

โครงร่างวิทยานิพนธ์

(THESIS PROPOSAL)

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) ระบบตรวจจับและติดตามคนที่เพิ่มการทำนายการเกิดขึ้นของการบัง
ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ) HUMAN DETECTION AND TRACKING WITH OCCLUSION PREDICTION

เสนอโดย นายวรายุ จริยาวัฒน์รัตน์
รหัสบัณฑิต 537 04842 21
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถานที่ติดต่อ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์ 08-6821-9642
อีเมล Warayu.J@student.chula.ac.th
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. นัทธี นิภานันท์

คำสำคัญ (ภาษาไทย) การตรวจจับและติดตามคน, อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์, การทำนายการบัง
คำสำคัญ (ภาษาอังกฤษ) HUMAN DETECTION AND TRACKING, LRF, OCCLUSION PREDICTION

ระบบตรวจจับและติดตามคนที่เพิ่มการทำนายการเกิดขึ้นของการบัง
(HUMAN DETECTION AND TRACKING WITH OCCLUSION PREDICTION)

นาย วราวุธ จริยาวัฒน์

วันที่ 10 เมษายน 2555

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบตรวจจับและติดตามคนโดยทั่วไปนั้น มีเหตุการณ์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นแล้วทำให้ความถูกต้องของระบบลดลง เหตุการณ์ดังกล่าว คือ การบัง ซึ่งหมายถึง การที่มีคนอยู่ขวางการมองเห็นของอุปกรณ์รับรู้ ทำให้อุปกรณ์รับรู้ไม่สามารถมีข้อมูลของบริเวณพื้นที่ที่ถูกบังได้ ทำให้ถ้าระบบมีอะไรเปลี่ยนแปลงในบริเวณที่เกิดการบังขึ้น ระบบจะไม่สามารถรับรู้ได้เลย ตัวอย่างเช่น ถ้ามีคนเดินเข้าไปในบริเวณที่ถูกบังจะส่งผลให้จำนวนของคนที่ตรวจจับได้ในระบบลดลง ทำให้ถ้าคนนั้นมีการเปลี่ยนเส้นทางการเดินในบริเวณที่ถูกบังนั้น ระบบจะไม่รับรู้ถึงการเปลี่ยนแปลงนั้น และเมื่อคนนั้นเดินออกมาจากส่วนที่ถูกบัง ระบบอาจไม่สามารถหาความสัมพันธ์กับคนเดียวกันก่อนเข้าไปในบริเวณที่เกิดการบังได้เลย

การบังจึงเป็นปัญหาที่สำคัญมากในการตรวจจับและติดตามคน จึงมีหลายวิธีในการจัดการเรื่องนี้ขึ้นอยู่กับใช้ อุปกรณ์รับรู้ประเภทไหน เช่น การเพิ่มอุปกรณ์รับรู้เข้าไปเพื่อลดพื้นที่ที่จะเกิดการบังได้ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่งบประมาณที่ต้องเสียไป ในขณะที่การบังนั้นไม่ได้เกิดขึ้นบ่อย หรือการวางอุปกรณ์รับรู้ประเภทกล้องในมุมสูงลดการบังที่จะเกิดขึ้น วิธีนี้สามารถใช้ได้กับอุปกรณ์รับรู้ที่ให้ผลลัพธ์เป็นภาพเนื่องจากได้ข้อมูลปริมาณมาก ๆ แตกต่างกับอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ที่ให้ข้อมูลมาเพียงระนาบเดียว จึงไม่สามารถใช้วิธีนี้ในการแก้ปัญหาได้ ดังนั้นระบบตรวจจับและติดตามคนโดยใช้ อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์จะต้องมีพื้นที่ที่ถูกบังเกิดขึ้นแน่นอน

ระบบลักษณะนี้โดยทั่วไปจะสมมติว่าเกิดการบังเพียงเวลาสั้น ๆ และพยายามหาโมเดลการเดินทางของคนที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถประมาณตำแหน่งของคนในขณะที่เกิดการบังได้ แต่ปัญหาจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเกิดการบังเป็นเวลานาน และมีโมเดลที่ไม่ดีพอ ส่งผลให้มีความผิดพลาดมากขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้ระบบไม่สามารถติดตามคนนั้นได้ต่อ

นอกจากนี้ การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่มีคนเดินไปเดินมา จำเป็นต้องให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ปกติแล้วระบบประเภทนี้จะใช้เพียงอุปกรณ์รับรู้บนตัวหุ่นยนต์เท่านั้น ทำให้การหลบหลีกสิ่งกีดขวางจะเป็นการตัดสินใจด้วยข้อมูลที่เป็นสภาพแวดล้อมบริเวณใกล้ ๆ ตัวหุ่นยนต์ แต่ถ้าหุ่นยนต์อยู่ในระบบที่ติดตั้งการตรวจจับและติดตามคนอยู่ด้วย ก็จะเพิ่มข้อมูลให้กับหุ่นยนต์มากขึ้น กล่าวคือ หุ่นยนต์จะรู้ข้อมูลของระบบ ทั้งบริเวณใกล้ ๆ ตัวที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้บนตัวหุ่นยนต์ และบริเวณห่างไกลที่ได้จากระบบตรวจจับและติดตามคน แต่การที่ระบบตรวจจับและติดตามคนไม่สามารถให้ตำแหน่งของคนในบริเวณที่เกิดการบัง ทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถรู้ถึงสถานะของสภาพแวดล้อมบริเวณนั้น แต่การหาเพียงพื้นที่ที่จะเกิดการบังในเวลาปัจจุบันนั้นไม่เพียงพอ เนื่องจากหุ่นยนต์ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าไปยังจุดเหล่านั้น ถ้าระบบรู้แต่เพียงการในปัจจุบัน กว่าหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ถึงพื้นที่บริเวณนั้นก็อาจจะไม่มีการบังแล้วก็เป็นได้

ดังนั้นวิธีที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาคือ การทำนายล่วงหน้าว่าจะเกิดการบังที่ตำแหน่งใด เพื่อที่จะทำให้ระบบสามารถหาทางจัดการกับการบังที่จะเกิดขึ้นนั้นให้เหมาะสมต่อไป เช่น การให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ไม่เกิดการบังเมื่อเวลาที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอระบบตรวจจับและติดตามคน ที่ใช้อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ และเพิ่มการทำนายการเกิดขึ้นของการบัง เพื่อเป็นการเพิ่มข้อมูลที่เป็นประโยชน์ให้กับระบบอื่นที่จะเข้ามาเกี่ยวข้องต่อไป

