(r,c-1)+uu(r,c-2)+uu(r,c-3)+uu(r,c-
4)+uu(r,c-5)+uu(r,c-6)+uu(r,c-7)+uu(r,c-8)+uu(r,c-9))/10;
            MaxXavg=[uu(r,c);uu(r,c-1);uu(r,c-2);uu(r,c-3);uu(r,c-
4);uu(r,c-5);uu(r,c-6);uu(r,c-7);uu(r,c-8);uu(r,c-9)];
            [MaxX] = max(MaxXavg);
            [MinX] = min(MaxXavg);

            else
                Xavg=uu(r1,c1) ;
                MaxX=0;
                MinX=0;
            end
        end
    end

end

[r2 c2] = size(uuu);
for xx = 1:r1;
    for yy = 1:c1;
        if c>11
            zetaAvg=(uuu(r,c)+uuu(r,c-1)+uuu(r,c-2)+uuu(r,c-3)+uuu(r,c-
4)+uuu(r,c-5)+uuu(r,c-6)+uuu(r,c-7)+uuu(r,c-8)+uuu(r,c-9))/10;
            MaxzetaAvg=[uuu(r,c);uuu(r,c-1);uuu(r,c-2);uuu(r,c-
3);uuu(r,c-4);uuu(r,c-5);uuu(r,c-6);uuu(r,c-7);uuu(r,c-8);uuu(r,c-9)];
            [MaxzetaAvg1] = max(MaxzetaAvg);
            [MinzetaAvg1] = min(MaxzetaAvg);

            else
                zetaAvg=uuu(r2,c2) ;
                MaxzetaAvg1=0;
                MinzetaAvg1=0;
            end
        end
    end

end

if (isempty(Zavg) && isempty(Xavg) && isempty(zetaAvg))
    p=0;
    O=0;
    S=0;
    zetaAvg2=0;
elseif not (isempty(Zavg) && isempty(Xavg) && isempty(zetaAvg))
    p=0;
    O=0;
    S=0;
    zetaAvg2=0;
else

```

```

        S=((Xavg^2+Zavg^2)-((Zavg*tan(zetaAvg))-
Xavg)^2+((Zavg*tan(zetaAvg))^2+Zavg^2))/(2*sqrt((Zavg*tan(zetaAvg))^2+Zavg^
2));
        p=sqrt(Xavg^2+Zavg^2);
        O=sqrt(p^2-S^2);
        zetaAvg2=zetaAvg
    end
        S=((Xavg^2+Zavg^2)-((Zavg*tan(zetaAvg))-
Xavg)^2+((Zavg*tan(zetaAvg))^2+Zavg^2))/(2*sqrt((Zavg*tan(zetaAvg))^2+Zavg^
2));
        p=sqrt(Xavg^2+Zavg^2);
        O=sqrt(p^2-S^2);
        zetaAvg2=zetaAvg;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%1720x720%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        LengthTarget3=text(850,440, strcat('Angle of
Car:',num2str(zetaAvg2*(57.2957795)-35, '%.2f')));
        set( LengthTarget3, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold',
'FontSize', 22, 'Color', 'b');
        LengthTarget3=text(850,490, strcat('Angle of
Camera:',num2str(zetaAvg2*(57.2957795), '%.2f')));
        set( LengthTarget3, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold',
'FontSize', 22, 'Color', 'b');

        LengthTarget3=text(850,540, strcat('S(mm.):',num2str(S, '%.2f')));
        set( LengthTarget3, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold',
'FontSize', 22, 'Color', 'b');

        LengthTarget3=text(850,590, strcat('O(mm.):',num2str(O, '%.2f')));
        set( LengthTarget3, 'FontName', 'Arial', 'FontWeight', 'bold',
'FontSize', 22, 'Color', 'b');

        line([Rmax/2,Rmax/2],[1,Cmax], 'Color', '[0 1 1]', 'LineStyle', '-
.', 'LineWidth', 1);
        line([1,Rmax],[Cmax/2,Cmax/2], 'Color', '[1 0 0]', 'LineStyle', '-
.', 'LineWidth', 1);
        hold off
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%1720x720%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        i=i+1;
        t=t+ts;
        pause(t);
    end
    stop(vid);
    flushdata(vid);
    vid.TimerFcn = {'stop'};
    delete(vid)

```

## ภาคผนวก จ

ภาพตัวอย่างการทดลองในห้องปฏิบัติการ และสวนยางพารา

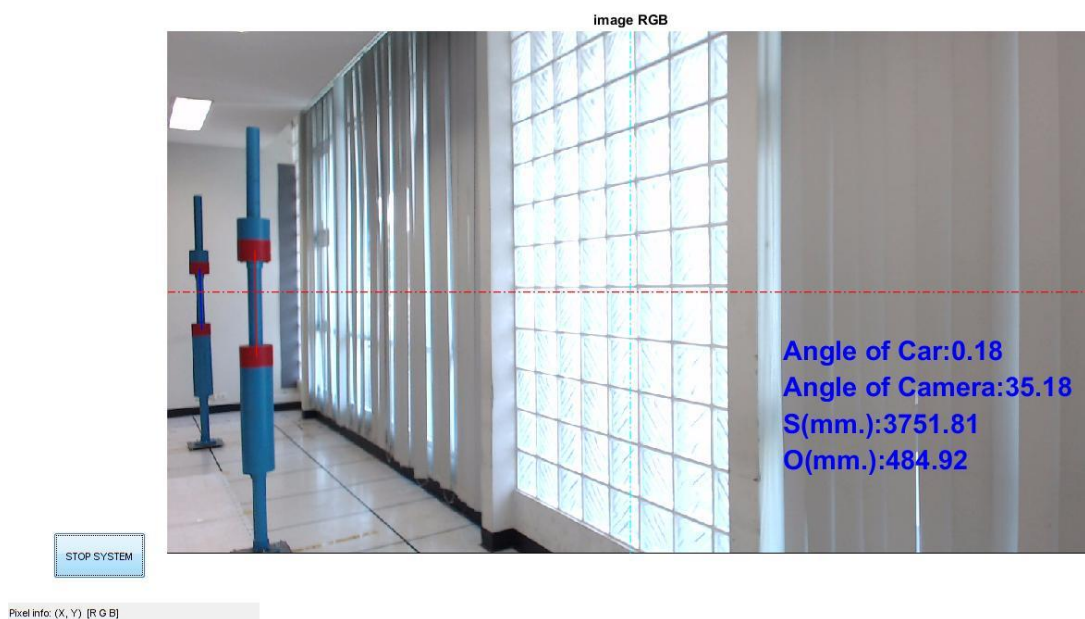
## ภาคผนวก จ

## ภาพตัวอย่างการทดลองในห้องปฏิบัติการ



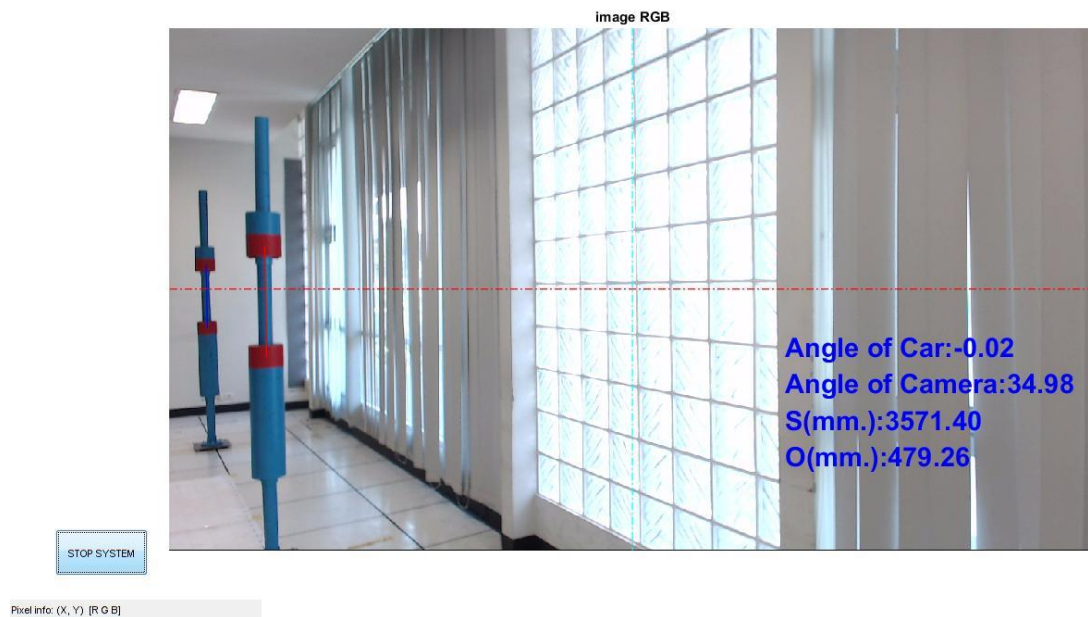
Pixel info: (X, Y) [R G B]

รูปที่ จ.1 การทดลองที่ 1 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.

