

การควบคุมเลเซอร์พอยเตอร์สำหรับการตรวจจับบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก

Laser pointer control for deep learning human detection

ภาริณี อรุณศิริวัฒนา^{1*}, จิราพร เกียรติวุฒิมอร์², ชัยพิชิต คำพิมพ์²
Parinee Arunsiriwattana^{1*}, Jiraporn Kiatwuthiamorn², Chaipichit Cumpim²

Received: 2 November 2021 ; Revised: 14 January 2021 ; Accepted: 7 February 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการพัฒนาระบบการติดตามบุคคลแบบอัตโนมัติ ในปัจจุบันระบบตรวจสอบวัตถุโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย การติดตามวัตถุในภาพวิดีโอก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่นำไปประยุกต์ใช้ ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบการติดตามและระบุตัวบุคคลที่มีการประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึก โดยการทำงานของระบบประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะใช้การเรียนรู้เชิงลึกตรวจสอบบุคคลภายในภาพที่ได้รับจากกล้องดิจิทัล จากนั้นนำภาพบุคคลที่ถูกตรวจสอบได้มาคำนวณหาจุดศูนย์กลาง ขั้นตอนสุดท้ายจะนำจุดศูนย์กลางไปคำนวณระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้งและแนวนอนของสเต็ปมอเตอร์ การเคลื่อนที่ของมอเตอร์จะไปบังคับตัวเลเซอร์พอยเตอร์ให้ชี้ไปยังตัวบุคคลที่ตรวจสอบได้ภายในภาพจากกล้องดิจิทัล โดยผลการทำงานของระบบนี้สามารถทำการชี้ไปยังตัวบุคคลที่ปรากฏภายในภาพ

คำสำคัญ: การตรวจจับบุคคล การติดตามบุคคล การเรียนรู้เชิงลึก

Abstract

This research proposes a method for developing an automated person tracking system. At present, many object inspection systems use deep learning and deep learning methods are widely used in object detection methods. Object tracking in a video image is another example. In this research, a new approach is developed to track and identify the person by using deep learning. This method consists of two steps. The first step, deep learning is used to examine the person featured in digital images. The center point of the detected person is used for the next step. In the last step, two-stepping motors are forced to move on the vertical and horizontal axes. The moving distance of the two axes is calculated by using the previous step center point. This movement of stepping motors will control the laser pointer for pointing out the person appearing in the digital image. The experiment and result of this method demonstrate that the method can point to the person within an image.

Keywords: Human Detection, Human Tracking, Deep Learning

¹ นิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

² อาจารย์สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

¹ Bachelor degree student, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 73170

² Lecturer, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin 73170

* Corresponding author; Parinee Arunsiriwattana, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 73170.
parinee.aru@rmutr.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันรัฐบาลได้กำหนดนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ที่มุ่งการขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรม โดยมุ่งเน้นการพัฒนาอุตสาหกรรมหลักทั้งหมด 5 กลุ่ม คือ กลุ่มอาหาร เกษตรและเทคโนโลยีชีวภาพ กลุ่มสาธารณสุข สุขภาพและเทคโนโลยีทางการแพทย์ กลุ่มเครื่องมือ อุปกรณ์อัจฉริยะ หุ่นยนต์และระบบเครื่องกลที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม กลุ่มดิจิทัล เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อ รวมถึงปัญญาประดิษฐ์ และกลุ่มอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ วัฒนธรรมและบริการที่มีมูลค่าสูง จากหัวข้อที่กล่าวมาการควบคุมแบบอัตโนมัติและปัญญาประดิษฐ์ ได้เข้ามามีส่วนสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ จึงมีการนำเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องเข้ามาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางอุตสาหกรรม เพื่อให้เกิดประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และลดต้นทุน เป็นต้น

สำหรับตัวอย่างในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ เช่น การนำการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้กับปัญญาประดิษฐ์เพื่อใช้ในการระบุตัวตนของบุคคลที่ปรากฏในภาพที่ได้รับจากกล้องวงจรปิด การนับจำนวนรถที่วิ่งผ่านบนท้องถนน การสร้างภาพความละเอียดสูง การนับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตผ่านสายพานลำเลียงโดยกล้องวงจรปิด การตรวจสอบคุณภาพของสินค้าที่ผลิตได้ในแต่ละอุตสาหกรรม เช่น การตรวจสอบหน้ากากอนามัย การตรวจสอบรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

สำหรับการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์มีไลบรารีนิยมใช้กัน คือ ไพทอช (PyTorch) (Paszke *et al.*, 2019) และ TensorFlow (Abadi *et al.*, 2015) ทั้งสองไลบรารีมีฟังก์ชันที่ใช้สร้างโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการเรียนรู้เชิงลึก (Deep leaning) (Goodfellow *et al.*, 2016) โดยนำมาใช้งานร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และการประมวลผลภาพ สามารถใช้ได้หลายระบบปฏิบัติการ ตัวอย่างการใช้งาน คือ การนำเอาไพทอชมาเป็นส่วนหนึ่งของไลบรารี Jetson Inference เพื่อนำไปประมวลผลบนบอร์ด Nvidia Jetson Nano เพื่อใช้ในการฝึกสอนชุดข้อมูลให้กับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อนำองค์ความรู้ที่ได้ไปถ่ายทอดการเรียนรู้ (Transfer Learning) สำหรับการตรวจจับวัตถุ การจำแนกวัตถุ และการแบ่งส่วนภาพ ปัจจุบันมีการนำวิธีการของ SSD (Single Shot MultiBox Detector) (Liu *et al.*, 2016) คือการตรวจจับวัตถุในภาพ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ซับซ้อนน้อยลง หรือใช้โมเดล MobileNetV2 (Sandler *et al.*, 2019) ที่ใช้ในการจำแนกสิ่งของหรือ การตรวจจับวัตถุในภาพหรือวิดีโอ ซึ่งเหมาะสำหรับการทำงานแบบ Real Time ที่ต้องการความเร็วและความแม่นยำในการทำงาน

ในปัจจุบันมีการใช้การเรียนรู้เชิงลึกมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) ซึ่งเป็นเครือข่ายอุปกรณ์ที่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน เพื่อให้เกิดการทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะรับข้อมูลจากเซนเซอร์และส่งกลับไปยังระบบที่มีการวิเคราะห์และตัดสินใจ โดยระบบการเรียนรู้เชิงลึกก็จะถูกนำเข้ามาในส่วนของการวิเคราะห์และตัดสินใจ เพื่อควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าให้ทำงานตามที่ต้องการ ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ทำงานอยู่ในส่วนของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เช่น บอร์ดเจตสันนาโน (Jetson Nano) คือ บอร์ดที่เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสามารถใช้งานได้ทั่วไปเหมือนคอมพิวเตอร์ มีการประมวลผลผ่าน GPU บอร์ด ESP8266 ESP-12E (ESP8266 ESP-12E Board) สามารถเชื่อมกับอุปกรณ์ต่างๆ ผ่าน GPIO อย่างเช่นบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Stepper Motor Driver) เป็นตัวไดรเวอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ (Stepping Motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้การขับเคลื่อนด้วยสัญญาณพัลส์ หรือบอร์ด Arduino Mega 2560 (Arduino Mega 2560 Board) โดยเขียนคำสั่งด้วยภาษา C++ หรือภาษา Python

