

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก
ด้วยโปรแกรมชีราคอร์

Development and Performance Evaluation of a Helmet Detection Prototype
System Using CIRA CORE

สมเจตน์ บุญชื่น¹ สารัลย์ กระจง¹ วัชรพล แก้วเปี้ย¹ ภันทิรา วรรณชิต¹ ธิตินัฐ ไชยกาล¹

สุวรรณษา ตันดี¹ ทวีศักดิ์ วรจักร¹ นัฐพงษ์ เนินชิต¹ และ สุภัตรา ปินจันทร์^{1*}

Somjate Bunchuen¹, Saran Krachong¹, Watcharaphol Kaewpia¹, Pantira Wannachid¹, Thitinut Chaiyakan¹,
Suwannasa Tandee¹, Thaweesak Worachak¹, Nattapong Nernchad¹ and Supattra Pinchan^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

¹Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

*Corresponding author; email: supattra.pin@live.ur.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก และทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับหมวกกันน็อกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ระบบพัฒนาด้วยโปรแกรม ชีราคอร์ร่วมกับการฝึกโมเดลด้วยชุดข้อมูลภาพจำนวน 200, 300, 400 และ 500 รูปภาพ กระบวนการทดลองประกอบด้วยการเตรียมภาพ การทำป้ายกำกับบริเวณหมวกกันน็อก และการฝึกโมเดลด้วยเครื่องมือฝึกการเรียนรู้เชิงลึก จากนั้นนำผลการตรวจจับมาเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 ผลการทดสอบพบว่า โมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 200 และ 300 รูป ยังไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ ส่วนโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 400 รูป มีความแม่นยำเฉลี่ย 13.5% และโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 500 รูป มีความแม่นยำเฉลี่ย 57.9% เมื่อเปรียบเทียบกับโยโลวี 3 พบว่าโยโลวี 3 มีความแม่นยำเฉลี่ย 48.3% นอกจากนี้ การทดสอบมุกกล้องพบว่า มุกกล้อง 45 องศา ตรวจพบจำนวน 9 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 57.2% ส่วนมุกกล้อง 90 องศา ตรวจพบจำนวน 6 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 35.4% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจำนวนภาพที่ใช้ฝึกโมเดลและมุกกล้องมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับหมวกกันน็อก

คำสำคัญ: การตรวจจับหมวกกันน็อก, การเรียนรู้เชิงลึก, โยโลวี 3, ชีราคอร์

Abstract

This research aimed to design and develop a helmet detection prototype system and evaluate its detection performance within Uttaradit Rajabhat University. The system was developed using CIRA CORE and trained with image datasets consisting of 200, 300, 400, and 500 images. The experimental process included image preparation, helmet annotation, and model training using a deep learning training tool. The detection performance of the developed models was subsequently compared with that of the YOLOv3 model. The experimental results revealed that the models trained with 200 and 300 images were unable to detect helmets. The model trained with 400 images achieved an average accuracy of 13.5%, whereas the model trained with 500 images achieved an average accuracy of 57.9%. In comparison, the YOLOv3 model achieved an average accuracy of 48.3%. Furthermore, camera-angle evaluation showed that at the 45-degree angle, the system successfully detected helmets 9 times, achieving an average accuracy of 57.2%, whereas at the 90-degree angle, the system detected helmets 6 times, with an average accuracy of 35.4%. The findings indicate that both the number of training images and the camera angle affect the performance of the helmet detection system.