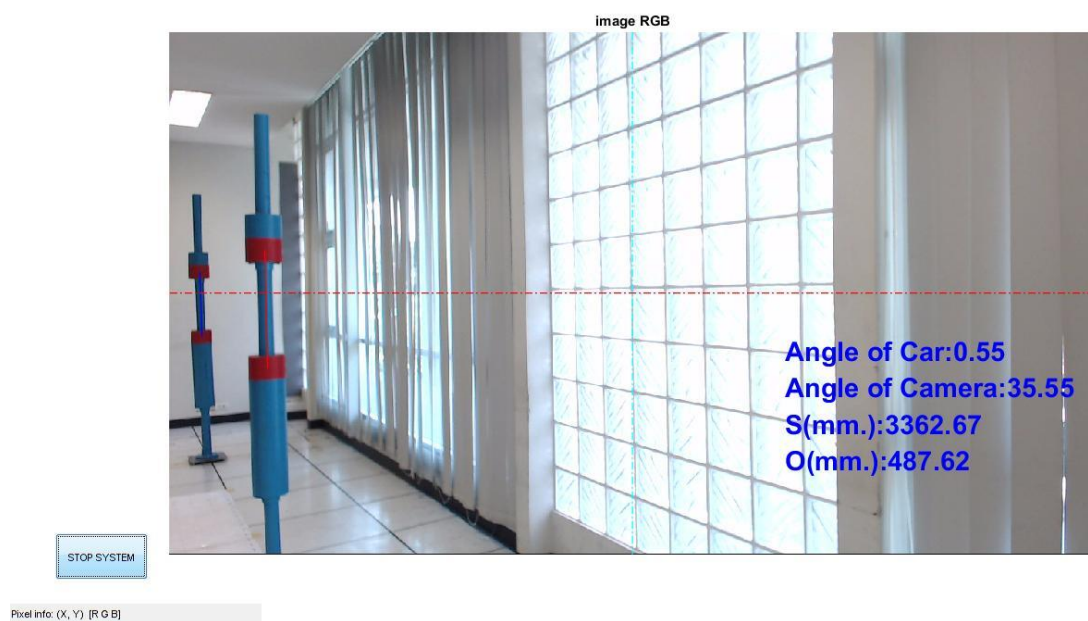


Pixel info: (X, Y) [R G B]

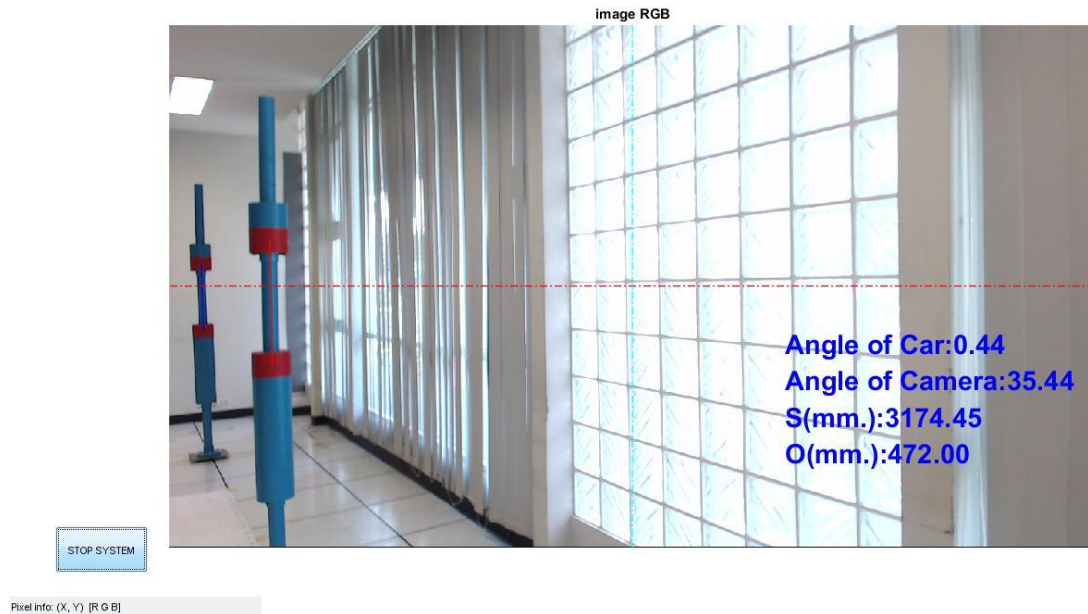
รูปที่ จ.2 การทดลองที่ 2 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



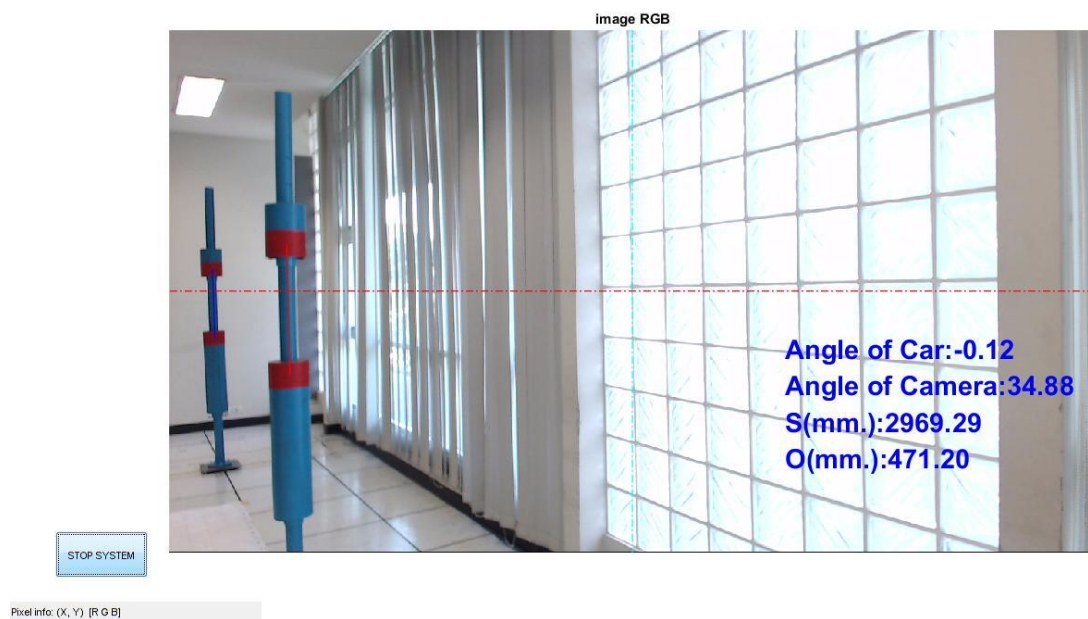
รูปที่ จ.3 การทดลองที่ 3 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



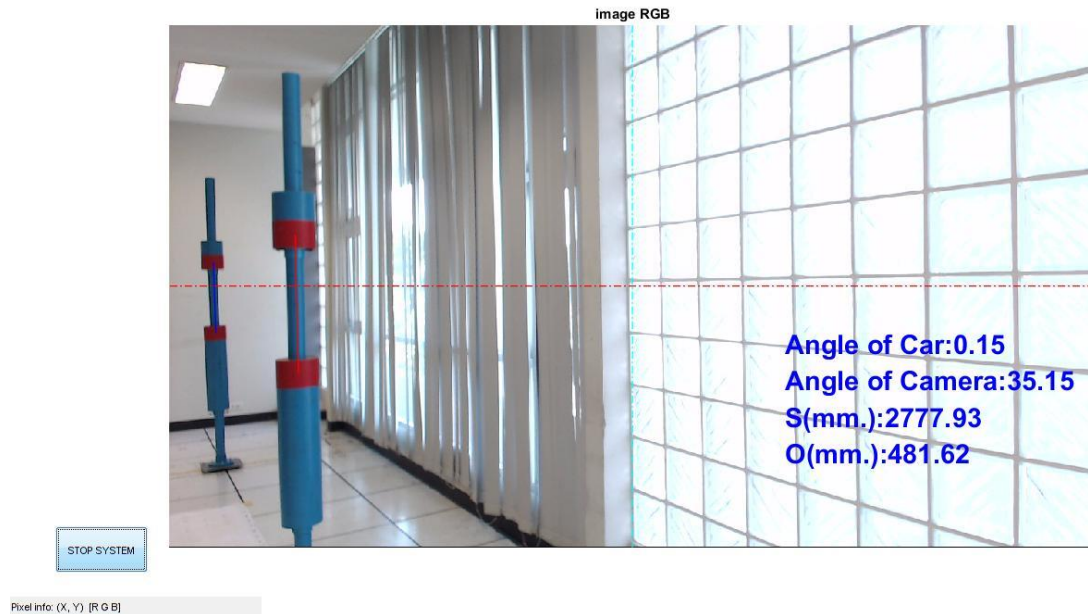
รูปที่ จ.4 การทดลองที่ 4 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



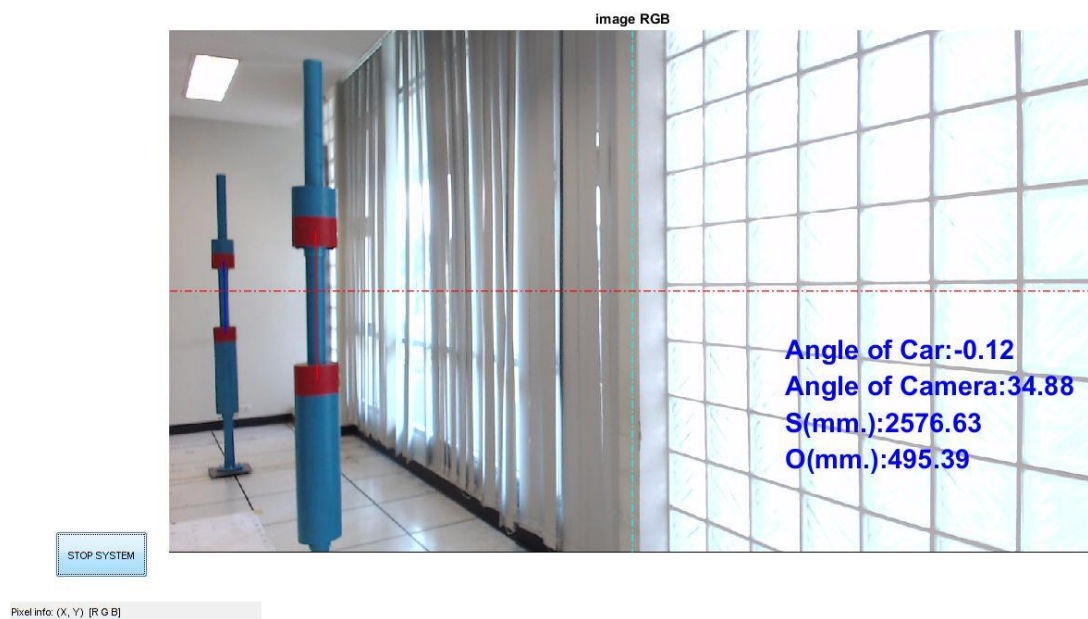
รูปที่ จ.5 การทดลองที่ 5 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