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนับวัตถุหรือการติดตามวัตถุจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งประเภทงานวิจัยในเรื่องเหล่านี้ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกคือกลุ่มที่ใช้วิธีการจัดการทางด้านข้อมูลด้วยคณิตศาสตร์ กลุ่มที่สอง คือ การนำการโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยกลุ่มแรก งานวิจัยแรกคือระบบตรวจจับวัตถุแบบอัตโนมัติ (Chinpanthana, 2010) เป็นวิธีที่ใช้การประมวลผลภาพด้วยเทมเพลตแมชชีนแบบนอร์มัลไลซ์คอร์เรชัน ที่มีการตรวจจับวัตถุได้ดีกว่าการใช้เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ สำหรับงานวิจัยต่อมา (Chinpanthana & Phiasai, 2017) เป็นการนับวัตถุด้วยวิธีการโดยใช้เทมเพลตแมชชีนแบบฟาสนอร์มัลไลซ์คอร์เรชันที่มีการนับวัตถุได้ดีกว่าการใช้เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุบนสายพานลำเลียง ส่วนงาน (Saraphak & Thaweewannakij, 2018) เป็นงานวิจัยที่ใช้การติดตามบุคคลด้วยแอปพลิเคชันติดตามบุคคล โดยเป็นการนำจีพีเอสในการระบุพิกัดตำแหน่งที่อยู่และติดตามตัวบุคคล สุดท้าย (Kajornrit *et al.*, 2017) เป็นงานวิจัยการควบคุมระบบส่องสว่างภายในบ้านด้วยสมาร์ตโฟน โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things สำหรับงานวิจัยกลุ่มนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับและติดตามวัตถุจากภาพถ่ายดิจิทัล สำหรับงานวิจัยที่สามเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตามบุคคลที่ใช้จีพีเอส ส่วนงานวิจัยสุดท้ายเป็นการประยุกต์ใช้การควบคุมอุปกรณ์

ไฟฟ้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับ Internet of Things

ตัวอย่างงานวิจัยกลุ่มที่สอง งานวิจัยแรกคือการอ่านเลขสายรถประจำทางจากภาพ (Wongta, 2017) โดยนำเสนอโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก Fast RCNN (Girshick, 2015) โดยงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงความแม่นยำในภายหลังการประมวลผลเพื่อทำนายเลขสายรถประจำทาง ส่วนงาน (Pohtongkam & Srinonchat, 2018) ได้นำเสนองานวิจัยที่ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับการประมวลผลภาพ เพื่อใช้ในการจดจำวัตถุจากการสัมผัสพื้นผิว โดยใช้ประสาทสัมผัสทางกายเทียม งานนี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อเป็นพื้นฐานของหุ่นยนต์ที่นำมาใช้แทนมือของมนุษย์ ต่อมา (Manokij, 2019) เป็นงานวิจัยที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึก 2 โมเดลในการทำนายปริมาณน้ำฝน โดยใช้โมเดลแรกในการทำนายพื้นที่ที่เกิดฝน ส่วนโมเดลที่สองใช้ทำนายปริมาณน้ำฝนที่จะเกิดขึ้น สำหรับ (Yongying, 2019) เป็นงานวิจัยที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึกในการแยกประเภทข้อมูลของถนนจากภาพถ่าย Drone เพื่อใช้สำรวจถนนในชนบท เพราะข้อมูลจาก google map ยังไม่ครอบคลุมถนนในชนบท โดยจะใช้โมเดลที่สามารถแยกประเภทและวิเคราะห์ข้อมูลถนนในภาพถ่ายเพื่ออัปเดตข้อมูล Open Street Map ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับ (Hongboonmee & Jantawong, 2020) เป็นงานวิจัยที่วิเคราะห์ความหวานของแตงโมจากภาพถ่าย โดยนำเอาเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกไปใช้งานบนสมาร์ตโฟนเพื่อความสะดวกในการใช้งานของบุคคลทั่วไปในกรณีที่ต้องการทราบชื่อพันธุ์และความหวานของแตงโม โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ไลบรารี TensorFlow ในการพัฒนาโมเดลที่ใช้ในการทำนาย งานวิจัยนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบอัลกอริทึม InceptionV3 (Szegedy *et al.*, 2015) และ MobileNet (Howard *et al.*, 2017) ผลการทดลองพบว่าโมเดลจากอัลกอริทึม InceptionV3 มีประสิทธิภาพที่เท่ากับโมเดลจากอัลกอริทึม MobileNet และเมื่อพิจารณาขนาดของโมเดล พบว่า MobileNet มีขนาดของโมเดลเล็กกว่า InceptionV3 งานวิจัยสุดท้าย (Inthanon & Mungsing, 2020) เป็นงานวิจัยที่ใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับใบหน้าของบุคคล โดยนำโมเดลไปประมวลผลบนบอร์ด AI Edge Computing ผลการทดลองพบว่าบอร์ด Raspberry Pi 4 + Intel® Neural Compute Stick 2 มีความแม่นยำดีที่สุดสำหรับงานวิจัยกลุ่มนี้ เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำการเรียนรู้เชิงลึกมาประยุกต์ใช้

สำหรับงานวิจัยนี้จะมีลักษณะงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยกลุ่มที่สอง เป็นการพัฒนาระบบการระบุตำแหน่งด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ ร่วมกับการติดตามการเคลื่อนไหวของบุคคล โดยการใช้ระบบการเรียนรู้แบบเชิงลึกติดตามการเคลื่อนไหวของตัวบุคคลที่อยู่ในบริเวณที่กล้องทำการตรวจจับได้ เมื่อระบบทำการติดตามตัวบุคคลได้แล้ว จะทำการชี้ไปที่ตำแหน่ง

ของตัวบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ สำหรับรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการใช้หลักการการเรียนรู้เชิงลึก มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์
2. เพื่อศึกษาการพัฒนาระบบอัตโนมัติในการระบุตำแหน่งของบุคคลที่ตรวจจับได้จากกล้องดิจิทัล
3. เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ช่วยในระบบรักษาความปลอดภัย สำหรับการตรวจหาผู้บุกรุก