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการตรวจจับและติดตามคน (Human Detection and Human Tracking) เป็นงานที่สามารถนำมาใช้ในชีวิตประจำวันของคนในหลายด้าน เช่น การรักษาความปลอดภัย (Surveillance) [1], [2] การควบคุมฝูงชน (Crowd Control) หรือแม้แต่การรู้จำลักษณะกิจกรรม (Activity Recognition and Characterization) นอกจากนี้งานด้านการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคนและหุ่นยนต์ (Human-Robot Interaction) ก็เป็นงานอีกประเภทหนึ่งที่ใช้งานวิจัยด้านการตรวจจับและติดตามคนเข้าไปเป็นส่วนประกอบ เช่น การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile Robot) เนื่องจากหุ่นยนต์มีความจำเป็นต้องรับรู้ถึงตำแหน่งของคนในบริเวณโดยรอบ เพื่อที่จะหลบหลีก หรือเข้าไปมีปฏิสัมพันธ์ได้ จะเห็นได้ว่า งานด้านการตรวจจับและติดตามคนนั้นมีความหลากหลายอยู่มาก เพื่อให้เห็นภาพรวม สามารถแบ่งได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 แบ่งตามจำนวนของคนที่ต้องการติดตาม ประกอบด้วย การตรวจจับและติดตามคนเพียงหนึ่งคน เช่น การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามคน [3] และ การตรวจจับและติดตามกลุ่มคน (มากกว่าหรือเท่ากับ 1 คน) [4–9] เช่น การตรวจจับและติดตามคนเพื่อใช้ในงานด้านการรักษาความปลอดภัย

วิธีที่ 2 แบ่งตามแพลตฟอร์มของอุปกรณ์รับรู้ ประกอบด้วย มีทั้งการใช้งานอุปกรณ์รับรู้ที่อยู่กับที่ (Static Platform) [7], [8], [10–12] และการใช้งานอุปกรณ์รับรู้ที่ติดอยู่บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile Platform) [3], [9], [13–19]

งานทั้งหมดข้างต้นจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์รับรู้ (Sensor) เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผล อุปกรณ์รับรู้ที่นิยมใช้ในงานประเภทนี้ มี 2 รูปแบบหลัก คือ อุปกรณ์รับรู้ที่ให้ผลลัพธ์เป็นภาพ [12], [20] ได้แก่ กล้องวิดีโอ กล้องอ้อมนิ (Omni-directional Camera) กล้องสเตอริโอ (Stereo Camera) และ อุปกรณ์รับรู้ที่ให้ผลลัพธ์เป็นความลึก (Depth Sensor) ได้แก่ กล้องไทม์ออฟไฟลท์ (Time-of-flight Camera) อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (Laser Range Finder, LRF) [4–7], [10], [17], [19], [21–23] โดยลักษณะการใช้งานมีทั้งการใช้อุปกรณ์ประเภทเดียว หรือใช้ร่วมกันหลายอุปกรณ์ [3], [8], [11], [13], [15], [16], [18] เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

ในอดีต งานด้านการตรวจจับและติดตามคน เป็นสิ่งที่ถูกกล่าวถึงอย่างมากในงานด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ซึ่งใช้อุปกรณ์รับรู้ที่ให้ผลลัพธ์เป็นภาพเท่านั้น เนื่องจาก อุปกรณ์ประเภทนี้มีราคาถูก ให้ข้อมูลปริมาณมาก และมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง ทำให้ได้จำนวนภาพต่อวินาที (fps) มาก แต่ข้อเสียของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ ข้อมูลที่ได้เป็นภาพ 2 มิติเท่านั้น (ไม่มีความลึก) ทำให้ยากต่อการหาตำแหน่งเพื่อใช้ในการตรวจจับและติดตามใน 3 มิติ จึงมีงานวิจัยที่พยายามจะเพิ่มข้อมูลความลึกเข้ามาโดยใช้กล้องสเตอริโอ แต่ความลึกที่ได้เป็นความลึกที่เกิดจากการคำนวณ ทำให้ขาดความแม่นยำในการใช้งาน ต่างจากการใช้อุปกรณ์รับรู้ที่ให้ผลลัพธ์เป็นความลึก ซึ่งได้ข้อมูลเป็นค่าความลึกโดยตรง ทำให้สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ นำไปสู่การตรวจจับและติดตามที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งในปัจจุบัน อุปกรณ์รับรู้ที่ให้ผลลัพธ์เป็นความลึกบางชนิด เช่น อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ มีราคาต่ำลงมาก และมีความเร็วในการทำงานมากขึ้น จาก 3 ภาพต่อวินาที เป็น 30 ภาพต่อวินาที ทำให้ปัจจุบันอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ได้รับความนิยมในงานประเภทนี้เป็นอันมาก

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ให้ผลลัพธ์เป็นข้อมูลความลึกในระนาบเดียว ทำให้ต้องระบุความสูงในการติดตั้ง มีการเสนอตำแหน่งการวางอุปกรณ์นี้ไว้ในหลายตำแหน่ง ได้แก่ ความสูงระดับลำตัว [6], [7], [19] ความสูงระดับข้อเท้า [3], [5], [6], [9], [13], [14], [18], [23], [25] ซึ่งตำแหน่งในการวางอุปกรณ์นี้จะส่งผลต่อการสร้างแบบจำลองของคน (Human Model)

แบบจำลองของคน เป็นสิ่งที่ถูกสร้างขึ้นมานำไปใช้แยกข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ว่าข้อมูลส่วนนี้เป็นของคนหรือไม่ หลักสำคัญของแบบจำลองของคนคือ การเลือกใช้อุปกรณ์รับรู้ ทั้งประเภท และตำแหน่งในการติดตั้ง มีการเสนอแบบจำลองของคนในหลายรูปแบบ เช่น รูปวงรีที่เกิดจากข้อมูลความสูงบริเวณเอว รูปวงกลม 2 วงที่เกิดจากข้อมูลความสูงบริเวณขา หรือแม้แต่การนำทั้งสองวิธีมาใช้ร่วมกัน เพื่อเพิ่มความแม่นยำมากขึ้น

การใช้งานอุปกรณ์รับรู้โดยทั่วไป ข้อมูลที่ได้จะมีค่าความไม่แน่นอนอันเกิดจากการประมาณของอุปกรณ์รับรู้เอง หรือเกิดจากสิ่งรบกวน (Noise) จึงต้องมีการจัดการกับความไม่แน่นอนเหล่านี้ วิธีที่นิยมใช้ในการจัดการกับสิ่งเหล่านี้ ได้แก่ หลากหลายงานวิจัยได้เสนอการใช้แบบจำลองต่าง ๆ กันในการประมาณตำแหน่งของคน เช่น Kalman Filter, Extended Kalman Filter, Particle Filter, MHT (Multiple Hypothesis Tracking) [23], [26], [27] เป็นต้น

นอกจากวิธีข้างต้นแล้ว ยังมีวิธีที่ใช้การเรียนรู้เชิงพฤติกรรมของคน [27–29] ว่าในสภาพแวดล้อมที่คุ้นเคย คนจะไม่เคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง (Brownian Motion) แต่จะเคลื่อนที่แบบมีเส้นทางการเดินที่ค่อนข้างจำกัด ขึ้นอยู่กับเป้าหมายที่ต้องการจะไป

