

การปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัด  
ระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง

นายสุชุม ถัดตรีตนามัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

IMPROVING AND FILTERING LASER DATA FOR EXTRINSIC LASER RANGE  
FINDER/CAMERA CALIBRATION

Mr. Sukhum Sattaratnamai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง
โดย	นายสุขุม สัตตัตตนามัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.นัทธี นิภานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.นัทธี นิภานันท์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรัทศน์ ฝักเจริญผล)

สุขุม สัตตัตตนามัย : การปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง (Improving and Filtering Laser Data for Extrinsic Laser Range Finder/Camera Calibration) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์  
 หลัก: อ.ดร.นัทที นิภานันท์, 62 หน้า.

การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกเป็นกระบวนการหาความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของเซนเซอร์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไป เพื่อให้สามารถนำข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งสองมาใช้งานร่วมกันได้ โดยเซนเซอร์แต่ละตัวอาจจะเป็นเซนเซอร์คนละประเภทหรือประเภทเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง ซึ่งอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องจะถูกวางอยู่ในตำแหน่งใดๆในสามมิติ โดยอุปกรณ์ทั้งสองจะต้องมีมุมมองส่วนหนึ่งร่วมกัน บริเวณที่มีมุมมองร่วมกันนี้จะถูกเรียกว่าบริเวณทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของวิธีการจะเป็นความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องซึ่งทำให้สามารถนำข้อมูลจากอุปกรณ์ทั้งสองภายในบริเวณทำงานมาใช้งานร่วมกันได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะช่วยให้การปรับแก้พารามิเตอร์ระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องมีความแม่นยำและง่ายต่อการนำไปใช้งาน และสามารถนำไปใช้ในการสร้างแผนที่สิ่งแวดล้อมขนาดใหญ่หรือนำไปสร้างโมเดลที่มีความละเอียดสูงของวัตถุได้ และในตอนท้ายของงานวิจัยได้แสดงการทดลองการปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์และการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก รวมถึงตัวอย่างการนำข้อมูลจากอุปกรณ์ทั้งสองมาสร้างเป็นแผนที่สิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

ภาควิชา...วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา...วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่ออ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา... 2554 .....

## 5370506421: MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS: EXTRINSIC CALIBRATION/ LASER RANGE FINDER/ CAMERA/ DATA  
 FUSION/ AUTOMATIC PROCESS

SUKHUM SATTARATNAMAI : IMPROVING AND FILTERING LASER DATA  
 FOR EXTRINSIC LASER RANGE FINDER/CAMERA CALIBRATION. ADVISOR :  
 NATTEE NIPANAN, Ph.D., 65 pp.

Extrinsic parameter calibration is a process to find geometric relationship between several sensors. Using data from several sensors, a same type or a different type, the extrinsic parameter has to be known. This research proposes improving and filtering method for the extrinsic parameter calibration between laser range finder and camera. Both sensors may be at any pose in 3D space, but they must be able to observe same area: working space. This process gives a geometric relationship of laser range finder and camera in 3D space as a result which enable using data from both sensors together precisely. Objective of this research is to improve accuracy of calibration result and introduce easy calibration process, and the result from this research will benefit the creation of large scale environment mapping and high definition modeling. The experiments are conducted with real data from several models of laser range finder and camera. We also provide an example of using data from both sensor to create a large scale environment mapping.

Department : . . . Computer Engineering . . . . . Student's Signature . . . . .  
 Field of Study : . . Computer Engineering . . . . . Advisor's Signature . . . . .  
 Academic Year : . . . 2011 . . . . .

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนและส่งเสริมเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาทั้งในส่วนของแนวทางในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ รวมถึงข้อแนะนำต่าง ๆ ของงานวิจัยและเรื่องอื่น ๆ นอกเหนือจากงานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา ตลอดจนกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตรัทธ์สันต์ ผักเจริญผล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง ที่ได้กรุณาสละเวลา ตรวจสอบและให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ที่จะขาดเสียมิได้ คือขอขอบคุณเหล่าพี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยระบบอัจฉริยะISL2 ทุก ๆ คนที่ช่วยให้คำแนะนำต่าง ๆ ทั้งในเรื่องของงานวิจัยและเรื่องอื่น ๆ รวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดามารดา ผู้ให้กำเนิด รวมไปถึงญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา และขอขอบคุณอีกหลาย ๆ ท่านที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ณ ที่นี้ ด้วยใจจริง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.3 การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	7
<b>2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและพารามิเตอร์ภายนอก.....</b>	<b>8</b>
2.1 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (Laser Range Finder).....	8
2.2 กล้องและการปรับแก้พารามิเตอร์ภายในของกล้อง.....	11
2.3 การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง.....	14
2.3.1 กรอบอ้างอิง.....	14
2.3.2 ฟังก์ชันการฉายภาพและการปรับแก้พารามิเตอร์.....	14
<b>3 คุณสมบัติของอุปกรณ์และความผิดพลาดในการฉายภาพ.....</b>	<b>16</b>
3.1 คุณสมบัติของเลเซอร์สแกน (LRF Characteristic).....	16
3.2 คุณสมบัติของกล้อง (Camera Characteristic).....	19
3.3 ความผิดพลาดในการฉายภาพ (Projection Error).....	19
3.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization).....	20
3.4.1 การจำลองการอบเหนียว (Stimulated Annealing).....	20
3.4.2 วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (Levenberg-Marquardt).....	23

บทที่	หน้า
<b>4 การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง.....</b>	<b>25</b>
4.1 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง.....	25
4.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	27
4.3 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์.....	28
4.4 ขอบเขตล่างของความผิดพลาดในการฉายภาพ.....	29
4.5 การทดลองด้วยโปรแกรมจำลอง.....	30
4.5.1 ความผิดพลาดเชิงมุม.....	30
4.5.2 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์.....	31
4.5.3 ขอบเขตล่างของความผิดพลาด.....	32
4.6 การทดลองด้วยอุปกรณ์จริง.....	34
4.6.1 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์.....	34
4.6.2 จำนวนข้อมูลคู่จุด.....	35
<b>5 กระบวนการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ.....</b>	<b>36</b>
5.1 ภาพรวมของกระบวนการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ.....	36
5.2 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงแบบอัตโนมัติ.....	38
5.3 มาตรฐานคุณภาพของข้อมูล.....	39
5.3.1 ปริมาณข้อมูลและการกระจายตัว.....	39
5.3.2 การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์อ้างอิงและคุณภาพของข้อมูล.....	39
5.4 ระบบแสดงผลและการตอบสนอง.....	41
5.5 การทดลองด้วยอุปกรณ์จริง.....	43
5.4.1 ผลกระทบของการกระจายตัวของข้อมูล.....	43
5.4.2 ความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการปรับแก้.....	44
<b>6 สรุปการวิจัยและแนวทางการวิจัยในขั้นถัดไป.....</b>	<b>46</b>
6.1 สรุปการวิจัย.....	46
6.2 แนวทางการวิจัยในขั้นถัดไป.....	47
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>48</b>
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>52</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์รุ่นต่างๆ.....	9
2.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์รุ่น URG-04.....	10
2.3 คุณสมบัติของกล้องรุ่นต่างๆ.....	13
3.1 รหัสเทียบของวิธีการจำลองการอบเหนียว.....	22
4.1 ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพ.....	31
4.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
4.3 ผลจากการปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์.....	34
5.1 ความผิดพลาดในการฉายภาพ.....	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเลเซอร์สแกนที่เวลาต่างๆ.....	9
2.2 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์.....	10
2.3 อุปกรณ์สำหรับการปรับแก้พารามิเตอร์กล้อง.....	13
2.4 กล้องรุ่นต่างๆ.....	13
2.5 กรอบอ้างอิงและตัวอย่างข้อมูล.....	14
3.1 พฤติกรรมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์.....	16
3.2 พฤติกรรมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์.....	17
3.3 ผลกระทบของปัจจัยต่างๆต่อเลเซอร์สแกน.....	18
3.4 ลักษณะการตรวจวัดที่เป็นพิกเซลและความไม่คมชัด.....	19
3.5 แนวคิดการทำงานของกล้องการจำลองการรอบเห็นยว.....	20
3.6 ลักษณะพื้นที่คำตอบและการเปลี่ยนแปลงสถานะ.....	21
3.7 แนวคิดของวิธีของเกาส์-นิวตันและวิธีไล่ความชัน.....	23
4.1 ตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น.....	25
4.2 ข้อมูลเลเซอร์.....	26
4.3 จุดขอบที่แท้จริงและความผิดพลาดเชิงมุม.....	26
4.4 การคำนวณหาจุดเลเซอร์.....	27
4.5 ตัวอย่างการเพิ่มและลดมุมของข้อมูลเลเซอร์.....	28
4.6 ค่าความผิดพลาดเชิงมุมที่เกิดขึ้น.....	30
4.7 ความผิดพลาดในการฉายภาพ.....	32
4.8 ความผิดพลาดในการฉายภาพ.....	35
5.1 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง.....	38
5.2 การแบ่งพื้นที่การทำงานของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์.....	39
5.3 ลักษณะหน้าจอแสดงผล.....	42
5.4 ผลการทดลอง.....	44
5.5 ความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิง.....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานหุ่นยนต์อัตโนมัติ นั้น หุ่นยนต์จำเป็นที่จะทราบข้อมูลของสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ดังกล่าวทำงานอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สภาพแวดล้อมนั้นเป็นสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุม หรือสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ไม่ทราบข้อมูลล่วงหน้าและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังตัวอย่างเช่นการใช้งานหุ่นยนต์ในบ้านร่วมกับมนุษย์ หุ่นยนต์ก็ยิ่งต้องการข้อมูลที่ครบถ้วนและมีความแม่นยำสูง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการนำอุปกรณ์รับรู้ที่เหมือนและต่างชนิดกันมาใช้งานร่วมกันเพื่อเพิ่มศักยภาพในการรับรู้ของหุ่นยนต์ การใช้อุปกรณ์รับรู้ร่วมกันนั้นเป็นงานที่ท้าทายเนื่องจากอุปกรณ์รับรู้ต่างชนิดกันจะตรวจวัดสภาพแวดล้อมเดียวกันด้วยวิธีการและลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (LRF: Laser Range Finder) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “เลเซอร์สแกน” สามารถตรวจวัดสภาพแวดล้อมได้ในรูปแบบของระยะทางจากตัวอุปกรณ์ถึงวัตถุ หรืออุปกรณ์รับภาพจำพวกกล้องวิดีโอสามารถตรวจจับแสงที่สะท้อนจากวัตถุทำให้ได้ภาพฉายสองมิติของสภาพแวดล้อม โดยเลเซอร์สแกนและอุปกรณ์รับภาพเป็นอุปกรณ์รับรู้ที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษซึ่งเห็นได้จากจำนวนบทความที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับการใช้งานอุปกรณ์รับรู้ดังกล่าว ข้อได้เปรียบของเลเซอร์สแกนคือสามารถให้ข้อมูลระยะความลึกของสภาพแวดล้อมได้เป็นมุมกว้าง ในขณะที่กล้องวิดีโอสามารถให้ข้อมูลสีที่บอกถึงรายละเอียดของสิ่งของได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้อุปกรณ์ทั้งสองมีราคาไม่สูงนักและสามารถทำงานแบบทันที (Real-time) ได้ เราจึงสามารถนำอุปกรณ์ทั้งสองมาประยุกต์ใช้ควบคู่กันในงานที่มีความน่าสนใจได้อย่างหลากหลาย เช่น การนำทาง [1 - 3], การหีบจับและเคลื่อนย้ายวัตถุ [4], การตรวจจับและติดตามบุคคล [5], การสร้างแผนที่และระบุตำแหน่ง [6], การสร้างพื้นผิวสามมิติ [7, 8] และอื่นๆ

การนำข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้หลายตัวหรือหลายชนิดมาใช้งานร่วมกันจะต้องทราบความสัมพันธ์ของตำแหน่งของอุปกรณ์รับรู้แต่ละตัวในระบบ ตัวอย่างเช่น ในระบบที่นำข้อมูลจากเลเซอร์สแกนและกล้องวิดีโอ การทราบความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของอุปกรณ์ทั้งสองจะทำให้เราสามารถหาได้ว่าพิกเซลใดในภาพที่สัมพันธ์กับจุดในสามมิติที่เราสนใจ เมื่อเลเซอร์สแกนของหุ่นยนต์บริการตรวจพบวัตถุวางขวางเส้นทาง หุ่นยนต์สามารถใช้ภาพสีจากกล้องเพื่อพิจารณาว่าวัตถุดังกล่าวเป็นคนหรือสิ่งของประเภทใด ควรจะเดินเข้าไปใกล้มากน้อยแค่ไหน กล่าวคือหุ่นยนต์สามารถรู้ตำแหน่งและขนาดของวัตถุได้พร้อมๆกับรายละเอียดสำคัญที่ได้จากกล้อง เช่น สีและ

ลักษณะพื้นผิว ด้วยศักยภาพที่เพิ่มขึ้นและความจำเป็นในการใช้งานเลเซอร์สแกนร่วมกับกล้องจึงมีงานวิจัยหลายชิ้นที่นำเสนอวิธีการหาความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของเลเซอร์สแกนและกล้อง ซึ่งรู้จักกันในชื่อ “ปัญหาการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง” หรือ “Laser Range Finder/Camera extrinsic parameter calibration problem” ซึ่งเป็นหัวข้อหลักของงานวิจัยชิ้นนี้ วิธีการที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองที่ได้มาจากการตรวจวัดวัตถุชิ้นเดียวกัน เมื่ออุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจพบวัตถุชิ้นเดียวกันข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันผ่านตำแหน่งของอุปกรณ์รับรู้ ดังนั้นกระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์จึงทำได้โดยการหาความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งที่ทำให้ข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองสอดคล้องกันมากที่สุด ตัวอย่างเช่น [9-11,13]

ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ คือ คุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์ โดยสิ่งที่ทำให้คุณภาพของข้อมูลลดลงก็คือลักษณะการทำงานของเลเซอร์สแกนซึ่งตรวจวัดสิ่งแวดล้อมอย่างไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือเลเซอร์สแกนสามารถตรวจวัดระยะวัตถุได้เพียงบางองศาเท่านั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดเชิงมุมของอุปกรณ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และปรับปรุงข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพซึ่งนำมาสู่การพารามิเตอร์ภายนอกที่มีความแม่นยำสูง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการทางสถิติเพื่อช่วยในการปรับปรุงข้อมูล โดยมีข้อกำหนดว่าข้อมูลจากวัตถุที่ใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ต้องได้มาโดยที่ตำแหน่งของวัตถุไม่ขึ้นกับความละเอียดเชิงมุมของเลเซอร์สแกน ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงเราไม่สามารถมองเห็นลำแสงของเลเซอร์สแกนจึงทำให้ข้อกำหนดดังกล่าวเป็นจริง นอกจากนี้วิธีการปรับปรุงข้อมูลที่ได้นำเสนอเป็นทำงานกับข้อมูลนำเข้าก่อนที่จะส่งต่อไปกับกระบวนการหาพารามิเตอร์ภายนอกทำให้สามารถนำไปใช้ได้กับงานที่หลากหลาย

การปรับปรุงข้อมูลสามารถเพิ่มความแม่นยำให้แก่ข้อมูลได้ แต่กระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์ยังคงใช้เวลามากเนื่องจากหลายขั้นตอนอาศัยการตัดสินใจของมนุษย์ โดยเฉพาะการเก็บข้อมูลซึ่งผู้ปฏิบัติงานต้องเคลื่อนย้ายวัตถุไปรอบๆ เพื่อให้อุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจวัดได้พร้อมๆกัน และการที่จะได้ผลลัพธ์ที่ดีจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากและครอบคลุมพื้นที่การทำงานของอุปกรณ์รับรู้ทั้งสอง โดยทั่วไปผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้ส่งสัญญาณให้ระบบบันทึกข้อมูลเมื่อวัตถุที่ใช้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม หลังจากการบันทึกข้อมูลทั้งหมดเสร็จสิ้นผู้ปฏิบัติงานต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อนนำไปใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก และหากมีข้อผิดพลาดหรือผลการปรับแก้พารามิเตอร์ไม่แม่นยำก็จำเป็นต้องกลับไปสู่กระบวนการเก็บข้อมูลอีกครั้งหนึ่ง เพื่อลดเวลาในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอกระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์แบบกึ่งอัตโนมัติ กล่าวคือ ระบบสามารถตรวจหาและติดตามวัตถุที่ใช้แล้วจึงตัดสินใจบันทึกข้อมูลเมื่อคุณภาพของข้อมูลผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทั้งนี้ระบบยังคงต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานในการเคลื่อนย้ายวัตถุ อย่างไรก็ตามระบบสามารถแสดงผลและตอบสนองกับผู้ปฏิบัติงานได้เพื่อช่วยให้ขั้นตอนการเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างราบรื่น ตัวอย่างเช่น การระบุตำแหน่งที่ผู้ปฏิบัติงานควรเคลื่อนย้ายวัตถุไป การให้สัญญาณเสียงเมื่อมีการบันทึกข้อมูล ฯลฯ ระบบปรับแก้พารามิเตอร์แบบกึ่งอัตโนมัติประกอบด้วยแนวคิดสำคัญสองประการ ประการแรก คือ การกำหนดมาตรฐานวัดคุณภาพของข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจบันทึกข้อมูลอย่างอัตโนมัติ โดยมาตรฐานวัดคุณภาพนี้เป็นตัวกำหนดระดับคุณภาพของข้อมูลที่ระบบยอมรับได้ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ได้ ประการที่สอง คือ ระบบต้องสามารถแสดงมาตรฐานวัดคุณภาพข้างต้นต่อผู้ปฏิบัติงานระหว่างการเก็บข้อมูล เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลือกและแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลได้ทันที

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้องถูกกล่าวถึงมาตั้งแต่ปี 1995 โดย Wasielewski และ Strauss [9] เสนอวิธีการในการปรับแก้พารามิเตอร์โดยใช้อุปกรณ์อ้างอิงช่วยในการปรับแก้ อุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษที่มีสันนูนตรงกลางแผ่นและระบายสีแต่ละข้างด้วยสีขาวและสีดำตามลำดับ ลักษณะดังกล่าวทำให้ข้อมูลจากเลเซอร์สแกนปรากฏเป็นเส้นตรงสองเส้นบรรจบกัน ซึ่งจุดยอดที่เป็นสันสามารถคำนวณได้จากจุดตัดของเส้นตรงทั้งสอง นอกจากนี้การหาสี่เหลี่ยมทั้งสองให้แตกต่างกันทำให้สามารถหาเส้นกึ่งกลางที่เป็นสันกระดาษได้ง่ายจากภาพจากกล้อง เนื่องจากเราทราบว่าจุดยอดจากข้อมูลเลเซอร์มีความสัมพันธ์กับเส้นในภาพจึงสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ภายนอกได้ โดยนำชุดข้อมูลจุดและเส้นจำนวนมากพอมารับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) จนได้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่เหมาะสม

สำหรับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดทำได้โดยการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายเป็นฟังก์ชันซึ่งรับชุดข้อมูลจุดและพารามิเตอร์ภายนอก จากนั้นจึงหาพารามิเตอร์ภายนอกที่ทำให้ฟังก์ชันดังกล่าวมีค่าเหมาะสมที่สุด โดยฟังก์ชันที่ได้รับความนิยมในงานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ ฟังก์ชันความผิดพลาดของการฉายจุดเลเซอร์ลงในกรอบอ้างอิงภาพ และฟังก์ชันความผิดพลาดของตำแหน่งจุดเลเซอร์ในกรอบอ้างอิงสามมิติ

### 1.2.1 ฟังก์ชันความผิดพลาดของการฉายจุดเลเซอร์ลงในกรอบอ้างอิงภาพ

การคำนวณความผิดพลาดทำโดยการฉายจุดข้อมูลเลเซอร์ลงในภาพที่ได้จากกล้อง จากนั้นจึงวัดระยะสั้นสุดจากจุดที่ฉายได้กับเส้นขอบของวัตถุในภาพ [9, 12, 13] สำหรับฟังก์ชันความผิดพลาดในรูปแบบนี้ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การตรวจหาบุคคล [14], การรู้จำวัตถุ [15], การนำทางอัตโนมัติในหุ่นยนต์ [16, 17], การสร้างแผนที่ของสิ่งแวดล้อม [18] หรือการปรับแก้พารามิเตอร์ร่วมกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ [19] เป็นต้น

ในปี 2006 มีการเสนอวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้องอ้อมนิ [12] โดยมีบทวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ในกรณีต่างๆ ได้แก่ กรณีที่เลเซอร์มีลักษณะเป็นลำแสงและมองเห็นได้, กรณีที่เลเซอร์มีลักษณะเป็นระนาบและมองเห็นได้ และกรณีที่เลเซอร์ไม่สามารถถูกมองเห็นได้ งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าในสองกรณีแรกที่ลำแสงเลเซอร์มองเห็นได้ การหาพารามิเตอร์ภายนอกสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองเพียงคู่เดียว ต่างกับกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ไม่สามารถมองเห็นได้ การหาพารามิเตอร์ภายนอกต้องมีการเปลี่ยนมุมมองของกล้องหรือมีการเคลื่อนย้ายวัตถุอ้างอิงเพื่อบันทึกชุดข้อมูลที่แตกต่างกันจำนวนหลายชุด

ในปี 2007 มีการเสนอทวิเคราะห์ลักษณะของอุปกรณ์อ้างอิงแบบต่างๆ [13] เช่น แบบจุดแบบเส้น และแบบระนาบ และสรุปได้ว่าอุปกรณ์อ้างอิงแบบเส้นมีความเหมาะสมที่สุด จึงนำเสนออุปกรณ์อ้างอิงแบบใหม่ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นกระดานสามเหลี่ยม ส่งผลให้การเก็บข้อมูลแต่ละครั้งจะได้คู่ข้อมูลจำนวนสองคู่จากด้านทั้งสองของสามเหลี่ยมที่ตัดกับระนาบของเลเซอร์สแกน จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าแผ่นสามเหลี่ยมดังกล่าวควรเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งส่งผลให้ได้พารามิเตอร์ภายนอกที่มีความแม่นยำมากที่สุด

### 1.2.2 ฟังก์ชันความผิดพลาดของตำแหน่งจุดเลเซอร์ในกรอบอ้างอิงสามมิติ

การคำนวณความผิดพลาดทำโดยอาศัยอุปกรณ์อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นตารางหมากรุก การใช้ตารางหมากรุกทำให้กล้องสามารถบอกการวางตัวของระนาบของวัตถุอ้างอิงเทียบกับกล้องได้ จากนั้นจึงคำนวณค่าความผิดพลาดจากระยะทางระหว่างจุดเลเซอร์และระนาบดังกล่าว [10, 11] โดยงานวิจัยนี้ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การรู้จำรถยนต์ [20], การนำทางอัตโนมัติในหุ่นยนต์ [21, 22], การสร้างแผนที่ของสิ่งแวดล้อม [23] หรือการปรับแก้พารามิเตอร์ร่วมกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ [24, 25, 26] เป็นต้น

ในปี 2004 มีการใช้อุปกรณ์อ้างอิงที่ใช้มีลักษณะเป็นตารางหมากรุกสี่เหลี่ยม [10] ข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์สแกนจึงมีลักษณะเป็นส่วนของเส้นตรง ซึ่งจุดแรกและจุดสุดท้ายของส่วนของเส้นตรงจึงมีความสัมพันธ์กับบริเวณขอบของแผ่นตารางหมากรุกดังกล่าว และเนื่องจากขอบของกระดานมีสีตัดกับพื้นหลังทำให้กล้องสามารถตรวจวัดเส้นขอบได้ จึงสามารถรวบรวมชุดข้อมูลคู่จุดและเส้นเพื่อใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ได้อย่างเพียงพอ เนื่องจากกระดานดังกล่าวมีลักษณะเป็นตารางหมากรุกทำให้เราสามารถระบุตำแหน่งคร่าวๆของระนาบของกระดานหมากรุกเทียบกับกล้องได้ เราจึงมีคำตอบเริ่มต้นที่ดีให้กับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและได้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกแม่นยำขึ้น

ในปี 2005 มีการปรับเปลี่ยนตัววัดค่าความผิดพลาดสำหรับกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด [11] จากการวัดค่าความผิดพลาดจากระยะทางของจุดเลเซอร์ไปยังระนาบของกระดานตามแนวตั้งฉากไปเป็นการวัดจากระยะทางของจุดเลเซอร์ไปยังระนาบของกระดานตามแนวรัศมีของเลเซอร์สแกน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคัดกรองข้อมูลที่น่าจะเกิดจากความผิดพลาดในการอ่านค่าของอุปกรณ์รับรู้ออกไปเพื่อทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

### 1.2.3 การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกแบบอัตโนมัติและแบบออนไลน์

ในปี 2009 มีการนำเสนอวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างกล้องและเลเซอร์สแกนแบบอัตโนมัติ [27] โดยอาศัยชุดข้อมูลต่อเนื่องจากกล้องและเลเซอร์สแกนและไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อ้างอิงปรากฏอยู่ในชุดข้อมูลดังกล่าว งานวิจัยนี้ใช้หลักการสร้างแบบจำลองสามมิติจาก

ชุดข้อมูลต่อเนื่องจากกล้อง ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะสร้างแบบจำลองสามมิติของสภาพแวดล้อมพร้อม กับระบุตำแหน่งของกล้องที่สัมพันธ์กับข้อมูลดังกล่าว จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนการปรับแก้ พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างกล้องและเลเซอร์สแกน โดยการหาพารามิเตอร์ภายนอกที่ทำให้สาม มิติที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ซ้อนทับกันมากที่สุด และเพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ ระบบจะ ตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องเชิงระยะทางในแบบจำลองสามมิติจากข้อมูลเลเซอร์ เช่น ขอบของรถยนต์ กับกำแพงด้านหลัง และเปรียบเทียบความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวกับความไม่ต่อเนื่องของสีที่ปรากฏใน ภาพ สังเกตว่าวิธีการปรับแก้ที่งานวิจัยนี้นำเสนอเป็นระบบแบบอัตโนมัติ แต่เนื่องจากการใช้ข้อมูล ที่ต้องจัดเก็บมาก่อนจึงอาจเกิดปัญหาด้านคุณภาพของข้อมูลและต้องกลับไปจัดเก็บข้อมูลใหม่อีก ครั้ง

ในปี 2010 มีการเสนอวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ระหว่างเลเซอร์สแกนหลายตัวแบบ ออนไลน์ [28] โดยได้นำวิธีการปรับแก้แบบไม่เชิงเส้น SOCP [29] มาช่วยในการหาค่าเหมาะสมสุด เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วจึงสามารถปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกแบบ ออนไลน์ได้ วิธีการที่งานวิจัยนี้เสนอไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์อ้างอิงแต่จะตรวจหาจุดสังเกตที่มี ลักษณะเป็นต้นเสาอย่างอัตโนมัติ จากนั้นจึงเปรียบเทียบจุดสังเกตที่ได้มาจากเลเซอร์สแกนแต่ละตัว เพื่อหาจุดที่มีความสัมพันธ์กันแล้วจึงคำนวณหาพารามิเตอร์ภายนอก อย่างไรก็ตามวิธีการนี้อาจ เกิดความผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจากการจับคู่จุดที่ไม่มีความสัมพันธ์กันในโลกจริง



### 1.3 การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์

การนำเสนอเนื้อหาในวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง, ส่วนการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก, และส่วนการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกแบบอัตโนมัติ

- ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อธิบายลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ ลักษณะของปัญหา และทฤษฎีที่ใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งประกอบด้วย บทที่ 2 อธิบายการทำงานของอุปกรณ์ และรูปแบบข้อมูลที่เลเซอร์สแกนและกล้องสามารถตรวจวัดได้ และท้ายบทอธิบายถึงปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง และบทที่ 3 อธิบายพฤติกรรมของเลเซอร์สแกนและกล้องที่ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของข้อมูลที่ได้ และท้ายบทอธิบายถึงวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้จัดการกับความไม่แน่นอนของข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้
- ส่วนการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก บทที่ 4 อธิบายรายละเอียดของการแก้ปัญหา ได้แก่ การเลือกใช้อุปกรณ์อ้างอิง, การนำวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมาใช้หาพารามิเตอร์ภายนอก, การปรับปรุงข้อมูลเชิงสถิติ, ขอบเขตของความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้ และท้ายบทได้แสดงผลการทดลองด้วยโปรแกรมจำลองและการทดลองด้วยอุปกรณ์จริง
- ส่วนการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกแบบอัตโนมัติ บทที่ 5 อธิบายรายละเอียดของการปรับเปลี่ยนวิธีการแก้ปัญหาส่วนต่างๆ ให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ ได้แก่ การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงแบบอัตโนมัติ, มาตรฐานวัดคุณภาพของข้อมูล, ระบบแสดงผลและตอบสนองสำหรับผู้ปฏิบัติงาน และท้ายบทได้แสดงผลการทดลองด้วยด้วยอุปกรณ์จริง

## บทที่ 2

### อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและพารามิเตอร์ภายนอก

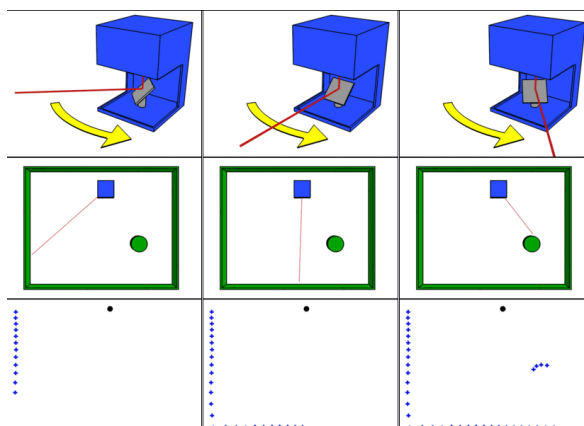
#### 2.1 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (Laser Range Finder)

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (LRF: Laser Range Finder, หรือ LADAR: Laser Detection and Ranging) หรืออีกอย่างหนึ่งว่าเลเซอร์ (Laser Scan) เป็นเทคโนโลยีการวัดระยะวัตถุด้วยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ขนาดเรียวยาวเล็กออกไปเป็นจังหวะสั้นๆ และวัดพลังงานที่วัตถุสะท้อนกลับมา เลเซอร์สแกนถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การวัดและสำรวจ การออกแบบสถาปัตยกรรม การสร้างโมเดลสามมิติ การสร้างแผนที่นำทาง การลงจอดของยานอวกาศ ฯลฯ เลเซอร์สแกนแต่ละรุ่นจะใช้แสงเลเซอร์ที่ย่านความถี่ที่ต่างกันซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรด (600–1000 นาโนเมตร) วัตถุที่สามารถวัดได้มีความหลากหลายสูง เช่น ผนัง โต๊ะไม้ ก้อนหิน พื้นกระเบื้อง ก่ออิฐ โคม ก่ออิฐพลาสติก เป็นต้น

การคำนวณระยะของวัตถุแบ่งออกเป็นสองวิธีหลัก คือ วิธีที่หนึ่งแบบ "Incoherent" ซึ่งวัดระยะทางจากปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับมา และวิธีที่สองแบบ "Coherent" ซึ่งวัดความถี่ของลำแสงซึ่งจะถูกรบกวนได้ง่ายกว่าแบบแรก วิธีการวัดทั้งสองวิธีจะต้องอาศัยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ออกไปซึ่งแบ่งเป็น ลำแสงพลังงานต่ำ และลำแสงพลังงานสูง สำหรับลำแสงพลังงานต่ำนั้นจะใช้พลังงานน้อยมาก (ระดับหนึ่งไมโครจูล) และส่วนใหญ่จะปลอดภัยต่อสายตา ส่วนลำแสงพลังงานสูงมักจะถูกใช้ในงานวิจัยด้านชั้นบรรยากาศ

เลเซอร์สแกนประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน (รูปที่ 2.1) ได้แก่

- แสงเลเซอร์ มีช่วงความยาวคลื่น 600-1000 นาโนเมตร ซึ่งอุปกรณ์ปล่อยลำแสงเลเซอร์มีราคาถูก แต่ส่งผลกระทบต่อสายตาจึงปล่อยพลังงานได้อย่างจำกัด เลเซอร์บางชนิดมีความยาวคลื่นเกินกว่า 1000 นาโนเมตร ซึ่งปลอดภัยต่อสายตาเนื่องจากตามนุษย์ไม่รับแสงที่ความยาวคลื่นนี้ แต่อุปกรณ์ตรวจวัดจะมีประสิทธิภาพต่ำ
- อุปกรณ์ปล่อยลำแสงเลเซอร์ มีลักษณะเป็นกระจกหมุนซึ่งวางตัวทำมุม 45 องศากับระนาบการหมุนเพื่อสะท้อนลำแสงเลเซอร์ออกไปตามทิศทางต่างๆ ในแนวระนาบ การเลือกอุปกรณ์ปล่อยลำแสงและฐานหมุนนี้ส่งผลต่อความละเอียดของข้อมูลที่อุปกรณ์ตรวจวัดได้และความเร็วในการทำงานของเลเซอร์สแกน
- อุปกรณ์รับแสง ทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแสงที่สะท้อนกลับมาจากวัตถุ ความแม่นยำและความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์รับแสงส่งผลต่อความละเอียดของข้อมูลที่เลเซอร์สแกนตรวจวัดได้และความเร็วในการทำงานของเลเซอร์สแกน



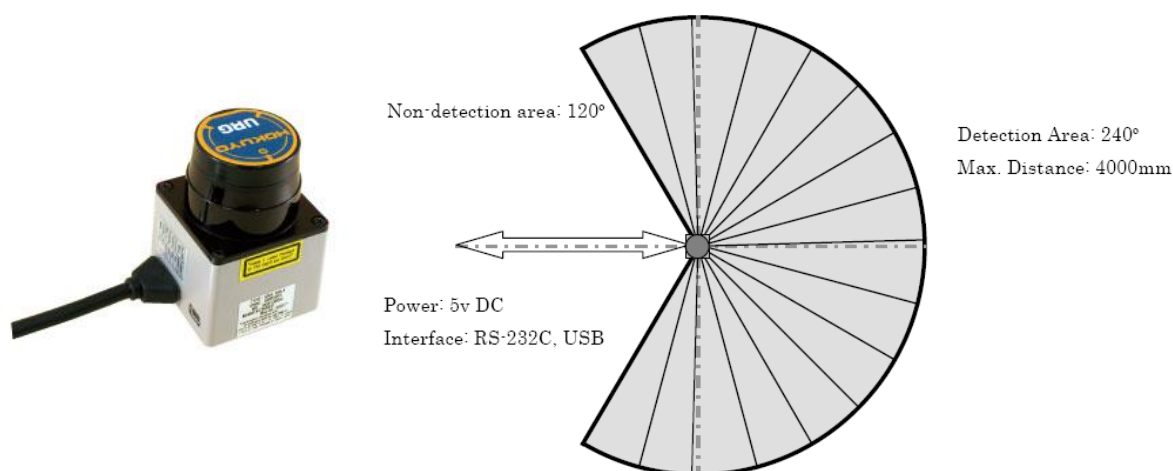
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเลเซอร์สแกนที่เวลาต่างๆ,

แถวบน) กระจกหมุนและทิศของลำแสงที่ถูกปล่อยออกมา,  
แถวกลาง) ภาพมุมมองของสิ่งแวดล้อม, แถวล่าง) ข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์สแกน

ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้เลเซอร์สแกน ได้แก่ ระยะการวัด, มุมมองการวัด, ความละเอียดเชิงมุม และความเร็วการวัด เช่น งานภายในอาคารใช้ระยะการวัดที่สั้นกว่างานภายนอกอาคาร งานตรวจสอบชิ้นงานใช้มุมมองที่แคบกว่างานตรวจจับความเคลื่อนไหวภายในพื้นที่ งานหุ่นยนต์ต้องการความเร็วในการวัดสูงเพื่อการตัดสินใจที่รวดเร็ว สำหรับเลเซอร์สแกนที่มีจำหน่ายมาจากหลายผู้ผลิต เช่น Hokuyo, SICK ฯลฯ ผู้ผลิตแต่ละรายจะผลิตเลเซอร์สแกนออกมาหลายรุ่นเพื่อตอบสนองความต้องการที่แตกต่างกันของผู้ใช้ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1 โดยราคาของอุปกรณ์แต่ละรุ่นมีแนวโน้มที่สัมพันธ์กับระยะการวัดเป็นหลัก

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์รุ่นต่างๆ

รุ่น	URG-04LX	UTM-30LX	LMS100	LMS291
ระยะการวัด (เมตร)	0.06 – 4	0.1 – 30	0.5 – 20	0 – 80
มุมมองการวัด (องศา)	240	270	270	180
ความละเอียดเชิงมุม (องศา)	0.36	0.25	0.25	0.25
ความเร็วการวัด (มิลลิวินาที/รอบ)	100	25	40	13
ราคาโดยประมาณ (บาท)	74,000	173,000	101,000	259,000



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (ซ้าย) เลเซอร์สแกนรุ่น Hokuyo URG-04, ขวา) ขอบเขตของบริเวณที่อุปกรณ์สามารถวัดระยะทางได้

สำหรับเลเซอร์สแกนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเลเซอร์สแกนของบริษัท Hokuyo รุ่น URG-04 [30] (รูปที่ 2.2 ซ้าย) โดยมีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์รุ่น URG-04

รุ่น	URG-04
ระยะการวัด	0.06 ถึง 4 เมตร
มุมมองการวัด	240 องศา
ความละเอียดเชิงมุม	0.36 องศา
จำนวนข้อมูล	683 จุด
ความเร็วการวัด	100 มิลลิวินาที/รอบ
ความแม่นยำ	$\pm 1\%$
การเชื่อมต่อ	RS-232, USB
แหล่งกำเนิดแสง	ความถี่ 785 นาโนเมตร
ไฟนำเข้า	5 โวลต์
ขนาด	50 x 50 x 70 มิลลิเมตร
น้ำหนัก	160 กรัม