วิธีการที่นำเสนอ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาระบบการชี้ตัวบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ โดยการเรียนรู้แบบเชิงลึก ระบบประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกคือการใช้การเรียนรู้เชิงลึกตรวจจับตัวบุคคลเพื่อหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของตัวบุคคล ส่วนที่สองใช้ควบคุมการทำงานการชี้ตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์ไปยังตัวบุคคล โดยระบบนี้จะรับข้อมูลภาพจากกล้องดิจิทัลเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในส่วนประกอบทั้งสองส่วน โดยส่วนแรกจะรับภาพจากกล้องดิจิทัลเข้ามาแล้วทำการตรวจจับตัวบุคคลจากภาพ หลังจากนั้นจะส่งตำแหน่งของตัวบุคคลไปยังส่วนที่สอง เพื่อทำการบังคับให้เลเซอร์พอยเตอร์ชี้ไปยังตัวบุคคล โดยรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

1. ระบบตรวจจับตัวบุคคล

ในระบบการตรวจจับตัวบุคคลโดยการเรียนรู้เชิงลึกของงานวิจัยนี้ ได้ใช้โมเดล SSD MobilenetV2 เพื่อตรวจหาบุคคลจากภาพที่ได้รับจากกล้องดิจิทัล เนื่องจากโมเดลถูกออกแบบมาให้สามารถนำไปใช้งาน Real Time บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ เช่น สมาร์ตโฟน หรืออุปกรณ์ Edge Computing เป็นต้น หลังจากสอนโครงข่ายประสาทเทียมของโมเดลนี้ตามขั้นตอนที่แสดงในโฟลว์ชาร์ต Figure 1 จะได้ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ที่ใช้ตรวจสอบบุคคลเพียงอย่างเดียว โดยปกติค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้กันอยู่สามารถตรวจสอบวัตถุได้ 91 กลุ่ม งานวิจัยนี้ได้เลือกเฉพาะกลุ่มของ Person หลังจากได้ค่าถ่วงน้ำหนักแล้วจะนำมาใช้ตรวจสอบตัวบุคคลที่ปรากฏในภาพในกระบวนการต่อไป

สำหรับกระบวนการตรวจสอบบุคคลภายในภาพ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมาจะถูกนำไปใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมโมเดล SSD MobilenetV2 โดยทำการรับภาพจากกล้องดิจิทัล จากนั้นนำภาพจากกล้องดิจิทัลมากำหนดเป็นอินพุตให้กับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้เรียบร้อยแล้ว โครงข่ายประสาทเทียม

จะทำการตรวจสอบหาบุคคลภายในภาพ เมื่อปรากฏบุคคลเพียง 1 บุคคลภายในภาพ หากโครงข่ายประสาทเทียมตรวจพบ ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้คือจุดศูนย์กลางและพื้นที่ของกรอบภาพบุคคลที่ตรวจพบ สำหรับกรณีที่มีจำนวนบุคคลมากกว่า 1 คนภายในภาพ ระบบจะเลือกเอาจุดศูนย์กลางภาพของบุคคลที่มีขนาดของพื้นที่มากที่สุด โดยกำหนดจุดศูนย์กลางของภาพบุคคลเป็น (x_c, y_c) โดย x_c คือ ตำแหน่งพิกเซลของภาพในแกนแนวนอน และ y_c คือ ตำแหน่งพิกเซลของภาพในแนวแกนตั้ง สำหรับขั้นตอนการตรวจจับตัวบุคคลภายในภาพจะแสดงได้ดัง Figure 2

