

โครงร่างวิทยานิพนธ์
(THESIS PROPOSAL)

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย)	การปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก ระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง
ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ)	Improving and Filtering Laser Data for Extrinsic Laser Range Finder/Camera Calibration
เสนอโดย	นายสุชุม สัตตรัตน์ามัย
รหัสบัณฑิต	5370506421
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถานที่ติดต่อ	ภาควิชาคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์	08-9121-4268
อีเมล	hare081987@hotmail.com
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.นัทที นิภานันท์
คำสำคัญ (ภาษาไทย)	อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์, การปรับแก้, พารามิเตอร์ภายนอก
คำสำคัญ (ภาษาอังกฤษ)	Laser Range Finder, Calibration, Extrinsic Parameters

การปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอก

ระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง

(Improving and Filtering Laser Data for Extrinsic Laser Range Finder/Camera Calibration)

นายสุชุม สัตตรัตน์นัย

9 กันยายน 2554

1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การใช้งานหุ่นยนต์อัตโนมัติ นั้น หุ่นยนต์จำเป็นที่จะทราบข้อมูลของสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ดังกล่าวทำงานอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สภาพแวดล้อมนั้นเป็นสภาพแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุม หรือสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ไม่ทราบข้อมูลล่วงหน้าและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา นั้น ดังตัวอย่างเช่นการใช้งานหุ่นยนต์ในบ้านร่วมกับมนุษย์ หุ่นยนต์ก็ยิ่งต้องการข้อมูลที่ครบถ้วนและมีความแม่นยำสูง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการนำอุปกรณ์รับรู้ที่แตกต่างกันจำนวนมาก มาใช้งานร่วมกัน การใช้อุปกรณ์รับรู้ร่วมกันนั้นเป็นงานที่ท้าทาย เนื่องจากอุปกรณ์รับรู้ต่างชนิดกันจะตรวจวัดสภาพแวดล้อมเดียวกันด้วยวิธีการและลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (LRF: Laser Range Finder) สามารถตรวจวัดสภาพแวดล้อมได้ในรูปแบบของระยะความลึกจากตัวอุปกรณ์ถึงวัตถุ หรืออุปกรณ์รับภาพจำพวกกล้องวิดีโอสามารถตรวจจับแสงที่สะท้อนจากวัตถุทำให้ได้ภาพของสภาพแวดล้อม โดยอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และอุปกรณ์รับภาพเป็นอุปกรณ์รับรู้ที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษซึ่งจะเห็นได้จากจำนวนบทความที่ตีพิมพ์เกี่ยวกับการใช้งานอุปกรณ์รับรู้ดังกล่าว ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์คือสามารถให้ข้อมูลระยะความลึกของสภาพแวดล้อมได้เป็นมุมกว้าง ในขณะที่กล้องวิดีโอสามารถให้ข้อมูลภาพสีที่บอกถึงรายละเอียดของสิ่งของได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้อุปกรณ์ทั้งสองมีราคาไม่สูงนักและสามารถทำงานแบบทันที (Real-time) ได้ ดังนั้นเราสามารถนำอุปกรณ์ทั้งสองมาประยุกต์ใช้ควบคู่กันในงานที่มีความน่าสนใจได้อย่างหลากหลาย เช่น การนำทาง [1, 2, 3], การหยิบจับและเคลื่อนย้ายวัตถุ [4], การตรวจจับและติดตามบุคคล [5], การสร้างแผนที่และระบุตำแหน่ง [6], การสร้างพื้นผิวสามมิติ [7, 8] และอื่นๆ

การนำอุปกรณ์รับรู้หลายตัวหรือหลายชนิดมาใช้งานร่วมกันนั้นจะให้ผลดีขึ้นอย่างมากเมื่อเราทราบความสัมพันธ์ของตำแหน่งของอุปกรณ์รับรู้แต่ละตัวในระบบ ตัวอย่างเช่น ในระบบที่มีอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องวิดีโอ นั้น การทราบความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของอุปกรณ์ทั้งสองจะทำให้เราทราบว่าจุดที่อยู่ ณ ตำแหน่งใด ๆ นั้นมีสีเป็นอย่างไร เมื่ออุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ของหุ่นยนต์บริการตรวจพบวัตถุวางขวางเส้นทาง หุ่นยนต์สามารถใช้ภาพจากกล้องเพื่อพิจารณาว่าวัตถุดังกล่าวเป็นคนหรือสิ่งของประเภทใด ควรจะเดินเข้าไปใกล้มากขึ้นแค่ไหน กล่าวคือเราสามารถรู้ตำแหน่งของวัตถุและรายละเอียดที่สำคัญของวัตถุดังกล่าว เช่น สี, ลักษณะพื้นผิว ฯลฯ จึงมีงานวิจัยหลายชิ้นที่นำเสนอวิธีการหาความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของอุปกรณ์วัด

ระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง ซึ่งรู้จักกันในชื่อ “ปัญหาการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง” หรือ “Laser Range Finder/Camera extrinsic parameter calibration problem” ซึ่งเป็นหัวข้อหลักในงานวิจัยชิ้นนี้

วิธีการที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองที่มาจากวัตถุชิ้นเดียวกัน โดยถ้าอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจพบวัตถุชิ้นเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันผ่านตำแหน่งของอุปกรณ์รับรู้ สำหรับกระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์ดังกล่าวจะทำได้โดยการหาความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งที่ทำให้ข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองสอดคล้องกันมากที่สุด อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญของวิธีการที่กล่าวมาคือข้อมูลนำเข้า คุณภาพของผลลัพธ์จะแปรผันตามคุณภาพของข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณเป็นอย่างมาก จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง

2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องถูกกล่าวถึงมาตั้งแต่ปี 1995 โดย Wasielewski และ Strauss [9] ซึ่งได้นำเสนอวิธีการในการปรับแก้พารามิเตอร์โดยใช้อุปกรณ์อ้างอิงเข้ามาช่วยในการปรับแก้ อุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษที่ถูกพับตรงกลางให้เป็นสันนูนและระบายสีกระดาษทั้งสองส่วนด้วยสีขาวและสีดำ จากลักษณะดังกล่าวทำให้ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ปรากฏเป็นเส้นตรงสองเส้น ซึ่งจุดที่เป็นสันสามารถคำนวณได้จากจุดตัดของเส้นตรงทั้งสองจึงได้ตำแหน่งที่ค่อนข้างแม่นยำ นอกจากนี้การทำสีบริเวณทั้งสองให้แตกต่างกันทำให้สามารถหาเส้นที่เป็นสันกระดาษได้ง่ายจากภาพจากกล้อง เมื่อได้ชุดข้อมูลจุดและเส้นมากพอจึงนำชุดข้อมูลที่ได้มาผ่านกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุด (Optimization) จนได้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่เหมาะสม

สำหรับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดจนได้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่เหมาะสม ทำได้โดยการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายเป็นฟังก์ชันซึ่งรับชุดข้อมูลจุดและพารามิเตอร์ภายนอก จากนั้นจึงหาพารามิเตอร์ภายนอกที่ทำให้ฟังก์ชันดังกล่าวมีค่าเหมาะสมที่สุด โดยฟังก์ชันที่ได้รับความนิยมในงานวิจัยที่ถูกนำเสนอในช่วงหลายปีที่ผ่านมาสามารถแบ่งออกเป็นสองแบบ ได้แก่ ฟังก์ชันความผิดพลาดของการฉายจุดเลเซอร์ลงในภาพจากกล้องในกรอบอ้างอิงภาพ และฟังก์ชันความผิดพลาดของตำแหน่งจุดเลเซอร์ในกรอบอ้างอิงสามมิติ

2.1 ฟังก์ชันความผิดพลาดของการฉายจุดเลเซอร์ลงในภาพจากกล้องในกรอบอ้างอิงภาพ

การคำนวณความผิดพลาดทำได้โดยการฉายจุดข้อมูลเลเซอร์ลงในภาพที่ได้จากกล้อง จากนั้นจึงวัดระยะตั้งฉากจากจุดที่ฉายได้กับเส้นขอบของวัตถุในภาพ [9, 12, 13] สำหรับฟังก์ชันความผิดพลาดในรูปแบบนี้ถูก

นำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การตรวจหาบุคคล [14], การรู้จำวัตถุ [15], การนำทางอัตโนมัติในหุ่นยนต์ [16, 17], การสร้างแผนที่ของสิ่งแวดล้อม [18] หรือการปรับแก้พารามิเตอร์ร่วมกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ [19] เป็นต้น

ในปี 2006 Mei และ Rives [12] ได้นำเสนอวิธีการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องออปติคัล โดยมีทวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ในกรณีต่างๆ ได้แก่ กรณีที่เลเซอร์มีลักษณะเป็นลำแสงและมองเห็นได้, กรณีที่เลเซอร์มีลักษณะเป็นเส้นและมองเห็นได้ และกรณีที่เลเซอร์ไม่สามารถถูกมองเห็นได้ งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าในสองกรณีแรกที่ลำแสงเลเซอร์มองเห็นได้ การหาพารามิเตอร์ภายนอกสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองเพียงชุดเดียว ต่างกับกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ไม่สามารถมองเห็นได้ การหาพารามิเตอร์ภายนอกต้องมีการเปลี่ยนมุมมองของกล้องหรือมีการเคลื่อนย้ายวัตถุอ้างอิงเพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่แตกต่างกันจำนวนหลายชุด

ในปี 2007 Ganhua Li และคณะ [13] ได้นำเสนอทวิเคราะห์ลักษณะของอุปกรณ์อ้างอิงแบบต่างๆ เช่น แบบจุด แบบเส้น และแบบระนาบ และสรุปได้ว่าอุปกรณ์อ้างอิงแบบเส้นมีความเหมาะสมที่สุด จึงนำเสนออุปกรณ์อ้างอิงแบบใหม่ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษสามเหลี่ยม ซึ่งจะทำให้การเก็บข้อมูลแต่ละครั้งจะได้คู่ข้อมูลจำนวนสองคู่จากด้านทั้งสองของสามเหลี่ยมที่ติดกับระนาบของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าแผ่นสามเหลี่ยมดังกล่าวควรเป็นสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งส่งผลให้ได้พารามิเตอร์ภายนอกที่มีความแม่นยำมากที่สุด

2.2 ฟังก์ชันความผิดพลาดของตำแหน่งจุดเลเซอร์ในกรอบอ้างอิงสามมิติ

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

ในปี 2004 Zhang และ Pless [10] ได้ปรับเปลี่ยนลักษณะของอุปกรณ์อ้างอิงและวิธีการตรวจวัดอุปกรณ์ดังกล่าว โดยอุปกรณ์อ้างอิงที่ใช้มีลักษณะเป็นตารางหมากรุกสี่เหลี่ยมทำให้ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์มีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของเส้นตรงหนึ่งเส้น ดังนั้นจุดแรกและจุดสุดท้ายของส่วนของเส้นตรงจึงเป็นบริเวณขอบของแผ่นตารางหมากรุกดังกล่าว และเนื่องจากขอบของกระดาษมีสีติดกับพื้นหลังทำให้กล้องสามารถตรวจวัดเส้นขอบได้ จึงสามารถรวบรวมชุดข้อมูลจุดและเส้นเพื่อใช้ในการปรับแก้พารามิเตอร์ได้อย่างเพียงพอ แต่ความแตกต่างของงานวิจัยนี้คือกระดาษดังกล่าวมีลักษณะเป็นตารางหมากรุกทำให้เราสามารถระบุตำแหน่งคร่าวๆของระนาบของกระดาษหมากรุกเทียบกับกล้องได้ เราจึงมีคำตอบเริ่มต้นที่ดีให้กับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดและได้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกแม่นยำขึ้น

ในปี 2005 Dupont, Keriven และ Fuchs [11] ได้ปรับเปลี่ยนตัววัดค่าความผิดพลาดสำหรับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด จากเดิม [10] ได้เสนอให้วัดค่าความผิดพลาดจากระยะทางของจุดเลเซอร์ไปยังระนาบของกระดานตามแนวตั้งฉาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้เสนอให้วัดจากระยะทางของจุดเลเซอร์ไปยังระนาบของกระดานตามแนวรัศมีของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคัดกรองข้อมูลที่น่าจะเกิดจากความผิดพลาดในการอ่านค่าของอุปกรณ์รับรู้ออกไปเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