## 2.2 กล้องและการปรับแก้พารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Camera & Intrinsic Parameter Calibration)

สำหรับกล้องที่มีใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีลักษณะการทำงานแบบกล้องรูเข็ม (Pinhole Camera) [31] โดยกล้องจะทำการฉายภาพวัตถุในพิกัดสามมิติผ่านรูขนาดเล็กให้มาอยู่ในพิกัดสองมิติของรูปดังสมการต่อไปนี้

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}$$

หรือเขียนโดยย่อได้เป็น

$$s \cdot p = AP_c$$

โดยจุด  $P_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$  เป็นพิกัดสามมิติของวัตถุเทียบกับกล้อง, จุด  $p = (u, v)$  เป็นพิกัดของจุดที่ฉายลงบนภาพ และเมทริกซ์  $A$  อธิบายพารามิเตอร์ภายในของกล้องประกอบไปด้วยจุด  $(c_x, c_y)$  เป็นจุดกึ่งกลางภาพมีหน่วยเป็นพิกเซลและ  $f_x, f_y$  เป็นความยาวโฟกัสตามแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามลำดับ ถ้ารูปที่ได้จากกล้องถูกขยายหรือย่อด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ค่าในเมทริกซ์  $A$  จะต้องถูกคูณด้วยค่าคงที่ค่านั้นด้วย อย่างไรก็ตามเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่า  $s$  เพื่อรักษาให้เมทริกซ์  $A$  มีค่าเท่าเดิม ดังนั้นค่าของเมทริกซ์  $A$  จึงขึ้นกับตัวกล้องและไม่ขึ้นกับมุมมองของกล้อง เราจึงเรียกเมทริกซ์  $A$  ว่าพารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Intrinsic Parameters) และเมื่อถูกวัดออกมาแล้วจะสามารถนำติดตัวกล้องไปใช้ซ้ำได้เสมอ

การนำกล้องไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นเราต้องแปลงพิกัดของวัตถุในกรอบอ้างอิงโลกมาเป็นพิกัดในกรอบอ้างอิงกล้อง ดังนี้

$$s \cdot p = AP_c = A[R | t]P$$

โดยที่  $[R | t]$  เป็นเมทริกซ์ที่เปลี่ยนพิกัด  $P = [X, Y, Z]^T$  ในกรอบอ้างอิงโลกเป็นพิกัด  $P_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$  ในกรอบอ้างอิงกล้อง ซึ่งเมทริกซ์นี้ขึ้นกับตำแหน่งของกล้องจึงถูกเรียกว่าพารามิเตอร์ภายนอก (Extrinsic Parameter) เราสามารถแจกแจงความสัมพันธ์ข้างต้นได้เป็น

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t$$

และ

$$\begin{aligned}x' &= X_c / Z_c \\y' &= Y_c / Z_c \\u &= f_x \cdot x' + c_x \\v &= f_y \cdot x' + c_y\end{aligned}$$

กล้องรูเข็มที่ดีต้องมีรูที่เป็นวงกลมและมีขนาดเล็กเพื่อให้ได้ภาพที่คมชัด แต่รูที่มีขนาดเล็กลงทำให้แสงผ่านได้น้อยลง และส่งผลเสียต่อคุณภาพของภาพที่ได้ ดังนั้นจึงมีการนำเลนส์มาทำหน้าที่รวมแสงแทนรูเข็ม อย่างไรก็ตามการนำเลนส์มาใช้ทำให้เกิดผลที่ตามมาคือ การบิดงอของภาพ โดยส่วนใหญ่การบิดงอของภาพจะเกิดขึ้นตามแนวแกนรัศมีจากศูนย์กลางเลนส์ ดังนั้นเราสามารถปรับแก้สมการข้างต้นใหม่ให้เป็น

$$\begin{aligned}x'' &= x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\y'' &= y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y'\end{aligned}$$

และ

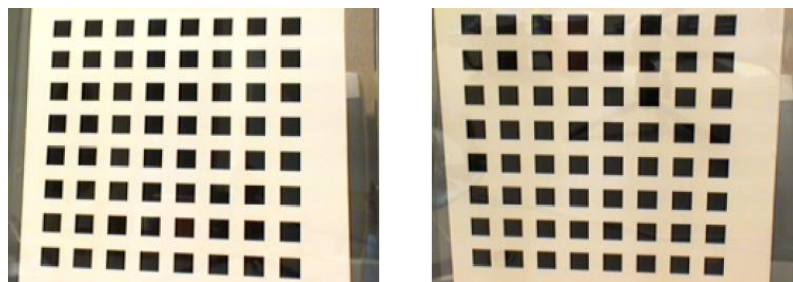
$$\begin{aligned}u &= f_x \cdot x'' + c_x \\v &= f_y \cdot x'' + c_y\end{aligned}$$

โดยที่

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

โดยมี  $k_1, k_2, k_3$  เป็นค่าคงที่ความบิดงอในแนวรัศมีและ  $p_1, p_2$  เป็นค่าคงที่ความบิดงอในแนวตั้งฉาก เนื่องจากค่าคงที่ข้างต้นจะขึ้นกับตัวกล้องแต่ไม่ขึ้นกับมุมมองของกล้องและขนาดของภาพจึงถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องด้วย

งานทางด้านหุ่นยนต์ที่มีความเกี่ยวข้องกับกล้องนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์และฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุในสามมิติและพิกัดในภาพเพื่อใช้ในการคำนวณที่มีความแม่นยำสูง ดังนั้นสิ่งที่ขาดไม่ได้สำหรับงานที่เกี่ยวกับกล้องก็คือ การปรับแก้พารามิเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์และฟังก์ชันดังกล่าว งานวิจัย [31] ได้นำเสนอหลักการในการประมาณพารามิเตอร์ของกล้อง โดยใช้กระดานของจุดจำนวนหนึ่งที่รู้ตำแหน่งของจุดเหล่านั้นอยู่ก่อนแล้วจึงทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างจุดสองมิติในภาพ  $p$  กับตำแหน่งในโลกสามมิติ  $P$  (รูปที่ 2.3) จากนั้นจึงนำข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวมาสร้างเป็นระบบสมการ จากนั้นจึงหาค่าของพารามิเตอร์ด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Process) นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวได้เผยแพร่โปรแกรมและรหัสต้นฉบับสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ภายในอีกด้วย



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สำหรับการปรับแก้พารามิเตอร์กล้อง

สำหรับกล้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 รุ่น ได้แก่ กล้องของบริษัท Allied Vision Tech รุ่น Stingray F-046 B/C [32] กล้องของบริษัท Canon รุ่น LEGRIA HF M300 [33] และกล้องของบริษัท Logitech รุ่น Webcam Pro 9000 [34] (รูปที่ 2.4) และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังตารางที่ 2.3 โดยกล้องที่เลือกใช้มีความละเอียดของภาพที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 640x480 พิกเซลซึ่งถือว่าเป็นระดับความละเอียดต่ำจนถึง 1920x1080 พิกเซลที่เป็นความละเอียดระดับสูงหรือที่รู้จักกันในชื่อกล้อง HD (High-definition) นอกจากนี้กล้องแต่ละตัวยังมีมุมมองที่แตกต่างกันตั้งแต่ 50 – 74 องศา ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดพื้นที่ของบริเวณที่กล้องมองเห็นได้



รูปที่ 2.4 กล้องรุ่นต่างๆ ซ้าย) กล้อง Stingray F-046 B/C, กลาง) กล้อง LEGRIA HF M300, ขวา) กล้อง Webcam Pro 9000

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของกล้องรุ่นต่างๆ

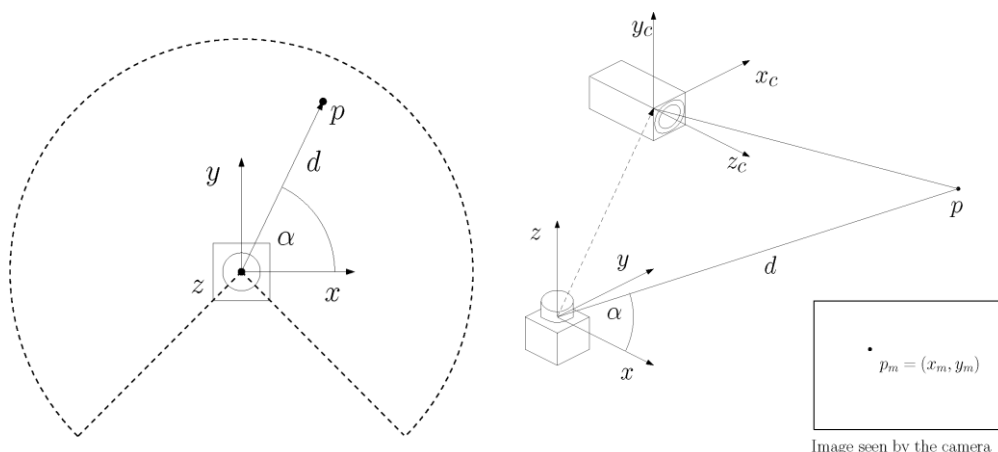
รุ่น	Stingray F-046 B/C	LEGRIA HF M300	Webcam Pro 9000
ความละเอียด(พิกเซล)	780 x 580	1920x1080	640x480
ความกว้างของมุมมอง(องศา)	ประมาณ 74 x 59	ประมาณ 50 x 30	ประมาณ 60 x 45
ความยาวโฟกัส(มิลลิเมตร)	17.5	4.1-61.5	3.7

## 2.3 การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง (Extrinsic LRF/Camera Calibration)

### 2.3.1 กรอบอ้างอิง

เนื่องจากเลเซอร์สแกนสามารถตรวจวัดวัตถุได้ในระนาบการทำงานของอุปกรณ์ เราจึงสามารถกำหนดให้กรอบอ้างอิงของเลเซอร์สแกนตรงกับกรอบอ้างอิงของโลก กล่าวคือเลเซอร์สแกนตั้งอยู่ที่จุดกำเนิด และจุดที่เลเซอร์สแกนตรวจวัดได้จะอยู่ที่จุด  $p = [x, y, z = 0]^T$  ซึ่งถูกแทนด้วยพิกัดเชิงขั้ว  $p_l = (\alpha, d)$  โดยที่  $\alpha = \tan^{-1}(y/x)$  เป็นมุมของจุดเทียบกับแกน x ของเลเซอร์สแกน และ  $d = \sqrt{x^2 + y^2}$  เป็นระยะทางจากเลเซอร์สแกนไปยังจุดดังกล่าว (รูปที่ 2.5 ซ้าย)

การกำหนดกรอบอ้างอิงของกล้องทำได้โดยสมมติให้กล้องอยู่ที่ตำแหน่ง  $t$  และมีการหมุน  $R$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ภายนอก  $M_{ext}$  ดังนั้นจุด  $p$  สามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $p_c = Rp - t$  เทียบกรอบอ้างอิงของกล้อง เมื่อเราทราบเมทริกซ์ภายใน  $M_{int}$  จุด  $p$  จะปรากฏในภาพที่ตำแหน่ง  $p_m = (x_m, y_m) = M_{int}p_c$  (รูปที่ 2.5 ขวา) โดยในงานวิจัยนี้ถือว่าภาพที่ได้จากกล้องถูกแก้ไขความบิดงอของภาพแล้ว



รูปที่ 2.5 กรอบอ้างอิงและตัวอย่างข้อมูล ซ้าย) กรอบอ้างอิงโลกและจุดที่เลเซอร์สแกนตรวจวัดได้, ขวา) ข้อมูลจุดในภาพจากกล้อง

### 2.3.2 ฟังก์ชันการฉายภาพและการปรับแก้พารามิเตอร์

ฟังก์ชันการฉายภาพ  $P$  เป็นการเปลี่ยนจุด  $p$  ในกรอบของโลกจริงไปอยู่ในกรอบของภาพที่จุด  $p_m$  สามารถนิยามได้เป็น

$$p_m = P(M_{ext}, p)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อทราบ  $M_{ext}$  เราสามารถฉายภาพชุดข้อมูลจุดจากเลเซอร์สแกนลงในภาพได้ แต่เมื่อต้องการหาค่าของ  $M_{ext}$  เราต้องทราบข้อมูลที่จำเป็น คือ คู่ข้อมูลของจุดเลเซอร์  $p_l = (\alpha_i, d_i)$  กับจุดในภาพ  $p_m = (x_i, y_i)$  ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดจากจุด  $p_i$  เดียวกัน เราจะเรียกปัญหา



การหา  $M_{ext}$  ว่าปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง

ในทางปฏิบัติการแก้สมการดังกล่าวเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เราจึงหาค่าของ  $M_{ext}$  ด้วยการหาค่า  $M_{ext}$  ที่ทำให้ความผิดพลาดของการฉายภาพน้อยสุด (Projection Error) สำหรับ  $M_{ext}$  ใดๆ เรายุทธความผิดพลาดของการฉายภาพเมื่อเทียบกับคู่ข้อมูลจุด  $(p_l, p_m)$  ดังนี้

$$E(M_{ext}, p_l) = \|P(M_{ext}, p_l) - p_m\|_2$$

เพื่อความชัดเจน เราสามารถนิยามปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้องได้ดังนี้ กำหนดให้มีชุดของข้อมูล  $D$  ซึ่งเป็นชุดของข้อมูลคู่จุด  $(p_l, p_m)$  เราต้องหาค่า  $M_{ext}$  ซึ่งทำให้ค่าของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS: Root Mean Square) ของความผิดพลาดของการฉายภาพมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ เราจะหา

$$M_{ext} = \arg \min \left( \sqrt{\frac{\sum_{p \in D} E(M_{ext}, p)^2}{|D|}} \right)$$

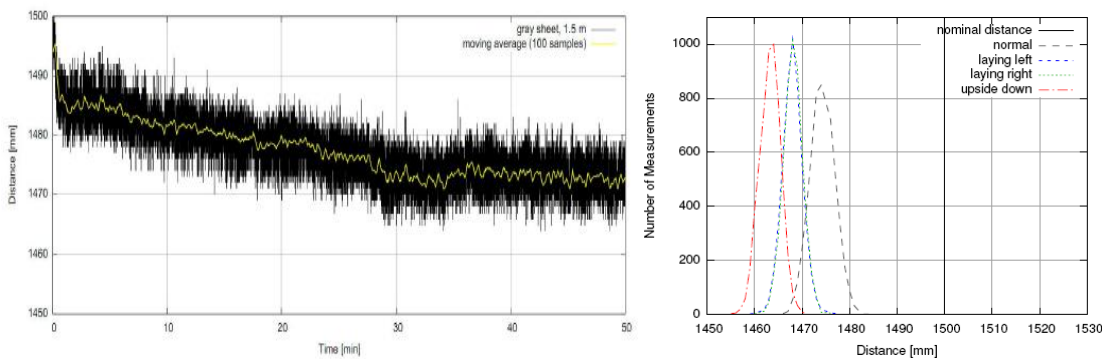
### บทที่ 3

## คุณสมบัติของอุปกรณ์และความผิดพลาดในการถ่ายภาพ

### 3.1 คุณสมบัติของเลเซอร์สแกน (LRF Characteristic)

เลเซอร์สแกนตรวจวัดระยะของวัตถุรอบๆตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง โดยจะสามารถตรวจวัดวัตถุได้ที่มุม  $\alpha = k\gamma$  เมื่อ  $\gamma$  เป็นความละเอียดเชิงมุมของเลเซอร์สแกน และ  $k$  คืออันดับของเส้นลำแสงที่เลเซอร์สแกนทำการตรวจวัดสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น เลเซอร์สแกนรุ่น URG-04LX มีความละเอียดเชิงมุมประมาณ 0.36 องศา (360 องศา/1024 เส้น) ซึ่งเทียบเท่ากับระยะทางประมาณ 2.25 เซนติเมตรต่อเส้นที่ระยะ 4 เมตร (ระยะทำการไกลสุดของอุปกรณ์รับรู้) หมายความว่าข้อมูล  $p_i$  ที่ได้อาจจะผิดพลาดจากจุด  $p$  ได้สูงสุดถึง 2.25 เซนติเมตรแม้ไม่มีสัญญาณรบกวน

เลเซอร์สแกนเป็นอุปกรณ์รับรู้แบบกัมมันต์ (Active sensor) ซึ่งสามารถปล่อยพลังงานออกมาเพื่อช่วยในการตรวจวัด ดังนั้นเมื่อเลเซอร์สแกนปล่อยลำแสงอินฟราเรดออกมาจึงก่อให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในระบบ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เลเซอร์สแกนวัดระยะทางผิดไปจากความเป็นจริง งานวิจัย [35] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยใช้เลเซอร์สแกนรุ่น URG-04LX พบว่าในช่วง 30 นาทีแรกของการทำงานระยะทางที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่หลังจากนั้น (รูปที่ 3.1 ซ้าย) โดยค่าที่วัดได้เมื่อเลเซอร์สแกนทำงานครบ 60 นาทีมีค่าประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ของค่าในตอนเริ่มต้น ช่วงเวลาข้างต้นถูกเรียกว่าช่วงเวลาอุ่นเครื่อง (Warm-up Period) เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยข้างต้นควรเปิดเลเซอร์สแกนทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาทีก่อนเริ่มการใช้งาน และเลเซอร์สแกนควรวางตัวระนาบกับพื้นโลกตลอดเวลา



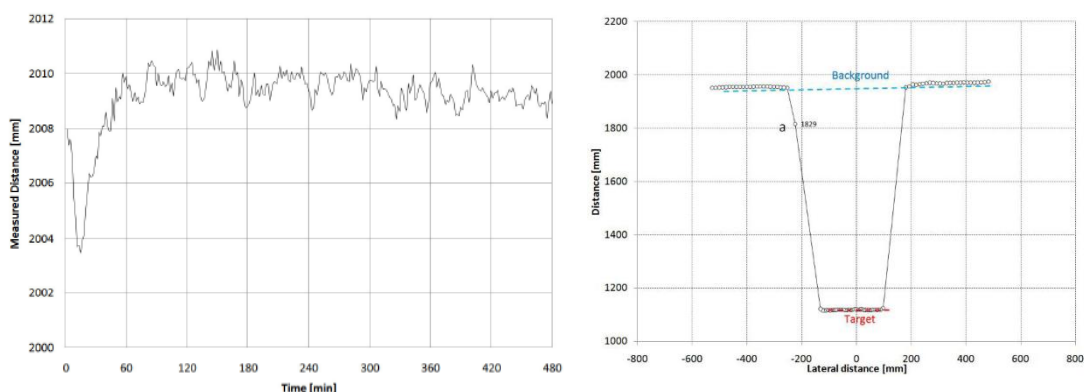
รูปที่ 3.1 พฤติกรรมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์

ซ้าย) แสดงผลจากปรากฏการณ์ความร้อนสะสม, ขวา) แสดงผลจากความเอียงของเลเซอร์สแกน

นอกจากนี้ [35] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดจากการวางเลเซอร์สแกนในมุมต่างๆ เช่น วางตะแคงซ้าย, วางตะแคงขวา และวางคว่ำ พบว่าการวางเลเซอร์สแกนตะแคงซ้ายและ