Keywords: Helmet Detection, Deep Learning, YOLOv3, CIRA CORE

บทนำ

ประเทศไทยมีอัตราการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน 25.4 คนต่อประชากร 100,000 คน [1] ในปัจจุบันรถจักรยานยนต์เป็นยานพาหนะที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความคล่องตัวสูง ประหยัดค่าใช้จ่าย เหมาะสมกับการเดินทางในระยะใกล้ โดยเฉพาะในกลุ่มนักเรียน นักศึกษา และบุคลากรในสถาบันการศึกษา อย่างไรก็ตาม การใช้รถจักรยานยนต์มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุสูงกว่ายานพาหนะหลายประเภท เนื่องจากผู้ขับขี่และผู้โดยสารมีการป้องกันร่างกายน้อย เมื่อเกิดอุบัติเหตุจึงมีโอกาสได้รับบาดเจ็บรุนแรง โดยเฉพาะบริเวณศีรษะและสมอง การสวมหมวกกันน็อกหรือหมวกกันน็อกจึงเป็นมาตรการสำคัญที่ช่วยลดความรุนแรงของการบาดเจ็บและการเสียชีวิตจากอุบัติเหตุทางถนน อย่างไรก็ตามจากบริบทของมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์พบว่านักศึกษาบางส่วนใช้รถจักรยานยนต์ในการเดินทางภายในพื้นที่มหาวิทยาลัย และยังพบปัญหาการไม่สวมหมวกกันน็อกในบางกรณี ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกเพื่อสนับสนุนการเฝ้าระวังและส่งเสริมความปลอดภัยในการขับขี่

การตรวจสอบการสวมหมวกกันน็อกโดยเจ้าหน้าที่มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้องใช้กำลังคนจำนวนมาก การตรวจสอบไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากสภาพแวดล้อมหรือปริมาณรถจักรยานยนต์ที่ผ่านเข้าออกพร้อมกันจำนวนมาก ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับการประมวลผลภาพจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการพัฒนาระบบตรวจจับแบบอัตโนมัติ โดยเฉพาะเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ซึ่งสามารถเรียนรู้ลักษณะของวัตถุจากข้อมูลภาพและนำไปใช้จำแนกหรือระบุตำแหน่งวัตถุในภาพได้ งานวิจัยของบุญญากร ท่องมนต์วิทย์ และคณะ [2] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับตรวจจับการสวมใส่หมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิคการเพิ่มข้อมูล ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าจำนวนและความหลากหลายของชุดข้อมูลภาพเป็นปัจจัยสำคัญต่อความแม่นยำของระบบตรวจจับหมวกกันน็อก นอกจากนี้งานวิจัยด้านการตรวจจับอุปกรณ์ป้องกันอันตราย

ส่วนบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึกยังแสดงให้เห็นว่าโมเดลตรวจจับวัตถุสามารถนำไปใช้เฝ้าระวังความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมจริงได้ โดยสามารถตรวจจับอุปกรณ์หลายประเภท เช่น หมวกนิรภัย เสื้อสะท้อนแสง และแว่นตานิรภัย [3]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อัลกอริทึมกลุ่มโยโล (YOLO) ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับงานตรวจจับวัตถุ เนื่องจากสามารถประมวลผลภาพได้รวดเร็วและเหมาะกับงานแบบใกล้เคียงเวลาจริง งานวิจัยที่นำโยโลไปใช้กับงานตรวจจับวัตถุในบริบทต่าง ๆ เช่น การตรวจจับความผิดปกติจากภาพในวิดีโอ [4] การตรวจจับและแบ่งระดับความรุนแรงของแผลกดทับด้วยโยโลวี 8 [5] การตรวจจับใบหน้าจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันด้วยโยโลวี 4 [6] การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับป้ายทะเบียนรถด้วยโยโล ร่วมกับการรู้จำตัวอักษรด้วยแสง [7] และการเปรียบเทียบโมเดลตรวจจับวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในงานภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ [8] งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า โยโล มีความยืดหยุ่นสูง สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งงานด้านความปลอดภัย การคมนาคม การเกษตร อุตสาหกรรม และการแพทย์ อีกทั้งยังมีแนวโน้มให้ผลลัพธ์ที่ดีเมื่อนำไปฝึกด้วยชุดข้อมูลที่เหมาะสม