3 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์สำหรับการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง โดยการปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์จะใช้เพียงข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองไม่มีการเพิ่มข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้อื่นอีก และการคัดเลือกข้อมูลเป็นแบบอัตโนมัติเพื่อช่วยคัดกรองข้อมูลที่ไม่ถูกต้องออกจากระบบโดยไม่เพิ่มความยุ่งยากในการปรับแก้พารามิเตอร์

4 ทฤษฎีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

4.1 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (Laser Range Finder)

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (LRF: Laser Range Finder, หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า LADAR: Laser Detection and Ranging) เป็นเทคโนโลยีการวัดระยะจากตัวอุปกรณ์ถึงวัตถุด้วยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ขนาดเรียวยาวออกไปเป็นจังหวะสั้นๆและวัดพลังงานที่วัตถุสะท้อนกลับมา อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การวัดและสำรวจ การออกแบบสถาปัตยกรรม การสร้างโมเดลสามมิติ การสร้างแผนที่เพื่อการนำทาง การลงจอดของยานอวกาศ ฯลฯ อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์แต่ละรุ่นจะใช้แสงเลเซอร์ที่ย่านความถี่ต่างๆกันซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรด (600–1000 นาโนเมตร) วัตถุที่สามารถวัดได้มีความหลากหลายสูง เช่น ผนัง ไม้ ก้อนหิน พื้นกระเบื้อง ก่ออิฐ โฟม ก่อพลาสติก เป็นต้น

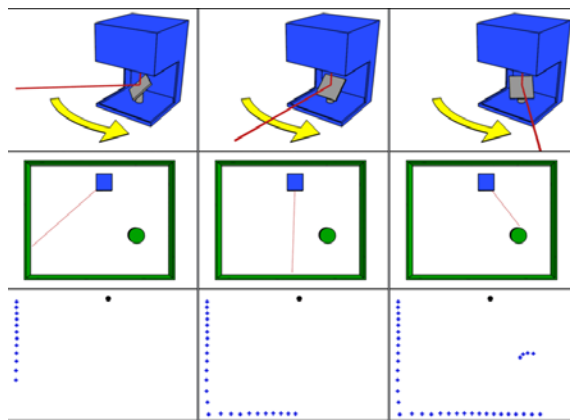
การคำนวณระยะของวัตถุแบ่งออกเป็นสองวิธีหลัก คือ วิธีที่หนึ่งแบบ "Incoherent" ซึ่งวัดระยะทางจากปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับมา และวิธีที่สองแบบ "Coherent" ซึ่งวัดความถี่ของลำแสงเลเซอร์ที่ส่งออกไปซึ่งจะถูกรบกวนได้ง่ายกว่าแบบแรก วิธีการวัดทั้งสองวิธีจะต้องอาศัยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ออกไปซึ่งแบ่งเป็น ลำแสงพลังงานต่ำ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

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน (รูปที่ 1) ได้แก่

- แสงเลเซอร์ มีช่วงความยาวคลื่น 600-1000 นาโนเมตร อุปกรณ์ที่ปล่อยลำแสงเลเซอร์ในช่วงความยาวคลื่นนี้มีราคาสูง แต่จะส่งผลกระทบต่อสายตาทำให้ต้องจำกัดปริมาณพลังงานที่เลเซอร์ปล่อย

ออกมา ในบางงานเลเซอร์ที่ใช้จะมีความยาวคลื่นเกินกว่า 1000 นาโนเมตรซึ่งปลอดภัยต่อสายตาที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าเนื่องจากตามนุษย์ไม่รับแสงที่ความยาวคลื่นนี้ แต่อุปกรณ์ที่จะตรวจวัดคลื่นที่ความยาวคลื่นนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่สูงนักทำให้มีความแม่นยำต่ำ

- อุปกรณ์ปล่อยลำแสงเลเซอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยกระจกตัวหมุนซึ่งการหมุนของกระจกทำให้แนวการตรวจวัดของเลเซอร์เปลี่ยนทิศไปเรื่อยๆและเรียงตัวกันเป็นระนาบ การเลือกอุปกรณ์ปล่อยลำแสงและฐานหมุนนี้จะส่งผลต่อความละเอียดของข้อมูลที่อุปกรณ์รับรู้จะตรวจวัดได้
- อุปกรณ์รับแสง โดยความเร็วและความละเอียดในการตรวจวัดแสงจะส่งผลต่อคุณภาพโดยรวมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์



รูปที่ 1 ส่วนประกอบและการทำงานของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ที่เวลาต่างๆ, แถวบน) กระจกหมุนและทิศของลำแสงที่ถูกปล่อยออกมา, แถวกลาง) ภาพมุมสูงของสิ่งแวดล้อม, แถวล่าง) ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์



รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย ซ้าย) Hokuyo URG-04, ขวา) Hokuyo UTM-30

สำหรับอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ของบริษัท Hokuyo รุ่น URG-04 [27] และรุ่น UTM-30 [28] (รูปที่ 2) โดยมีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์รุ่น URG-04 และ UTM-30

รุ่น	URG-04	UTM-30
Measuring Range	0.06 to 4 เมตร	0.1 to 30 เมตร
Measuring Angle	240 องศา	270 องศา
Angular Resolution	0.36 องศา	0.25 องศา
Light source	Semiconductor laser diode($\lambda=785\text{nm}$), Laser safety class 1	Semiconductor laser diode($\lambda=905\text{nm}$), Laser safety class 1

4.2 กล้องและการปรับแก้พารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Camera & Intrinsic Parameter Calibration)

สำหรับกล้องที่มีใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะมีลักษณะการทำงานแบบกล้องรูเข็ม [29] โดยกล้องจะทำการฉายภาพวัตถุในพิภคสามมิติผ่านรูขนาดเล็ก (เลนส์) ให้มาอยู่ในพิภคสองมิติของรูปดั่งสมการต่อไปนี้

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

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

โดยนิยามตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- s เป็นค่าคงที่
- $[R|t]$ เป็นเมทริกซ์อธิบายการเลื่อนที่และการหมุน
- (X, Y, Z) เป็นพิภคสามมิติของวัตถุในกรอบอ้างอิงโลก
- (u, v) เป็นพิภคของจุดที่ฉายลงระนาบสองมิติในกรอบอ้างอิงของภาพ
- เมทริกซ์ A หรือเมทริกซ์ของพารามิเตอร์ภายในของกล้อง
- (c_x, c_y) เป็นจุดกึ่งกลางภาพ
- f_x, f_y เป็นความยาวโฟกัสมีหน่วยเป็นพิภคเซล