ตะแคงขวาทำให้ระยะทางที่วัดได้มีค่าเป็น 98.3 เปอร์เซ็นต์ของการวางแบบปรกติ และการวางคว่ำทำให้ระยะทางที่วัดได้มีค่าเป็น 97.6 เปอร์เซ็นต์ของการวางแบบปรกติ (รูปที่ 3.1 ขวา) ดังนั้นเมื่อเลเซอร์สแกนตรวจวัดวัตถุที่ระยะ 4 เมตรระยะทางที่ได้จะผิดพลาดประมาณไป 10 เซนติเมตร

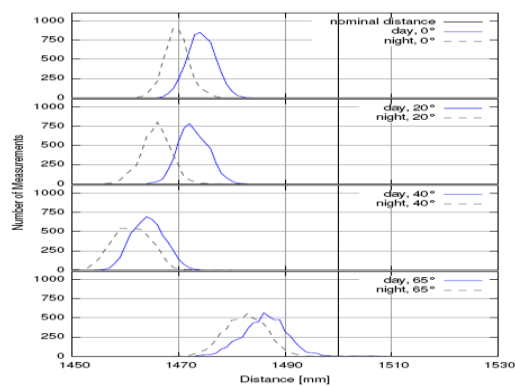
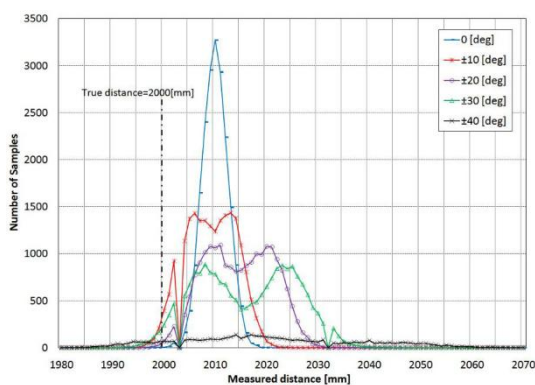
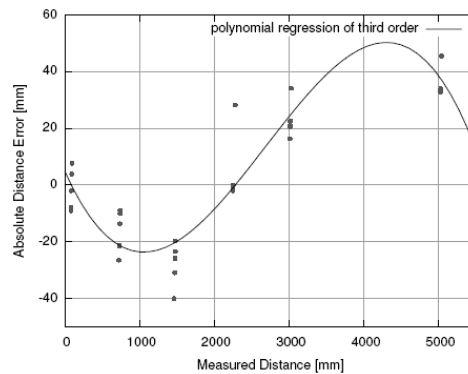
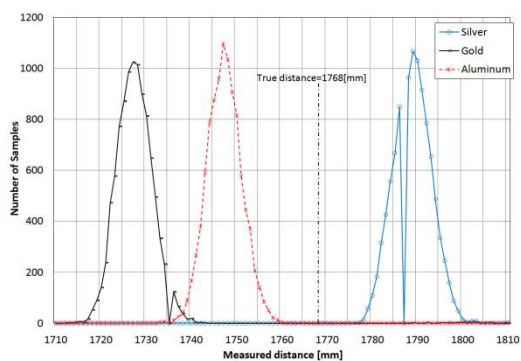
พฤติกรรมของเลเซอร์สแกนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัยนี้ คือ สัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวน ประเภทแรกเป็นการวัดระยะที่ผิดไปจากความเป็นจริง โดยงานวิจัย [36] ได้ทำการทดลองกับเลเซอร์สแกนรุ่น URG-04LX พบว่าระดับสัญญาณรบกวนอยู่ที่ประมาณ 0.3% ของระยะทางเฉลี่ยที่วัดได้ สัญญาณรบกวน (รูปที่ 3.2 ซ้าย) ประเภทที่สองเป็นปรากฏการณ์ที่เลเซอร์สแกนคืนค่าระยะทางที่อยู่ระหว่างระยะทางถึงฉากหลังและระยะทางถึงวัตถุ (รูปที่ 3.2 ขวา) จึงเสมือนกับว่าจุดเลเซอร์ดังกล่าวตกกระทบบริเวณพื้นที่โล่งกลางอากาศ ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าพิกเซลผสม (Mixed Pixel)



รูปที่ 3.2 พฤติกรรมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์

ซ้าย) แสดงระดับสัญญาณรบกวน, ขวา) แสดงปรากฏการณ์พิกเซลผสม

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเลเซอร์สแกนยังมีอีกหลายประการ (รูปที่ 3.3) เช่น ลักษณะของพื้นผิวของวัตถุ, ระยะทางจากเลเซอร์สแกนถึงวัตถุ, มุมตกกระทบ, แสงรบกวนจากภายนอก ฯลฯ เนื่องจากงานวิจัยนี้เน้นการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง การทดลองที่เกิดขึ้นจึงไม่ครอบคลุมปัจจัยดังกล่าว และเพื่อความถูกต้องของการทดลองเราจึงเลือกใช้วัสดุและสภาพแวดล้อมที่เหมือนกันในทุกการทดลองที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.3 ผลกระทบของปัจจัยต่างๆต่อเลเซอร์สแกน (ซ้ายบน) ลักษณะของพื้นผิวของวัตถุ, ขาวบน) ระยะทางจากเลเซอร์สแกนถึงวัตถุ, ซ้ายล่าง) มุมตกกระทบ, ขวาล่าง) แสงรบกวนจากภายนอก

### 3.2 คุณสมบัติของกล้อง (Camera Characteristic)

กล้องเป็นอุปกรณ์สามารถตรวจวัดแสงที่คลื่นความถี่ต่างๆและแปลค่าออกมาเป็นความเข้มแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน แต่เนื่องจากเลนเซอร์สแกนใช้ลำแสงอินฟราเรด กล้องทั่วไปรวมถึงกล้องที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงไม่สามารถตรวจวัดได้ นอกจากนี้การบันทึกภาพของกล้องมีลักษณะเป็นพิกเซลทำให้ข้อมูลที่ได้มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง โดยเฉพาะบริเวณมุม หรือขอบของวัตถุ และในการอ่านค่าจะทำเมื่อมีการเปิดรับแสงเป็นระยะเวลาสั้นๆทำให้ภาพที่ได้เป็นภาพซ้อนของช่วงเวลานั้น กล่าวคือ ถ้าวัตถุมีการเคลื่อนที่จะส่งผลให้ภาพของวัตถุที่ได้ไม่คมชัด



รูปที่ 3.4 ลักษณะการตรวจวัดที่เป็นพิกเซลและความไม่คมชัด

### 3.3 ความผิดพลาดในการฉายภาพ (Projection Error)

ในทางปฏิบัติข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้มักจะถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนข้างต้น ทำให้ค่า  $M_{ext}$  ที่ได้จากการปรับแก้ด้วยข้อมูลดังกล่าวมีความไม่แม่นยำ ดังนั้นเราจึงนิยาม  $M_{ext}^*$  ให้เป็นค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่ถูกต้องตามความเป็นจริง เป้าหมายของการหาพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลนเซอร์สแกนและกล้องจึงเป็นการหาค่า  $M_{ext}$  ที่ใกล้เคียงกับค่า  $M_{ext}^*$  มากที่สุด ทั้งนี้คุณภาพของ  $M_{ext}$  วัดได้จากความผิดพลาดของการฉายภาพ สำหรับ  $M_{ext}$  ใดๆ เรานิยามความผิดพลาดของการฉายภาพเมื่อเทียบกับคู่ข้อมูลจุด  $(p_l, p_m)$  ดังนี้

$$E(M_{ext}, p_l) = \|P(M_{ext}, p_l) - P(M_{ext}^*, p_l)\|_2$$

เนื่องจากเราไม่ทราบค่า  $M_{ext}^*$  จึงแทน  $P(M_{ext}^*, p_l)$  ด้วยจุด  $p_m$  เขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

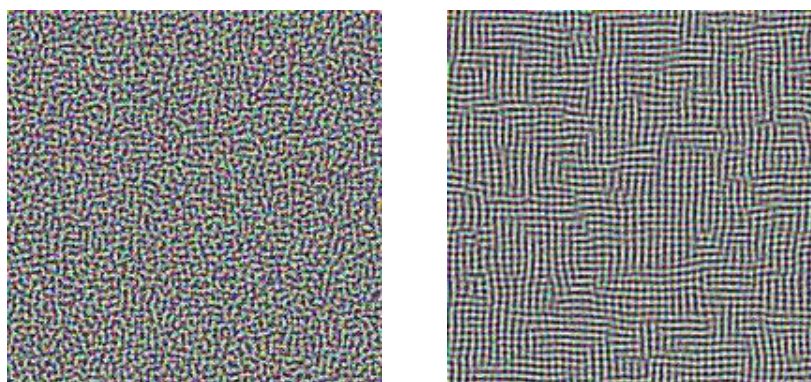
$$E(M_{ext}, p_l) = \|P(M_{ext}, p_l) - p_m\|_2$$

### 3.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง คือ การหาค่า  $M_{ext}$  ที่ทำให้ความผิดพลาดในการฉายภาพมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นเราจึงใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการหาค่าพารามิเตอร์ภายนอก  $M_{ext}$  ที่ทำให้ความผิดพลาดในการฉายภาพ  $e$  มีค่าน้อยที่สุด วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ วิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing)[37] และวิธีของลิเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (Levenberg-Marquardt)[38] โดยระบบเริ่มสมมติฐานว่าเลเซอร์สแกนและกล้องอยู่ที่ตำแหน่งและทิศทางเดียวกันหรือตำแหน่งและทิศทางที่ได้จากการคาดคะเนของผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นจึงหาค่าตอบขั้นต้นด้วยวิธีการจำลองการอบเหนียวซึ่งมีข้อดีคือไม่ต้องการค่าตอบเริ่มต้นที่แม่นยำและสามารถหาค่าตอบที่ใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดสัมบูรณ์ได้ จากนั้นจึงใช้ค่าตอบที่ได้มาเป็นค่าตอบเริ่มต้นให้กับวิธีของลิเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ซึ่งให้ค่าตอบเป็นจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ของบริเวณนั้น

#### 3.4.1 การจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing)

การจำลองการอบเหนียวเป็นวิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดสัมบูรณ์ของฟังก์ชันด้วยหลักการความน่าจะเป็น วิธีการนี้มักจะถูกใช้เมื่อขอบเขตของคำตอบมีขนาดใหญ่และค่าของฟังก์ชันมีจุดต่ำสุดสัมพัทธ์หลายตำแหน่ง ในบางปัญหาวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าวิธีการทางตัวเลข โดยหาค่าตอบที่มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับได้ในเวลาที่กำหนดแทนการหาค่าตอบที่ดีที่สุด ชื่อของการจำลองการอบเหนียวมาจากเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพโลหะ ซึ่งใช้การให้ความร้อนกับโลหะแล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวลงช้าๆ ความร้อนจะทำให้อะตอมของโลหะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่มากขึ้น การที่อุณหภูมิค่อยๆ ลดลงก็เปิดโอกาสให้อะตอมสามารถหาดำแหน่งที่เหมาะสมและส่งผลให้พลังงานโดยรวมของระบบมีค่าลดลง

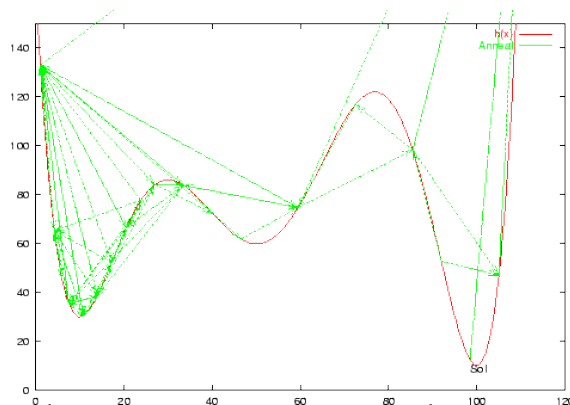


รูปที่ 3.5 แนวคิดการทำงานของจำลองการอบเหนียว

วิธีการจำลองการอบเหนียวประกอบด้วย สถานะ  $s$  และฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $E(s)$  เป้าหมายของการจำลองการอบเหนียวคือการเปลี่ยนสถานะจากสถานะเริ่มต้น  $s_0$  ไปเป็น  $s^*$  ซึ่งทำให้  $E(s^*)$  มีค่าน้อยสุด ในแต่ละรอบการทำงานระบบจะสุ่มเลือกสถานะใหม่  $s'$  ความน่าจะเป็นที่ระบบจะเปลี่ยนจากสถานะปัจจุบัน  $s$  ไปเป็นสถานะใหม่  $s'$  ขึ้นกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการยอมรับ  $P(e, e', T)$  ซึ่งคำนวณได้จากผลต่างของฟังก์ชัน  $e - e'$  และอุณหภูมิที่ลดลงอย่างต่อเนื่องของระบบ  $T$  ตัวอย่างเช่น

$$P(e, e', T) = \begin{cases} 1 & e < e' \\ e^{-(e-e')/T} & \text{otherwise} \end{cases}$$

เมื่อเริ่มต้นอุณหภูมิ  $T$  มีค่ามากทำให้  $e^{-(e-e')/T}$  มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นจึงมีโอกาสสูงที่  $s'$  จะถูกเลือก แม้ว่า  $e' > e$  เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของระบบลดลง  $e^{-(e-e')/T}$  จึงมีค่าเข้าใกล้ 0 ดังนั้นจึงมีโอกาสน้อยลงที่  $s'$  จะถูกเลือกในกรณีที่  $e' > e$  การเปิดโอกาสให้สถานะของระบบเคลื่อนที่ไปยังคำตอบที่แย่กว่าในช่วงแรกของการค้นหาทำให้การจำลองการอบเหนียวสามารถหลุดออกจากจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ได้ และในช่วงท้ายระบบจะเปลี่ยนแนวโน้มเป็นการเคลื่อนที่เข้าคำตอบที่ดีกว่าเท่านั้น ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์



รูปที่ 3.6 ลักษณะประวิฤทธิผลเฉลยและการเปลี่ยนแปลงสถานะ

การนำวิธีการจำลองการอบเหนียวไปใช้งานกับปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก ระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง จะต้องนิยามสิ่งต่อไปนี้

- ขอบเขตของสถานะหรือขอบเขตของพารามิเตอร์ภายนอก  $M_{ext}$  ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวนจริงจำนวน 6 ตัว แบ่งเป็นพารามิเตอร์การหมุนจำนวน 3 ตัว มีค่าอยู่ในช่วง  $[-\pi, \pi]$  และพารามิเตอร์การเลื่อนที่จำนวน 3 ตัว มีค่าอยู่ในช่วงจำนวนจริง
- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันความผิดพลาดในการฉายภาพ  $E(M_{ext}, p_l)$
- การสุ่มเลือกสถานะใกล้เคียง คือ การเลือกสถานะใหม่ที่ค่าพารามิเตอร์ภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสุ่มจากสถานะเดิมเล็กน้อย

- ฟังก์ชันความน่าจะเป็นในการยอมรับ คือ  $P(e, e', T) = \begin{cases} 1 & e < e' \\ e^{-(e-e')/T} & \text{otherwise} \end{cases}$
- อุณหภูมิเริ่มต้นและกำหนดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ กำหนดอุณหภูมิเริ่มไว้ที่ค่าที่มากพอและค่อยๆ ลดลงอย่างคงที่จนกระทั่งอุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์

รหัสเทียมของวิธีการจำลองการอบเหนียวดังแสดงในตารางที่ 3.1 เริ่มต้นโดยกำหนดค่าสถานะเป็น  $s_0$  และระบบจะทำงานไปจนกว่าจำนวนรอบการทำงาน  $k$  จะมากกว่าจำนวนรอบการทำงานสูงสุด  $k_{\max}$  หรือจนกว่าค่าของฟังก์ชัน  $e$  จะน้อยกว่าค่าที่ต้องการ  $e_{\max}$  และในระหว่างที่ระบบทำงานอยู่ค่า  $s_{\text{best}}$  และ  $e_{\text{best}}$  จะจดจำสถานะและค่าของฟังก์ชันที่ดีที่สุดไว้ตามลำดับ

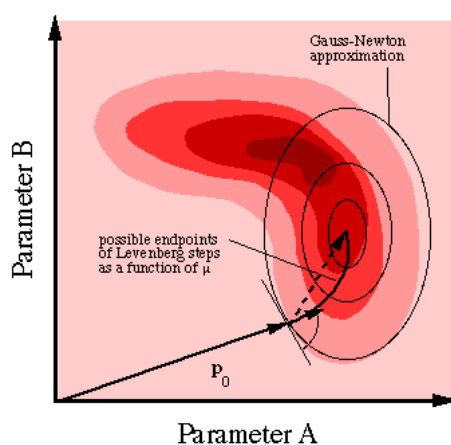
ตารางที่ 3.1 รหัสเทียมของวิธีการจำลองการอบเหนียว

$s \leftarrow s_0; e \leftarrow E(s)$	// สถานะเริ่มต้น
$s_{\text{best}} \leftarrow s; e_{\text{best}} \leftarrow e$	// ค่าดีที่สุดเริ่มต้น
$k \leftarrow 0$	// ตัวนับรอบพลังงาน
$T \leftarrow \text{temperature}(k/k_{\max})$	// จำนวนอุณหภูมิ
while $k < k_{\max}$ and $e > e_{\max}$	// ในขณะที่มีเวลาเหลือและค่าฟังก์ชันยังไม่ถึงค่าที่ต้องการ
$s_{\text{new}} \leftarrow \text{neighbour}(s)$	// สุ่มเลือกคำตอบข้างเคียง
$e_{\text{new}} \leftarrow E(s_{\text{new}})$	// จำนวนพลังงาน
if $P(e, e_{\text{new}}, T) > \text{random}()$ then	// จำนวนความน่าจะเป็นที่จะเปลี่ยนไปสถานะใหม่
$s \leftarrow s_{\text{new}}; e \leftarrow e_{\text{new}}$	// เปลี่ยนสถานะ
if $e_{\text{new}} < e_{\text{best}}$ then	// ตรวจสอบว่าเป็นสถานะที่ดีที่สุดหรือไม่
$s_{\text{best}} \leftarrow s_{\text{new}};$	// จดจำสถานะดีที่สุด
$e_{\text{best}} \leftarrow e_{\text{new}};$	
$k \leftarrow k + 1$	// เพิ่มตัวนับรอบพลังงาน
return $s_{\text{best}}$	// คืนค่าสถานะที่ดีที่สุด



### 3.4.2 วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ (Levenberg-Marquardt)

วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์เป็นวิธีการหาค่าตอบเชิงตัวเลขสำหรับปัญหาการหาค่าน้อยสุดของฟังก์ชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการหาค่ากำลังสองน้อยสุด วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์เป็นวิธีที่ผสมผสานระหว่าง วิธีของเกาส์-นิวตัน(Gauss-Newton) และวิธีไล่ความชัน (Gradient descent) วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์มีความมั่นคงมากกว่าวิธีของเกาส์-นิวตันเนื่องจากสามารถหาค่าตอบได้แม้ว่าค่าสถานะเริ่มต้นจะอยู่ไกลจากคำตอบ อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้จากวิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์เป็นเพียงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ไม่ใช่จุดต่ำสุดสัมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องการสถานะเริ่มต้นที่อยู่บริเวณเดียวกับจุดต่ำสุด