นอกจากโยโล แพลตฟอร์มสำหรับพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์แบบใช้งานง่าย เช่น ซีราคอร์ (CIRA CORE) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการพัฒนาระบบต้นแบบ เนื่องจากช่วยลดความซับซ้อนของการเขียนโปรแกรมและสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับภาพหรือระบบแสดงผลได้ งานวิจัยเกี่ยวกับระบบตรวจจับบุคคลอันตรายและแนะนำเส้นทางหนีภัยในโรงเรียนด้วยแพลตฟอร์ม ซีราคอร์แสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับการประมวลผลภาพจากกล้องวงจรปิดและการตรวจจับวัตถุในสถานการณ์ด้านความปลอดภัยได้ [9] เช่นเดียวกับการวิจัยด้านการตรวจจับรอยตำหนิบนตัวถังรถยนต์จำลองหลังการพ่นสี ซึ่งมีการเปรียบเทียบระบบตรวจจับวัตถุ รวมถึงซอฟต์แวร์ CIRA และระบบตรวจจับเชิงพาณิชย์อื่น ๆ [10] จึงกล่าวได้ว่า ซีราคอร์มีความเหมาะสมต่อการนำมาพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกในพื้นที่จริง โดยเฉพาะงานวิจัยระดับประยุกต์ที่ต้องการสร้างระบบให้สามารถใช้งานร่วมกับกล้องและอุปกรณ์ควบคุมได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนอุบัติเหตุยังสนับสนุนแนวทางการใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเช่น งานที่พัฒนาระบบตรวจจับและแจ้งเตือนอุบัติเหตุโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ภาพจากกล้องสามารถช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติและสนับสนุนการแจ้งเตือนได้ [11] งานด้านความปลอดภัยในพื้นที่อื่น ๆ เช่น การตรวจจับช้างป่าบุกรุกพื้นที่เกษตรกรรมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน [12] การตรวจจับวัตถุจากภาพถ่ายทางอากาศ [8] ล้วนชี้ให้เห็นว่าการเรียนรู้เชิงลึกสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีสภาพแวดล้อมซับซ้อนและมีความหลากหลายของภาพได้ ขณะเดียวกันงานวิจัยด้านการคัดแยกผักชีฟ้าด้วยเทคนิคโยโล [13] การคัดแยกมะขามหวานด้วยการประมวลผลภาพ [14] และการพัฒนาระบบสาธิตตรวจสอบวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน [15] ยังสะท้อนว่าความแม่นยำของระบบขึ้นอยู่กับการจัดเตรียมภาพ การกำหนดฉลากข้อมูล และการเลือกโมเดลที่เหมาะสม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ ชุดข้อมูลภาพสำหรับฝึกโมเดล อัลกอริทึมหรือแพลตฟอร์มที่ใช้ในการตรวจจับ และสภาพแวดล้อมของการติดตั้งใช้งานจริง งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ โดยใช้ซีราคอร์ร่วมกับกล้องตรวจจับภาพ และทดสอบประสิทธิภาพของระบบจากจำนวนภาพฝึกที่แตกต่างกัน รวมถึงศึกษาผลของมุมกล้องต่อการตรวจจับ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ โดยใช้โปรแกรมซีราคอร์ ร่วมกับการประมวลผลภาพจากกล้องตรวจจับ เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่จักรยานยนต์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบและสร้างระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก

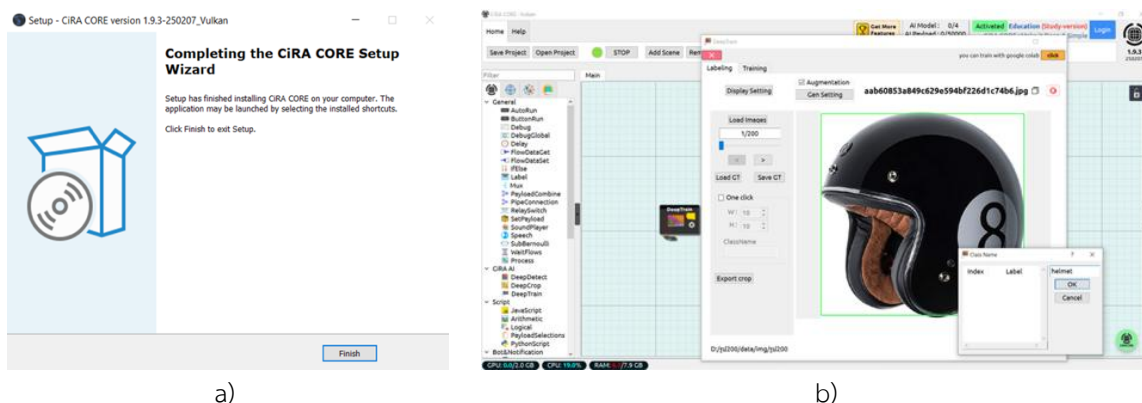
อุปกรณ์ประกอบไปด้วยกล้องเว็บแคมสามารถบันทึกวิดีโอบนคอมพิวเตอร์ กล้องเว็บแคมเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก

2. แพลตฟอร์มชีราคอร์

ชีราคอร์ (CIRA CORE) [16] แสดงดังภาพที่ 2 a) เป็นแพลตฟอร์มสำหรับพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์และระบบประมวลผลภาพที่สามารถสร้างกระบวนการทำงานในรูปแบบบล็อกโค้ด (Block Code) ทำให้ลดความซับซ้อนของการเขียนโปรแกรม และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับภาพ เช่น กล้องเว็บแคมและกล้องไอพีได้ ในงานวิจัยนี้ ชีราคอร์ถูกนำมาใช้ในการสร้างชุดข้อมูล ฝึกโมเดลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และทดสอบโมเดลด้วยการตรวจจับเชิงลึก (Deep Detect) เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์



ภาพที่ 2 แพลตฟอร์มชีราคอร์ a) การติดตั้งโปรแกรม ชีราคอร์ [16] b) การติดตั้งเครื่องมือฝึกการเรียนรู้เชิงลึก

สำหรับการเรียนรู้เชิงลึกเป็นเครื่องมือในโปรแกรม ชีราคอร์ที่ใช้สำหรับฝึกโมเดลปัญญาประดิษฐ์ให้สามารถเรียนรู้และจดจำวัตถุจากชุดข้อมูลภาพ กระบวนการทำงานเริ่มจากการเตรียมภาพชุดข้อมูล (Dataset) หลายมุมมอง จากนั้นนำภาพเข้าสู่โปรแกรมเพื่อทำการป้ายกำกับ (Labeling) โดยตีกรอบบริเวณวัตถุเป้าหมายและกำหนดชื่อวัตถุดังภาพที่ 2 b) เมื่อ

บันทึกข้อมูลฉากภาพแล้วจึงนำไปใช้ในการฝึกโมเดล (Train Model) โดยพิจารณาค่าการเรียนรู้ของโมเดลเช่น ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (Avg Loss) เมื่อโมเดลมีค่าความคลาดเคลื่อนลดลงหรือคงที่ จึงทำการบันทึกโมเดลเพื่อนำไปทดสอบการตรวจจับต่อไป ในงานวิจัยนี้ใช้การเรียนรู้เชิงลึกเพื่อฝึกระบบให้สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากจำนวนภาพฝึก 200, 300, 400 และ 500 รูปภาพ

โยโลวี 3 (You Only Look Once version 3, YOLOv3) [17] เป็นอัลกอริทึมตรวจจับวัตถุด้วยการเรียนรู้เชิงลึกที่สามารถตรวจจับตำแหน่งและจำแนกประเภทของวัตถุภายในภาพจากการประมวลผลเพียงครั้งเดียว จึงเหมาะสมกับงานตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์เช่นในงานตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์และงานเฝ้าระวังความปลอดภัยจากภาพหรือวิดีโอ [18] ในงานวิจัยนี้นำโยโลวี 3 สำเร็จรูปที่ได้รับการฝึกหมวกกันน็อกแล้ว [19] มาใช้เป็นโมเดลเปรียบเทียบกับโมเดลที่ฝึกด้วยโปรแกรมซีราคอร์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก

3. ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3.1 หลังจากดำเนินการออกแบบและสร้างระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกเสร็จสมบูรณ์ ได้ดำเนินการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ โดยติดตั้งกล้องเว็บแคมบริเวณด้านหน้ามหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์สัญจรผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 3

ขั้นตอนที่ 3.2 การเตรียมและปรับชุดข้อมูลภาพ ผู้วิจัยได้เตรียมชุดข้อมูลภาพสำหรับฝึกโมเดลตรวจจับหมวกกันน็อก โดยรวบรวมภาพของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ทั้งกรณีสวมหมวกกันน็อกและไม่สวมหมวกกันน็อก ภาพที่นำมาใช้ประกอบด้วยภาพจากหลายมุมมอง หลายระยะ และหลายสภาพแสง เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะของหมวกกันน็อกได้หลากหลายมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 3.3 การแบ่งข้อมูลและการฝึกโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยนำภาพเข้าสู่โปรแกรมซีราคอร์ เพื่อทำป้ายกำกับข้อมูล (Labeling) ด้วยการตีกรอบบริเวณหมวกกันน็อกและกำหนดชื่อวัตถุเป้าหมายเป็น “helmet” จากนั้นบันทึกข้อมูลป้ายกำกับเป็นไฟล์จีที (GT) เพื่อนำไปใช้ในการฝึกโมเดล โดยแบ่งจำนวนภาพสำหรับฝึกโมเดลออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ 200 300 400 และ 500 รูปภาพ เพื่อให้ระบบสามารถเรียนรู้ลักษณะของหมวกกันน็อกจากชุดข้อมูลภาพที่แตกต่างกัน สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการฝึกโมเดลได้แก่ ขนาดภาพนำเข้า (Width) เท่ากับ 416 พิกเซล ค่าจำนวนภาพที่ระบบใช้ประมวลผลในหนึ่งรอบการอัปเดตค่าน้ำหนักของโมเดล (Batch size) เท่ากับ 64 และค่าชุดย่อยของ Batch size (Subdivisions) เท่ากับ 8 จากนั้นทำการฝึกโมเดลจนค่าเฉลี่ยความผิดพลาด (Avg Loss) ลดลงจนมีแนวโน้มคงที่จึงนำโมเดลเพื่อนำไปทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3.4 เมื่อฝึกโมเดลด้วยการเรียนรู้เชิงลึกเสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้นำโมเดลที่ได้ไปทดสอบการตรวจจับหมวกกันน็อก โดยกำหนดจำนวนการทดลองระบบของแต่ละชุดข้อมูลเป็น 10 ครั้ง โดยใช้เกณฑ์ในการประเมินผลประกอบด้วย ค่าร้อยละของการตรวจพบผู้สวมหมวกกันน็อก ค่าร้อยละของการตรวจจับผิดพลาด และผลการตรวจจับภายใต้มุมมองที่แตกต่างกัน ได้แก่ มุมกล้อง 45 องศา และมุมกล้อง 90 องศา

ขั้นตอนที่ 3.5 นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำโมเดลโยโลวี 3 มาใช้เปรียบเทียบกับโมเดลที่ฝึกด้วยโปรแกรมซีราคอร์ เพื่อพิจารณาความแตกต่างของประสิทธิภาพในการตรวจจับหมวกกันน็อก โดยเลือกติดตั้งกล้องในตำแหน่งที่ให้ผลการตรวจจับเหมาะสม และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบในด้านความแม่นยำและความผิดพลาดของระบบ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการทดลองการตรวจจับหน้ามหาวิทยาลัย