ถ้ารูปที่ได้จากกล้องถูกขยายหรือย่อด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง พารามิเตอร์ในเมทริกซ์ A จะต้องถูกคูณด้วยค่าคงที่ค่านั้น อย่างไรก็ตามเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่า s เพื่อรักษาให้เมทริกซ์ A มีค่าเท่าเดิม จึงเรียกเมทริกซ์ A ว่าพารามิเตอร์ภายในของกล้อง (Intrinsic Parameters) ซึ่งขึ้นกับตัวกล้องและไม่ขึ้นกับมุมมองของกล้อง และเมื่อถูกวัดออกมาแล้วจะสามารถนำติดตัวกล้องไปใช้ซ้ำได้เสมอ (ความยาวโฟกัสจะต้องไม่ถูกเปลี่ยนแปลง หรือไม่มีการซูมนั่นเอง) ในส่วนของเมทริกซ์การหมุนและการเลื่อนตำแหน่งจะถูกเรียกรวมกันว่า พารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง (Extrinsic Parameters) กล่าวคือเมทริกซ์นี้จะอธิบายการวางตัวของกล้องเมื่อเทียบกับโลก โดยที่

$[R|t]$ เป็นเมทริกซ์ที่เปลี่ยนตำแหน่ง (X, Y, Z) ไปเป็นตำแหน่ง (x, y, z) ในกรอบอ้างอิงที่คงที่เมื่อเทียบกับกล้อง ความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถจัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

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

$$x' = x / z$$

$$y' = y / z$$

$$u = f_x \cdot x' + c_x$$

$$v = f_y \cdot x' + c_y$$

แต่เนื่องจากปัญหาทางเทคนิคทำให้เลนส์ที่สร้างขึ้นทำให้รูปภาพที่ได้มีการบิดงอ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นการบิดงอในแนวแกนรัศมีจากศูนย์กลางเลนส์ ดังนั้นเราจะต้องปรับแก้สมการข้างต้นใหม่ให้เป็น

$$x'' = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2)$$

$$y'' = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y'$$

และ

$$u = f_x \cdot x'' + c_x$$

$$v = f_y \cdot x'' + c_y$$

โดยที่

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

โดยนิยามตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- k_1, k_2, k_3 เป็นค่าคงที่ความบิดงอในแนวรัศมี
- p_1, p_2 เป็นค่าคงที่ความบิดงอในแนวตั้งฉาก
- (u, v) เป็นพิกัดของจุดที่ฉายลงระนาบสองมิติในกรอบอ้างอิงของภาพ
- เมทริกซ์ A หรือเมทริกซ์ของพารามิเตอร์ภายในของกล้อง
- (c_x, c_y) เป็นจุดกึ่งกลางภาพ
- f_x, f_y เป็นความยาวโฟกัสมีหน่วยเป็นพิกเซล

เนื่องจากค่าคงที่ข้างต้นจะขึ้นกับตัวกล้องและไม่ขึ้นกับมุมมองของกล้องจึงถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องด้วย และค่าคงที่เหล่านี้จะไม่ขึ้นกับขนาดของภาพ

งานทางด้านหุ่นยนต์ที่มีความเกี่ยวข้องกับกล้องนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์และฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุในสามมิติและตำแหน่งในภาพ เพื่อใช้ในการคำนวณที่มี

ความแม่นยำสูง ดังนั้นสิ่งที่ขาดไปมิได้สำหรับงานที่เกี่ยวกับกล้องก็คือ การปรับแก้พารามิเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์และฟังก์ชันดังกล่าว

ในงานวิจัย [29] ได้นำเสนอหลักการในการประมาณพารามิเตอร์ของกล้อง โดยใช้กระดานของจุดจำนวนหนึ่งที่อยู่ตำแหน่งของจุดเหล่านั้นอยู่ก่อนแล้ว (รูปที่ 3) จึงทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างจุดสองมิติในภาพ (p) กับตำแหน่งในโลกสามมิติ (P) จากนั้นจึงนำข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวมาแก้สมการหาค่าของพารามิเตอร์ นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวได้เผยแพร่โปรแกรมสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ภายในให้ใช้ฟรีอีกด้วย



รูปที่ 3 อุปกรณ์สำหรับการปรับแก้พารามิเตอร์กล้องซึ่งถูกนำเสนอโดย [29]



รูปที่ 4 ซ้าย) กล้องรุ่น Stingray F-046 B/C, ขวา) กล้องรุ่น LEGRIA HF M300

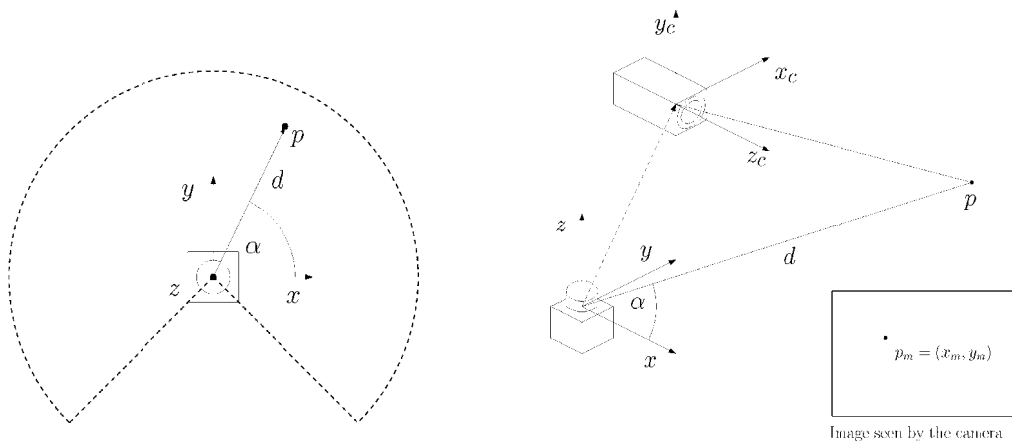
สำหรับกล้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกล้องของบริษัท Allied Vision Tech รุ่น Stingray F-046 B/C [30] และกล้องของบริษัท Canon รุ่น LEGRIA HF M300 [31] (รูปที่ 4) โดยมีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของกล้อง รุ่น Stingray F-046 B/C และ LEGRIA HF M300