รูปที่ 3.7 แนวคิดของวิธีของเกาส์-นิวตันและวิธีไล่ความชัน

วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์มักถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่ากำลังสองน้อยสุดเมื่อมีชุดของข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตาม  $D = \{x_i, y_i \mid 1 \leq i \leq m\}$  มาให้ และต้องการหาพารามิเตอร์  $B$  ของฟังก์ชัน  $f(x, B)$  เพื่อให้ผลรวมกำลังสองของผลต่างมีค่าน้อยสุด  $S(B) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, B)]^2$  วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์แก้ปัญหาดังกล่าวแบบต่อเนื่อง (Iterative) กล่าวคือระบบเริ่มจากสถานะเริ่มต้น  $B_0$  ที่ผู้ใช้กำหนดให้ และในแต่ละรอบการทำงานระบบจะแทนที่สถานะเก่า  $B$  ด้วยสถานะใหม่  $B + \varepsilon$  การคำนวณหาค่า  $\varepsilon$  ฟังก์ชันจะถูกประมาณด้วย  $f(x_i, B + \varepsilon) = f(x_i, B) + J_i B$  โดยที่  $J_i = \frac{\partial f(x_i, B)}{\partial B}$  เป็นทิศทางความชันของฟังก์ชัน  $f$  เมื่อเทียบกับ  $B$  เนื่องจากจุดที่  $S(B)$  มีค่าต่ำสุดจะมีค่าความเปลี่ยนแปลงของ  $S(B)$  เทียบกับ  $\varepsilon$  เป็น 0 และจากการประมาณค่าของฟังก์ชัน  $f$  จึงเขียนได้เป็น

$$S(B + \varepsilon) \approx \|y - f(B) - J\varepsilon\|^2$$

จากนั้นทำการหาค่าอนุพันธ์เทียบกับ  $\varepsilon$  และกำหนดให้คำตอบเท่ากับ 0 แล้วจึงแก้สมการได้เป็น

$$(J^T J + \lambda I) = J^T [y - f(B)]$$

โดยที่  $I$  เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์และ  $\lambda$  เป็นตัวประกอบการหน่วงซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าในทุกๆ รอบการทำงาน เมื่อค่าของฟังก์ชัน  $S$  ลดลงอย่างรวดเร็วค่า  $\lambda$  ที่ใช้จะมีค่าน้อยและระบบจะทำงานใกล้เคียงกับวิธีของเกาส์-นิวตัน แต่เมื่อค่าของฟังก์ชัน  $S$  ลดลงช้ากว่าระดับที่กำหนด ค่า  $\lambda$  จะเพิ่มขึ้นและระบบจะทำงานใกล้เคียงการทำงานของวิธีไล่ความชัน ระบบหยุดการทำงานเมื่อค่า  $\varepsilon$  น้อยกว่าค่าที่กำหนดเอาไว้

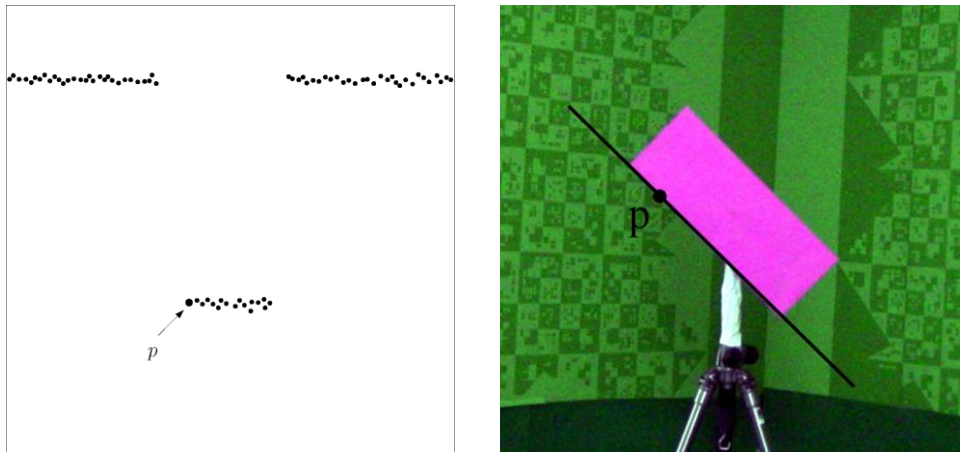
สำหรับปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างเลเซอร์สแกนและกล้อง เราจะใช้วิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ในหาค่าต่ำสุดของกำลังสองของฟังก์ชันความผิดพลาดในการฉายภาพ โดยมีสถานะเป็น  $M_{ext}$  เขียนได้เป็น  $S(M_{ext}) = \sum_{i=1}^n [P(M_{ext}, p_{li}) - p_{mi}]^2$  เราสามารถประมาณค่า  $P(M_{ext} + \varepsilon, p_l)$  ได้เป็น  $P(M_{ext} + \varepsilon, p_l) \approx P(M_{ext}, p_l) + J_i \varepsilon$  โดยที่  $J_i = \frac{\partial P(M_{ext}, p_{li})}{\partial M_{ext}}$  แต่เนื่องจากการหาค่าอนุพันธ์ของเมทริกซ์การหมุนโดยตรงจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณ จึงต้องเปลี่ยนเมทริกซ์การหมุนให้อยู่ในรูปแบบ โรดริกส์ (Rodrigues) จากนั้นจึงสามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ตามปกติ

## บทที่ 4

### การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง

#### 4.1 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง

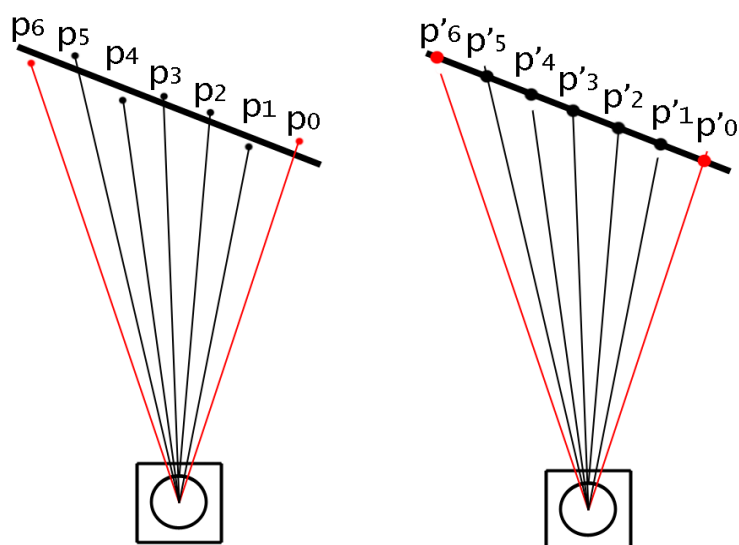
เพื่อให้วิธีการปรับแก้สมบรูณ์เราจำเป็นต้องหาชุดข้อมูลคู่จุด ( $p_l, p_m$ ) ซึ่งเป็นเรื่องท้าทายเนื่องจากลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบวัตถุไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือกล้องจึงไม่สามารถหาจุด  $p$  ซึ่งเป็นจุดที่อุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจวัดได้ร่วมกัน อย่างไรก็ตามมีหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่ การใช้อุปกรณ์อ้างอิงซึ่งเป็นวัตถุที่เราทราบรูปทรงอยู่ก่อนแล้วและสามารถตรวจวัดจากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองได้ง่ายและแม่นยำ สำหรับรูปทรงที่พบได้ในงานวิจัยอื่น[9, 13] มีลักษณะเป็นวัตถุที่มีขอบเป็นเส้นตรง ตัวอย่างเช่น กระดานสี่เหลี่ยมสีดำซึ่งถูกวางในบริเวณที่อุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจวัดได้ เนื่องจากกระดานมีลักษณะเป็นระนาบทำให้ข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์สแกนปรากฏเป็นส่วนของเส้นตรง ซึ่งมีจุดแรกและจุดสุดท้ายเป็นขอบของกระดาน นอกจากนี้สีของกระดานถูกเลือกให้แตกต่างจากพื้นหลังทำให้เราสามารถหาเส้นขอบของกระดานได้ง่าย (รูปที่ 4.1) ทั้งนี้คุณภาพของผลลัพธ์จะขึ้นกับคุณภาพของความสัมพันธ์ที่เราหาได้



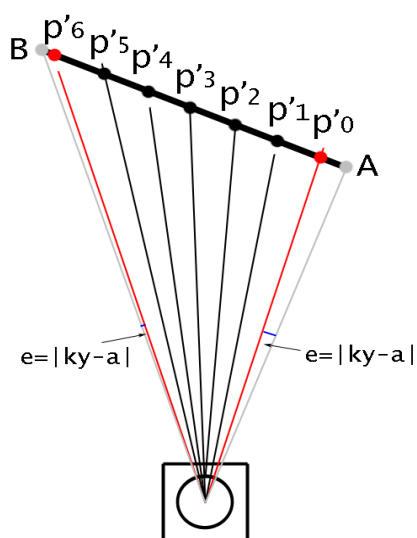
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ซ้าย) จุด  $p_l$  ได้จากเลเซอร์สแกน ขวา) ภาพฉายของจุด  $p_m$

การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงเป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนข้อมูลดิบจากเลเซอร์สแกนและกล้องให้เป็นข้อมูลคู่จุดกับเส้นที่สัมพันธ์กับอุปกรณ์อ้างอิง ในส่วนของข้อมูลภาพจากกล้องใช้วิธีการหาเส้นตรงในภาพที่มีงานวิจัยอยู่ก่อนแล้ว[39] และเลือกเส้นตรงที่สัมพันธ์กับอุปกรณ์อ้างอิงโดยผู้ใช้ ในส่วนของข้อมูลเลเซอร์จะทำการหากลุ่มของข้อมูลเลเซอร์ที่สัมพันธ์กับอุปกรณ์อ้างอิง โดยข้อมูล

เลเซอร์เส้นที่ติดกันแต่มีระยะที่ต่างกันมากกว่าค่าคงที่ค่าหนึ่งจะถือว่าเป็นขอบของอุปกรณ์อ้างอิง จากนั้นจึงหาเส้นตรงที่สามารถอธิบายกลุ่มข้อมูลเหล่านั้น ได้ดีที่สุด และสุดท้ายทำการฉายจุดเลเซอร์ลงบนเส้นตรงดังกล่าวและใช้จุดและส่วนของเส้นตรงที่ได้เป็นข้อมูลสำหรับส่วนต่อไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.2 ด้านซ้ายแสดงจุดที่ได้มาจากข้อมูลดิบ  $p_i$  และเส้นตรงที่อธิบายกลุ่มจุดดังกล่าว และรูปที่ 4.2 ด้านขวาแสดงจุดที่ฉายลงบนเส้นตรง  $p'_i$  และส่วนของเส้นตรง  $p'_0 p'_6$  ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 4.2 ข้อมูลเลเซอร์ (ซ้าย) ข้อมูลดิบ, (ขวา) ข้อมูลที่ฉายลงส่วนของเส้นตรงที่คำนวณได้



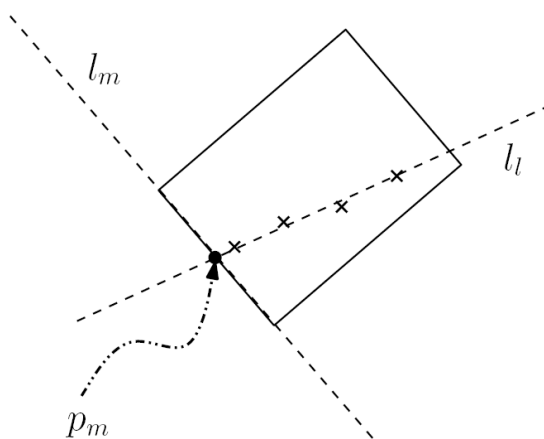
รูปที่ 4.3 จุดขอบที่แท้จริงและความผิดพลาดเชิงมุม

## 4.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุด

กำหนดให้ข้อมูลจุด  $p_l$  เป็นข้อมูลเลเซอร์ที่ถูกปรับแก้แล้วซึ่งอยู่ในกรอบอ้างอิงโลก และข้อมูลจุดซึ่งอยู่ในภาพ  $p_m$  เกิดจากจุดตัดของเส้นตรงซึ่งเป็นขอบของอุปกรณ์อ้างอิง  $l_m$  และเส้นตรงซึ่งเกิดจากการฉายระนาบสแกนของเลเซอร์สแกนลงบนภาพ  $l_l$  (รูปที่ 4.4) เมื่อได้ข้อมูลคู่จุด  $(p_{l_1}, p_{m_1}), (p_{l_2}, p_{m_2}), \dots, (p_{l_n}, p_{m_n})$  จำนวน  $n$  คู่ เราจะหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการจำลองการอบเหนียวและวิธีของลิเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{ext} = \arg \min \left( \sqrt{\frac{\sum_{p \in D} E(M_{ext}, p)^2}{|D|}} \right)$$

เมื่อได้พารามิเตอร์ภายนอกเราสามารถทำการคัดกรองข้อมูลได้ โดยจุดเลเซอร์จะถูกฉายลงไปบนภาพทำให้ทราบได้ว่าจุดเลเซอร์ดังกล่าวตกทับอุปกรณ์อ้างอิงหรือไม่ จากนั้นจึงทำการคัดกรองคู่ข้อมูลที่มีความผิดพลาดสูงกว่าเมื่อเทียบกับความผิดพลาดของกลุ่มออกไปจากระบบ นอกจากนี้เราสามารถแก้ปัญหาคความผิดพลาดของเลเซอร์สแกนแบบพิกเซลผสมได้ด้วยการเลือกที่จะใช้หรือไม่ใช้จุดเลเซอร์ที่เป็นปัญหาดังกล่าวโดยพิจารณาจากผลการฉายจุดเลเซอร์ลงไปบนภาพ จากนั้นจึงเข้าขั้นตอนการปรับปรุงข้อมูลจนถึงการหาค่าเหมาะสมที่สุดใหม่อีกครั้งจนกว่าจะไม่มีเปลี่ยนแปลงชุดของข้อมูลเกิดขึ้นในขั้นตอนการคัดกรองของข้อมูล

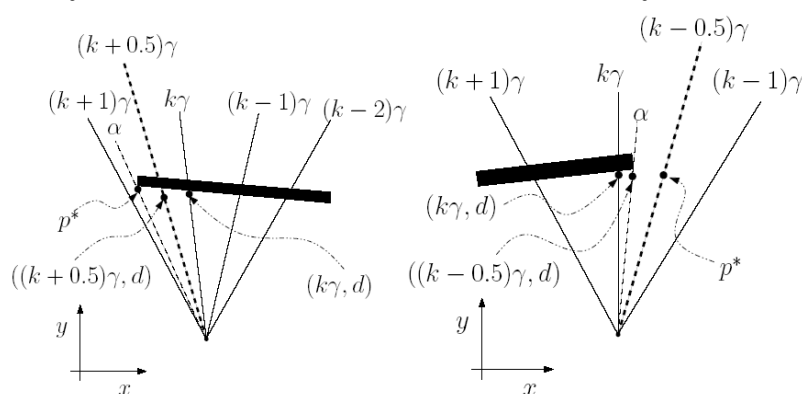


รูปที่ 4.4 การคำนวณหาจุดเลเซอร์

### 4.3 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์

การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์เริ่มจากการพิจารณาการตรวจวัดระยะของวัตถุรอบตัวอย่างไม่ต่อเนื่องของเลเซอร์สแกน ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 จุดขอบที่แท้จริงของอุปกรณ์อ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่ง A และ B แต่เลเซอร์สแกนตรวจวัดได้ที่จุด  $p'_0$  ถึง  $p'_6$  ตามลำดับ โดยความผิดพลาดในส่วนนี้เป็นส่วนที่เราต้องการแก้ไข สมมติให้จุดที่อยู่บนขอบของอุปกรณ์อ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่ง  $p^* = (x, y, 0)$  และเขียนเป็นพิกัดเชิงขั้วได้เป็น  $(\alpha^*, d^*)$  อย่างไรก็ตามเลเซอร์สแกนมีความละเอียดเชิงมุม  $\gamma$  จะตรวจวัดจุดขอบได้ที่ตำแหน่ง  $p'$  มีพิกัดเชิงขั้วเป็น  $(k\gamma, d)$  และนิยามใหม่เป็น  $(\alpha, d)$  เราสามารถนิยามความผิดพลาดเชิงมุมได้เป็น  $e = |k\gamma - \alpha|$  (รูปที่ 4.3) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องถูกลดค่าลงให้เหลือน้อยที่สุด โดยค่าความผิดพลาด  $e$  มีค่าอยู่ในช่วง  $[0, \gamma)$  เพราะถ้าเมื่อ  $e$  มีค่ามากกว่า  $\gamma$  จะส่งผลให้อุปกรณ์ตรวจพบจุด  $(k + \lfloor e/\gamma \rfloor \gamma, d'')$  แทน นอกจากนี้ถ้าอุปกรณ์อ้างอิงถูกวางอย่างสุ่มในสามมิติ ค่าเฉลี่ยของ  $e$  จะเข้าใกล้  $\gamma/2$  เมื่อข้อมูลมีจำนวนมากขึ้น เนื่องจากการวางอุปกรณ์อ้างอิงอย่างสุ่มส่งผลให้ค่า  $e$  มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในช่วง  $0 \leq e < \gamma$  และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $\gamma/2$

การลดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทำได้โดยการเพิ่มหรือลดมุมที่วัดได้จากเลเซอร์สแกน ตัวอย่างเช่น จุดที่ตำแหน่ง  $(k\gamma, d)$  จะถูกเปลี่ยนเป็น  $((k + 0.5)\gamma, d)$  หรือ  $((k - 0.5)\gamma, d)$  ขึ้นอยู่กับทิศทางของขอบที่ตรวจวัดได้ เมื่อพิจารณาจุด  $((k + 1)\gamma, d)$  และจุด  $((k - 1)\gamma, d)$  จะพบว่าต้องมีจุดใดจุดหนึ่งเพียงจุดเดียวที่ตรวจพบว่าเป็นอุปกรณ์อ้างอิง ซึ่งจุดดังกล่าวก็คือจุดที่อยู่ใกล้จุด  $(k\gamma, d)$  มากกว่า สมมติว่าจุด  $((k + 1)\gamma, d)$  ตรวจพบอุปกรณ์อ้างอิงหมายความว่าขอบที่แท้จริงของอุปกรณ์อ้างอิงจะอยู่ภายในช่วงมุม  $(k - 1)\gamma < \alpha \leq k\gamma$  ดังนั้นเราจะเปลี่ยนจุด  $(k\gamma, d)$  เป็นจุด  $((k - 0.5)\gamma, d)$  ในทางกลับกันถ้าจุดที่ตรวจพบอุปกรณ์อ้างอิงเป็น  $((k - 1)\gamma, d)$  เราจะเปลี่ยนจุด  $(k\gamma, d)$  เป็นจุด  $((k + 0.5)\gamma, d)$  วิธีการที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเปลี่ยนการกระจายตัวของค่า  $\alpha^* - \alpha$  จากที่เคยอยู่ในช่วง  $[0, \gamma)$  เป็น  $[-\gamma/2, \gamma/2)$  ดังนั้นค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดเชิงมุมจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในช่วง  $0 \leq e < \gamma/2$  ทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่  $\gamma/4$