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อกดำเนินการโดยใช้โปรแกรมชีราคอร์ ในการฝึกโมเดลตรวจจับภาพ และเปรียบเทียบผลการตรวจจับจากชุดข้อมูลภาพที่มีจำนวนแตกต่างกัน ได้แก่ 200 300 400 และ 500 รูปภาพ รวมถึงเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 เพื่อพิจารณาความสามารถของระบบในการตรวจจับผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ที่สวมหมวกกันน็อกภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนด

1. การฝึกรูปภาพจำนวน 200 รูป

จากผลการทดสอบโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 200 รูป พบว่าระบบไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ โดยมีค่าการตรวจพบผู้สวมหมวกกันน็อกเฉลี่ยเท่ากับ 0% และเกิดการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ย 54.6% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 8.3 แสดงดังตารางที่ 1 ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่าโมเดลยังไม่สามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของหมวกกันน็อกได้เพียงพอเนื่องจากจำนวนภาพที่ใช้ฝึกมีน้อยเกินไป และอาจยังไม่ครอบคลุมความแตกต่างของรูปทรง สี มุมมอง แสง และสภาพแวดล้อมจริง ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานของ บุญญากร ทองมนต์วิทย์และคณะ [2] ที่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ และชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มข้อมูลภาพมีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับ เนื่องจากช่วยเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลและลดข้อจำกัดจากชุดข้อมูลขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 การฝึก 200 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคน สวมใส่หมวกกันน็อก	ตรวจจับผิดพลาด	มุลกล้อง 45	มุลกล้อง 90
	(เปอร์เซ็นต์)	(เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	0	55	0	0
2	0	57	0	0
3	0	50	0	0
4	0	53	0	0
5	0	56	0	0
6	0	55	0	0
7	0	51	0	0
8	0	54	0	0
9	0	60	0	0
10	0	55	0	0

ตารางที่ 2 การฝึก 300 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคน	ตรวจจับผิดพลาด	มุกกล้อง 45	มุกกล้อง 90
	สวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	(เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	0	51	0	0
2	0	55	0	0
3	0	52	0	0
4	0	50	0	0
5	0	51	0	0
6	0	54	0	0
7	0	54	0	0
8	0	53	0	0
9	0	51	0	0
10	0	51	0	0

2. การฝึกรูปภาพจำนวน 300 รูป

เมื่อเพิ่มจำนวนภาพฝึกเป็น 300 รูป ผลการทดสอบยังคงพบว่าระบบไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ โดยมีค่าการตรวจพบผู้สวมหมวกกันน็อกเฉลี่ย 0% และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ย 52.2% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 2.8 แสดงดังตารางที่ 2 แม้ว่าค่าการตรวจจับผิดพลาดจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการฝึกด้วยภาพ 200 รูป แต่ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง การเพิ่มจำนวนภาพเพียงเล็กน้อยยังไม่สามารถทำให้โมเดลเรียนรู้คุณลักษณะของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะวัตถุที่มีความหลากหลายสูงอย่างหมวกกันน็อก ซึ่งมีทั้งแบบเต็มใบ ครึ่งใบ สีเข้ม สีอ่อน มีลาย หรือมีรูปร่างใกล้เคียงกับเส้นผมและศีรษะของผู้ขับขี่ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของงานวิจัยด้านการตรวจจับอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก [3] ซึ่งระบุว่าระบบตรวจจับอุปกรณ์นิรภัยต้องอาศัยข้อมูลภาพที่หลากหลายและมีการกำหนดฉลากข้อมูลอย่างเหมาะสม เพื่อให้โมเดลสามารถจำแนกวัตถุที่มีลักษณะคล้ายกันได้ดีขึ้น