รุ่น	Stingray F-046 B/C	LEGRIA HF M300
Resolution	780 x 580 พิกเซล	1920x1080 พิกเซล
FOV	ประมาณ 74 x 59 องศา	ประมาณ 50 x 30 องศา
Focal Length	17.5 มิลลิเมตร	4.1-61.5 มิลลิเมตร

4.3 การปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง (Extrinsic LRF/Camera Calibration)

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์สามารถตรวจวัดสิ่งกีดขวางได้ในระนาบการทำงานของอุปกรณ์ เราจึงสามารถกำหนดให้กรอบอ้างอิงของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรงกับกรอบอ้างอิงของโลก กล่าวคือ อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตั้งอยู่ที่จุดกำเนิด และจุดที่อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรวจวัดได้จะอยู่ที่ตำแหน่ง $p = (x, y, z = 0)$ ซึ่งถูกแทนด้วยค่าแห่งเชิงขั้ว $p_l = (a, d)$ โดยที่ $a = \tan^{-1}(y/x)$ เป็นมุมของจุดในระนาบการทำงานเทียบกับแกน x ของอุปกรณ์ และ $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$ เป็นระยะทางจากตัวอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ไปยังสิ่งกีดขวาง (รูปที่ 5 ซ้าย)



รูปที่ 5 ซ้าย) กรอบอ้างอิงโลกและข้อมูลจุดที่อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรวจวัดได้, ขวา) ข้อมูลจุดในภาพจากกล้อง

ในงานวิจัยนี้จะถือว่าภาพที่ได้จากกล้องถูกแก้ไขความบิดงอด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 4.2 แล้ว สมมติให้กล้องอยู่ที่ตำแหน่ง T และมีการหมุน R ซึ่งสามารถเขียนเป็นเมทริกซ์ภายนอก M_{ext} ได้ ดังนั้นจุด p สามารถเขียนใหม่ได้เป็น $p_c = Rp - T$ โดยเทียบกับกรอบอ้างอิงของกล้อง เมื่อเราทราบเมทริกซ์ภายใน M_{int} จากหัวข้อที่ 4.2 จุด p จะปรากฏในภาพที่ตำแหน่ง $p_m = (x_m, y_m) = M_{int}p_c$ (รูปที่ 5 ขวา) ทำให้เราสามารถนิยามฟังก์ชันการฉายภาพ P เป็นการเปลี่ยนจุด p ในกรอบของโลกจริงไปอยู่ในกรอบของภาพที่จุด p_m ได้จากสมการ

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

จากสมการข้างต้น เมื่อทราบ M_{ext} เราสามารถฉายภาพจุดข้อมูลจุดจากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ลงในภาพได้ แต่เมื่อต้องการหาค่าของ M_{ext} เราต้องทราบข้อมูลที่จำเป็น คือ คู่ข้อมูลจุดเลเซอร์ (a_i, d_i) กับข้อมูลจากภาพ (x_i, y_i) ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดจากตำแหน่งเดียวกันในกรอบอ้างอิงโลก คือจุด p_i เราจะเรียกปัญหาการหา M_{ext} ว่าปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง

ในทางปฏิบัติข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้มักจะถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนทำให้ค่า M_{ext} มีความไม่แม่นยำ ดังนั้นเราจะนิยาม M_{ext}^* ให้ค่าพารามิเตอร์ภายนอกที่ถูกต้องตามความเป็นจริง เป้าหมายของการหาพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องจึงเป็นการหาค่า M_{ext} ที่ใกล้เคียงกับค่า M_{ext}^* มากที่สุด

คุณภาพของ M_{ext} วัดได้จากความผิดพลาดของการฉายภาพ สำหรับ M_{ext} ใดๆ เรานิยามความผิดพลาดของการฉายภาพเมื่อเทียบกับคู่ข้อมูลจุด (p_l, p_m) ดังนี้

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

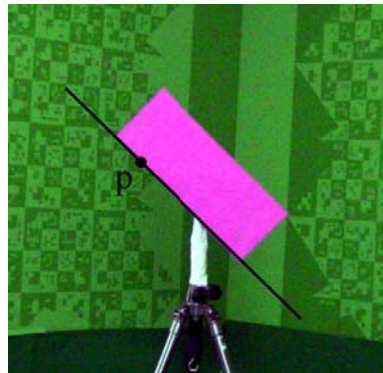
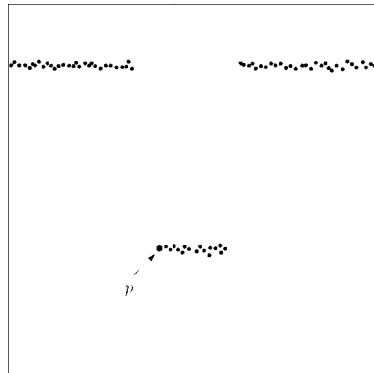
เราไม่ทราบค่า M_{ext}^* เราจึงแทนค่า $P(M_{ext}^*, p_l)$ ด้วยจุด p_m เขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

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

เพื่อความชัดเจน เราสามารถนิยามปัญหาการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องได้ดังนี้ กำหนดให้มีชุดของข้อมูล D ซึ่งเป็นชุดของข้อมูลคู่จุด (p_l, p_m) เราต้องหาค่า M_{ext} ซึ่งทำให้ค่าของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของการฉายภาพมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือเราจะหา

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

เพื่อให้วิธีการปรับแก้สมบูรณ์เราจำเป็นต้องหาชุดข้อมูลคู่จุด (p_l, p_m) ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำนายเพราะลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบวัตถุไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือกล้องทำให้ไม่สามารถหาจุด p ซึ่งเป็นจุดที่อุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจวัดได้ร่วมกัน อย่างไรก็ตามมีหลายวิธีที่ถูกลำเอียงมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าว แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่ การใช้อุปกรณ์อ้างอิงซึ่งเป็นวัตถุที่เราทราบรูปทรงอยู่ก่อนแล้วและสามารถถูกตรวจวัดได้จากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองอย่างแม่นยำ สำหรับรูปทรงที่พบเห็นได้ทั่วไปในงานวิจัยอื่น ๆ จะมีลักษณะเป็น วัตถุที่มีขอบเป็นเส้นตรง ตัวอย่างเช่น กระดานสี่เหลี่ยมสีดำ โดยกระดานดังกล่าวจะถูกวางในบริเวณที่อุปกรณ์รับรู้ทั้งสองตรวจวัดได้ เนื่องจากกระดานมีลักษณะเป็นระนาบทำให้ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ปรากฏเป็นส่วนหนึ่งของเส้นตรง ซึ่งมีจุดแรกและจุดสุดท้ายเป็นขอบของกระดาน นอกจากนี้สีของกระดานที่ถูกเลือกให้แตกต่างจากพื้นหลังจะทำให้เราสามารถหาเส้นขอบของกระดานได้ (รูปที่ 6) ทั้งนี้คุณภาพของผลลัพธ์จะขึ้นกับคุณภาพของความสัมพันธ์ที่เราหาได้



รูปที่ 6 ซ้าย) ตัวอย่างเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยจุด p ได้จากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ขวา) ภาพฉายของจุด p

5 แนวคิดของการวิจัยและการดำเนินงาน

การพัฒนาวิธีการปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลเลเซอร์สำหรับการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำให้กับการปรับแก้พารามิเตอร์ โดยที่การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์จะใช้เพียงข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ทั้งสองไม่มีการเพิ่มข้อมูลจากอุปกรณ์รับรู้อื่นอีก และการคัดเลือกข้อมูลเป็นแบบอัตโนมัติเพื่อช่วยคัดกรองข้อมูลที่ไม่ถูกต้องออกจากระบบโดยไม่เพิ่มความยุ่งยากในการปรับแก้พารามิเตอร์ เพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นจึงต้องพิจารณาด้านเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น 3 ประการ ได้แก่

1. การประพาดตัวของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ที่จะตรวจจบบรรยากาศของวัตถุรอบๆ ตัวอย่างไม่ต่อเนื่องกล่าวคือ อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ไม่สามารถปล่อยลำแสงเลเซอร์และตรวจวัดระยะทางอย่างต่อเนื่อง แต่จะค่อยๆ ปล่อยออกไปทีละมุม โดยมีระยะห่างระหว่างมุมเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเป็นตัวกำหนดความละเอียดเชิงมุมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อการหาขอบของวัตถุโดยสิ่งที่อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรวจวัดได้จะเป็นลำแสงเลเซอร์ลำสุดท้ายที่ตกกระทบในเนื้อวัตถุไม่ใช่ขอบจริงของวัตถุ เมื่อนำตำแหน่งดังกล่าวไปใช้เป็นการสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งในสามมิติของโลกจริงและตำแหน่งในสองมิติของภาพ ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้
2. การวัดระยะทางที่ผิดพลาดของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณขอบของวัตถุ กล่าวคือ ลำแสงที่อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ปล่อยออกมาจะมีลักษณะเป็นโคนที่มีขนาดความกว้างมากกว่าศูนย์ ถ้าส่วนหนึ่งของลำแสงดังกล่าวตกกระทบขอบของวัตถุและอีกส่วนหนึ่งตกกระทบพื้นหลัง จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดระยะทางของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ดังที่ได้มีรายงานไว้ในงานวิจัย [27] เมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นทำให้ตัดสินใจได้ยากว่าควรใช้

ข้อมูลที่มึมใด ระหว่างมุดมดงกล่าวหรือมุดมก่อนหน้าทีล่ำแสงดกกระทบในเนือวตุ หากเลือกมุดมทีมีปัญหาก็จะได้ระยะทีผิดพลาด หากเลือกมุดมก่อนหน้าทีจะได้มุดมทีผิดพลาด

3. การเคลื่อนทีของอุปกรณ์อ้างอิงในขณะทีทำการบันทึกข้อมูลภาพและข้อมูลเลเซอร์ กล่าวคือ ผู้ปฏิบัติการทำการบันทึกข้อมูลในขณะทีอุปกรณ์อ้างอิงไม่ได้ยู่นิ่ง อันเกิดมาจากอุปกรณ์อ้างอิงไม่ได้ถูกยึดติดกับฐาน หรือการบันทึกระหว่างทีผู้ปฏิบัติการตั้งใจเคลื่อนอุปกรณ์อ้างอิงพอดี ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการติดอุปกรณ์อ้างอิงเข้ากับฐาน เช่น ขาดึงกล้อ และเว้นระยะเวลาระหว่างทีทำการบันทึกข้อมูลและการเคลื่อนทีอุปกรณ์อ้างอิง แต่วิธีดังกล่าวจะทำให้กระบวนการปรับแก้พารามิเตอร์ใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

ในงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นกระดาษสี่เหลี่ยมทีมีสีติดกับพื้นหลังเป็นอุปกรณ์อ้างอิง โดยแบ่งขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีในการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

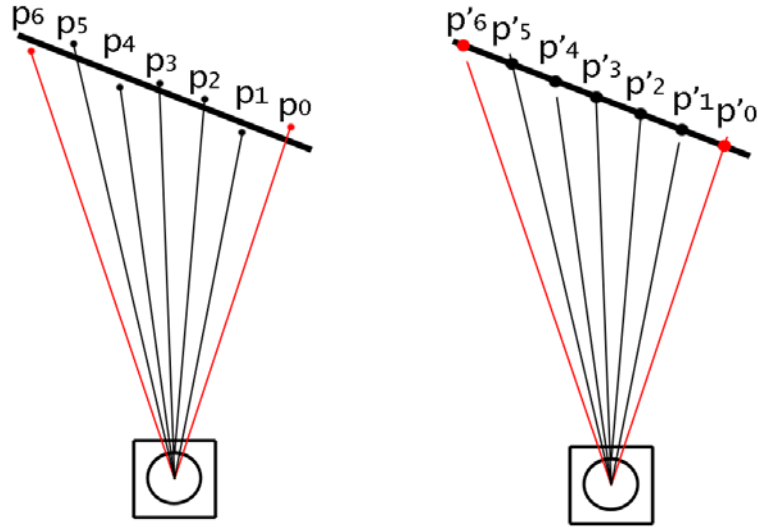
1. การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนข้อมูลดิบจากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อให้เป็นข้อมูลคู่จุดกับเส้นทีสัมพันธ์กับอุปกรณ์อ้างอิง
2. เมื่อได้ข้อมูลคู่จุดกับเส้นมาแล้ว จะนำข้อมูลจุดทีเป็นข้อมูลในส่วนของเลเซอร์มาปรับปรุง โดยใช้หลักการทางสถิติทำให้ข้อมูลทีได้ตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น
3. เมื่อได้ข้อมูลคู่จุดกับเส้นมาทีปรับปรุงแล้ว จึงนำข้อมูลดังกล่าวไปผ่านกระบวนการหาค่าเหมาะสมทีสุดจนได้เป็นพารามิเตอร์ภายนอก
4. หลังจากได้พารามิเตอร์ภายนอกแล้ว เราจะสามารถฉายจุดเลเซอร์ลงไปในภาพได้ และใช้ข้อมูลดังกล่าวในการคัดกรองคู่ข้อมูลบางคู่ออกไปจากระบบ จากนั้นจึงกลับไปทำขั้นตอนที่สองใหม่อีกครั้ง