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการเพิ่มและลดมุมของข้อมูลเลเซอร์

#### 4.4 ขอบเขตล่างของความผิดพลาดในการฉายภาพ

ในขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุด เราพยายามลดความผิดพลาดในการฉายภาพ แต่เนื่องจากพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสองประกอบกับสัญญาณรบกวนทำให้ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราจะพิจารณาขอบเขตล่างของความผิดพลาดในการฉายภาพ สมมติให้เลเซอร์สแกนและกล้องมีตำแหน่งและทิศทางเดียวกันในสามมิติ กล่าวคือ อุปกรณ์ทั้งสองอยู่ที่จุดกำเนิดและทิศทางขนานกับกรอบอ้างอิงโลก ดังนั้นพิกัดของจุด  $p = (x, y, z = 0)$  ที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนจะอยู่ที่พิกัดเดียวกันในกรอบอ้างอิงของกล้อง และเมื่อถูกฉายลงไปบนภาพด้วยสมการการฉายภาพของกล้อง

$$u = f_x \cdot (Y_c / X_c) + c_x$$

$$v = f_y \cdot (Z_c / X_c) + c_y$$

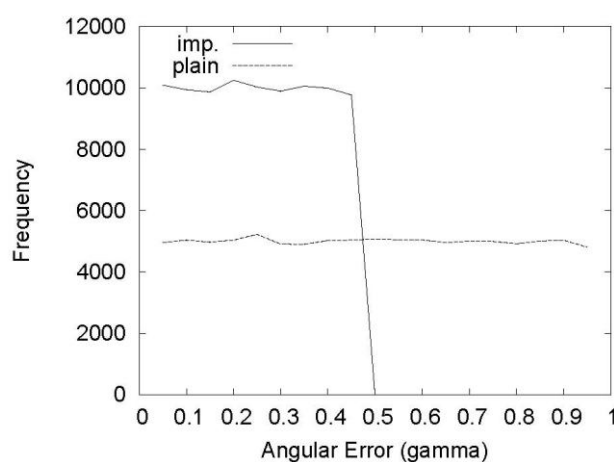
จุดที่ได้จะอยู่บนแนวกึ่งกลางภาพที่พิกัด  $p_c = (u, v = y_c)$  ค่า  $u$  หรือพิกัดในแนวนอนของภาพจะขึ้นกับค่าของ  $Y_c / X_c$  ซึ่งเป็นค่าแทนเงนตของมุมที่จุด  $p$  ทำกับแกน  $x$  ของเลเซอร์สแกน เนื่องจากมุมมองที่กล้องมองเห็นได้มีค่าน้อยจึงสามารถประมาณค่าแทนเงนตของมุมได้ด้วยค่าของมุมดังกล่าว ทำให้พิกัดแนวนอนในภาพของจุด  $p$  มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมที่จุด  $p$  ทำกับแกน  $x$  ของกรอบอ้างอิงของเลเซอร์สแกน ดังนั้นค่าความผิดพลาดในการฉายภาพสามารถคำนวณได้จาก  $e_0 = f_x \cdot \gamma / 4$  โดยที่  $f_x$  เป็นพารามิเตอร์ภายในของกล้องและ  $\gamma$  ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเชิงมุมในการตรวจจับอุปกรณ์อ้างอิง

#### 4.5 การทดลองด้วยโปรแกรมจำลอง

ในการทดลองด้วยโปรแกรมจำลอง กำหนดให้เลเซอร์สแกนวางตัวอยู่ที่จุดกำเนิดและระนาบการตรวจวัดอยู่ที่  $z = 0$  กล่าวคือกรอบอ้างอิงของเลเซอร์สแกนวางตัวขนานกับกรอบอ้างอิงโลก เลเซอร์สแกนมีระยะการตรวจวัดอยู่ที่ 4 เมตรและมีมุมมองการตรวจวัดเท่ากับ 180 องศา ความละเอียดเชิงมุมถูกกำหนดไว้ที่ประมาณ 0.36 องศา ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เทียบได้กับเลเซอร์สแกนรุ่น Hokuyo URG-04LX ส่วนกล้องจะถือว่าไม่มีการบิดของภาพและดูกว้างไว้อย่างสม่ำเสมอที่ตำแหน่ง  $r$  และมีการหมุนเป็น  $R$  กำหนดให้พารามิเตอร์ภายนอกที่สัมพันธ์กับ  $r$  และ  $R$  มีค่าเป็น  $M_{ext}^*$  อุปกรณ์อ้างอิงดูกว้างอย่างสม่ำเสมอที่ตำแหน่งต่างๆภายในระยะ 0.5 – 4 เมตรจากเลเซอร์สแกน โดยอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองต้องสามารถตรวจวัดอุปกรณ์อ้างอิงได้ จำนวนตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิงจะแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง

##### 4.5.1 ความผิดพลาดเชิงมุม

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลของพฤติกรรมของเลเซอร์สแกนที่มีต่อการตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง กล่าวคือผลจากการตรวจวัดระยะของวัตถุรอบตัวอย่างไม่ต่อเนื่องของเลเซอร์สแกน ในการทดลองนี้ อุปกรณ์อ้างอิงวางไว้ที่ตำแหน่งต่างๆอย่างสม่ำเสมอทั้งหมด 100,000 ตำแหน่ง และคำนวณหาข้อมูลจุดโดยแบ่งข้อมูลเป็นสองชุด ได้แก่ ชุดแรกคำนวณจากข้อมูลปกติ และชุดที่สองคำนวณจากการข้อมูลเลเซอร์ที่ปรับปรุงแล้ว การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดเชิงมุมที่เกิดขึ้นจากข้อมูลชุดแรกอยู่ในช่วง  $[0, \gamma)$  เมื่อมีการปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์ทำให้การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดเชิงมุมอยู่ในช่วง  $[0, \gamma/2)$  (รูปที่ 4.4) ซึ่งตรงกับข้อสมมติฐานที่ตั้งไว้



รูปที่ 4.6 ค่าความผิดพลาดเชิงมุมที่เกิดขึ้น



#### 4.5.2 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลของการปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์ที่มีต่อความผิดพลาดในการฉายภาพ ในการทดลองนี้อุปกรณ์อ้างอิงถูกวางไว้ที่ตำแหน่งต่างๆอย่างสุ่มจำนวน 100 ตำแหน่ง ทำให้เกิดข้อมูลคู่จุดจำนวน 100 คู่ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ข้อมูลส่วนแรกจำนวน 50 คู่ ใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก พารามิเตอร์ภายนอก  $M_{ext}$  ที่ได้จากขั้นตอนแรกจะถูกวัดผลด้วยความผิดพลาดในการฉายภาพของข้อมูลส่วนที่สองจำนวน 50 คู่ เนื่องจากการทดลองเกิดขึ้นในโปรแกรมจำลองทำให้เราทราบค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่แท้จริง  $M_{ext}^*$  และสามารถวัดความผิดพลาดในการฉายภาพด้วย  $E(M_{ext}, p_l) = \|P(M_{ext}, p_l) - P(M_{ext}^*, p_l)\|_2$  การทดลองถูกทำซ้ำ 100 รอบ โดยในแต่ละรอบตำแหน่งของกล้องจะเปลี่ยนไปอย่างสุ่ม จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลเลเซอร์ที่ปรับปรุงแล้วในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกทำให้ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการใช้ข้อมูลเลเซอร์ที่ไม่มีปรับปรุง สัดส่วนความผิดพลาดที่ลดลงมีความสอดคล้องกับการลดลงของความผิดพลาดเชิงมุม

ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพ

Target	$E(M_{ext}^*, p_l)$			$p_m$		
	imp	plain	ratio	imp	plain	ratio
average RMS	0.32	0.54	54.8%	0.92	2.04	48.0%
S.D. or RMS	0.007	0.032	36.6%	0.003	0.019	39.3%

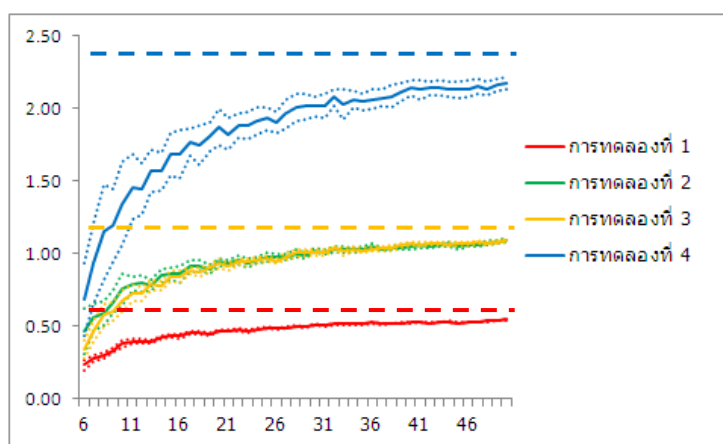
#### 4.5.3 ขอบเขตล่างของความผิดพลาด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าขอบเขตล่างของความผิดพลาดในการฉายภาพมีค่าเท่ากับ  $e_0 = f_x \cdot \gamma / 4$  โดยทำการทดลองจำนวน 4 รอบ ในแต่ละรอบใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง	$f_x$	$\gamma$
1	270	0.5
2	540	0.5
3	270	1.0
4	540	1.0

การทดลองจะเริ่มจากการสุ่มตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิงจำนวน  $n$  ตำแหน่ง ทำให้เกิดข้อมูลคู่จุดจำนวน  $n$  คู่ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก และวัดผลการทดลองด้วยค่าความผิดพลาดในการฉายภาพ แต่ละการทดลองจะถูกทำซ้ำจำนวน 4500 รอบ โดยจำนวนข้อมูลคู่จุดที่ใช้จะอยู่ในช่วง  $6 \leq n \leq 50$  รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองที่ได้ โดยค่า  $e$  ของทุกการทดลองจะมีค่าเข้าใกล้  $e_0$  เมื่อจำนวนข้อมูล  $n$  มีค่ามากขึ้นซึ่งตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้



รูปที่ 4.7 ความผิดพลาดในการฉายภาพ

ผลการทดลอง(รูปที่ 4.7) แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดในการฉายภาพจะมีค่าน้อยเมื่อใช้ข้อมูลน้อยและค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ข้อมูลจำนวนมากขึ้น โดยค่าผิดพลาดในการฉายภาพมีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้ค่า  $e_0 = f_x \cdot \gamma / 4$  ซึ่งแสดงด้วยเส้นประที่ระดับ  $(270 \frac{0.5\pi}{180}) / 4 \approx 0.59$ ,

$(540 \frac{0.5\pi}{180})/4 \approx 1.18$  ,  $(270 \frac{1.0\pi}{180})/4 \approx 1.18$  , และ  $(540 \frac{1.0\pi}{180})/4 \approx 2.36$  การหาค่าความผิดพลาด

ในการฉายภาพที่ได้มีค่าน้อยกว่าขอบเขตล่างที่ประมาณไว้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ข้อมูลจำนวนน้อย มีสาเหตุมาจากการที่ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดเข้ากับข้อมูลตัวอย่างที่ใช้มากเกินไป (Over Fit) กล่าวคือผลลัพธ์ที่ได้ให้ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพน้อยเมื่อใช้ข้อมูลตัวอย่าง แต่อาจจะให้ค่าความผิดพลาดสูงกว่าเมื่อใช้ข้อมูลอื่นๆ

เมื่อเราสามารถประมาณค่า  $e_0$  ได้ ทำให้เราทราบว่าผลการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกที่ได้มีคุณภาพมากเพียงพอแล้วหรือยัง อย่างไรก็ตามเราจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากพอในการปรับแก้เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดเข้ากับชุดข้อมูลตัวอย่างมากเกินไป

#### 4.6 การทดลองด้วยอุปกรณ์จริง

ในการทดลองด้วยอุปกรณ์จริง กำหนดให้เลเซอร์สแกนวางตัวอยู่ที่จุดกำเนิดและระนาบการตรวจวัดอยู่ที่  $z = 0$  กล่าวคือกรอบอ้างอิงของเลเซอร์สแกนวางตัวขนานกับกรอบอ้างอิงโลก เลเซอร์สแกนที่ใช้เป็นเลเซอร์สแกนรุ่น Hokuyo URG-04LX ซึ่งมีระยะการตรวจวัดอยู่ในช่วง 60 – 4095 มิลลิเมตรและมีมุมมองการตรวจวัด 240 องศา มีความละเอียดเชิงมุมประมาณ 0.36 องศา (360 องศา/ 1024 เส้น) ส่วนกล้องที่ใช้จะแตกต่างกันในแต่ละการทดลองและภาพที่ได้จากกล้องถูกปรับแก้การบิดก่อนแล้ว ในการทดลองกล้องถูกวางไว้ข้างเลเซอร์สแกนและหันไปทางทิศทางที่ใกล้เคียงกัน อุปกรณ์อ้างอิงจะถูกวางอย่างสุ่มที่ตำแหน่งต่างๆภายในระยะ 0.5 – 4 เมตรจากเลเซอร์สแกน โดยอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองต้องสามารถตรวจวัดอุปกรณ์อ้างอิงได้

##### 4.6.1 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์

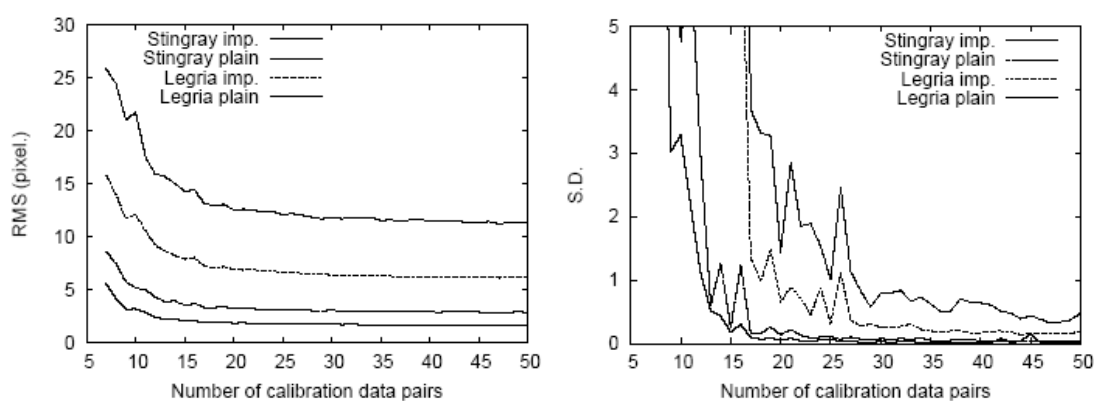
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลของการปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์ที่มีต่อความผิดพลาดในการฉายภาพ กล้องที่ใช้ในการทดลองมีสองรุ่น ได้แก่ กล้องของบริษัท Allied Vision Tech รุ่น Stingray F-046 B/C และกล้องของบริษัท Canon รุ่น LEGRIA HF M300 ความละเอียด 780 x 582 และ 1920 x 1080 พิกเซล ตามลำดับ การทดลองเป็นไปเช่นเดียวกับการทดลองในโปรแกรมจำลอง โดยอุปกรณ์อ้างอิงถูกวางไว้ที่ตำแหน่งต่างๆอย่างสุ่มจำนวน 100 ตำแหน่ง ทำให้เกิดข้อมูลจุดจำนวน 100 คู่ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ข้อมูลส่วนแรกจำนวน 50 คู่ ใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก พารามิเตอร์ภายนอก  $M_{ext}$  ที่จากขั้นตอนแรกจะถูกวัดผลด้วยข้อมูลส่วนที่สองจำนวน 50 คู่ โดยวัดจากความผิดพลาดในการฉายภาพด้วย  $E(M_{ext}, p_l) = \|P(M_{ext}, p_l) - p_m\|_2$  จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลเลเซอร์ที่ปรับปรุงแล้วในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกทำให้ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการใช้ข้อมูลเลเซอร์ที่ไม่มีปรับปรุง สัดส่วนความผิดพลาดที่ลดลงมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในโปรแกรมจำลอง

ตารางที่ 4.3 ผลจากการปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์

Target	Stingray			Legria		
	imp	plain	ratio	imp	plain	ratio
average RMS	1.66	2.90	57.3%	6.18	11.38	54.3%
S.D. or RMS	0.02	0.04	40.7%	0.19	0.48	38.8%

#### 4.6.2 จำนวนข้อมูลคู่จุด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลของจำนวนของข้อมูลคู่จุดต่อความผิดพลาดในการฉายภาพ การทดลองเป็นไปเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.6.1 โดยใช้จำนวนข้อมูลคู่จุดระหว่าง 6 – 50 คู่ รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองที่ได้ สังกเกตกว่าค่าความผิดพลาดในการฉายภาพมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนข้อมูลมีค่าอยู่ในช่วง 6 – 25 คู่ แต่เมื่อจำนวนข้อมูลมีค่ามากกว่า 25 คู่ค่าความผิดพลาดในการฉายภาพมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยและคงที่อยู่ที่ประมาณ 2 และ 7 พิกเซลสำหรับกล้องรุ่น Stingray F-046 B/C และกล้องรุ่น LEGRIA HF M300 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อการข้อมูลจำนวนมากขึ้นในการปรับแก้พารามิเตอร์ส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าลดลงซึ่งบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้ข้อมูลจำนวนมากขึ้นทำให้การปรับแก้พารามิเตอร์มีค่าแม่นยำและน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.8 ความผิดพลาดในการฉายภาพ (ซ้าย) ค่าเฉลี่ย, ขวา) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## บทที่ 5

### กระบวนการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุดในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก คือ การเก็บข้อมูลคู่จุด ซึ่งมีสาเหตุที่เกี่ยวข้องสองประการ ประการแรกคือการเก็บข้อมูลคู่จุดต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานในการเลือกตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิงและกำหนดจังหวะเวลาในการบันทึกข้อมูลเมื่ออุปกรณ์อ้างอิงพร้อม ประการที่สองกระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกมีลักษณะเป็นการทำงานแบบออฟไลน์ กล่าวคือ ชุดข้อมูลคู่จุดจะถูกเก็บมาทั้งหมดก่อนแล้วจึงนำไปใช้ในการปรับแก้เพื่อหาพารามิเตอร์ภายนอก ถ้าหากผลลัพธ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ ผู้ปฏิบัติงานต้องกลับไปเก็บข้อมูลใหม่ทำให้เวลาโดยรวมในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะลดเวลาโดยรวมในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก โดยมีหลักการสำคัญที่ใช้แก้ปัญหาข้างต้นดังนี้ ประการแรกปรับปรุงให้ขั้นตอนการเก็บข้อมูลคู่จุดให้มีความเป็นอัตโนมัติมากขึ้น โดยได้นำเสนอขั้นตอนการเก็บข้อมูลคู่จุดแบบอัตโนมัติที่สามารถเลือกระดับความแม่นยำได้ ซึ่งระดับความแม่นยำนี้เป็นการเลือกกระหว่างความเร็วในการเก็บข้อมูลคู่จุดและคุณภาพของข้อมูลคู่จุดที่ได้ ประการที่สองเพิ่มการแสดงผลและการตอบสนองในขั้นตอนการเก็บข้อมูล โดยผู้ปฏิบัติงานจะได้เห็นมาตรวัดคุณภาพด้านต่างๆของข้อมูลตลอดเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล การเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติและการแสดงผลคุณภาพของข้อมูลสามารถช่วยลดเวลาในการเก็บข้อมูลลงได้