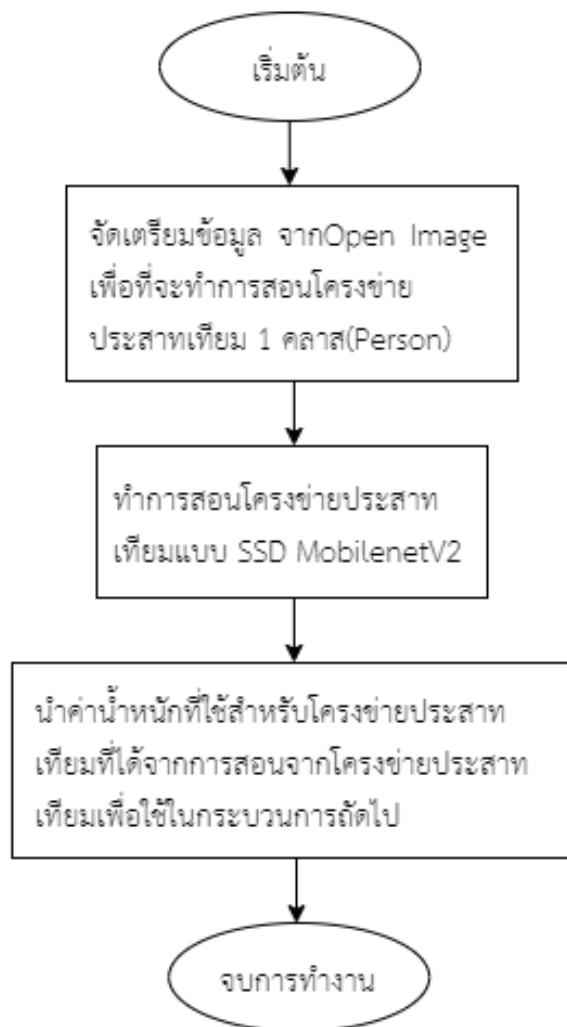


Figure 1 Teaching a Neural Network

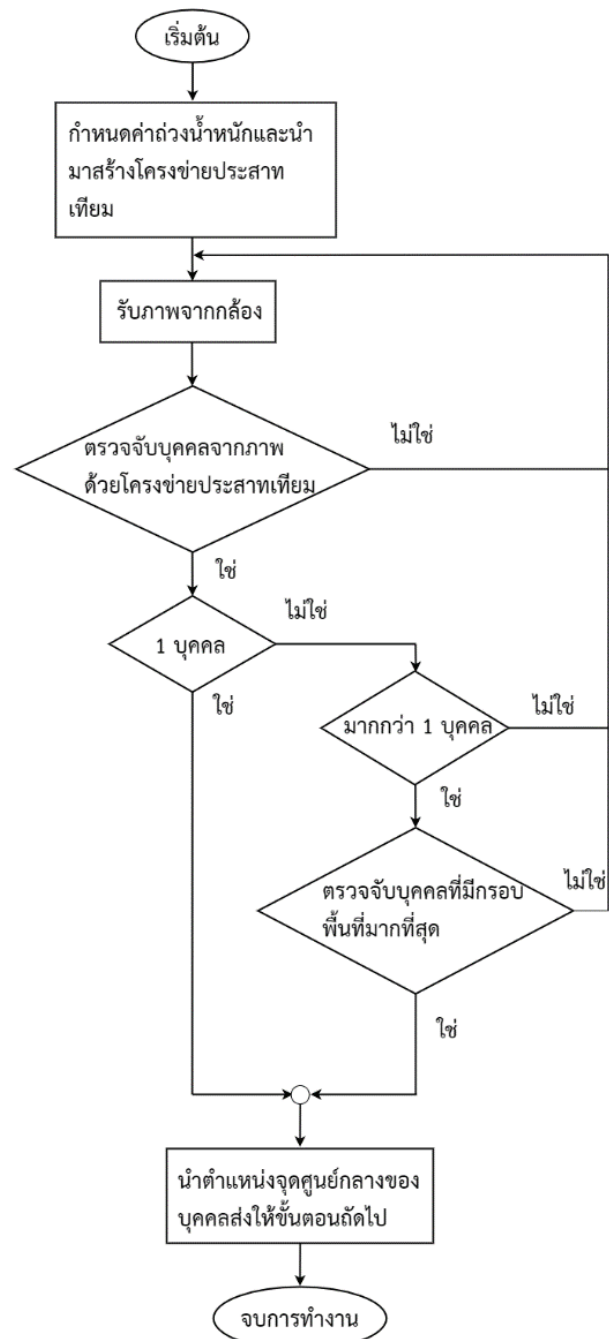


Figure 2 Personal Identification System

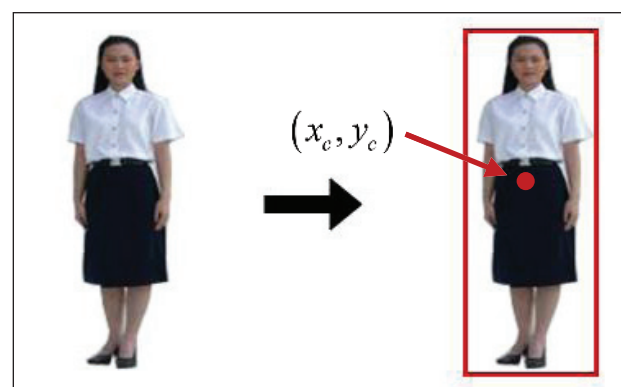


Figure 3 Person detection obtained from a digital camera

จาก Figure 3 เมื่อมีบุคคลปรากฏภายในภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล ระบบการตรวจจับบุคคลจะทราบตำแหน่งจุดศูนย์กลาง (x_c , y_c) และจะทำการสร้างกรอบรอบตัวบุคคลเพื่อบ่งบอกว่าส่วนที่ปรากฏภายในกรอบคือตัวบุคคล จุดศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนของการควบคุมการชี้ตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์

2. การควบคุมการทำงานการชี้ตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์ไปยังตัวบุคคล

ตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง ที่ระบุตำแหน่งของบุคคลภายในภาพจากขั้นตอนที่ผ่านมา จะนำมาใช้ในการควบคุมการชี้ตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์ ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในขั้นตอนถัดไป สำหรับการชี้ตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์จะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ประกอบด้วยสเต็ปปีงมอเตอร์สองตัว โดยตัวที่หนึ่งจะควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนนอน (สเต็ปปีงมอเตอร์ตัวล่าง) และตัวที่สองจะควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้ง (สเต็ปปีงมอเตอร์ตัวบน) จาก Figure 4 สเต็ปปีงมอเตอร์ตัวล่างจะติดอยู่กับฐานเพื่อให้แผ่นจานหมุนให้เคลื่อนที่ในแนวแกนตั้ง ส่วนสเต็ปปีงมอเตอร์ตัวบนจะติดกับขาคีบสเต็ปปีงมอเตอร์เพื่อหมุนฐานของเลเซอร์พอยเตอร์ให้เคลื่อนที่ในแนวตั้ง เมื่อสเต็ปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัวทำงานร่วมกัน จะทำให้เลเซอร์พอยเตอร์ชี้ไปยังตัวบุคคลที่เคลื่อนที่ผ่านด้านหน้ากล้องดิจิทัล ส่วนกล้องจะติดตั้งบริเวณด้านหลังของตัวเลเซอร์พอยเตอร์ โดยตัวกล้องจะไม่มีเคลื่อนที่ สำหรับรายละเอียดทางฮาร์ดแวร์จะแสดงในหัวข้อถัดไป

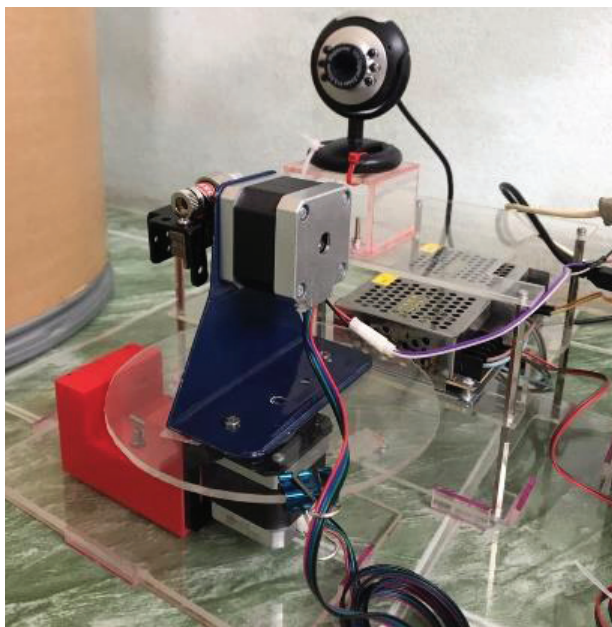


Figure 4 The location of the device that makes the laser pointer point to a person

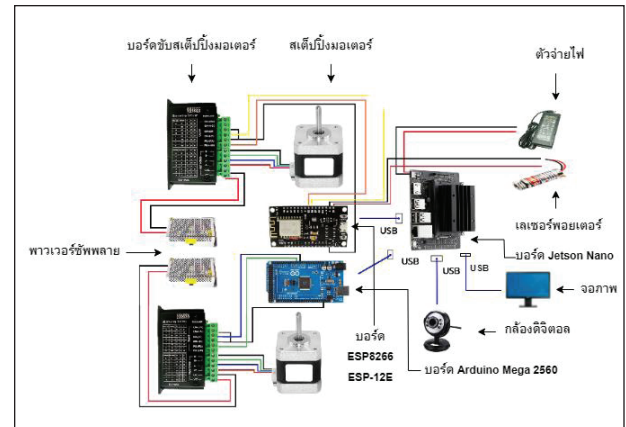


Figure 5 Device and circuit connection

(1) รายละเอียดด้านฮาร์ดแวร์ อุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สเต็ปปีงมอเตอร์ เลเซอร์พอยเตอร์ บอร์ด Arduino Mega 2560 บอร์ด ESP8266 ESP-12E บอร์ด Jetson Nano บอร์ดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ พาวเวอร์ซัพพลาย และกล้องดิจิทัล ในการเคลื่อนที่ในแนวแกนนอนของเลเซอร์พอยเตอร์จะอาศัยการเคลื่อนที่ของสเต็ปปีงมอเตอร์ผ่านบอร์ดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ 1 ตัว โดยการส่งสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม (Square Wave) 1 ลูกคลื่นไปยังบอร์ดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ ให้เคลื่อนที่ได้ 1 สเต็ป โดยสัญญาณพัลส์ควบคุมบอร์ดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์จะได้รับมาจากบอร์ดคอนโทรล บอร์ด Jetson Nano จะควบคุมการทำงานของบอร์ดคอนโทรลโดยส่งคำสั่งผ่านทางพอร์ตอนุกรม สำหรับการเคลื่อนที่ของเลเซอร์พอยเตอร์ในแนวแกนตั้ง โดยใช้อุปกรณ์เหมือนกันแต่ต่างตรงที่จะใช้บอร์ด ESP8266 มาแทนบอร์ดคอนโทรล อุปกรณ์จะแสดงดัง Figure 5