3. การฝึกรูปภาพจำนวน 400 รูป

ในการฝึกโมเดลด้วยภาพจำนวน 400 รูป ระบบเริ่มสามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ จากตารางที่ 3 ระบบตรวจพบหมวกกันน็อกได้ถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 13.5% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 812.7 และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 62.9% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1259 และมีการตรวจพบด้วยมุกกล้องที่ 45 องศา มีการตรวจพบจำนวน 3 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 16.4% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 702.3 และมุกกล้องที่ 90 องศา มีการตรวจพบจำนวน 2 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 10.2% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 462.6 อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำยังอยู่ในระดับต่ำ จึงยังไม่เหมาะต่อการใช้งานในสถานการณ์จริงที่ต้องการความถูกต้องสูง การที่โมเดลเริ่มตรวจจับได้แต่ยังมีค่าความผิดพลาดสูงอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ภาพฝึกมีมุมมองไม่หลากหลาย ระยะห่างของกล้องไม่เหมาะสม ความละเอียดของภาพไม่เพียงพอ แสงสว่างเปลี่ยนแปลง หรือการติดรอบวัตถุในขั้นตอนการทำป้ายกำกับไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยด้านการตรวจจับวัตถุด้วยโวล เช่น การตรวจจับป้ายทะเบียนรถ [7] และการตรวจจับใบหน้าบุคคลในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน [6] พบว่าแม้โมเดลตรวจจับวัตถุจะมีประสิทธิภาพสูง แต่คุณภาพของภาพ สภาพแวดล้อม และลักษณะของข้อมูลฝึกมีผลโดยตรงต่อความแม่นยำของระบบ

ตารางที่ 3 การฝึก 400 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคน	ตรวจจับผิดพลาด	มุกกล้อง 45	มุกกล้อง 90
	สวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	(เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	0	63	53	0
2	0	86	0	50
3	64	0	0	0
4	0	72	0	0
5	0	82	60	0
6	0	79	0	52
7	0	94	51	0
8	71	0	0	0
9	0	56	0	0
10	0	97	0	0

4. การฝึกรูปภาพจำนวน 500 รูป

สำหรับการฝึกโมเดลด้วยภาพจำนวน 500 รูป พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากตารางที่ 4 ระบบตรวจพบหมวกกันน็อกได้ถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 57.9% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1694.1 และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 18% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 878.9 และมีการตรวจพบด้วยมุกกล้องที่ 45 องศา จำนวน 6 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 40.8% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1319.5 และมุกกล้องที่ 90 องศา จำนวน 4 ครั้งมีความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 25.2% มีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1098.4



a)



b)

ภาพที่ 4 ตรวจจับหมวกกันน็อกที่ การฝึกโมเดลด้วยภาพจำนวน 500 รูป

a) ตรวจจับหมวกกันน็อกบริเวณที่โล่งแจ้ง b) ตรวจจับหมวกกันน็อกในห้องที่มีแสงสว่างคงที่