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ไม่ว่าจะใช้อุปกรณ์รับรู้ประเภทไหน หรือกลวิธีแบบใด ปัญหาหลักในการตรวจจับและติดตามคน นั่นคือการบัง (Occlusion) ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้การตรวจจับและติดตามคนมีความผิดพลาด เนื่องจากในช่วงที่เกิดการบังขึ้นนั้น ระบบไม่สามารถรู้ตำแหน่งของคนที่ถูกบังได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาอัลกอริทึมในการทำนาย การเกิดขึ้นของการบังในอนาคต เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น การบอกว่าบริเวณที่เกิดการบังเป็นบริเวณที่ระบบไม่รู้ถึงสถานะของสิ่งของในบริเวณนั้น ถ้ามีหุ่นยนต์ต้องการเคลื่อนที่ผ่านก็ใช้ในการตัดสินใจได้ว่าควรเลือกเส้นทางอื่น หรือ จะเป็นการนำเอาอุปกรณ์รับรู้ตัวอื่น เข้าไปเก็บข้อมูลเพิ่มเติมบริเวณนั้น เพื่อลดการบังที่จะเกิดขึ้นและเพิ่มความถูกต้องของการตรวจจับและติดตามคนได้

3. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

นำเสนอระบบตรวจจับและติดตามคน โดยใช้อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ที่เพิ่มระบบทำนายการเกิดขึ้นของการบัง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดการกับการบังที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

4. อุปกรณ์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (Laser Range Finder)

อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (LRF: Laser Range Finder, LADAR: Laser Detection and Ranging, LIDAR: Light Detection and Ranging) เป็นเทคโนโลยีการวัดระยะจากตัวอุปกรณ์ถึงวัตถุด้วยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ขนาดรีเวเล็กออกไปเป็นจังหวะสั้น ๆ และวัดพลังงานที่วัตถุสะท้อนกลับมา อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การวัดและสำรวจ [30], [31] การสร้างโมเดลสามมิติ [32] ฯลฯ อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์แต่ละรุ่นจะใช้แสงเลเซอร์ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ กัน ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงของแสงอินฟราเรด (600-1000 นาโนเมตร) วัตถุที่สามารถวัดได้มีความหลากหลายสูง เช่น เสื้อผ้า ผิวน้ำ ไม้ ก้อนหิน พื้นกระเบื้อง แผ่นโพลี ก่อผลพลาสติก เป็นต้น

การคำนวณระยะของวัตถุแบ่งออกเป็นสองวิธีหลัก คือ วิธีที่หนึ่งแบบ “Incoherent” ซึ่งวัดระยะทางจากปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับมา และวิธีที่สองแบบ “Coherent” ซึ่งวัดความถี่ของลำแสงซึ่งจะถูกรบกวนได้ง่ายกว่าแบบแรก วิธีการวัดทั้งสองวิธีจะต้องอาศัยการปล่อยลำแสงเลเซอร์ออกไปซึ่งแบ่งเป็น ลำแสงพลังงานต่ำ และลำแสงพลังงานสูง สำหรับลำแสงพลังงานต่ำนั้นจะใช้พลังงานน้อยมาก (ระดับหนึ่งไมโครจูล) และส่วนใหญ่จะปลอดภัยต่อสายตา ส่วนลำแสงพลังงานสูงนั้นจะถูกใช้ในงานวิจัยด้านชั้นบรรยากาศ

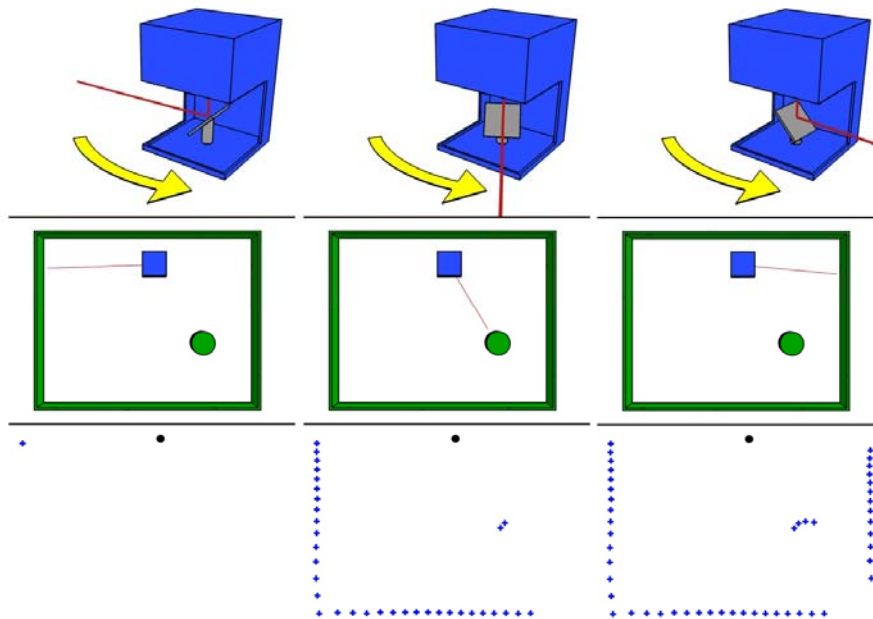
อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังรูปที่ 1 ได้แก่

- แสงเลเซอร์ มีช่วงความยาวคลื่น 600-1000 นาโนเมตร อุปกรณ์ที่ปล่อยลำแสงเลเซอร์ในช่วงความยาวคลื่นนี้มีราคาถูก แต่จะส่งผลกระทบต่อสายตาทำให้ต้องจำกัดปริมาณพลังงานที่เลเซอร์ปล่อยออกมา ในบางงานเลเซอร์ที่ใช้จะมีความ

ยาวคลื่นเกินกว่า 1000 นาโนเมตรซึ่งปลอดภัยต่อสายตาที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าเนื่องจากตาคนไม่รับแสงที่ความยาวคลื่นนี้ แต่อุปกรณ์ที่จะตรวจวัดคลื่นที่ความยาวคลื่นนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่สูงนักทำให้มีความแม่นยำต่ำ

- อุปกรณ์ปล่อยลำแสงเลเซอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยกระจกตัวหมุนซึ่งการหมุนของกระจกทำให้แนวการตรวจวัดของเลเซอร์เปลี่ยนทิศไปเรื่อย ๆ และเรียงตัวกันเป็นระนาบ การเลือกอุปกรณ์ปล่อยลำแสงและฐานหมุนนี้จะส่งผลต่อความละเอียดของข้อมูลที่อุปกรณ์รับรู้จะตรวจวัดได้

- อุปกรณ์รับแสง โดยความเร็วและความละเอียดในการตรวจวัดแสงจะส่งผลต่อคุณภาพโดยรวมของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์



รูปที่ 1 ส่วนประกอบและการทำงานของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ [33]