(2) การควบคุมเลเซอร์พอยเตอร์การเคลื่อนที่สเต็ปปีงมอเตอร์จะสัมพันธ์กับจำนวนพิกเซลของภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล โดยระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้งจะสัมพันธ์กับจำนวนพิกเซลในแนวแกนตั้งของภาพ และระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกนนอนจะสัมพันธ์กับจำนวนพิกเซลในแนวแกนนอนของภาพด้วย กำหนดให้ h คือ จำนวนพิกเซลในแนวแกนตั้ง และ w คือ จำนวนพิกเซลในแนวแกนนอน ความสัมพันธ์ของจำนวนพัลส์ที่จะควบคุมให้สเต็ปปีงมอเตอร์ที่เคลื่อนที่ไปแต่ละสเต็ป โดยเคลื่อนที่จากตำแหน่งพิกเซลที่เลเซอร์พอยเตอร์ชี้อยู่ในปัจจุบัน (x_o , y_o) ไปยังตำแหน่งของบุคคลที่ถูกตรวจพบได้ในภาพ (x_c , y_c) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 1 และสมการที่ 3 โดยสามารถแยกพิจารณาในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้ง เมื่อพิจารณาในแนวแกนนอนสามารถหาระยะการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันของเลเซอร์พอยเตอร์ (x_o) ไปยังตำแหน่งในแนวแกนนอนของภาพบุคคลที่ตรวจพบได้ (x_c) การคำนวณหาระยะห่างระหว่างพิกเซลในแนวแกนนอน (x_n) สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 1

$$x_n = x_c - x_o \quad (1)$$

เมื่อรู้ระยะทางในการเคลื่อนที่ในแนวแกนนอน จากนั้นจะนำค่านี้ไปใช้คำนวณหาจำนวนพัลส์ที่ทำให้สแต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนที่ไปในแนวแกนนอน ดังสมการที่ 2 ถ้าค่า $x_n < 0$ แสดงว่าสแต็ปปีงมอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปทางซ้าย ถ้าค่า $x_n \geq 0$ แสดงว่าสแต็ปปีงมอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปทางขวา เมื่อได้ค่าระยะของฟิกเซล

$$N_x = \frac{P_x \times x_n}{w} \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ N_x คือจำนวนพัลส์ที่ควบคุมให้สแต็ปปีงมอเตอร์หมุนตามตำแหน่งระยะของฟิกเซลที่ต้องการ P_x คือจำนวนพัลส์ที่ใช้เคลื่อนจากด้านซ้ายไปด้านขวาของภาพที่ได้จากกล้องดิจิตอล x_n คือ ค่าระยะห่างระหว่างฟิกเซลทั้งสองในแนวแกนนอน w คือ จำนวนฟิกเซลในแนวแกนนอน

เมื่อพิจารณาในแนวแกนตั้งสามารถหาระยะการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันของเซอร์พอยเตอร์ ไปยังตำแหน่งในแนวแกนตั้งของภาพบุคคลที่ตรวจจับได้ การคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างฟิกเซลในแนวแกนตั้ง สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 3

$$y_n = y_c - y_o \quad (3)$$

เมื่อรู้ระยะทางในการเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้ง จากนั้นจะนำค่านี้ไปใช้คำนวณหาจำนวนพัลส์ที่ทำให้สแต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนที่ไปในแนวแกนตั้ง ดังสมการที่ 4 ถ้าค่า $y_n < 0$ แสดงว่าสแต็ปปีงมอเตอร์จะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ถ้าค่า $y_n \geq 0$ แสดงว่าสแต็ปปีงมอเตอร์จะเคลื่อนที่ลงด้านล่าง เมื่อได้ค่าระยะของฟิกเซล

$$N_y = \frac{p_y \times y_n}{h} \quad (4)$$

โดยกำหนดให้ N_y คือ จำนวนพัลส์ที่ควบคุมให้สแต็ปปีงมอเตอร์หมุนตามระยะของฟิกเซลที่ต้องการ

p_y คือ จำนวนพัลส์ที่ใช้เคลื่อนจากด้านบนไปด้านล่างของภาพที่ได้จากกล้องดิจิตอล

y_n คือ ค่าระยะห่างระหว่างฟิกเซลทั้งสองในแนวแกนตั้ง

h คือ จำนวนฟิกเซลในแนวแกนตั้ง

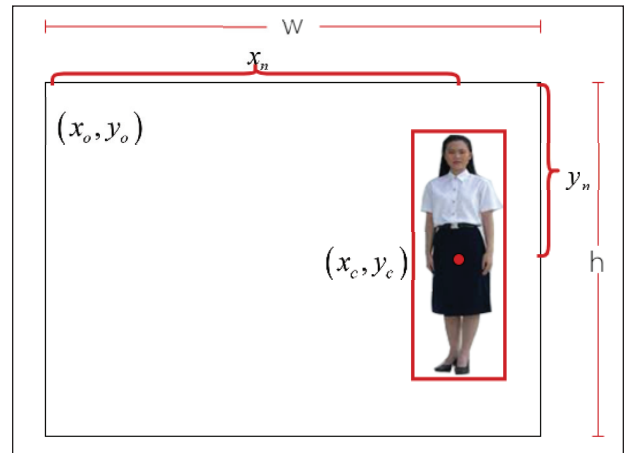


Figure 6 The pattern of detecting a person moving from left to right

จาก Figure 6 หน้าจอแสดงผลที่มีความกว้างเท่ากับ w ความสูงเท่ากับ h เมื่อตรวจจับบุคคลได้จากกล้องดิจิตอล จุดศูนย์กลางของบุคคลเท่ากับ (x_c, y_c) โดยตำแหน่งเลเซอร์พอยเตอร์ (x_o, y_o) มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวบุคคลในแกนแนวนอนเท่ากับ x_n ฟิกเซล และในแนวแกนตั้งเท่ากับ y_n ฟิกเซล

หลังจากทำการควบคุมให้สแต็ปปีงมอเตอร์บังคับให้เลเซอร์พอยเตอร์ชี้ไปยังตำแหน่งของบุคคลตามที่ต้องการแล้ว ในส่วนของอัลกอริทึมการทำงานจะนำเอาตำแหน่งของบุคคลที่ตรวจพบภายในภาพไปเป็นตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์ที่อยู่ในตำแหน่งปัจจุบัน $(x_o, y_o) = (x_c, y_c)$ ดังแสดงใน Figure 7