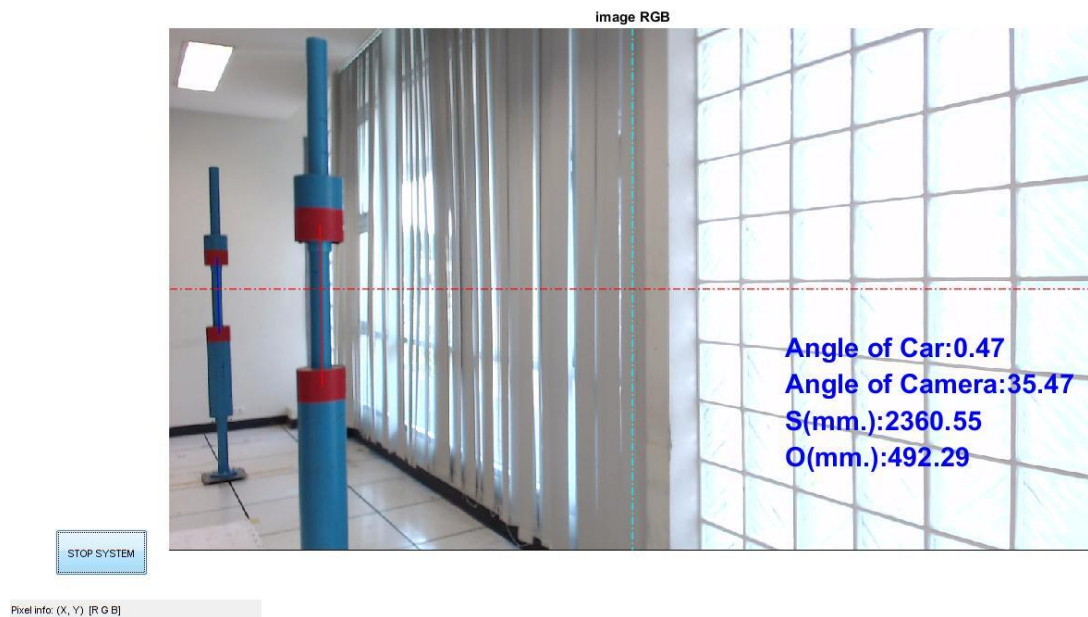
รูปที่ จ.6 การทดลองที่ 6 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



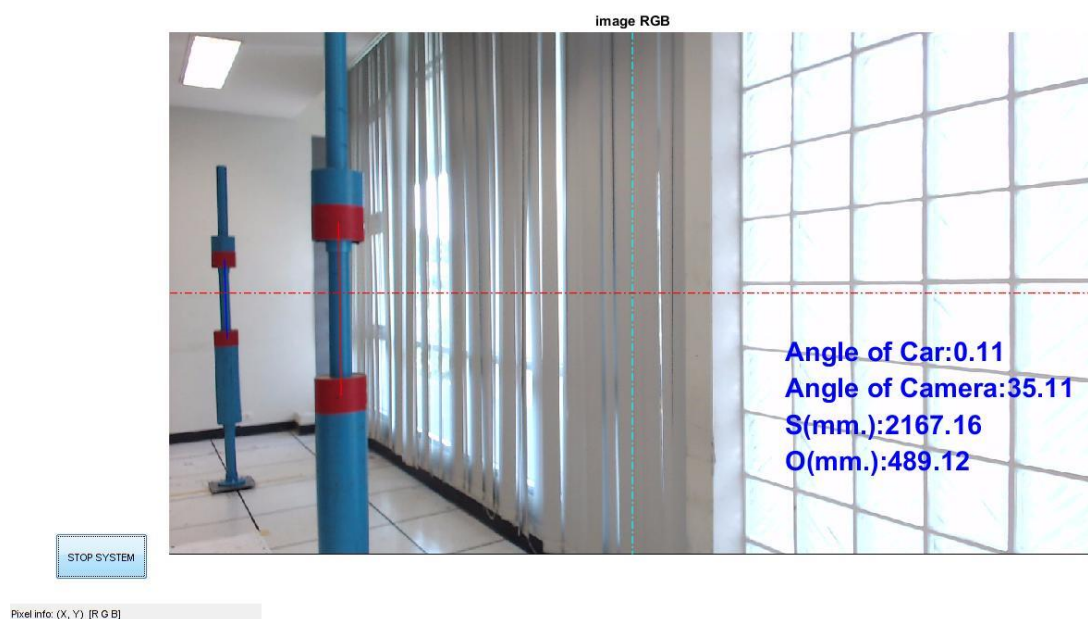
รูปที่ จ.7 การทดลองที่ 7 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



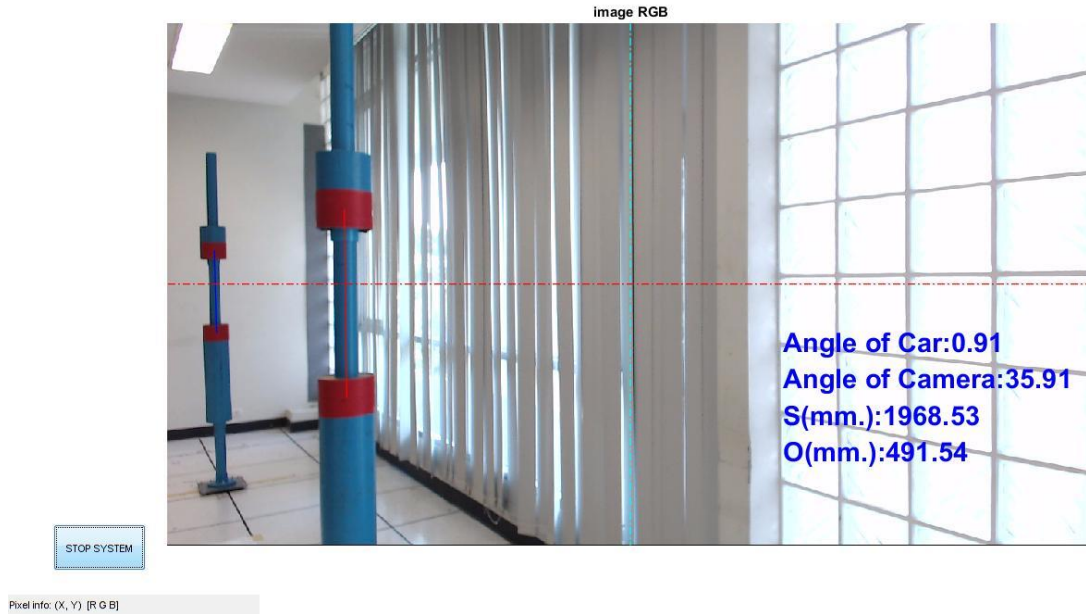
รูปที่ จ.8 การทดลองที่ 8 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



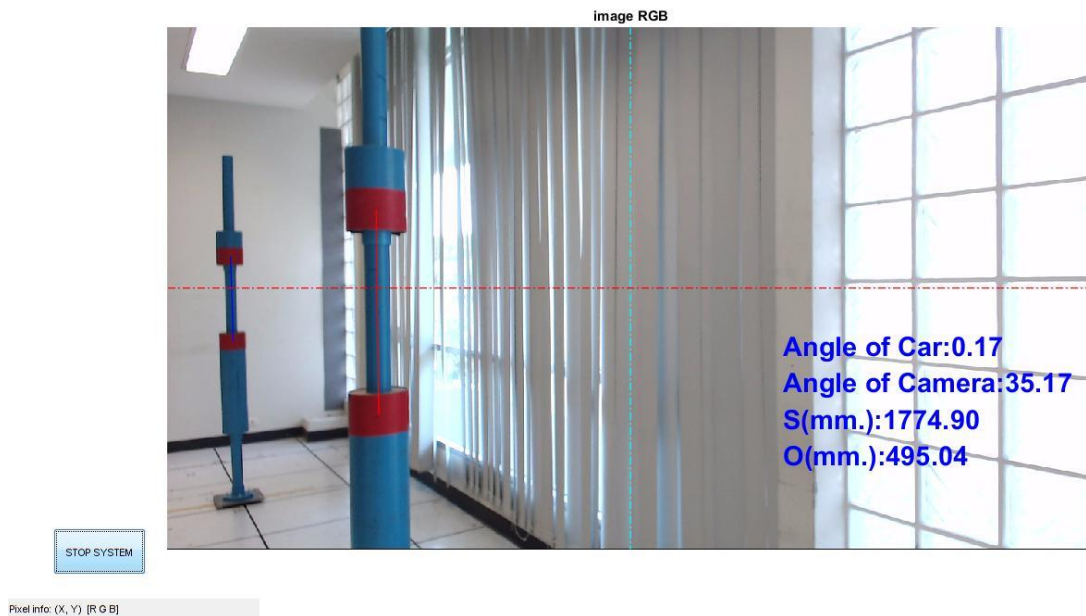
รูปที่ จ.9 การทดลองที่ 9 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



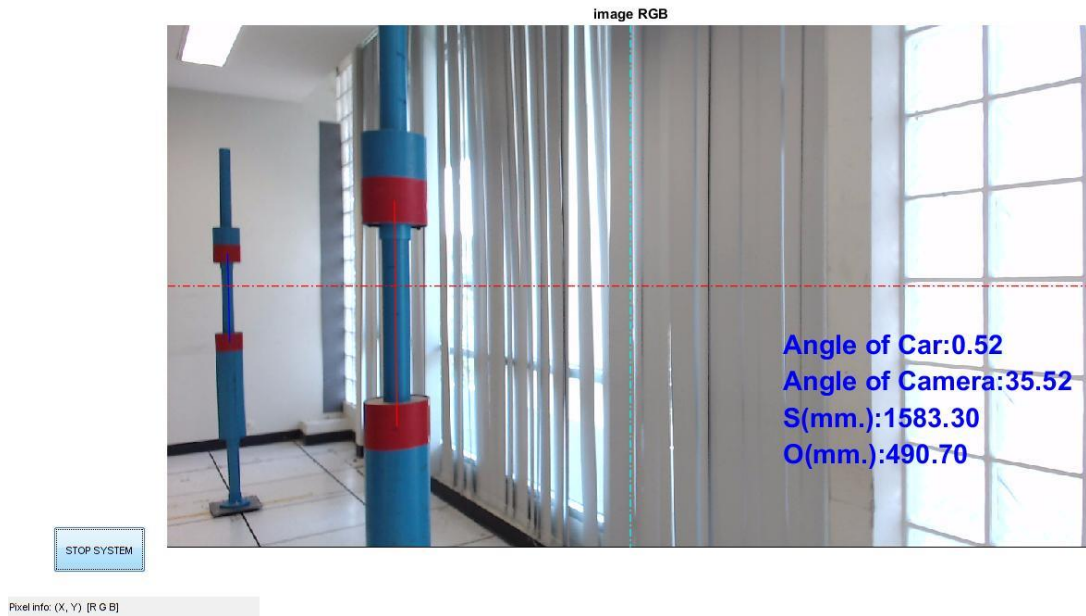