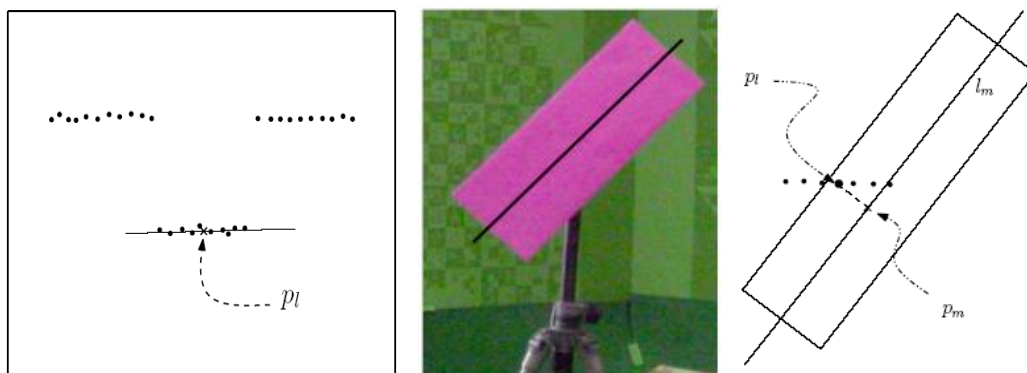
#### 5.1 ภาพรวมของกระบวนการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ

เพื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูล การหาความสัมพันธ์ของข้อมูลคู่จุด  $p_l$  และ  $p_m$  จะต้องเป็นไปอย่างอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามผู้ปฏิบัติงานยังคงต้องย้ายอุปกรณ์อ้างอิงไปยังตำแหน่งต่างๆ ซึ่งการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์อ้างอิงอาจก่อให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น ภาพของอุปกรณ์อ้างอิงไม่ชัดเจน และเนื่องจากเราไม่สามารถกำหนดให้เลเซอร์สแกนและกล้องเก็บข้อมูลที่เวลาเดียวกันข้อมูลที่ได้จึงไม่แม่นยำ ดังนั้นการเก็บข้อมูลควรเกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์อ้างอิงอยู่กับที่แล้วเท่านั้น ในบางครั้งอุปกรณ์อ้างอิงอาจถูกเลื่อนออกจากระนาบการวัดของเลเซอร์สแกนทำให้ข้อมูลผิดพลาดอย่างมากและไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เราจึงนำเสนอมาตรวัดคุณภาพของข้อมูลในแง่ต่างๆ โดยระบบจะตัดสินใจเก็บข้อมูลเมื่อมาตรวัดเหล่านี้ผ่านเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ก่อน นอกจากนี้การตอบสนองด้วยภาพและเสียงยังถูกนำมาใช้แจ้งสถานะของระบบให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถแก้ไขความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ทันที

เมื่อได้ชุดข้อมูลคู่จุด  $(p_{l-1}, p_{m-1}), (p_{l-2}, p_{m-2}), \dots, (p_{l-n}, p_{m-n})$  มากพอ โดยมีจำนวน  $n_0 < n$  คู่ เราจะเริ่มหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการจำลองการอบเหนียวและวิธีของลีเวนเบิร์ก-มาร์ควอดท์ ซึ่งขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดนี้เป็นไปอย่างอัตโนมัติและทำใหม่ทุกครั้งที่มีข้อมูลคู่จุดมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีจำนวนมากขึ้น พารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการฉายจุดเลเซอร์ลงในภาพจากกล้องอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ผู้ใช้ได้เห็นความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้

## 5.2 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงแบบอัตโนมัติ

การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การหาจุด  $p_l$  จากข้อมูลเลเซอร์และการหาจุด  $p_m$  จากข้อมูลภาพ โดยวิธีการที่จะนำเสนอต่อไปนี้จะใช้อุปกรณ์อ้างอิงที่มีลักษณะเป็นกระดานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสีแตกต่างกับพื้นหลังเช่นเดียวกับวิธีการที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แต่เนื่องเส้นที่ปรากฏในภาพจากกล้องอาจมีหลายเส้นทำให้ไม่ทราบว่าเส้นใดเป็นขอบที่แท้จริงของอุปกรณ์อ้างอิง ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องเลือกว่าเส้นใดสัมพันธ์กับขอบของอุปกรณ์อ้างอิง เพื่อให้การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงเป็นไปอย่างอัตโนมัติเราจึงเปลี่ยนวิธีตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง โดยวิธีการตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงแบบใหม่จะตรวจหาเส้นกึ่งกลางของอุปกรณ์อ้างอิง ซึ่งทำได้โดยการตรวจหากลุ่มสีที่ตรงกับอุปกรณ์อ้างอิงและมีขนาดเหมาะสม จากนั้นจึงหาเส้นตรง  $l_m$  ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มสีดังกล่าวด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญ (PCA: Principal Component Analysis) ในส่วนของข้อมูลเลเซอร์ใช้จุดศูนย์กลางของกลุ่มจุดเลเซอร์เป็นจุด  $p_l$  ซึ่งหาได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งของจุดเลเซอร์ที่อยู่ในกลุ่ม และการหาค่า  $p_m$  ทำได้โดยหาจุดตัดของเส้นตรงซึ่งเป็นขอบของอุปกรณ์อ้างอิง  $l_m$  และเส้นตรงซึ่งเกิดจากการฉายระนาบสแกนของเลเซอร์สแกนลงบนภาพ  $l_l$



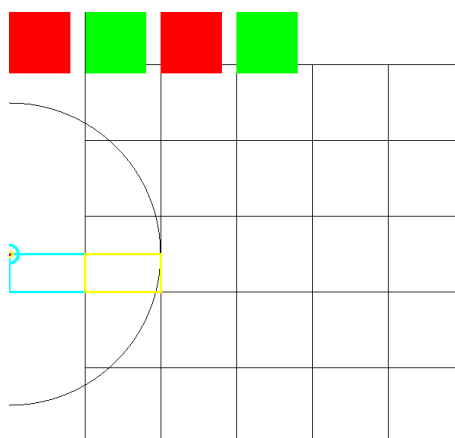
รูปที่ 5.1 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง ซ้าย) ข้อมูลเลเซอร์, กลาง) ข้อมูลจากกล้อง, ขวา) การหาจุด  $p_m$



### 5.3 มาตรการคุณภาพของข้อมูล

#### 5.3.1 ปริมาณข้อมูลและการกระจายตัว

เมื่อเราสามารถเก็บข้อมูลคู่จุดได้อย่างอัตโนมัติทำให้การเก็บข้อมูลจำนวนมากในเวลาอันสั้นเป็นเรื่องที่ง่าย แต่อาจเกิดปัญหาการกระจุกตัวของข้อมูลเนื่องจากผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนย้ายอุปกรณ์อ้างอิงไม่ทัน จึงเกิดคำถามว่าต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากเท่าใดจึงจะครอบคลุมพื้นที่การทำงานทั้งหมดของอุปกรณ์รับรูทั้งสอง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวเราจึงแบ่งพื้นที่การทำงานของเลเซอร์สแกนออกเป็นส่วนๆ โดยแต่ละส่วนครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 50x50 ตารางเซนติเมตร (รูปที่ 5.2) จากนั้นจึงกำหนดจำนวนคู่ข้อมูลสูงสุดที่เก็บได้ในแต่ละส่วน เช่น แต่ละส่วนเก็บได้ 1 – 3 คู่ และข้อมูลแต่ละคู่ที่เก็บมาจะต้องเก็บมาจากช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เช่น ห่างกันอย่างน้อย 0.1 วินาที นอกจากนี้ระบบจะเริ่มคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายนอกเมื่อมีจำนวนข้อมูลไม่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ก่อนแล้ว เช่น ต้องมีข้อมูลอย่างน้อย 6 คู่



รูปที่ 5.2 การแบ่งพื้นที่การทำงานของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์

#### 5.3.2 การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์อ้างอิงและคุณภาพของข้อมูล

การที่อุปกรณ์อ้างอิงเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุปกรณ์รับรูทั้งสองบันทึกข้อมูลไม่พร้อมกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงสุดเราจึงควรบันทึกข้อมูลเมื่ออุปกรณ์อ้างอิงหยุดนิ่งเป็นช่วงเวลาหนึ่งแล้วเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วเราสามารถทำเช่นนั้นได้โดยให้ผู้ปฏิบัติงานเลื่อนอุปกรณ์อ้างอิงไปโดยรอบและให้สัญญาณการเก็บข้อมูลกับระบบเมื่อเห็นว่าพร้อม แต่ขั้นตอนดังกล่าวทำให้เสียเวลาในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกเป็นอย่างมาก ทางออกหนึ่งคือการให้ระบบสามารถตัดสินใจได้ด้วยตัวเอง โดยระบบจะติดตามและคำนวณความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิงจากตำแหน่งในระนาบการทำงานของเลเซอร์สแกน และใช้ตำแหน่งดังกล่าวในช่วงเวลาหนึ่ง เช่น ตำแหน่งจากการทำงาน 5 รอบสุดท้าย จากนั้นระบบจะ

บันทึกข้อมูลเมื่อความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิงอยู่ในขอบเขตความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้ก่อน นอกจากนี้การติดตามตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิงยังมีประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล กล่าวคือ ผู้ปฏิบัติงานอาจจะเคลื่อนอุปกรณ์อ้างอิงออกจากกระบวนการตรวจวัดของเลเซอร์สแกนซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลที่ได้อผิดพลาด เมื่อเกิดกรณีเช่นนี้ระบบจะสามารถรับรู้ได้จากตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิงที่หายไป หรือเปลี่ยนตำแหน่งอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่จะเป็นจริงได้ ระบบจะหยุดการบันทึกข้อมูลและแจ้งเตือนผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นจึงรอคำยืนยันจากผู้ปฏิบัติงานเพื่อเริ่มบันทึกข้อมูลอีกครั้ง

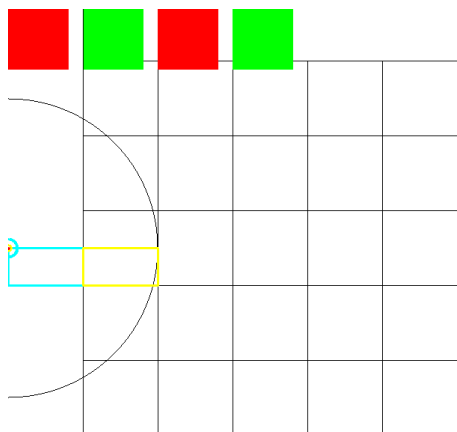
#### 5.4 ระบบแสดงผลและการตอบสนอง

แม้ว่าระบบจะสามารถตัดสินใจบันทึกข้อมูลได้อย่างอัตโนมัติแต่ก็ยังคงต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์อ้างอิงไปตามตำแหน่งต่างๆ การทำงานร่วมกันระหว่างระบบอัตโนมัติและผู้ปฏิบัติงานต้องอาศัยความเข้าใจสถานะของระบบ เพื่อให้การทำงานร่วมกันเป็นไปอย่างราบรื่นระบบจึงต้องมีส่วนแสดงผลและการตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอส่วนแสดงผลและการตอบสนองในรูปแบบของภาพและเสียงดังต่อไปนี้

- ส่วนแสดงมาตรวัดคุณภาพของข้อมูล เป็นการแสดงผลด้วยภาพ ประกอบด้วยสัญญาณต่างๆ ได้แก่ สถานการณ์ติดตามอุปกรณ์อ้างอิง ความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิง ระดับความเอียงของอุปกรณ์อ้างอิงในภาพ และสัญญาณเว้นช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล โดยสัญญาณทั้งหมดถูกแสดงด้วยกรอบสีเหลี่ยมซึ่งแสดงสีเขียวหรือสีแดงเมื่อสัญญาณแต่ละตัวพร้อมหรือไม่พร้อมตามลำดับ
- ส่วนแสดงการกระจายตัวของข้อมูล เป็นการแสดงจำนวนข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกไปแล้วในบริเวณต่างๆ เนื่องจากการเก็บข้อมูลขึ้นกับการแบ่งระนาบการทำงานของเลเซอร์ออกเป็นส่วนๆ การแสดงจำนวนข้อมูลในแต่ละส่วนจึงช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลื่อนอุปกรณ์อ้างอิงไปยังตำแหน่งที่ยังไม่มีข้อมูลได้อย่างถูกต้อง
- ส่วนแสดงผลการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก เป็นส่วนที่นำข้อมูลเลเซอร์ฉายลงบนภาพด้วยค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่ระบบคำนวณได้ในขณะนั้น เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถทราบถึงคุณภาพของผลการปรับแก้ได้อย่างต่อเนื่อง และเพิ่มข้อมูลหรือเก็บข้อมูลใหม่ในบริเวณที่การฉายภาพมีความผิดพลาดสูง
- สัญญาณเตือนและสัญญาณตอบรับ เป็นการส่งสัญญาณเสียง เมื่อเกิดเหตุการณ์ต่างๆ เช่น เมื่อมีการบันทึกข้อมูลระบบจะส่งสัญญาณเสียงเพื่อบอกให้ผู้ปฏิบัติงานย้ายอุปกรณ์อ้างอิงไปยังตำแหน่งถัดไป และในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนย้ายอุปกรณ์อ้างอิงออกจากระนาบการทำงานของเลเซอร์สแกนระบบจะส่งเสียงเตือนการหยุดบันทึกข้อมูล และรอสัญญาณยืนยันจากผู้ใช้อีกเพื่อให้ระบบกลับมาทำงานอีกครั้งหนึ่ง

จากการปฏิบัติงานระหว่างการวิจัยพบว่าส่วนแสดงผลและการตอบสนองในรูปแบบของภาพและเสียงจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับผู้ใหม่ที่เริ่มต้นการใช้งานระบบ แต่เมื่อมีความคุ้นเคยกับระบบแล้วสัญญาณบางส่วนก็มีความจำเป็นน้อยลง เช่น ส่วนแสดงมาตรวัดคุณภาพของข้อมูล และสัญญาณเตือนและสัญญาณตอบรับ เนื่องจากผู้ที่ใช้ระบบที่มีความชำนาญสามารถเข้าใจสถานะของระบบได้เป็นอย่างดี ยกเว้นกรณีที่เกิดความผิดพลาดผู้ใช้อาจจำแนกความแตกต่างของความผิดพลาดแบบต่างๆ ได้ยาก เช่น อุปกรณ์อ้างอิงออกนอกระนาบการตรวจวัดของเลเซอร์

สแกน และอุปกรณ์อ้างอิงมีมุมเอียงที่ไม่เหมาะสม จึงต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการตรวจสอบสาเหตุของความผิดพลาด



รูปที่ 5.3 ลักษณะหน้าจอแสดงผล ซ้าย) การแบ่งพื้นที่และสัญญาณต่างๆ, ขวา) ข้อมูลเลเซอร์ที่ถูกฉายลงภาพจริง

## 5.5 การทดลองด้วยอุปกรณ์จริง

ในการทดลองด้วยอุปกรณ์จริง กำหนดให้เลเซอร์สแกนวางตัวอยู่ที่จุดกำเนิดและระนาบการตรวจวัดอยู่ที่  $z = 0$  กล่าวคือกรอบอ้างอิงของเลเซอร์สแกนวางตัวขนานกับกรอบอ้างอิงโลก เลเซอร์สแกนที่ใช้ ได้แก่ รุ่น Hokuyo URG-04LX ซึ่งมีระยะการตรวจวัดอยู่ในช่วง 60 - 4095 มิลลิเมตร มีมุมมองการตรวจวัดเท่ากับ 240 องศา และมีความละเอียดเชิงมุมประมาณ 0.36 องศา (360 องศา/ 1024 เส้น) ส่วนกล้องที่ใช้จะแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง โดยภาพที่ได้จากกล้องถูกปรับแก้การบิดก่อนแล้ว ในการทดลองกล้องจะถูกวางไว้ข้างเลเซอร์สแกนและหันไปทางทิศทางใกล้เคียงกัน ส่วนอุปกรณ์อ้างอิงจะถูกวางอย่างสุ่มที่ตำแหน่งต่างๆภายในระยะ 0.5 - 4 เมตรจากเลเซอร์สแกน โดยอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองต้องสามารถตรวจวัดอุปกรณ์อ้างอิงได้

### 5.5.1 ผลกระทบของการกระจายตัวของข้อมูล

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงผลของการกระจายตัวของข้อมูลต่อคุณภาพของการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก กล่าวคือ การใช้ข้อมูลที่มีการกระจายตัวทั่วทั้งบริเวณทำงานน่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการใช้ข้อมูลที่กระจุกตัวอยู่บางพื้นที่ ในการใช้งานส่วนใหญ่เลเซอร์สแกนและกล้องมักถูกวางไว้ที่ตำแหน่งและทิศทางที่ใกล้เคียงกัน ตำแหน่งของอุปกรณ์อ้างอิงในภาพจึงขึ้นกับมุมที่เลเซอร์สแกนตรวจพบมากกว่าระยะทางจากอุปกรณ์อ้างอิงถึงเลเซอร์สแกน ดังนั้นเพื่อแสดงผลของการกระจายตัวของข้อมูลเราจึงแบ่งบริเวณทำงานออกเป็น 3 ส่วนตามมุมที่เลเซอร์สแกนตรวจพบอุปกรณ์อ้างอิง ได้แก่ ซ้าย กลาง และขวา การทดลองเริ่มจากการเก็บข้อมูลจำนวน 120 คู่ โดยมาจากทางซ้าย ตรงกลาง และทางขวา บริเวณละ 40 คู่ จากนั้นจึงทำการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกโดยมีข้อกำหนดที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ แบบแรกใช้ข้อมูลจากทางซ้าย, แบบที่สองใช้ข้อมูลจากตรงกลาง, แบบที่สามใช้ข้อมูลจากทางขวา และแบบที่สี่ใช้ข้อมูลจากทั้งบริเวณ โดยแต่ละการทดลองข้อมูลจำนวน 26 คู่จะถูกใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก โดยข้อมูลดังกล่าวถูกเลือกอย่างสุ่มตามข้อกำหนดแบบต่างๆ และข้อมูลที่เหลือจากการเลือกจำนวน 94 คู่จะถูกใช้ในการวัดความแม่นยำของพารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จากการปรับแก้ โดยการทดลองของข้อกำหนดแต่ละแบบจะถูกทำการทดลองซ้ำ 100 รอบ