(แถวบน) กระจกหมุนและทิศของลำแสงที่ถูกปล่อยออกมา

(แถวกลาง) ภาพมุมมองของสิ่งแวดล้อม

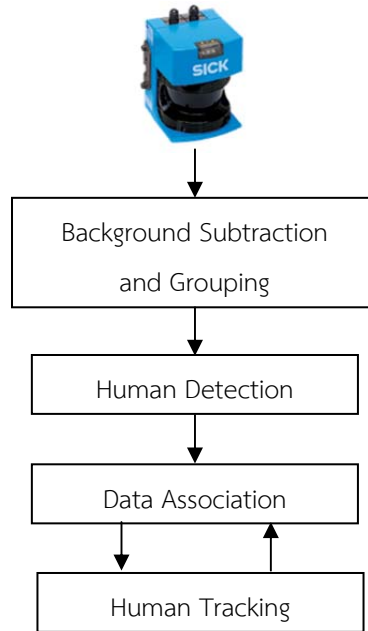
(แถวล่าง) ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์



รูปที่ 2 อุปกรณ์วัดระยะทางเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย SICK LMS200 [34]

4.2 การตรวจจับและติดตามคน (Human Detection and Human Tracking)

การตรวจจับและติดตามคนประกอบด้วยขั้นตอนตามรูปที่ 3 ดังนี้



รูปที่ 3 แสดงลำดับขั้นตอนในการตรวจจับและติดตามคน

- การลบพื้นหลัง และการจัดกลุ่ม (Background Subtraction and Grouping)

เนื่องจากข้อมูลที่น่าเข้าในขั้นตอนนี้เป็นข้อมูลจากอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ ทำให้ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องในรูปของกลุ่มจุดดังรูปที่ 1 กลุ่มจุดเหล่านี้ประกอบไปด้วยกลุ่มข้อมูลที่ต้องการ คือ กลุ่มข้อมูลของคน และ กลุ่มข้อมูลที่ไม่ต้องการ เช่น พื้นหลัง หรือวัตถุที่อยู่นิ่ง เช่น โต๊ะ ดังนั้นขั้นตอนนี้คือการกำจัดกลุ่มที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้เหลือแต่กลุ่มที่มีความน่าจะเป็นที่จะเป็นคน

- การตรวจจับคน (Human Detection)

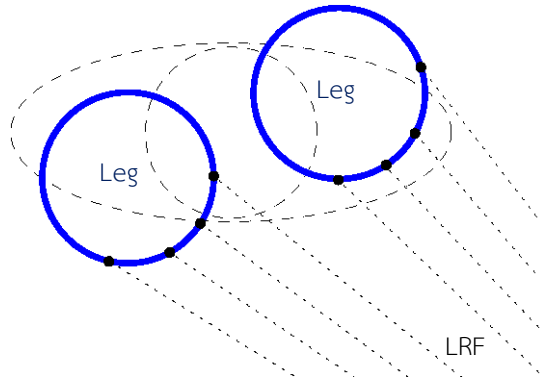
นำกลุ่มที่แยกได้มาใส่เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ตามโมเดลของคน ขั้นตอนนี้จะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งการวางของอุปกรณ์รับรู้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ไว้ที่ระดับใด เช่น ถ้าไว้ที่ระดับขา กลุ่มของคนหนึ่งคนจะประกอบด้วยกลุ่มของขาสองขา (ดังรูปที่ 4) เป็นต้น

- Data Association

เมื่อทราบตำแหน่งของคนแล้ว จะทำการจับคู่ตำแหน่งของคนในเวลาปัจจุบัน กับตำแหน่งของคนในเวลาก่อนหน้า ในขั้นตอนนี้ก็ต้องมีการกำหนดเงื่อนไขบังคับเช่นเดียวกัน เช่น ความเร็วของคนในการเคลื่อนที่ ทำให้สามารถจับคู่ว่าตำแหน่งของคนในปัจจุบัน คือใครในเวลาก่อนหน้า

- การติดตามคน (Human Tracking)

เมื่อทำการจับคู่ตำแหน่งของคนในปัจจุบัน กับตำแหน่งของคนในอดีตได้เรียบร้อยแล้ว แปลว่า สามารถติดตามคนได้



รูปที่ 4 แสดงผลลัพธ์จากการตรวจจับคนด้วยอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ มีการวางอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์ตรงมุมล่างขวา จุดสีดำแทนค่าที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ และมีวงกลมสีน้ำเงินแทนขาของคน วงกลมและวงรีเส้นประแทนศีรษะและลำตัวคนที่สมมติขึ้นตามลำดับ

แต่การใช้อุปกรณ์รับรู้จะมีความไม่แน่นอน หรือสิ่งรบกวนเกิดขึ้น ทำให้การวัดผล หรือตำแหน่งที่ได้ อาจมีการกระโดดไปมา จึงจำเป็นต้องมีวิธีที่จัดการกับความไม่แน่นอน หรือสิ่งรบกวนเหล่านี้ อธิบายในหัวข้อถัดไป

4.3 การติดตามคนในเชิงความน่าจะเป็น

การติดตามคน คือการรู้ตำแหน่งของคนตลอดเวลา แต่ปัญหาคืออุปกรณ์รับรู้ไม่สามารถบอกตำแหน่งของคนแต่ละคนได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งไม่รู้ตำแหน่งของคนที่ได้ในเวลาหนึ่งมีความสัมพันธ์กับคนที่ตำแหน่งที่ได้ในเวลาก่อนหน้านี้อย่างไร เนื่องจากอุปกรณ์รับรู้ทำงานเป็นรอบ ๆ และข้อมูลที่ได้อาจไม่ได้บอกว่าใครเป็นใคร อีกทั้งยังมีความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวน ทำให้ในแต่ละรอบของข้อมูลที่ได้อาจมาจากอุปกรณ์รับรู้ ไม่สามารถนำไปใช้เป็นตำแหน่งของคนได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องมีการประมาณค่าของข้อมูลที่ได้อาจให้เข้ากับโมเดลการเดินของคน เพื่อให้เกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด และค่าที่ได้จากการประมาณจะไม่อยู่ในรูปของตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแน่นอน แต่จะอยู่ในรูปของตำแหน่ง ร่วมกับความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของตำแหน่งนั้น ๆ กล่าวคือ การแทนด้วยค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) นั่นเอง

การติดตามคนนอกจากรู้ตำแหน่งแล้วจำเป็นต้องมีการระบุสิ่งอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ความเร็ว ทิศทางการเคลื่อนที่ หรือเรียกโดยรวมทั้งหมดว่า สถานะ (State) ของคน

ขอนิยามสัญลักษณ์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการอธิบายต่อไป ดังนี้

กำหนดให้

x_k^j เป็นสถานะของคนที่ j ณ เวลา k

z_k^j เป็นตำแหน่งของคนที่ j ที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์รับรู้ ณ เวลา k

$X_{0:k}^j$ เป็นบันทึก (History) ของสถานะของคนที่ j ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น โดย

$$X_{0:k}^j = \{x_0^j, x_1^j, x_2^j, \dots, x_k^j\} = X_{0:k-1}^j \cup \{x_k^j\}$$