รูปที่ จ.10 การทดลองที่ 10 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



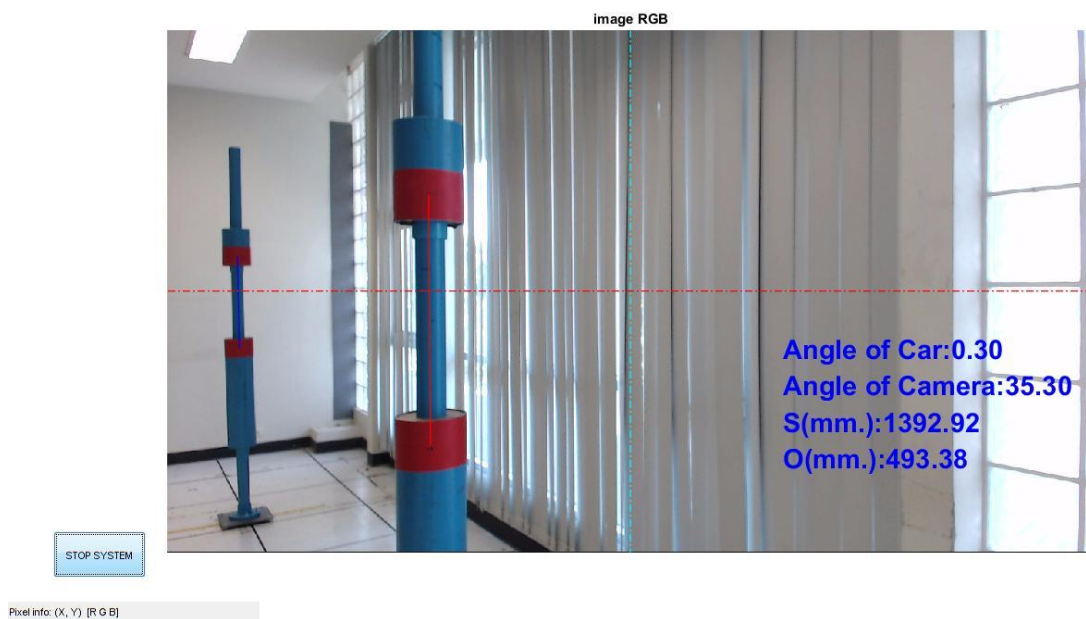
รูปที่ จ.11 การทดลองที่ 11 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



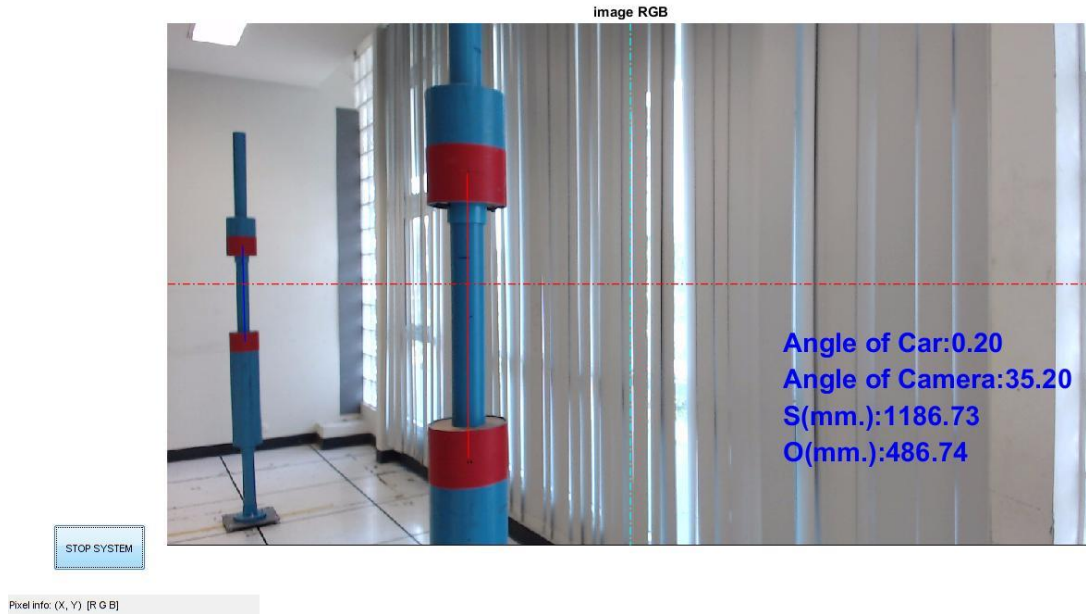
รูปที่ จ.12 การทดลองที่ 12 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



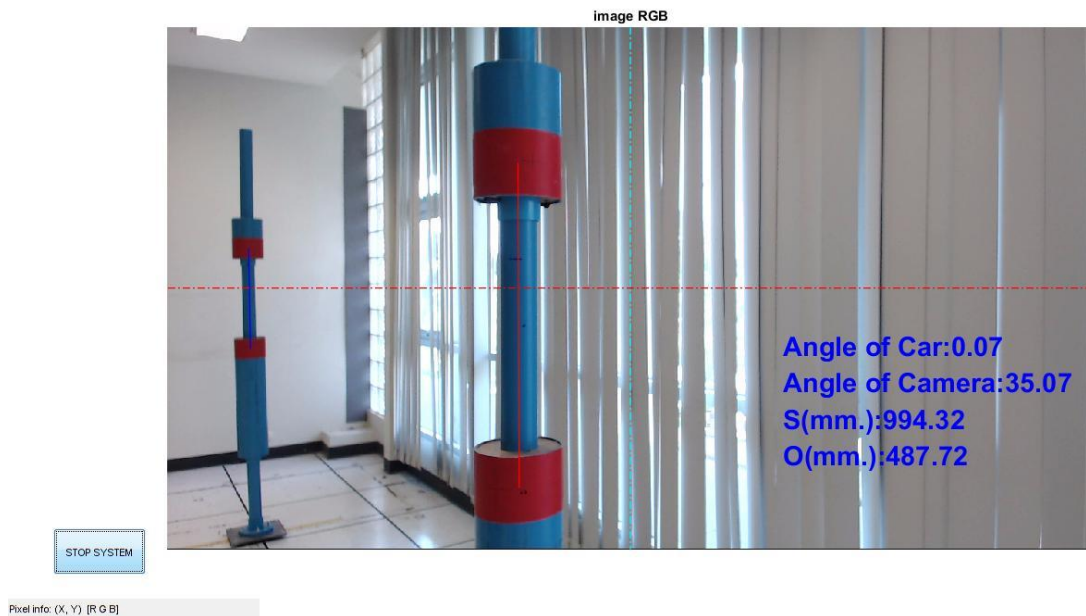
รูปที่ จ.13 การทดลองที่ 13 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.



รูปที่ จ.14 การทดลองที่ 14 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.