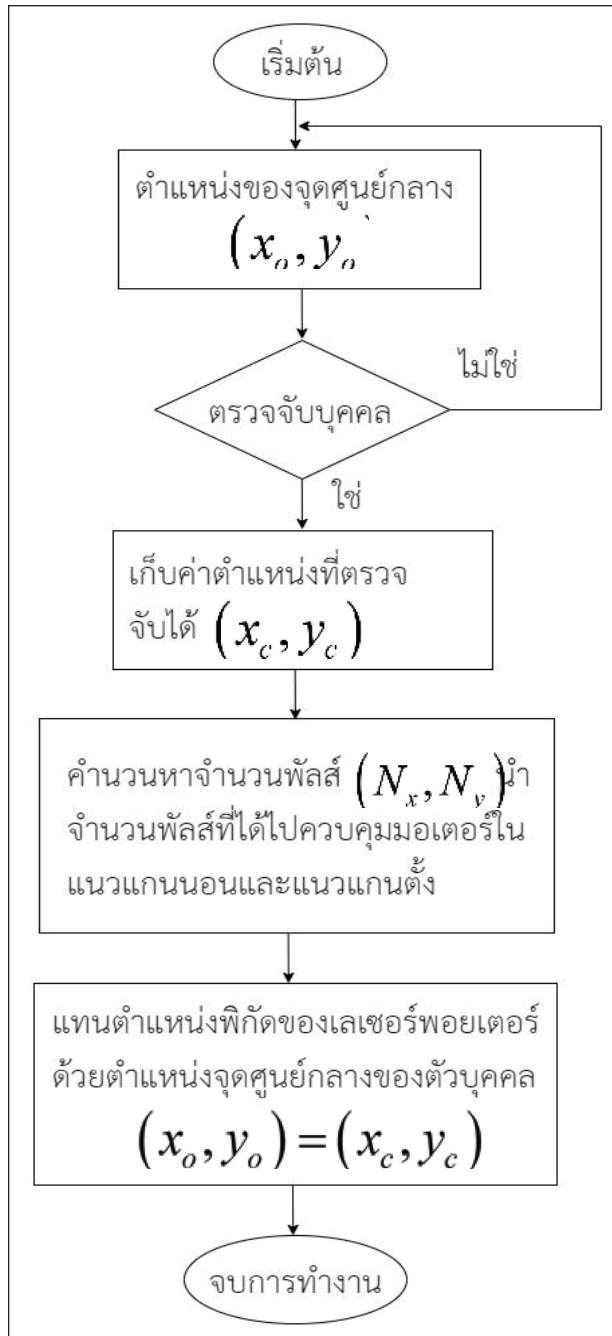


Figure 7 The representation of the coordinates of the laser pointer

ผลการทดลอง

การทดลองระบบตรวจจับบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ ก่อนการทดลองของงานวิจัยนี้ จะต้องทำการปรับตำแหน่งของเลเซอร์พอยเตอร์ให้ชี้ไปตำแหน่งมุมบนด้านซ้ายของจอแสดงผลที่มีขนาด $w \times h$ โดยการทดลองนี้กำหนด $w = 640$ และ $h = 480$ ดัง Figure 8 สำหรับจำนวนพัลส์ที่ใช้ควบคุมสเต็ปมอเตอร์ให้เคลื่อนที่จากด้านซ้ายไปด้านขวา (p_x) และจากด้านบนไปด้านล่าง (p_y) ของภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 540 พัลส์ และ 350 พัลส์ ตามลำดับ

การกำหนดจำนวนพัลส์ให้เคลื่อนที่ในแต่ละแกนสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าจนได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละแกน (Trial and Error) ในการทดลองนี้จะกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของเลเซอร์พอยเตอร์ (x_o, y_o) มีค่าเท่ากับ $(0, 0)$ โดยจะทำการทดลองระบบตามสถานการณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้



Figure 8 The display screen

การตรวจจับบุคคล 1 บุคคลในภาพ เมื่อระบบมีการตรวจจับบุคคล เลเซอร์พอยเตอร์จะทำการชี้ไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกรอบที่ล้อมรอบตัวบุคคล ดัง Figure 9 เมื่อบุคคลทำการเคลื่อนที่เลเซอร์พอยเตอร์ก็จะชี้ตามการตรวจจับของบุคคล ดัง Figure 10 และ 11

การตรวจจับบุคคล 2 บุคคลในภาพ เมื่อระบบมีการตรวจจับบุคคลได้ 2 บุคคล เลเซอร์พอยเตอร์จะทำการชี้ไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกรอบที่ล้อมรอบตัวบุคคลของตัวบุคคลที่มีขนาดพื้นที่กรอบล้อมรอบตัวที่มากที่สุด ดัง Figure 12, 13 และ 14

เมื่อระบบมีการตรวจจับบุคคลได้มากกว่า 2 บุคคล เลเซอร์พอยเตอร์จะทำการชี้ไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกรอบที่ล้อมรอบบุคคลที่มีพื้นที่กรอบล้อมรอบตัวที่มากที่สุด เช่นเดียวกับการตรวจจับบุคคล 2 บุคคลในภาพ ดัง Figure 15, 16 และ 17 และภาพรวมการทำงานของระบบ เมื่อระบบมีการตรวจจับบุคคล จะแสดงดัง Figure 18 และ 19