5.1 การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง

การตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิง เป็นขั้นตอนในการเปลี่ยนข้อมูลดิบจากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อให้เป็นข้อมูลคู่จุดกับเส้นทีสัมพันธ์กับอุปกรณ์อ้างอิง ในส่วนของข้อมูลภาพจากกล้อจะใช้วิธีการหาเส้นตรงในภาพทีงานวิจัยอยู่ก่อนแล้ว และเลือกเส้นตรงทีสัมพันธ์กับข้อมูลเลเซอร์โดยผู้ใช้

ในส่วนของข้อมูลเลเซอร์จะทำการหากลุ่มของข้อมูลเลเซอร์ทีสัมพันธ์กับอุปกรณ์อ้างอิง โดยการหาจุดขอบจากการเทียบระยะทีวัดได้กับระยะของเส้นทีติดกัน ถ้าแตกต่างกันมากกว่าค่าคงทีค่าหนึ่งจะถือว่าเป็นขอบของอุปกรณ์อ้างอิง จากนั้นจึงหาเส้นตรงทีสามารถอธิบายกลุ่มข้อมูลเหล่านั้นได้ดีทีสุด และสุดท้ายทำการฉายจุดเลเซอร์ลงบนเส้นตรงดังกล่าวและใช้จุดและส่วนของเส้นตรงทีได้เป็นข้อมูลสำหรับส่วนต่อไป ดังตัวอย่างในรูป

ที่ 7 ด้านซ้ายแสดงจุดที่ได้มาจากข้อมูลดิบ p_i และเส้นตรงที่อธิบายกลุ่มจุดดังกล่าว และรูปที่ 7 ด้านขวาแสดงจุดที่ฉายลงบนเส้นตรงแล้ว p'_i และส่วนของเส้นตรง p'_0 ถึง p'_6 ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนถัดไป

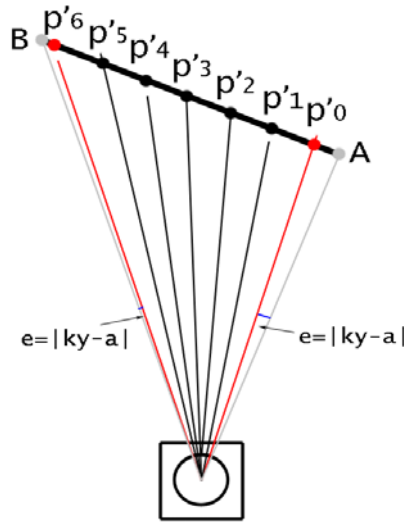


รูปที่ 7 ซ้าย) ข้อมูลดิบของข้อมูลเลเซอร์, ขวา) ข้อมูลที่ฉายลงส่วนของเส้นตรงที่คำนวณได้

5.2 การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์

การปรับปรุงข้อมูลเลเซอร์เริ่มจากการพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ซึ่งตรวจจับระยะของวัตถุรอบๆ ตัวอย่างไม่ต่อเนื่อง โดยจะสามารถตรวจวัดระยะได้ที่มุม $a = ky$ เมื่อ y เป็นความละเอียดเชิงมุมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และ k คืออันดับของมุมที่อุปกรณ์ทำการสแกน ตัวอย่างเช่น Hokuyo URG04 มีความละเอียดเชิงมุมประมาณ 0.36 องศาซึ่งเทียบเท่ากับระยะทางประมาณ 2.25 เซนติเมตรต่อลำดับการวัดระยะที่ระยะ 4 เมตร (ระยะทำการไกลสุดของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์) หมายความว่าข้อมูล p_i ที่ได้จากข้อ 5.1 อาจจะมีผิดพลาดจากจุดขอบจริง p ได้สูงสุดถึง 2.25 เซนติเมตรแม้ว่าอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์จะไม่มีสัญญาณรบกวนก็ตาม ดังตัวอย่างในรูปที่ 8 ด้านซ้าย จุดขอบที่แท้จริงอยู่ที่ตำแหน่ง A และ B แต่อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรวจวัดได้ที่จุด p'_0 ถึง p'_6 ตามลำดับ โดยความผิดพลาดในส่วนนี้เป็นส่วนที่เราต้องการแก้ไข

สมมติให้จุดที่อยู่บนขอบของอุปกรณ์อ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่ง $p^* = (x, y, 0)$ และเขียนเป็นพิกัดเชิงขั้วได้เป็น (a^*, d^*) อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์มีความละเอียดเชิงมุม y จะตรวจวัดจุดขอบได้ที่ตำแหน่ง p' มีพิกัดเชิงขั้วเป็น (ky, d) และนิยามใหม่เป็น (a, d) เราสามารถนิยามความผิดพลาดเชิงมุมได้เป็น $e = |ky - a|$ (รูปที่ 8) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องถูกลดค่าลงให้เหลือน้อยที่สุด



รูปที่ 8 จุดขอบที่แท้จริง A, B และความผิดพลาดเชิงมุม e

5.3 การหาค่าเหมาะสมที่สุด

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลอุปกรณ์อ้างอิงจะถูกเปลี่ยนตำแหน่งไปรอบๆบริเวณที่กล้องและอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรวจวัดได้ จากนั้นจึงนำชุดข้อมูลที่ได้ผ่านกระบวนการในข้อ 5.1 และ 5.2 มาใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดจนได้เป็นพารามิเตอร์ภายนอก M_{ext}