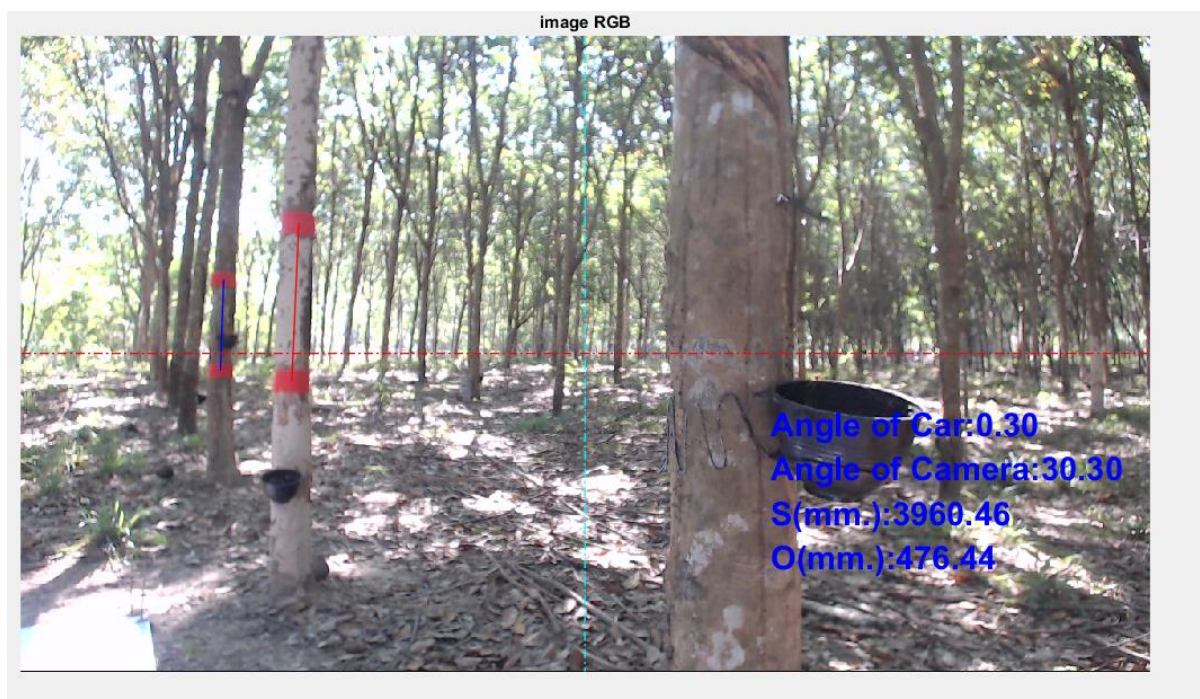


รูปที่ จ.15 การทดลองที่ 15 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.

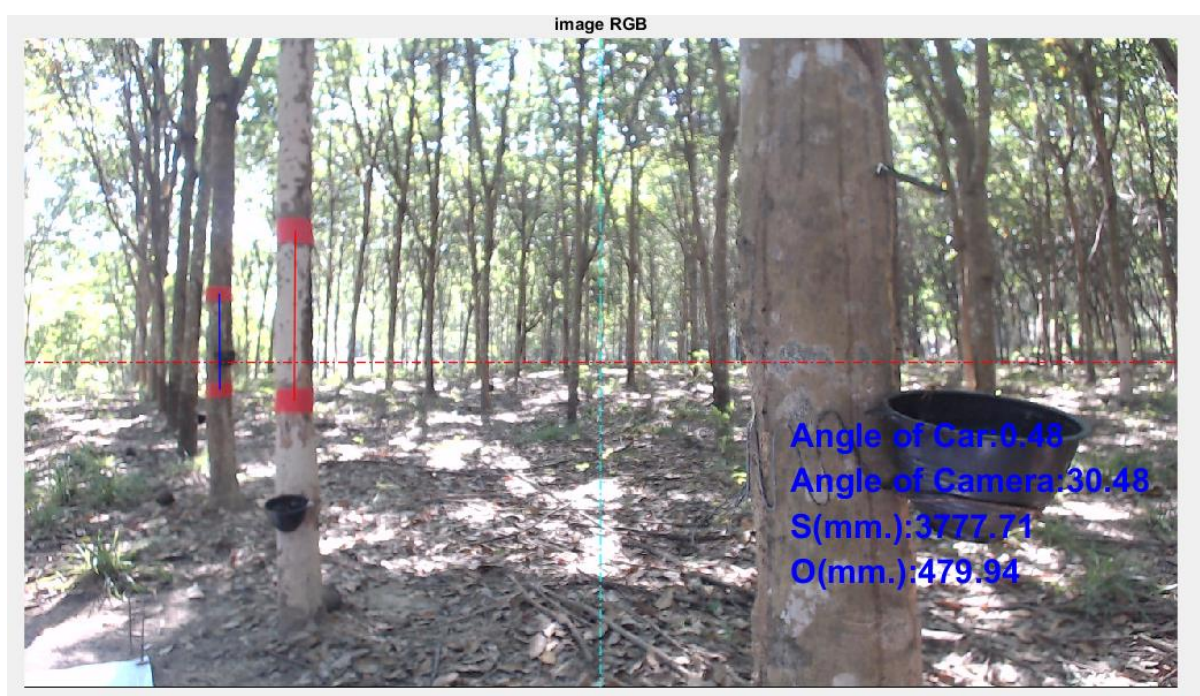


รูปที่ จ.16 การทดลองที่ 16 ในห้องปฏิบัติการที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_t = 700$  mm.

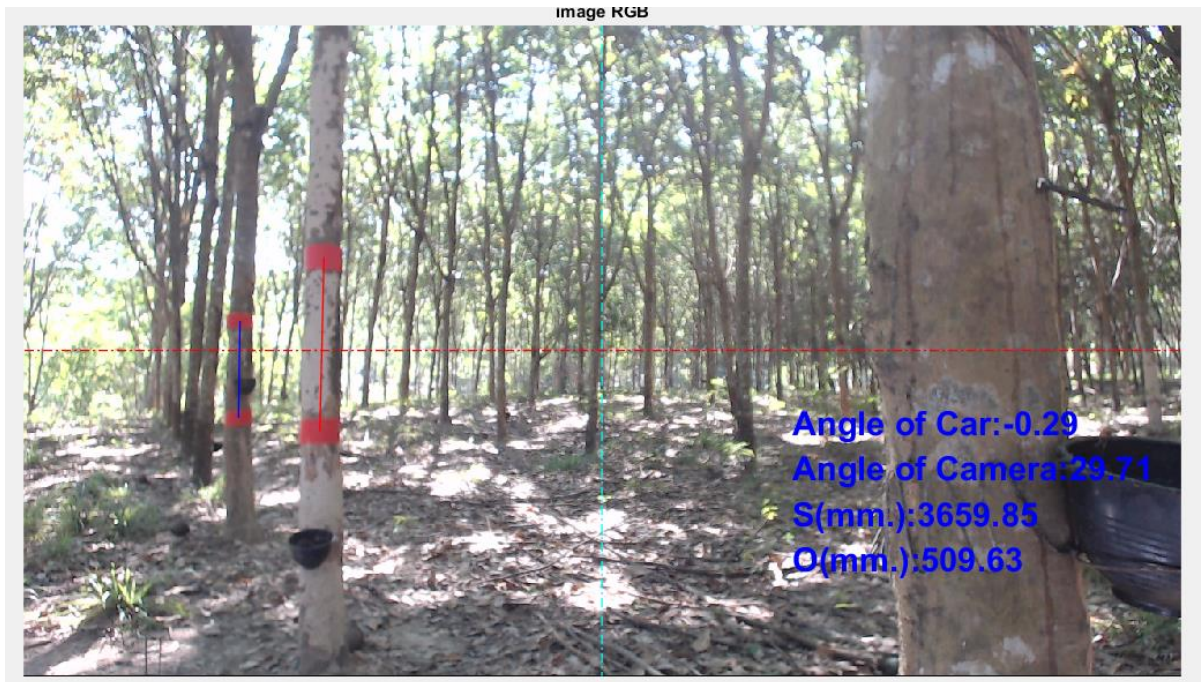
ภาพตัวอย่างการทดลองในสวนยางพารา



รูปที่ จ.17 การทดลองที่ 1 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



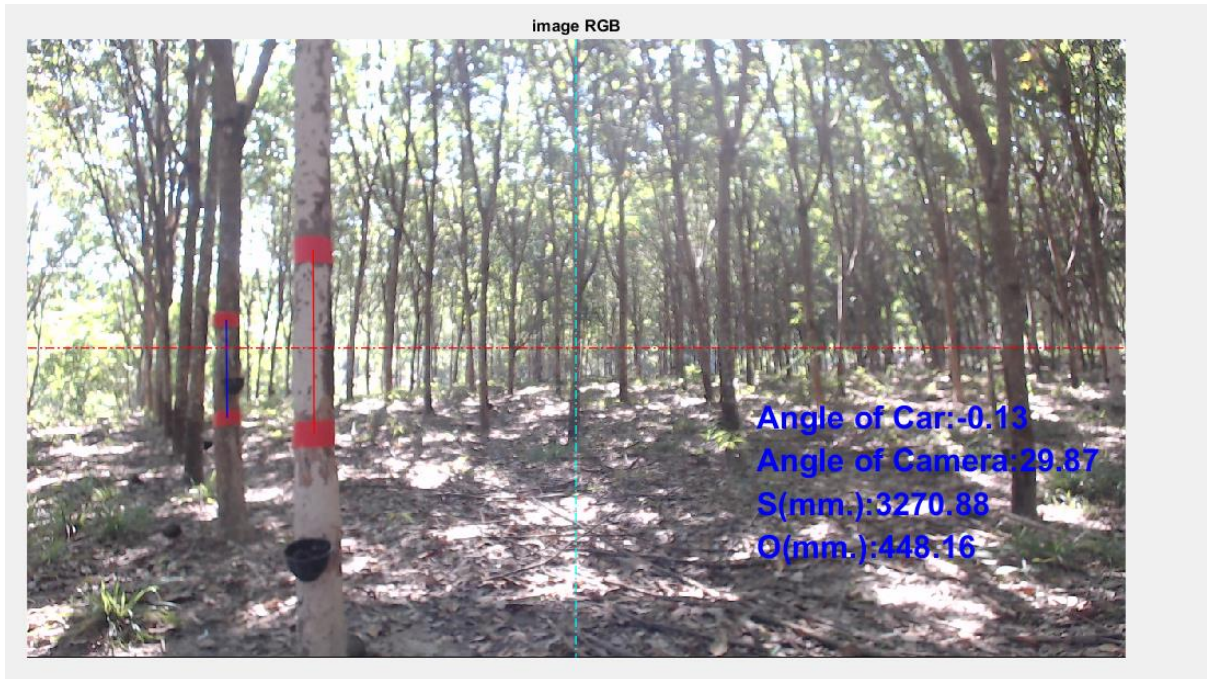
รูปที่ จ.18 การทดลองที่ 2 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



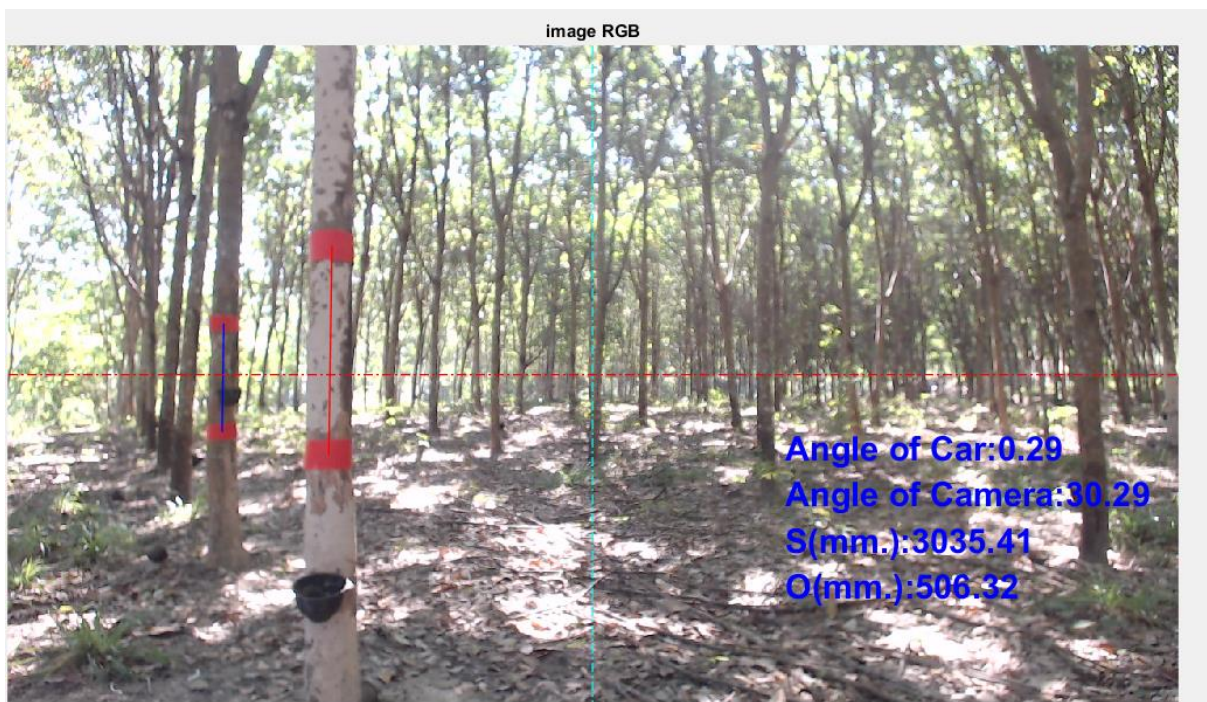
รูปที่ จ.19 การทดลองที่ 3 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



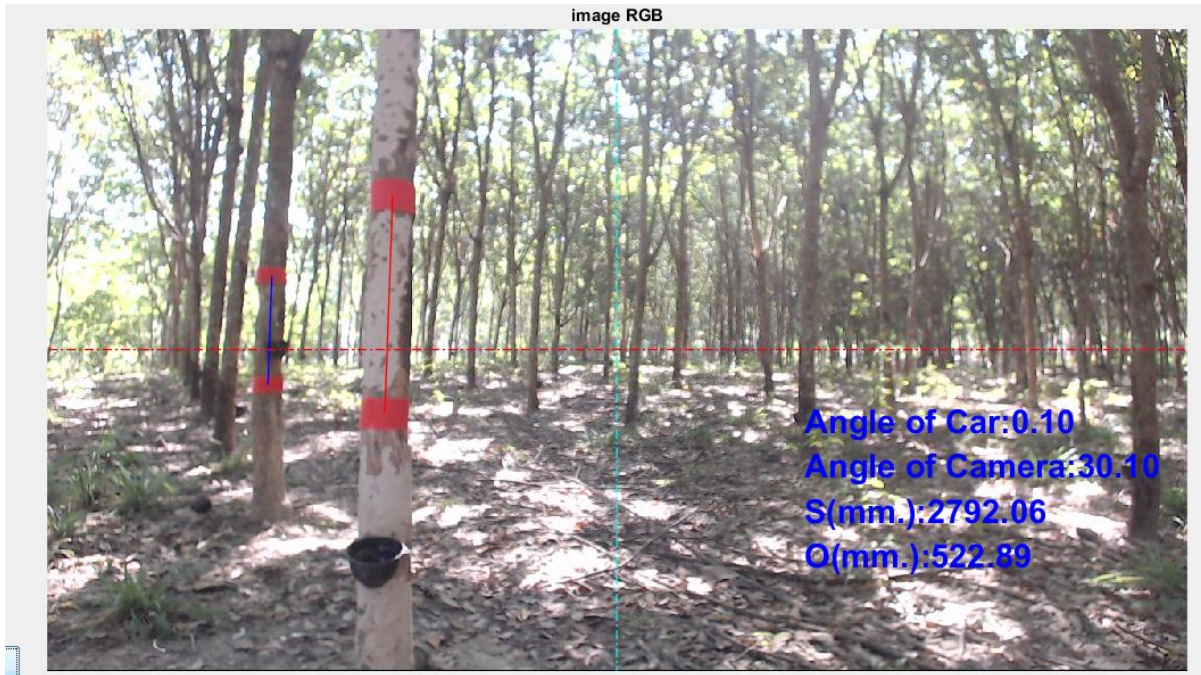