$Z_{0:k}^j$ เป็นบันทึก ของตำแหน่งของคนที่ j ที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์รับรู้ ตั้งแต่เวลาเริ่มต้น โดย

$$Z_{0:k}^j = \{z_0^j, z_1^j, z_2^j, \dots, z_k^j\} = Z_{0:k-1}^j \cup \{z_k^j\}$$

เนื่องจากข้อมูลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน และการรบกวนอยู่ ทำให้ต้องมีวิธีการจัดการกับข้อมูลเหล่านั้นก่อนนำมาใช้งาน

Kalman Filter

Kalman Filter [35] เป็นระเบียบวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการกรอง และทำนายสถานะของระบบเชิงเส้น (Linear Systems) หรือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยมีสมมุติฐานว่า สถานะของระบบที่ต้องการประมาณค่านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และสถานะของระบบ ณ เวลาปัจจุบัน จะขึ้นอยู่กับสถานะของระบบ ณ เวลาก่อนหน้าเท่านั้น

สถานะของคน ประกอบด้วย ตำแหน่งและความเร็วของคน เขียนแทนด้วย x_k (ขออนุญาตละ j ไว้ เนื่องจากถ้าต้องการติดตามหลายคน ก็จะมีตัวแปร j มาเกี่ยวข้องด้วย) เมื่อเวลาผ่านไป จะสามารถเขียนการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบได้ในรูป

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k$$

เมื่อ $f(x_{k-1}, u_k)$ เป็นฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของคน (เป็น Linear System)
 u_k เป็นคำสั่งในการเคลื่อนที่ (ในที่นี้ไม่ใช่)
 w_k เป็น Process Noise ที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) ที่มีค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 และมีค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) เป็น Q_k ($w_k = N(0, Q_k)$)

การจะนำค่าที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้มาใช้ปรับแก้ได้นั้น ต้องทราบโมเดลการวัด หรือ Measurement Model ก่อน โดย Measurement Model สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$z_k = h(x_k) + v_k$$

เมื่อ $h(x_k)$ เป็นฟังก์ชันของอุปกรณ์รับรู้ (เป็น Linear System)
 v_k เป็น Observation Noise ที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) ที่มีค่าเฉลี่ย (Mean) เป็น 0 และมีค่าความแปรปรวนร่วม (Covariance) เป็น R_k

สำหรับการทำงานของ Kalman Filter จะเป็นการทำงานแบบวนรอบ (Iterative) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำนาย (Prediction) และ การปรับแก้เมื่อได้รับค่าจากการวัด (Update Measurement) สลับไปเรื่อย ๆ ดังนี้

ขั้นตอนการทำนาย

$$\hat{x}_k^- = F_x \hat{x}_{k-1} + B_k u_k$$
$$P_k^- = F_x P_{k-1} F_x^T + Q_k$$

ขั้นตอนการปรับแก้เมื่อได้รับค่าจากการวัด

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$$
$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$$
$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T$$

เมื่อ

\hat{x}_{k-1} คือ สถานะประมาณของระบบที่เวลา $k - 1$

\hat{x}_k^- คือ สถานะประมาณของระบบ ที่เกิดจากการทำนายที่เวลา k

\hat{x}_k คือ สถานะประมาณของระบบ ที่ผ่านขั้นตอนการปรับแก้ที่เวลา k

P_{k-1} คือ ความแปรปรวนร่วมของสถานะของระบบที่เวลา $k - 1$

P_k^- คือ ความแปรปรวนร่วมของสถานะของระบบ ที่เกิดจากการทำนายที่เวลา k

P_k คือ ความแปรปรวนร่วมของสถานะของระบบ ที่ผ่านขั้นตอนการปรับแก้ที่เวลา k

K_k คือ Kalman Gain

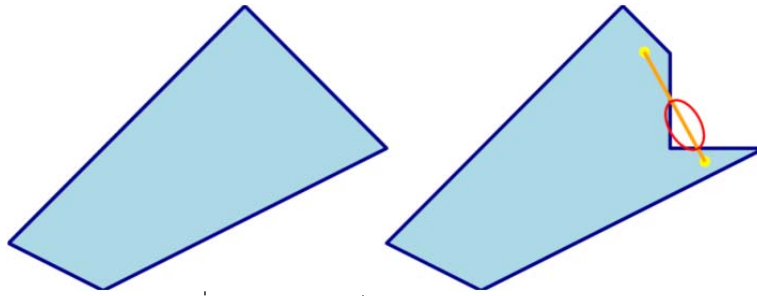
- Z_k คือ ค่าที่ได้จากการวัด
- F_k คือ State Transition Model
- B_k คือ Control Model
- H_k คือ Observation Model

4.4 Gilbert–Johnson–Keerthi (GJK) Algorithm

ระเบียบวิธี GJK [36] เป็นหนึ่งในระเบียบวิธีตรวจจับการชน (Collision Detection Algorithm) ของรูปคอนเวกซ์ (Convex Shape)

รูปคอนเวกซ์ (Convex Shape)

สำหรับปริภูมิ 2 มิติ (2-Dimensional Space) รูปคอนเวกซ์ คือ รูปที่เมื่อนำสองจุดใด ๆ ที่อยู่ในรูปนั้น มาสร้างส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างสองจุดดังกล่าว ส่วนของเส้นตรงที่ได้ต้องประกอบไปด้วยจุดที่อยู่ในรูปนั้นเท่านั้น ตัวอย่างเช่น รูปที่ 5 จะไม่สามารถหาสองจุดใด ๆ ในรูปด้านซ้าย แล้วสร้างส่วนของเส้นตรงเชื่อมที่ทำให้มีส่วนของเส้นตรงที่ได้ประกอบด้วยจุดที่อยู่นอกรูปนั้น ดังนั้นรูปทางด้านซ้ายจึงเป็นรูปคอนเวกซ์ ส่วนรูปทางขวาสามารถหาจุดสองจุด (สีเหลือง) ที่เมื่อลากส่วนของเส้นตรง (สีส้ม) เชื่อม ทำให้มีจุดที่อยู่บนส่วนของเส้นตรงบางจุดอยู่นอกรูป (จุดในวงรีสีแดง) ดังนั้นรูปทางด้านขวาก็ไม่ใช่รูปคอนเวกซ์



รูปที่ 5 แสดงความเป็นคอนเวกซ์ (Convexity)

(รูปซ้าย) รูปคอนเวกซ์ (Convex Shape)

(รูปขวา) ไม่ใช่รูปคอนเวกซ์ (Non-Convex Shape, Concave Shape)