Figure 9 Results of the 1st experiment



Figure 12 Results of the 4th experiment



Figure 10 Results of the 2nd experiment



Figure 13 Results of the 5th experiment

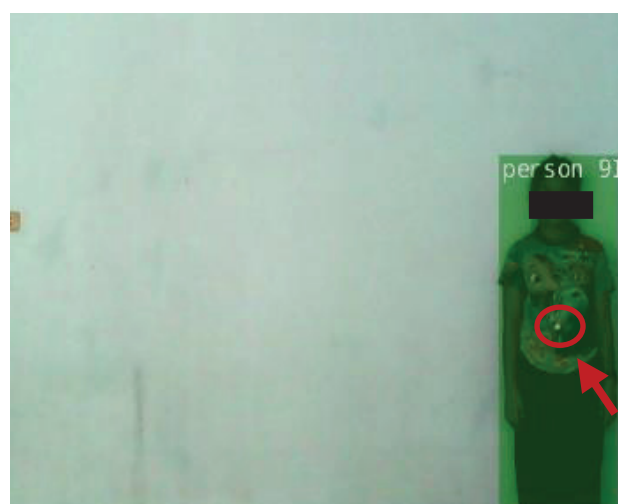


Figure 11 Results of the 3rd experiment



Figure 14 Results of the 6th experiment

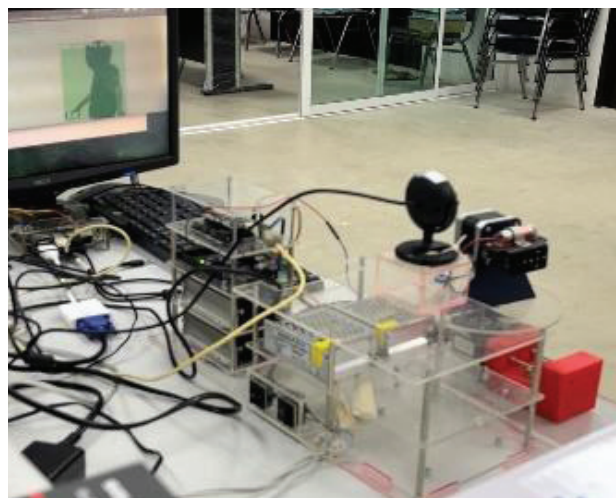
Figure 15 Results of the 7th experiment

Figure 18 Results of system

Figure 16 Results of the 8th experiment

Figure 19 Results of system

Figure 17 Results of the 9th experiment

ในการติดตั้งระบบต้องมีสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณแสงที่พอดี เพื่อให้ระบบการตรวจจับบุคคลสามารถตรวจจับบุคคลได้ ถ้าแสงน้อยเกินไปหรือมากเกินไปจะทำให้ระบบไม่สามารถตรวจจับบุคคลได้ ดังแสดงใน Figure 20 และ 21

เมื่อระบบมีการตรวจจับบุคคลได้ 2 บุคคลในภาพ และบุคคลยืนซ้อนกัน ระบบการตรวจจับบุคคลจะทำการตรวจจับบุคคลได้ 2 บุคคลในภาพ และเลเซอร์พอยเตอร์จะชี้ไปยังตำแหน่งของตัวบุคคลที่มีพื้นที่ที่ครอบคลุมรอบตัวบุคคลที่มากที่สุด ดัง Figure 22 แต่ถ้าบุคคลยืนซ้อนกันมากเกินไประบบจะทำการตรวจจับได้เพียง 1 บุคคล ที่มีพื้นที่รวมกัน และเลเซอร์พอยเตอร์จะชี้ไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางของกรอบที่ล้อมรอบตัวบุคคล ดัง Figure 23



Figure 20 The great amount of light



Figure 21 Low light quantity



Figure 22 Detection of people standing stacked within the image



Figure 23 Detecting a person standing stacked with in an image that only one person can be detected by the system

เมื่อระบบทำการตรวจจับบุคคลในภาพถ่ายด้านข้างของตัวบุคคล ระบบจะทำการตรวจจับบุคคลและเลเซอร์พอยเตอร์จะชี้ไปยังจุดศูนย์กลางของกรอบล้อมรอบตัวบุคคลที่ตรวจจับได้ ดัง Figure 24



Figure 24 Side person detection

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองชี้ระบุเป้าหมาย โดยให้บุคคลที่ต้องการทำการตรวจสอบยืนอยู่ภายในกรอบของภาพ โดยจะทำการทดสอบ 3 ตำแหน่งในภาพ คือ บุคคลยืนที่ตำแหน่งทางด้านซ้าย กึ่งกลาง และด้านขวาของภาพ จากนั้นจึงทำการทดสอบระบบตรวจจับด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ แบ่งเป็น 4 สถานการณ์ คือ มี 1 บุคคล 2 บุคคล 3 บุคคล และ 4 บุคคลในภาพ โดยทำการทดลองระบบทั้งหมด 20 ครั้ง ต่อ 1 สถานการณ์ จะได้ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของระบบตรวจจับบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ ดัง Table 1 โดยสมการที่ 5 ที่ใช้คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน ในการทดลองแต่ละสถานการณ์

$$E = \sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2} \quad (5)$$

โดยกำหนดให้ E คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบตรวจจับบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์

x_c คือ ตำแหน่งพิกเซลในแนวแกนนอนของภาพบุคคลที่ตรวจจับได้

x_p คือ ตำแหน่งพิกเซลในแนวแกนนอนที่เลเซอร์พอยเตอร์ชี้

y_c คือ ตำแหน่งพิกเซลในแนวแกนตั้งของภาพบุคคลที่ตรวจจับได้

y_p คือ ตำแหน่งพิกเซลในแนวแกนตั้งที่เลเซอร์พอยเตอร์ชี้

Table 1 Error-values of the laser pointer detection system

Number of Persons	Position		
	Left	Center	Right
1	11.381	7.311	12.038
2	8.725	6.106	7.919
3	13.170	11.201	12.366
4	15.471	13.551	13.204

จาก Table 1 จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของภาพมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด และจำนวนบุคคลที่มากขึ้นมีผลต่อระบบเช่นกัน และขึ้นอยู่กับการติดตั้งระบบก่อนการใช้งานที่สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงได้

สำหรับการทดลองระบบตรวจจับบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ ที่ระบุตำแหน่งของบุคคลภายในภาพ โดยกำหนดตำแหน่งภายในภาพทั้งหมด 11 ตำแหน่ง ทำการทดลองระบบทั้งหมด 20 รอบ โดยตำแหน่งที่ 1 จะอยู่บริเวณทางซ้ายสุดของภาพ โดยเรียงลำดับจากซ้ายมือไปขวามือของภาพ 11 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งสุดท้ายจะอยู่บริเวณขวาสุดของภาพ เพื่อหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในการตรวจจับบุคคลของแต่ละตำแหน่ง ผลการทดลองได้แสดงไว้ดัง Table 2

จาก Table 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งจากทางซ้ายไปทางขวาจะมีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการระบุตำแหน่งจุดเริ่มต้นของเลเซอร์ในด้านมุมซ้ายบน และอาจจะขึ้นอยู่กับการติดตั้งระบบก่อนการใช้งานที่ทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่ 1 จะมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด คือ 7.22 พิกเซล และตำแหน่งที่ 10 จะมีความผิดพลาดมากที่สุด คือ 17.9 พิกเซล

Table 2 Error-values of the laser pointer detection system are divided into 11 locations within the image.