รูปที่ จ.20 การทดลองที่ 4 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



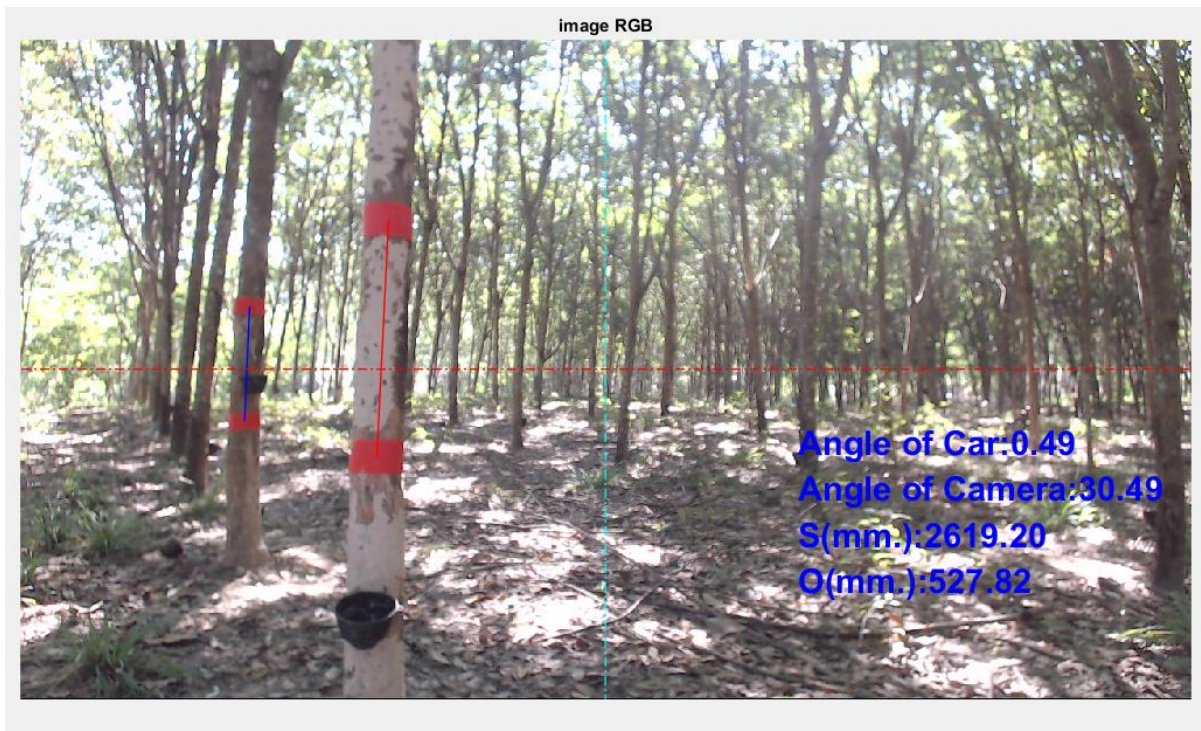
รูปที่ จ.21 การทดลองที่ 5 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



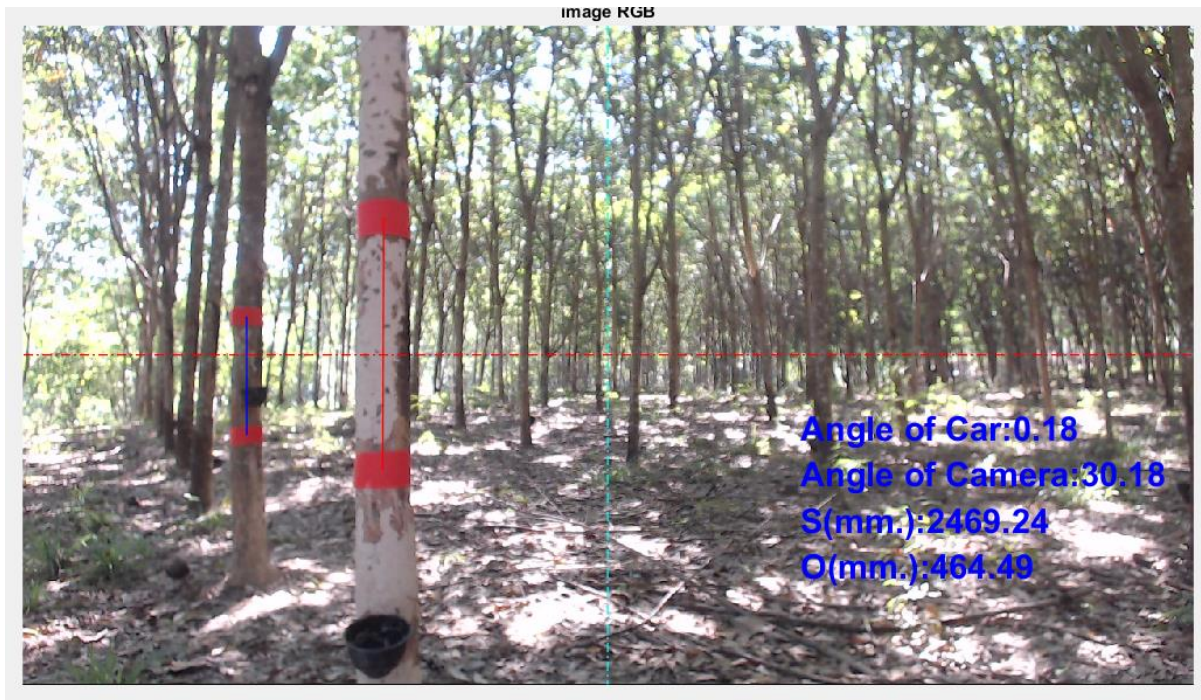
รูปที่ จ.22 การทดลองที่ 6 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



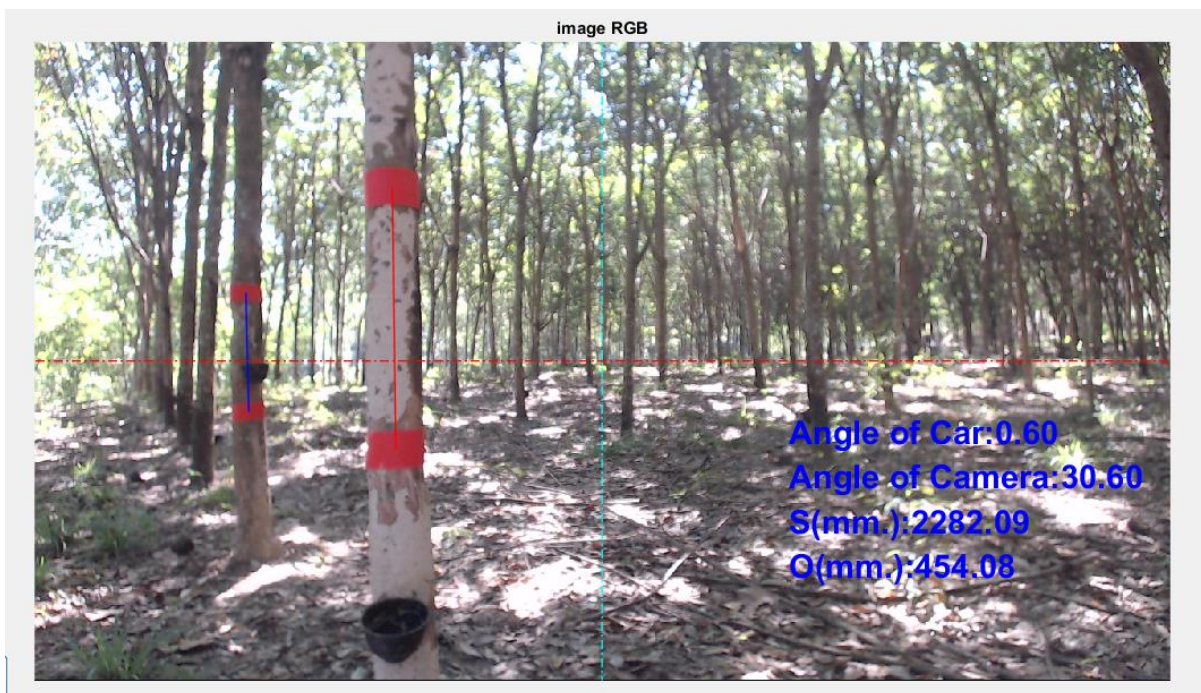
รูปที่ จ.23 การทดลองที่ 7 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



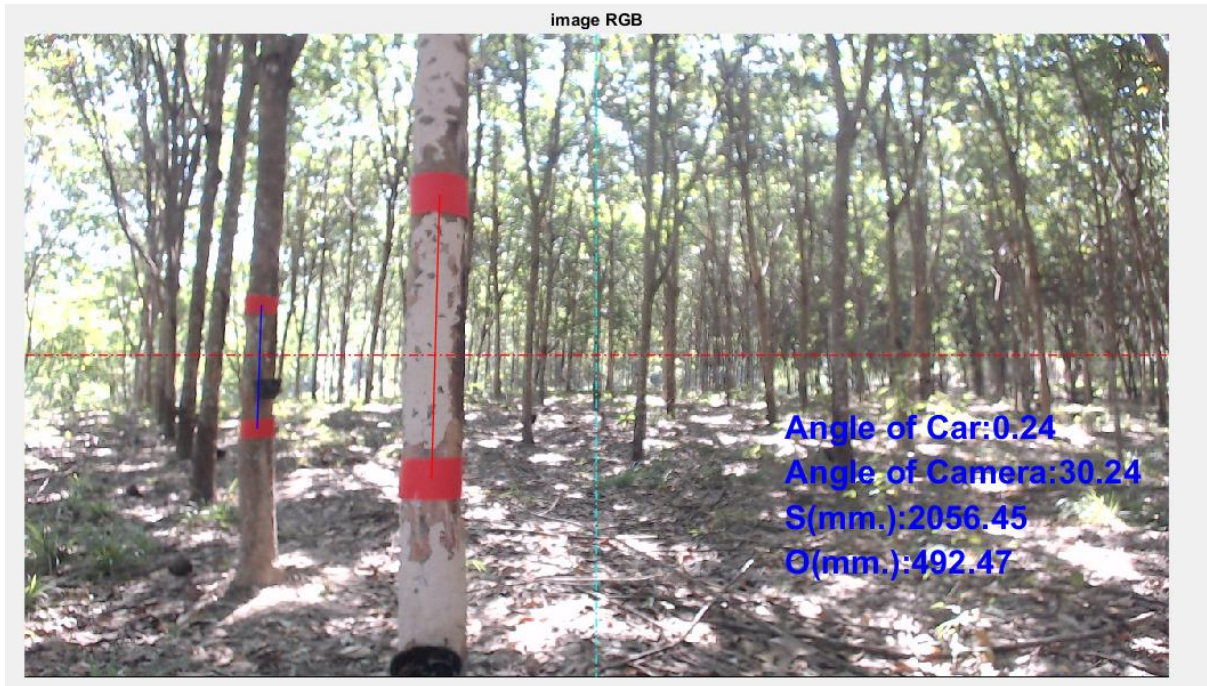
รูปที่ จ.24 การทดลองที่ 8 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



รูปที่ จ.25 การทดลองที่ 9 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



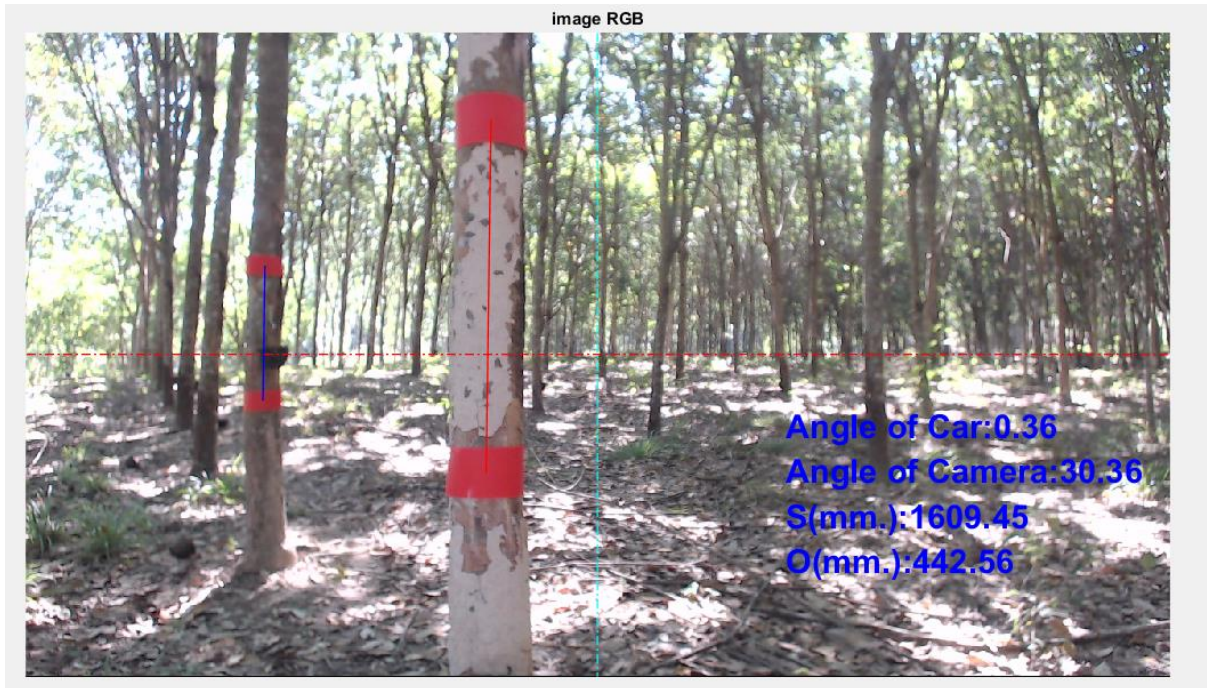
รูปที่ จ.26 การทดลองที่ 10 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