Minkowski Sum

กำหนดให้

A และ B แทน เซตของจุดบนปริภูมิ 2 มิติ

Minkowski Sum ของ A และ B คือ

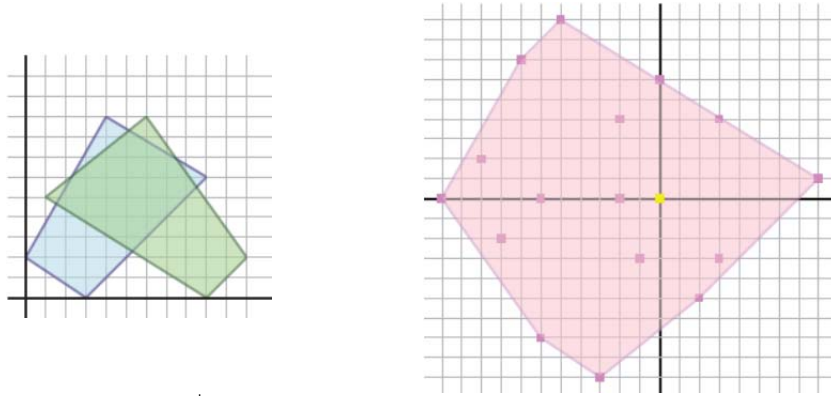
$$A + B = \{a + b | a \in A, b \in B\}$$

และ

$$A - B = \{a - b | a \in A, b \in B\}$$

และ เมื่อ A และ B เป็นรูปคอนเวกซ์ ผลลัพธ์ของ Minkowski Sum จะได้รูปคอนเวกซ์ด้วย จากคุณสมบัติทั้งหมดเหล่านี้ ทำให้สรุปได้ว่า

“เมื่อ A และ B เป็นรูปคอนเวกซ์ A กับ B จะมีการชนกัน หรือซ้อนทับกัน ก็ต่อเมื่อ A-B มีจุดกำเนิด (0,0) อยู่ใน”



รูปที่ 6 แสดงผลลัพธ์ของการทำ Minkowski Sum
 (รูปซ้าย) รูปคอนเวกซ์ A (สีฟ้า) และ รูปคอนเวกซ์ B (สีเขียว)
 (รูปขวา) รูปคอนเวกซ์ของ A - B

หลักการของระเบียบวิธี GJK คือ การที่ไม่ต้องคำนวณ A-B ออกมาจนได้รูปคอนเวกซ์ทั้งก้อน แต่จะทำการสร้างรูปคอนเวกซ์เล็ก ๆ ขึ้นภายในรูป A-B นั้น แล้วตรวจสอบว่า รูปคอนเวกซ์เล็ก ๆ นั้นมีจุดกำเนิดอยู่ภายในหรือไม่ ถ้าพบว่ามีเมื่อไหร่ แสดงว่ารูป A-B นั้นมีจุดกำเนิดอยู่ภายในด้วย แปลว่ารูปคอนเวกซ์ A และ B นั้นมีการชนกัน หรือทับกันเกิดขึ้นนั่นเอง

5. แนวคิดของงานวิจัย และวิธีการดำเนินงาน

5.1 การพัฒนาระบบทำนายการเกิดขึ้นของการบัง

ระบบตรวจจับและติดตามคนจะวัตถุที่อยู่ในพื้นที่การทำงาน (Workspace) 2 กลุ่ม ดังนี้

1. Static object คือ วัตถุที่ไม่เปลี่ยนตำแหน่งไปตามเวลา หรือวัตถุที่อยู่นิ่ง เช่น กำแพง โต๊ะ เก้าอี้ เป็นต้น
2. Dynamic object คือ วัตถุที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งไปตามเวลา หรือวัตถุที่เคลื่อนที่ได้แก่ คน

ในกรณีที่พื้นที่การทำงานมีแต่ Static object พื้นที่ที่อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์มองเห็น จะเป็นพื้นที่มากที่สุดที่อุปกรณ์นี้สามารถมองเห็นได้ เพราะว่าถ้ามี Dynamic object เข้ามาในพื้นที่การทำงาน พื้นที่ของการมองเห็นของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์จะลดลง เนื่องจากจะ Dynamic object นั้นจะไปบังการมองเห็นของอุปกรณ์ ทำให้เกิดบริเวณพื้นที่ที่อุปกรณ์ตัวนั้นไม่สามารถมองเห็นได้

ในระบบกำหนดให้

n แทน จำนวนของอุปกรณ์รับรู้

m แทน จำนวนของคน

$B(i)$ แทน เซตของจุดที่อุปกรณ์รับรู้ตัวที่ i สามารถมองเห็นได้ เมื่อไม่มี Dynamic object ในระบบ

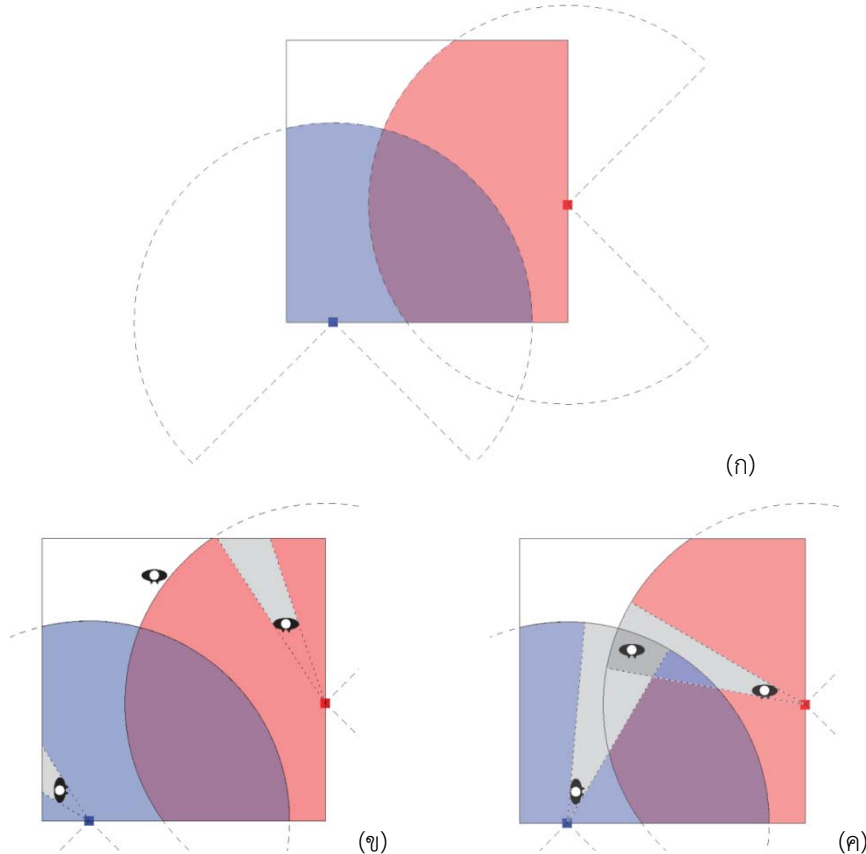
$A(i, j, t)$ แทน เซตของจุดที่เป็นเงาที่เกิดจากอุปกรณ์รับรู้ตัวที่ i กับคนที่ j ณ เวลา t ดังนั้น $1 \leq i \leq n$ และ $1 \leq j \leq m$

ต้องการหา $U_{i=1}^n U_{j=1}^m A(i, j, t) - U_{i=1}^n (B(i) - U_{j=1}^m A(i, j, t))$ ในกรณีที่ทำให้ $U_{i=1}^n U_{j=1}^m A(i, j, t) - U_{i=1}^n (B(i) - U_{j=1}^m A(i, j, t)) \neq \emptyset$