Position of Persons	Error
1	7.217
2	8.084
3	7.412
4	7.296
5	9.125
6	15.979
7	14.215
8	17.053
9	17.726
10	17.975
11	17.072

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่าการระบุตำแหน่งของตัวบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์สามารถทำงานได้ดีในบริเวณตรงกลางของภาพที่ได้จากกล้อง ในกรณีที่มีตรวจจับบุคคล 1 บุคคลในภาพที่วางอุปกรณ์ในระดับเดียวกับบุคคล และการระบุตำแหน่งของตัวบุคคลด้วยเลเซอร์พอยเตอร์ จะระบุตำแหน่งได้กึ่งกลางของกรอบล้อมรอบบุคคลจะขึ้นอยู่กับ การปรับขอบเขตของการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเลเซอร์พอยเตอร์ จะทำให้คลาดเคลื่อนน้อยลง

จากการทดลองปรับเปลี่ยนระยะทางระหว่างกล้องกับบุคคลเพื่อทำการตรวจจับบุคคล พบว่า เมื่อระบบทำการตรวจจับบุคคลที่มีระยะทางห่างจากกล้องมากกว่า 30 เมตร จะทำให้ระบบไม่สามารถทำการตรวจจับบุคคลได้ ดัง Figure 25 แต่จะสามารถตรวจจับบุคคลได้เมื่อระยะห่างจากกล้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 เมตร ดังแสดงใน Figure 26



Figure 25 Undetectable distance



Figure 26 Detectable distance

ในการทดลองพบว่าสภาพแวดล้อมมีผลต่อการตรวจจับบุคคล เช่น ถ้าสีของพื้นหลังใกล้เคียงกับสีของตัวบุคคลที่เคลื่อนที่ผ่านกล้อง จะทำให้ระยะทางการตรวจจับที่ระบบสามารถทำการตรวจจับได้มีระยะทางน้อยลง ดัง Figure 27 และ 28



Figure 27 Undetectable distance

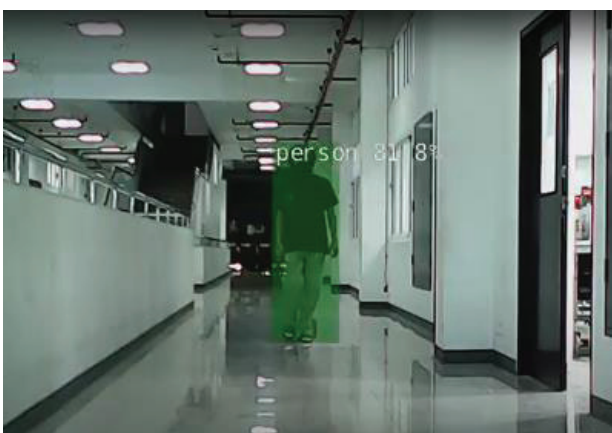


Figure 26 Detectable distance

สรุปผล

สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยระบุตำแหน่งของบุคคลที่ได้จากกล้องดิจิทัล แต่จะมีข้อผิดพลาดที่ไม่สามารถชี้เป้าได้ตรงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของบุคคลที่ถูกตรวจพบได้ เพราะมีข้อจำกัดหลายด้าน แต่ตำแหน่งที่ระบุได้ก็ยังอยู่ในกรอบของบุคคลที่ได้จากการใช้การเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งปัญหาที่ปรากฏเมื่อมีการใช้งาน ได้แก่ ระบบจะมีการทำงานที่ช้าลงเมื่อมีเวลาในการทำงานเพิ่มมากขึ้น เพราะเกิดจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ต้องใช้หน่วยความจำในการนำไปใช้ในการเรียนรู้เชิงลึก ปัญหาต่อมาเมื่อระยะห่างที่มากเกินไประหว่างอุปกรณ์กับบุคคลที่จะทำการตรวจจับ จะส่งผลให้การเรียนรู้เชิงลึกไม่สามารถตรวจจับบุคคลได้ และปัญหาสุดท้ายคือผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของแสงที่มากหรือน้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับบุคคลได้

งานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อโดยการปรับปรุงการรับภาพจากกล้องให้ได้มุมมองมากขึ้น เพื่อเพิ่มขอบเขตการทำงานให้สามารถเพิ่มการตรวจจับของบุคคลให้ได้ 180 องศาหรือมากกว่า และปรับปรุงอัลกอริทึมของการเรียนรู้เชิงลึกให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเดิม ในการนำมาใช้ประโยชน์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้าน การตรวจจับผู้บุกรุกเข้ามาในพื้นที่ ระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ช่วยยามรักษาการในเรือนจำตรวจจับนักโทษที่อาจหลบหนีจากเรือนจำ โดยประยุกต์ใช้ไฟส่องแทนแลเซอร์พอยเตอร์ได้ และต้องมีการปรับเปลี่ยนใช้กล้องอินฟราเรด และมีการสอนให้ระบบการเรียนรู้แบบเชิงลึกเรียนรู้ภาพจากกล้องอินฟราเรดใหม่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

เอกสารอ้างอิง

- Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S. (2015). Tensor flow: large-scale machine learning on heterogeneous systems. Retrieved from <https://www.tensorflow.org/>
- Chinpanthana, N. (2010). *Automatic counting objects system by using template matching with normalized correlation*. Dhurakij Pundit University. Retrieved from <http://libdoc.dpu.ac.th/research/138607.pdf>
- Chinpanthana, N., & Phiasai, T. (2017). Fast normalized cross correlation for real time automatic counting. *RMUTT Journal*.
- Girshick, R. (2015). *Fast R-CNN*.

- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- Hongboonmee, N., & Jantawong, N. (2020). Apply of deep learning techniques to measure the sweetness level of watermelon via smartphone. *Journal of Information Science and Technology*, 10, 59-69. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JIST/article/download/240500/163974/>
- Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M. (2017). *Mobilenets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications*.
- Inthanon, P., & Mungsing, S. (2020). The ability test of model the facial landmark detecting. *PKRU SciTech Journal*, 4. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech/article/download/240864/165536>
- Kajornrit, J., Chaipornkaew, P., & Chuan, N. T. M. (2017). An application of internet of things technology to control the illumination systems in smart home. *Journal of Information Science and Technology*, 7.
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., & Berg, A. C. (2016). SSD: Single shot multiBox detector. *Lecture Notes in Computer Science*, 21-37. doi:10.1007/978-3-319-46448-0_2
- Manokij, F. (2019). *Thailand's precipitation forecasting using deep learning approach*. Chulalongkorn University. <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/65135>
- Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T. (2019). PyTorch: an imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in Neural Information Processing Systems* 32 (pp. 8024-8035). Curran Associates, Inc. Retrieved from <http://papers.neurips.cc/paper/9015-pytorch-an-imperative-style-high-performance-deep-learning-library.pdf>
- Pohtongkam, S., & Srinonchat, J. (2018). Object recognition for humanoid robot using tactile image processing and artificial neural network. *Naresuan University Engineering Journal*.
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2019). *MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks*.
- Saraphak, W., & Thaweewannakij, P. (2018). Real time GPS application with track team location. *Journal of Project in Computer Science and Information Technology*, 4. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/project-journal/article/download/153087/111611/>
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2015). *Rethinking the inception architecture for computer vision*.
- Wongta, P. (2017). *Vision-based bus route number reader*. Chulalongkorn University. <http://doi.org/10.14457/CU.the.2017.574>
- Yongying, N. (2019). *A deep learning approach on road detection from unmanned aerial vehicle-based images in rural road monitoring*. Naresuan University. http://www.agi.nu.ac.th/nred/Document/is-PDF/2562/geo_2562_05_FullPaper.pdf