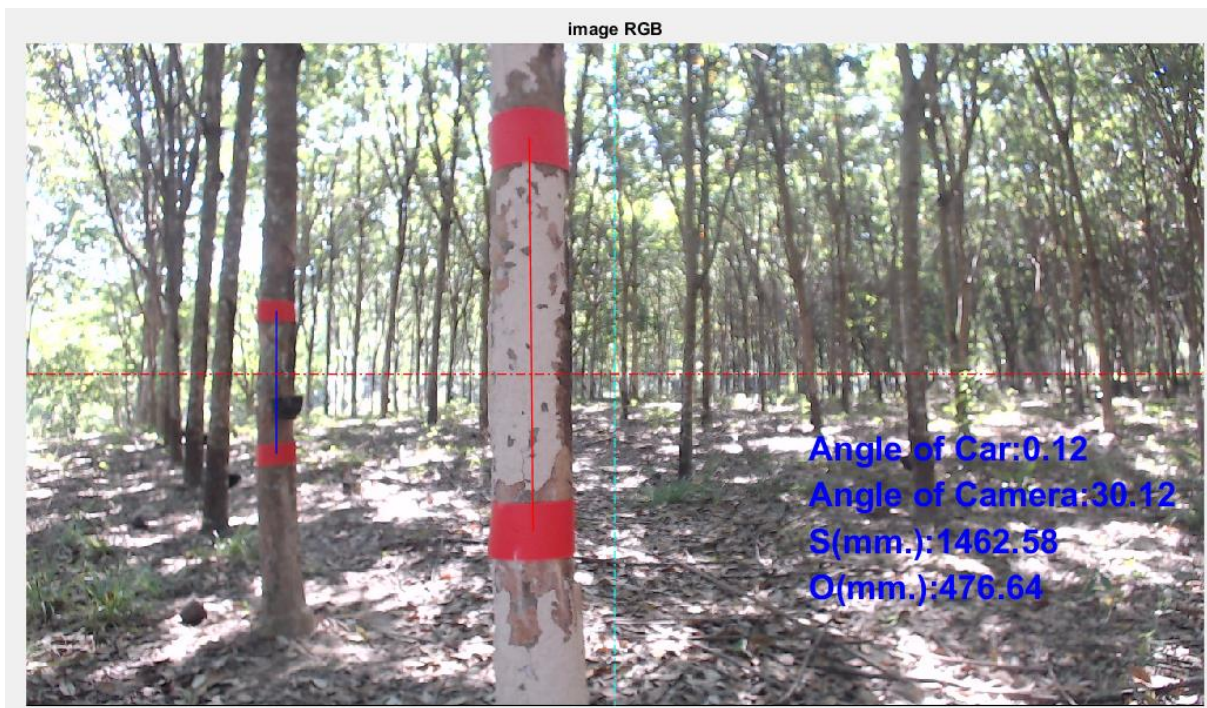
รูปที่ จ.27 การทดลองที่ 11 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



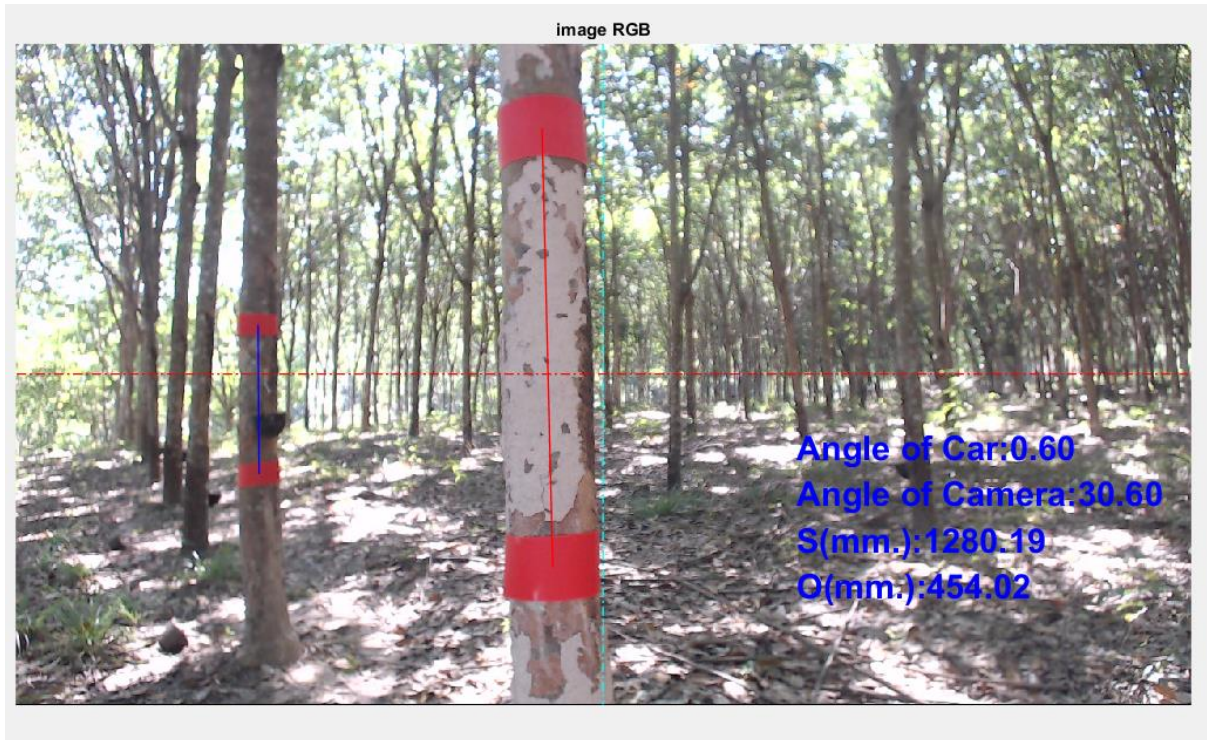
รูปที่ จ.28 การทดลองที่ 12 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



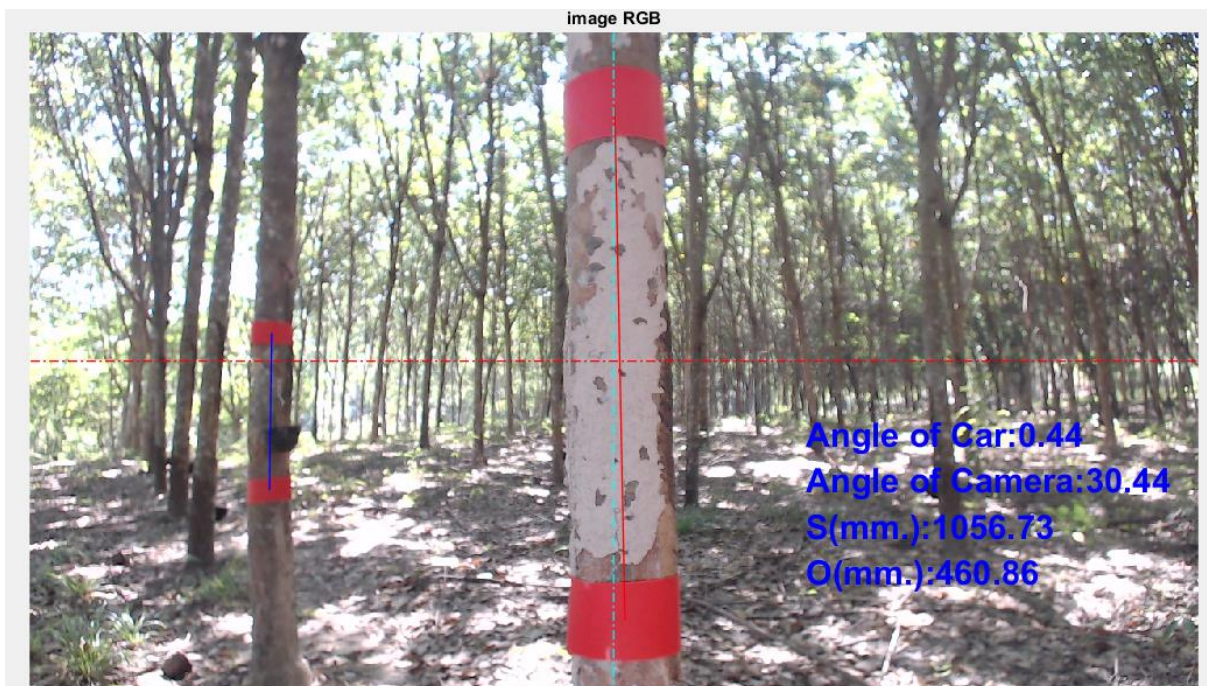
รูปที่ จ.28 การทดลองที่ 13 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



รูปที่ จ.29 การทดลองที่ 14 ในสวนยางพาราที่  $S_o = 500$  mm. และ  $h_T = 700$  mm.



รูปที่ จ.30 การทดลองที่ 15 ในสวนยางพาราที่  $S_o=500$  mm. และ  $h_T=700$  mm.



รูปที่ จ.31 การทดลองที่ 16 ในสวนยางพาราที่  $S_o=500$  mm. และ  $h_T=700$  mm.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวรวิทย์ กังหัน
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 88 ม.5 ซ.2 ต.บ้านปง อ.สูงเม่น จ.แพร่ 54130
ประวัติการศึกษา	2551 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ ช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคแพร่ 2554 ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (คอ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2554-2556	ครูประจำแผนกช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคโนโลยีกรุงธน
พ.ศ. 2556	R&D Mechanical Engineer บริษัท VISUAL POINT
พ.ศ. 2557-2559	ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล บริษัท มิลล์คอน สตีล จำกัด (มหาชน)
พ.ศ. 2559-2562	อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี
พ.ศ. 2562-ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำ สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์