ตัวอย่าง พื้นที่การทำงาน เมื่อมองจากมุมด้านบน เป็นไปตามรูปที่ 7(ก) กรอบสี่เหลี่ยมเป็น พื้นที่การทำงานของระบบ จุดสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน และแดง แทนอุปกรณ์รับรู้โดยมีรัศมีการทำงานตามเส้นประ พื้นที่สีน้ำเงิน และแดงแทนพื้นที่ที่อุปกรณ์รับรู้สีน้ำเงินและแดง สามารถมองเห็นได้ เมื่อไม่มี Dynamic object ในระบบ ($B(i)$) ตามลำดับ

เมื่อมีคนเดินเข้ามาในพื้นที่การทำงาน และเข้าไปในพื้นที่ $B(i)$ จะเกิดเงาขึ้น ($A(i, j, t)$) ตัวอย่างเช่น พื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 7(ข)

ต้องการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมในรูปที่ 7(ค) ที่เป็นพื้นที่ที่ไม่มีอุปกรณ์รับรู้ตัวใดเลยสามารถมองเห็นบริเวณนั้น



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างพื้นที่การทำงานของระบบ

สำหรับแนวทางในการพัฒนาระบบเพื่อหาส่วนที่เกิดการบังดังกล่าวขึ้น จะแยกออกเป็น 2 แนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 พัฒนาโดยใช้การทำนายล่วงหน้าเป็นขั้นเวลา (Time Step) กล่าวคือ มีการคำนวณหาการทับซ้อนที่ต้องการในปริภูมิ 2 มิติ ด้วยระเบียบวิธีตรวจจับการชน เช่น ระเบียบวิธี GJK โดยมีการทำนายล่วงหน้าไปเป็นขั้น ๆ จนกว่าจะครบตามเวลาต้องการ วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายรูปแบบ ขอเพียงทราบตำแหน่งของคนในเวลาต่าง ๆ แต่วิธีนี้จะมีข้อที่ต้องคำนึงอยู่ 2 ข้อด้วยกัน คือ เรื่องประสิทธิภาพ และความถูกต้อง เพราะว่าถ้าแบ่งเป็นขั้น ๆ ที่ละเอียดมาก ๆ จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ ที่ทำให้ประสิทธิภาพลดลง แต่ถ้าแบ่งเป็นขั้น ๆ ที่หยาบเกินไป แม้ประสิทธิภาพจะดีขึ้น แต่เรื่องความถูกต้องจะเข้ามาแทน เพราะว่ามีโอกาสที่จะข้ามส่วนที่จะเกิดการบังเพียงเวลาสั้น ๆ ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเลือกช่วงเวลาที่จะแบ่งเป็นขั้นให้เหมาะสม

แนวทางที่ 2 พัฒนาโดยสร้างรูปทรง 3 มิติในปริภูมิของตำแหน่งและเวลาขึ้นมา แล้วหาส่วนที่ทับซ้อนกันของรูปทรง 3 มิติเหล่านั้น แนวทางนี้มีความถูกต้องสูง เพราะว่าเป็นการหาคำตอบบนความต่อเนื่อง ไม่มีการแบ่งออกเป็นขั้นเวลา แต่มีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ ที่เมื่อมีเส้นทางการเดินของคนทำให้รูปทรง 3 มิติไม่เป็นรูปคอนเวกซ์ จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก

ทั้ง 2 แนวทางนี้ จะมีสมมติฐานเบื้องต้นอยู่ 2 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 เป็นการสมมติว่าคนเดินทางเป็นเส้นตรง และความเร็วคงที่ ทำให้สามารถใช้แนวทางที่ 2 การแก้ปัญหาได้ โดยการสร้างรูป 3 มิติในปริภูมิของตำแหน่งและเวลาขึ้นมาเพื่อหาส่วนที่ทับซ้อนได้

ระดับที่ 2 เป็นการสมมติว่าการเดินของคนเป็นการเดินแบบไม่ไร้ทิศทาง มีจุดมุ่งหมาย และเดินไปตามเส้นทางที่คนส่วนใหญ่เดินกัน [27] ทำให้รู้เส้นทางการเดินของคนได้จากตำแหน่งในปัจจุบัน และนำไปคำนวณตามแนวทางที่ 1 เพื่อหาว่าเวลาใดในอนาคตมีการทับซ้อนที่เราสนใจเกิดขึ้น

5.2 การวัดผลการทดลอง

สำหรับการวัดผลของระบบทำนายการเกิดขึ้นของการบัง จะแยกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ความเร็ว

วัดเวลาในการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนคน จำนวนอุปกรณ์รับรู้ แล้วมีผลต่อเวลาในการทำงานอย่างไร

2. ความถูกต้อง

เนื่องจากวิธีที่ใช้การแบ่งเป็นชั้นเวลา มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดได้ ถ้าแบ่งชั้นเวลาได้ไม่เหมาะสม ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้อง คือ การพิจารณาว่ามีการบังที่เกิดขึ้นจริงแต่ไม่ได้ทำนายไว้หรือไม่

6. ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างระบบตรวจจับและติดตามคนในบริเวณพื้นที่ที่มีเส้นทางการเดินแน่ชัด เช่น บริเวณหน้าลิฟต์ โถงทางเดิน เป็นต้น

สร้างระบบทำนายการเกิดการบังของคน โดยรับข้อมูลเข้าเป็นสถานะของคน (ตำแหน่ง ทิศทาง ความเร็ว) เส้นทางการเดินของคน และช่วงเวลาที่ต้องการผลการทำนาย จากนั้นให้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่งและ เวลาที่จะเกิดการบัง

7. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับและติดตามคน
2. ศึกษาและทดลองใช้อุปกรณ์วัดระยะทางด้วยเลเซอร์
3. พัฒนาระบบตรวจจับและติดตามคน
4. พัฒนาระบบทำนายการเกิดขึ้นของการบัง
5. วัดผลการทดลอง
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำวิทยานิพนธ์

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. H. Lee, Y.-S. Kim, B. K. Kim, K. Ohba, H. Kawata, A. Ohya, and S. Yuta, "Security Door System Using Human Tracking Method with Laser Range Finders," in *Proc. Int. Conf. Mechatronics and Automation ICMA 2007*, 2007, pp. 2060–2065.