กำหนดให้ข้อมูลจุด p_i เป็นข้อมูลเลเซอร์ที่ถูกปรับแก้แล้วโดยจุดดังกล่าวอยู่ในกรอบอ้างอิงโลก และข้อมูลจุดซึ่งอยู่ในภาพ p_m เกิดจากจุดตัดของเส้นตรงซึ่งเป็นขอบของอุปกรณ์อ้างอิง l_m และเส้นตรงซึ่งเกิดจากการฉายระนาบสแกนของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ลงบนภาพ l_i เมื่อได้ข้อมูลคู่จุด $(p_{i1}, p_{m1}), (p_{i2}, p_{m2}), \dots, (p_{in}, p_{mn})$ จำนวน n คู่เราจะทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการหลอมจำลอง [32] ตามสมการในหัวข้อที่ 4.3

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

5.4 การคัดกรองข้อมูล

หลังจากได้พารามิเตอร์ภายนอกจากขั้นตอนที่สาม เราจะสามารถฉายจุดเลเซอร์ลงไปบนภาพได้ ทำให้เราทราบได้ว่าจุดเลเซอร์ดังกล่าวตกทับอุปกรณ์อ้างอิงหรือไม่ และเราจะใช้ข้อมูลดังกล่าวในการคัดกรองคู่ข้อมูลที่มีความผิดพลาดมากเกินไปจากระบบ นอกจากนี้เราสามารถแก้ปัญหาการวัดระยะทางที่ผิดพลาดของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณขอบของวัตถุได้ ด้วยการเลือกที่จะใช้หรือไม่ใช้จุดเลเซอร์ที่เป็นปัญหาดังกล่าวโดยพิจารณาจากผลการฉายจุดเลเซอร์ลงไปบนภาพ จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 5.1 ใหม่อีกครั้งจนกว่าจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของข้อมูล

6 ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะพัฒนาวิธีการปรับปรุงและคัดกรองข้อมูลอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์โดยอัตโนมัติเพื่อการปรับแก้พารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง
2. อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้องจะเรียงตัวอิสระต่อกัน โดยต้องมีบริเวณที่อุปกรณ์ทั้งสองสามารถตรวจวัดได้ร่วมกัน และกล้องจะอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตลอดการทดลอง
3. สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองต้องเหมาะสมกับการทำงานของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง
4. อุปกรณ์อ้างอิงที่ใช้ในการทดลองสามารถตรวจวัดได้ง่ายโดยอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง

7 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของกล้องและการหาพารามิเตอร์ภายในของกล้อง
2. ศึกษาลักษณะการทำงานและพฤติกรรมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์
3. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการหาพารามิเตอร์ภายนอกระหว่างอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์และกล้อง
4. ศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจหาอุปกรณ์อ้างอิงจากข้อมูลเลเซอร์และข้อมูลภาพ
5. พัฒนาวิธีการปรับปรุงข้อมูลและคัดกรองข้อมูลจากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์
6. วัดผลการทดลอง
7. สรุปผลการทดลองพร้อมจัดทำรูปเล่มและเนื้อหาวิทยานิพนธ์

8 เอกสารอ้างอิง

[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, 18-22 Oct. 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. VTC Spring 2009. IEEE 69th, pp.1-6, 26-29 April 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, 18-22 Oct. 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, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, pp.557-562, 15-19 May 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. ICRA 2008. IEEE International Conference on, pp.4012-4017, 19-23 May 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. 3DIM '07. Sixth International Conference on, pp.320-327, 21-23 Aug. 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. WCICA 2008. 7th World Congress on, pp.1640-1644, 25-27 June 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, 25-26 Sep 1995
- [10] Qilong Zhang; Pless, R.;, "Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)," Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, vol.3, pp. 2301- 2306 vol.3, 28 Sept.-2 Oct. 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. 3DIM 2005. Fifth International Conference on, pp. 89- 94, 13-16 June 2005
- [12] Mei, C.; Rives, P.;, "Calibration between a central catadioptric camera and a laser range finder for robotic applications," Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, pp.532-537, 15-19 May 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. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, pp.3854-3859, Oct. 29 2007-Nov. 2 2007

- [14] Spinello, L.; Siegwart, R.; "Human detection using multimodal and multidimensional features," Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, pp.3264-3269, 19-23 May 2008
- [15] Douillard, B.; Fox, D.; Ramos, F.;, "A spatio-temporal probabilistic model for multi-sensor object recognition," Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, pp.2402-2408, Oct. 29 2007-Nov. 2 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, Oct. 29 2007-Nov. 2 2007
- [17] Muhlbauer, Q.; Kuhnlenz, K.; Buss, M.;, "Fusing laser and vision data with a genetic ICP algorithm," Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference on, pp.1844-1849, 17-20 Dec. 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, 3-7 May 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. CVPR Workshops 2009. IEEE Computer Society Conference on, pp.16-23, 20-25 June 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, April 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. ISA 2009. International Workshop on, pp.1-4, 23-24 May 2009
- [24] Bacca, E.B.; Mouaddib, E.; Cufí, 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, 18-22 Oct. 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, 8-10 Sept. 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, 21-24 June 2010
- [27] Kneip, L.; Tache, F.; Caprari, G.; Siegwart, R., "Characterization of the compact Hokuyo URG-04LX 2D laser range scanner," Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on, pp.1447-1454, 12-17 May 2009
- [28] Morales, J.; Martinez, J.L.; Mandow, A.; Pequeno-Boyer, A.; Garcia-Cerezo, A., "Design and development of a fast and precise low-cost 3D laser rangefinder," Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on, pp.621-626, 13-15 April 2011
- [29] 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 vol.1, 1999
- [30] <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/firewire/stingray/f-046bc.html>
- [31] <http://www.canon.com.au/For-You/Digital-Video-Cameras/LEGRIA-Video-Cameras/HFM300>
- [32] Saul B. Gelfand; Sanjoy K. Mitter, "Analysis of simulated annealing for optimization," Decision and Control, 1985 24th IEEE Conference on, vol.24, pp.779-786, Dec. 1985