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการปรับแก้โดยใช้ข้อมูลตามข้อกำหนดแบบต่างๆ คอลัมน์ “ปรับแก้” แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการฉายภาพในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก และคอลัมน์ “ทดสอบ” แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดในการฉายภาพที่เกิดกับข้อมูลทดสอบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ข้อมูลที่กระจายทั่วทั้งบริเวณทำงานให้ผลการปรับแก้ที่ดีกว่าการใช้ข้อมูลที่กระจุกตัวอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง นอกจากนี้สังเกตว่าในการใช้ข้อมูลจากทางซ้ายเพียงอย่างเดียวมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการ

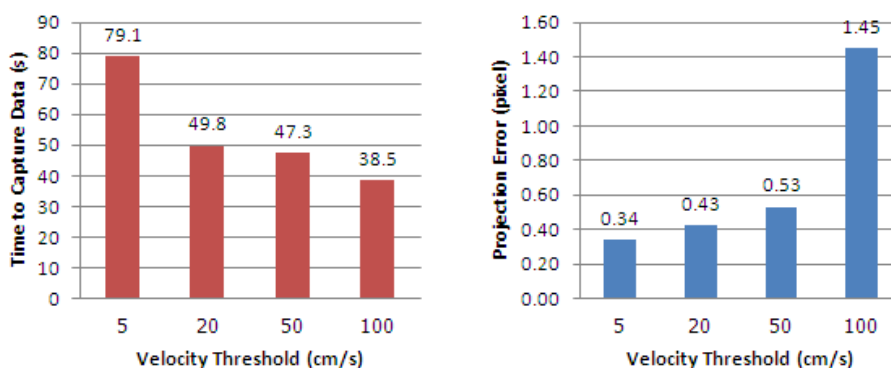
ฉายภาพระหว่างการปรับแก้ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมที่ผลลัพธ์จากการปรับแก้มีความเข้ากันกับข้อมูลที่ใช้เกินไป จึงมีความผิดพลาดในการฉายภาพที่ต่ำเมื่อใช้ข้อมูลที่ใช้ในการปรับแก้ แต่กลับมีความผิดพลาดในการฉายภาพที่สูงเมื่อใช้ข้อมูลทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ความผิดพลาดในการฉายภาพ

บริเวณ	ปรับแก้		ทดสอบ	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
ซ้าย	0.44	0.002	1.03	0.063
กลาง	0.39	0.003	0.78	0.037
ขวา	0.50	0.003	1.16	0.078
ทั้งหมด	0.44	0.005	0.69	0.011

### 5.5.2 ความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการปรับแก้

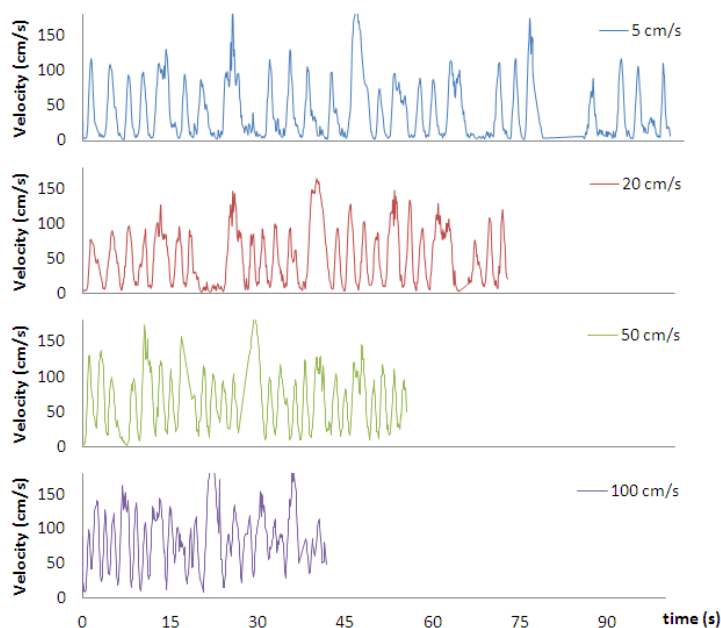
การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลของความนิ่งของอุปกรณ์อ้างอิงที่มีต่อความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล การทดลองจะถูกทำซ้ำ 4 รอบ แต่ละรอบจะกำหนดความเร็วสูงสุดของอุปกรณ์อ้างอิงไว้แตกต่างกัน คือ 5, 20, 50 และ 100 เซนติเมตรต่อวินาที โดยผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนย้ายอุปกรณ์อ้างอิงไปบริเวณต่างๆด้วยมือเปล่า ในการปรับแก้ใช้ข้อมูลจำนวน 26 คู่ที่กระจายทั่วทั้งบริเวณทำงาน นอกจากนี้ในการเก็บข้อมูลทดสอบอุปกรณ์อ้างอิงจะถูกติดเข้ากับขาตั้งกล้องก่อนที่จะย้ายไปตำแหน่งต่างๆเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์อ้างอิงอยู่นิ่งระหว่างการเก็บข้อมูล พารามิเตอร์ภายนอกที่ได้จากการปรับแก้ในการทดลองแต่ละรอบจะถูกทดสอบความแม่นยำด้วยข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน



รูปที่ 5.4 ผลการทดลอง ซ้าย) เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล, ขวา) ความผิดพลาดในการฉายภาพ

จากผลการทดลอง (รูปที่ 5.5) แสดงให้เห็นว่าความเร็วสูงสุดที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการฉายภาพมีค่าสูงขึ้น กล่าวคือ การใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์อ้างอิงที่นิ่งกว่าในการปรับแก้ทำให้ได้พารามิเตอร์ภายนอกที่แม่นยำกว่า สังเกตว่าเมื่อกำหนดความเร็วสูงสุดไว้ที่ 20 เซนติเมตรต่อวินาที เวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจะลดลงไปอยู่ที่ 63 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับความเร็วสูงสุดที่ 5 เซนติเมตรต่อวินาที ที่ความเร็วสูงสุด 50 และ 100 เซนติเมตรต่อวินาทีเวลาที่ใช้จะลดลงเหลือ 60 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ความเร็วสูงสุด 50 และ 100 เซนติเมตรต่อวินาทีเทียบได้กับการเดินช้าๆและการเดินด้วยความเร็วปรกติตามลำดับ นอกจากนี้เหตุผลที่การกำหนดความเร็วสูงสุดไว้ที่ 5 เซนติเมตรต่อวินาทีใช้เวลามากกว่าความเร็วอื่น ๆ มากเนื่องจากความเร็วดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับระดับสัญญาณรบกวน ทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องถืออุปกรณ์อ้างอิงค้างไว้ระยะเวลาหนึ่ง

รูปที่ 5.5 แสดงความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิงระหว่างการทดลอง จะเห็นว่าเมื่อความเร็วสูงสุดมีค่ามากขึ้นผู้ปฏิบัติงานจะสามารถเคลื่อนไปทั่วบริเวณทำงานได้เร็วขึ้น นอกจากนี้เนื่องจากระบบมีสัญญาณแจ้งเมื่อมีการบันทึกข้อมูลทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเคลื่อนต่อไปยังจุดถัดไปได้โดยไม่ต้องรอให้อุปกรณ์อ้างอิงนิ่งสนิท ซึ่งจะเห็นได้จากความเร็วต่ำสุดในแต่ละการทดลองจะใกล้เคียงกับค่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้ และข้อมูลความเร็วที่ข้อกำหนดความเร็วสูงสุด 100 เซนติเมตรแสดงให้เห็นว่าผู้ปฏิบัติงานไม่ใช่ประโยชน์จากความเร็วที่เพิ่มขึ้นได้มากนัก



รูปที่ 5.5 ความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิง

## บทที่ 6

### สรุปการวิจัยและแนวทางการวิจัยในขั้นถัดไป

#### 6.1 สรุปการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่เกี่ยวข้องกับการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การเพิ่มความแม่นยำให้กับการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก และการปรับปรุงวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ให้มีความเป็นอัตโนมัติมากขึ้น สำหรับการเพิ่มความแม่นยำให้กับการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกมีประเด็นที่น่าสนใจ ดังนี้ การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลเลเซอร์ด้วยวิธีการทางสถิติ, การวัดและควบคุมคุณภาพของข้อมูล, และการวิเคราะห์ขอบเขตล่างของความผิดพลาดในการฉายภาพ

ผลการทดลองด้วยโปรแกรมจำลองและการทดลองด้วยอุปกรณ์จริง พบว่าการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลเลเซอร์ด้วยวิธีการทางสถิติสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำให้แก่พารามิเตอร์ภายนอกได้ นอกจากนี้การวัดและควบคุมคุณภาพของข้อมูล เช่น การกระจายตัวของข้อมูล, จำนวนข้อมูลที่ใช่, และความเร็วของอุปกรณ์อ้างอิง สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถหาพารามิเตอร์ภายนอกที่ไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการฉายภาพได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเรื่องขอบเขตล่างของความผิดพลาดในการฉายภาพ

ในส่วนของ การปรับปรุงวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ให้มีความเป็นอัตโนมัติมากขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดการแสดงผลและการตอบสนองกับผู้ปฏิบัติงานเพื่อเพิ่มความเร็วและคุณภาพในขั้นตอนการเก็บข้อมูล ตัวอย่างเช่น การแสดงบริเวณที่ควรเก็บข้อมูลเพิ่ม, การตอบสนองด้วยเสียงเมื่อมีการบันทึกข้อมูล, การแสดงผลมาตรวัดคุณภาพของข้อมูล, และการแจ้งเตือนด้วยเสียงเมื่อระบบตรวจพบความผิดพลาด ซึ่งผลการทดลองด้วยอุปกรณ์จริงแสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์แบบกึ่งอัตโนมัติสามารถลดเวลาที่ใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์และควบคุมคุณภาพของผลลัพธ์ได้



## 6.2 แนวทางการวิจัยในขั้นถัดไป

แม้ว่าวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องที่ได้นำเสนอในงานวิจัยจะสามารถลดความยุ่งในการหาพารามิเตอร์ภายนอกได้ แต่ผู้วิจัยพบว่ามีประเด็นที่น่าสนใจควรแก่การค้นหาคำตอบต่อไปอีกหลายประเด็น ดังนี้

- งานวิจัยนี้ได้นำเสนอให้ปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์โดยการเพิ่มหรือลดค่าของมุม ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอให้ใช้ค่าครึ่งหนึ่งของความละเอียดเชิงมุมของเลเซอร์สแกน แต่มีความเป็นไปได้ว่าค่าที่ใกล้เคียง เช่น 0.4 หรือ 0.6 เท่าของความละเอียดเชิงมุมของเลเซอร์สแกนอาจให้ผลการปรับแก้พารามิเตอร์ที่ดีกว่า และเนื่องจากพฤติกรรมของสัญญาณรบกวนของเลเซอร์สแกนแต่ละชิ้นมีความแตกต่างกันจึงทำให้ค่าดังกล่าวอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุปกรณ์แต่ละตัว
- มาตรฐานวัดคุณภาพของข้อมูลที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นเพียงมาตรฐานซึ่งสามารถปรับปรุงให้มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อผลลัพธ์ที่แม่นยำขึ้นได้ และมาตรฐานดังกล่าวเป็นเพียงส่วนหนึ่งของมาตรฐานที่ส่งผลต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ภายนอกที่ได้ จึงควรมีการค้นหามาตรฐานอื่นๆต่อไป
- แนวคิดเรื่องการแสดงผลและการตอบสนองต่อผู้ปฏิบัติงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการปรับแก้พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ชนิดอื่นๆได้อีกหลากหลาย แต่จำเป็นต้องมีการปรับให้เข้ากับชนิดของอุปกรณ์และลักษณะการใช้งานจริง

## รายการอ้างอิง

- [1] Wijesoma W.S., Kodagoda K.R.S., Balasuriya A.P., Teoh E.K., Laser and camera for road edge and mid-line detection, Robot Motion and Control, 2001 Proceedings of the Second International Workshop on, pp.269-274, 2001
- [2] Peynot T., Kassir A., Laser-camera data discrepancies and reliable perception in outdoor robotics, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pp.2625-2632, 2010
- [3] Gate G., Breheret A., Nashashibi F., Fast Pedestrian Detection in Dense Environment with a Laser Scanner and a Camera, Vehicular Technology Conference, 2009. IEEE 69th, pp.1-6, 2009
- [4] Rao D., Le Q.V., Phoka T., Quigley M., Sudsang A., Ng A.Y., Grasping novel objects with depth segmentation, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pp.2578-2585, 2010
- [5] Kobilarov M., Sukhatme, G., Hyams, J., Batavia, P., People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser, Robotics and Automation. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, pp.557-562, 2006
- [6] Amarasinghe D., Mann G.K.I., Gosine R.G., Integrated laser-camera sensor for the detection and localization of landmarks for robotic applications, Robotics and Automation, 2008 IEEE International Conference on, pp.4012-4017, 2008
- [7] Brim X., Goulette F., Modeling and Calibration of Coupled Fish-Eye CCD Camera and Laser Range Scanner for Outdoor Environment Reconstruction, 3-D Digital Imaging and Modeling, 2007. Sixth International Conference on, pp.320-327, 2007
- [8] Xiaofeng Lian, Zaiwen Liu, Xiaoyi Wang, Lihua Dou, Reconstructing indoor environmental 3D model using laser range scanners and omnidirectional camera, Intelligent Control and Automation, 2008 7th World Congress on, pp.1640-1644, 2008
- [9] Wasielewski S., Strauss O., Calibration of a multi-sensor system laser rangefinder/camera, Intelligent Vehicles '95 Symposium., Proceedings of the, pp.472-477, 1995

- [10] Qilong Zhang, Pless R., Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration), Intelligent Robots and Systems, 2004. IEEE/RSJ International Conference on, vol.3, pp. 2301- 2306 vol.3, 2004
- [11] Dupont R., Keriven R., Fuchs P., An improved calibration technique for coupled single-row telemeter and CCD camera, 3-D Digital Imaging and Modeling, 2005. Fifth International Conference on, pp. 89- 94, 2005
- [12] Mei C., Rives P., Calibration between a central catadioptric camera and a laser range finder for robotic applications, Robotics and Automation, 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, pp.532-537, 2006
- [13] Ganhua Li, Yunhui Liu, Li Dong, Xuanping Cai, Dongxiang Zhou, An algorithm for extrinsic parameters calibration of a camera and a laser range finder using line features, Intelligent Robots and Systems, 2007. IEEE/RSJ International Conference on, pp.3854-3859, 2007
- [14] Spinello L., Siegwart R., Human detection using multimodal and multidimensional features, Robotics and Automation, 2008. IEEE International Conference on, pp.3264-3269, 2008
- [15] Douillard B., Fox D., Ramos F., A spatio-temporal probabilistic model for multi-sensor object recognition, Intelligent Robots and Systems, 2007. IEEE/RSJ International Conference on, pp.2402-2408, 2007
- [16] Kolski S., Macek K., Spinello L., Secure autonomous driving in dynamic environments: From object detection to safe driving, Workshop on Safe Navigation in Open and Dynamic Environments (IROS 2007). IEEE/RSJ International Conference on, pp.2402-2408, 2007
- [17] Muhlbauer Q., Kuhnlenz K., Buss M., Fusing laser and vision data with a genetic ICP algorithm, Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. 10th International Conference on, pp.1844-1849, 2008
- [18] Bertrand Douillard, Dieter Fox, Fabio Ramos, Laser and Vision Based Outdoor Object Mapping, In Proceedings of Robotics: Science and Systems IV, 2008
- [19] Chao Gao, Spletzer, J.R., On-line calibration of multiple LIDARs on a mobile vehicle platform, Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, pp.279-284, 2010

- [20] Mohottala S., Ono S., Kagesawa M., Ikeuchi K., Fusion of a camera and a laser range sensor for vehicle recognition, Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2009. IEEE Computer Society Conference on, pp.16-23, 2009
- [21] Martinelli A., State Estimation Based on the Concept of Continuous Symmetry and Observability Analysis: The Case of Calibration, Robotics, IEEE Transactions on, vol.27, no.2, pp.239-255, 2011
- [22] Fu. Y.L, Lang. S.Y.T, Tso. S.K, Investigation of an autonomous intelligent mobile robot system for indoor environment navigation, In Journal of Harbin Institute of Technology, 2006
- [23] Henghai Fan, Ganhua Li, Li Dong, A 3D Color Measurement System, Intelligent Systems and Applications, 2009. International Workshop on, pp.1-4, 2009
- [24] Bacca E.B., Mouaddib E., Cufi X., Embedding range information in omnidirectional images through laser range finder, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pp.2053-2058, 2010
- [25] Lixia Meng, Fuchun Sun, Shuzhi Sam Ge, Extrinsic calibration of a camera with dual 2D laser range sensors for a mobile robot, Intelligent Control (ISIC), 2010 IEEE International Symposium on, pp.813-817, 2010
- [26] Osgood T.J., Yingping Huang, Young K., Minimisation of alignment error between a camera and a laser range finder using Nelder-Mead simplex direct search, Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2010 IEEE, pp.779-786, 2010
- [27] Bileschi S., Fully automatic calibration of LIDAR and video streams from a vehicle, Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2009 IEEE 12th International Conference on, pp.1457-1464, 2009
- [28] Chao Gao, Spletzer J.R., On-line calibration of multiple LIDARs on a mobile vehicle platform, Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, pp.279-284, 2010
- [29] M. Lobo, L. Vandenberghe, S. Boyd, and H. Le Bret, Applications of second-order cone programming, Linear Algebra and Applications, Special Issue on Linear Algebra in Control, Signals and Image Processing, 1998.

- [30] Kneip L., Tache F., Caprari G., Siegwart R., Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range scanner, *Robotics and Automation*, 2009. IEEE International Conference on, pp.1447-1454, 2009
- [31] Zhengyou Zhang, Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations, *Computer Vision*, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on, vol.1, pp.666-673, 1999
- [32] <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/firewire/stingray/f-046bc.html>
- [33] <http://www.canon.com.au/For-You/Digital-Video-Cameras/LEGRIA-Video-Cameras/HFM300>
- [34] <http://www.logitech.com/en-us/webcam-communications/webcams/devices/6333>
- [35] Kneip L., Tache F., Caprari G., Siegwart R., Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range scanner, *Robotics and Automation*, 2009. IEEE International Conference on, pp.1447-1454, 2009
- [36] Y. Okubo, C. Ye, and J. Borenstein, Characterization of the hokuyo urg-04lx laser rangefinder for mobile robot obstacle negotiation, *SPIE*, 2009
- [37] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P., Optimization by Simulated Annealing, *Science* 220 (4598), pp. 671–680, 1983
- [38] Kenneth Levenberg, A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics* 2, pp 164–168, 1944
- [39] J. Skingley and A.J. Rye, The Hough Transform Applied to SAR Image for Thin Line Detection, *Pattern Recognition Letters* (6), pp 61-67, 1987

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุขุม สัตตรัตน์นามัย เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม 2530 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม อันดับหนึ่ง) สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ณ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

มีความสนใจในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการ นำหุ่นยนต์มาใช้งานในชีวิตประจำวัน ซึ่งหุ่นยนต์ต้องมีทักษะพื้นฐาน เช่น การเข้าใจสิ่งแวดล้อม ด้วยอุปกรณ์รับรู้ชนิดต่างๆ การรับรู้และเข้าใจคำสั่งจากมนุษย์ เป็นต้น