- [2] J. Watada and Z. B. Musaand, "Tracking human motions for security system," in *SICE Annual Conference, 2008*, 2008, pp. 3344–3349.
- [3] R. C. Luo, N.-W. Chang, S.-C. Lin, and S.-C. Wu, "Human tracking and following using sensor fusion approach for mobile assistive companion robot," in *Proc. 35th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics IECON '09*, 2009, pp. 2235–2240.
- [4] B. Kluge, C. Kohler, and E. Prassler, "Fast and robust tracking of multiple moving objects with a laser range finder," in *Proc. ICRA Robotics and Automation IEEE Int. Conf*, 2001, vol. 2, pp. 1683–1688.
- [5] X. Shao, H. Zhao, K. Nakamura, K. Katabira, R. Shibasaki, and Y. Nakagawa, "Detection and tracking of multiple pedestrians by using laser range scanners," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2007*, 2007, pp. 2174–2179.
- [6] A. Carballo, A. Ohya, and S. Yuta, "Fusion of double layered multiple laser range finders for people detection from a mobile robot," in *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008. MFI 2008. IEEE International Conference on*, 2008, pp. 677–682.
- [7] D. F. Glas, T. Miyashita, H. Ishiguro, and N. Hagita, "Laser tracking of human body motion using adaptive shape modeling," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2007*, 2007, pp. 602–608.
- [8] M. Hashimoto, T. Konda, Z. Bai, and K. Takahashi, "Laser-based tracking of randomly moving people in crowded environments," in *Proc. IEEE Int Automation and Logistics (ICAL) Conf*, 2010, pp. 31–36.
- [9] H. Zhao, Y. Chen, X. Shao, K. Katabira, and R. Shibasaki, "Monitoring a populated environment using single-row laser range scanners from a mobile platform," in *Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf*, 2007, pp. 4739–4745.
- [10] A. Fod, A. Howard, and M. A. J. Mataric, "A laser-based people tracker," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA '02*, 2002, vol. 3, pp. 3024–3029.
- [11] K. Morioka, S. Kuroiwa, F. Hashikawa, and T. Takigawa, "Human tracking based on integration of laser range scanners and cameras in intelligent space," in *Control Conference (ASCC), 2011 8th Asian*, 2011, pp. 719–724.
- [12] Y.-L. Hou and G. K. H. Pang, "People Counting and Human Detection in a Challenging Situation," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, vol. 41, no. 1, pp. 24–33, 2011.
- [13] M. Kleinhagenbrock, S. Lang, J. Fritsch, F. Lomker, G. A. Fink, and G. Sagerer, "Person tracking with a mobile robot based on multi-modal anchoring," in *Proc. 11th IEEE Int Robot and Human Interactive Communication Workshop*, 2002, pp. 423–429.
- [14] T. Horiuchi, S. Thompson, S. Kagami, and Y. Ehara, "Pedestrian tracking from a mobile robot using a laser range finder," in *Proc. ISIC Systems, Man and Cybernetics IEEE Int. Conf*, 2007, pp. 931–936.
- [15] R. C. Luo, Y. J. Chen, C. T. Liao, and A. C. Tsai, "Mobile robot based human detection and tracking using range and intensity data fusion," in *Proc. IEEE Workshop Advanced Robotics and Its Social Impacts ARSO 2007*, 2007, pp. 1–6.

- [16] S. Gidel, P. Checchin, C. Blanc, T. Chateau, and L. Trassoudaine, "Parzen method for fusion of laserscanner data: Application to pedestrian detection," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp*, 2008, pp. 319–324.
- [17] G. Gate and F. Nashashibi, "Fast algorithm for pedestrian and group of pedestrians detection using a laser scanner," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp*, 2009, pp. 1322–1327.
- [18] N. Bellotto and H. Hu, "Multisensor-Based Human Detection and Tracking for Mobile Service Robots," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 39, no. 1, pp. 167–181, 2009.
- [19] S. Gidel, P. Checchin, C. Blanc, T. Chateau, and L. Trassoudaine, "Pedestrian Detection and Tracking in an Urban Environment Using a Multilayer Laser Scanner," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 579–588, 2010.
- [20] B. Schiele, M. Andriluka, N. Majer, S. Roth, and C. Wojek, "Visual People Detection: Different Models, Comparison and Discussion," in *Proceedings of the IEEE ICRA 2009 Workshop on People Detection and Tracking*, 2009, pp. 1–8.
- [21] H. Zhao and R. Shibusaki, "A novel system for tracking pedestrians using multiple single-row laser-range scanners," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, vol. 35, no. 2, pp. 283–291, 2005.
- [22] J. Cui, H. Zha, H. Zhao, and R. Shibusaki, "Laser-based detection and tracking of multiple people in crowds," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 106, no. 2–3, pp. 300–312, May 2007.
- [23] K. O. Arras, S. Grzonka, M. Luber, and W. Burgard, "Efficient people tracking in laser range data using a multi-hypothesis leg-tracker with adaptive occlusion probabilities," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA 2008*, 2008, pp. 1710–1715.
- [24] D. F. Glas, T. Miyashita, H. Ishiguro, and N. Hagita, "Automatic position calibration and sensor displacement detection for networks of laser range finders for human tracking," in *Proc. IEEE/RSJ Int Intelligent Robots and Systems (IROS) Conf*, 2010, pp. 2938–2945.
- [25] X. Shao, H. Zhao, K. Nakamura, R. Shibusaki, R. Zhang, and Z. Liu, "Analyzing Pedestrians' Walking Patterns Using Single-Row Laser Range Scanners," in *Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics SMC '06*, 2006, vol. 2, pp. 1202–1207.
- [26] N. A. Tsokas and K. J. Kyriakopoulos, "A multiple hypothesis people tracker for teams of mobile robots," in *Proc. IEEE Int Robotics and Automation (ICRA) Conf*, 2010, pp. 446–451.
- [27] M. Luber, G. D. Tipaldi, and K. O. Arras, "Better models for people tracking," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 854–859.
- [28] A. Bruce and G. Gordon, "Better Motion Prediction for People-tracking," in *In Proceedings of ICRA 2004*, 2004.
- [29] M. Luber, G. D. Tipaldi, and K. O. Arras, "Place-Dependent People Tracking," in *Robotics Research*, vol. 70, C. Pradalier, R. Siegwart, and G. Hirzinger, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 557–572.

- [30] A. Diosi and L. Kleeman, "Advanced sonar and laser range finder fusion for simultaneous localization and mapping," in *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, 2004, vol. 2, pp. 1854 – 1859 vol.2.
- [31] S. H. Cho and S. Hong, "Map based indoor robot navigation and localization using laser range finder," in *Control Automation Robotics Vision (ICARCV), 2010 11th International Conference on*, 2010, pp. 1559 –1564.
- [32] D. Klimentjew, M. Arli, and J. Zhang, "3D scene reconstruction based on a moving 2D laser range finder for service-robots," in *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009 IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1129 –1134.
- [33] "LIDAR - Wikipedia, the free encyclopedia." [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/LIDAR>. [Accessed: 05-Apr-2012].
- [34] "Laser measurement technology." [Online]. Available: http://www.sick.com/group/EN/home/products/product_portfolio/laser_measurement_systems/Pages/laser_measurement_technology.aspx. [Accessed: 05-Apr-2012].
- [35] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. Series D, pp. 35–45, 1960.
- [36] E. G. Gilbert, D. W. Johnson, and S. S. Keerthi, "A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space," *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, vol. 4, no. 2, pp. 193 –203, Apr. 1988.