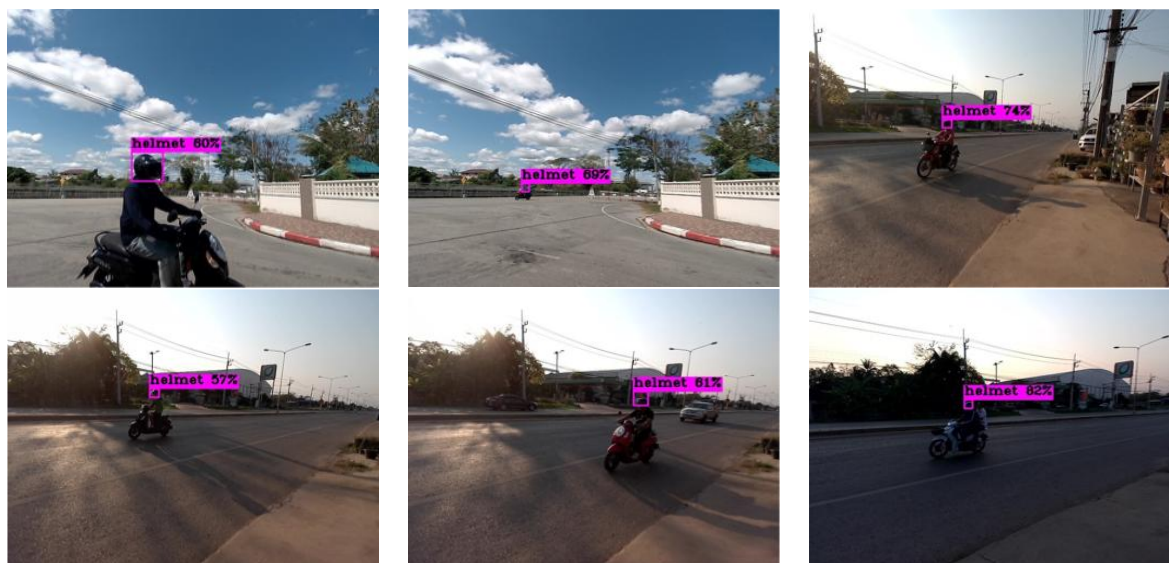
ผลการตรวจจับหมวกกันน็อกแสดงดังภาพที่ 4 การเพิ่มจำนวนภาพฝึกช่วยให้ระบบตรวจจับหมวกกันน็อกได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการฝึกด้วยภาพ 200, 300 และ 400 รูป ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์และคณะ [5] ที่ประยุกต์ใช้โยโล และการเรียนรู้เชิงลึกในการคัดแยกระดับความรุนแรงของแผลกดทับ โดยพบว่าการจัดเตรียมชุดข้อมูลและการเลือกขนาดโมเดลมีผลต่อความแม่นยำในการจำแนกภาพ

ตารางที่ 4 การฝึก 500 รูปภาพ สำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อก

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก			
	ตรวจพบคน	ตรวจจับผิดพลาด	มุกกล้อง 45	มุกกล้อง 90
	สวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	(เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)	องศา (เปอร์เซ็นต์)
1	85	0	0	0
2	96	0	0	65
3	59	0	66	0
4	79	0	0	59
5	88	0	74	51
6	80	0	52	0
7	92	0	80	0
8	0	55	0	77
9	0	75	55	0
10	0	50	81	0

5. ผลการตรวจจับหมวกกันน็อกกับโยโลวี 3

จากผลการทดลองข้างต้นด้านมุกกล้องพบว่า มุกกล้อง 45 องศาให้ผลการตรวจจับดีกว่ามุกกล้อง 90 องศา โดยมุกกล้อง 45 องศาตรวจพบรวม 9 ครั้ง และมีความแม่นยำเฉลี่ย 57.2% ขณะที่มุกกล้อง 90 องศาตรวจพบรวม 6 ครั้ง และมีความแม่นยำเฉลี่ย 35.4% ดังนั้นจึงติดตั้งกล้องที่ตำแหน่ง 45 องศาเพื่อใช้กับโมเดลโยโลวี 3 ผลการตรวจจับแสดงดังรูปที่ 5



ภาพที่ 5 การตรวจจับหมวกกันน็อกกับโยโลวี 3

ตารางที่ 5 ผลการตรวจจับหมวกกันน็อกสำหรับคนสวมใส่หมวกกันน็อกของโยโลวี 3

ครั้งที่ทดสอบ	ผลการตรวจสอบคนสวมใส่หมวกกันน็อก	
	ตรวจพบคน สวมใส่หมวกกันน็อก (เปอร์เซ็นต์)	ตรวจจับผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์)
1	60	0
2	69	0
3	74	0
4	80	0
5	57	0
6	61	0
7	82	0
8	0	100
9	0	100
10	0	100

จากตารางที่ 5 ระบบตรวจพบหมวกกันน็อกกับโมเดลโยโลวี 3 ถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 48.3% และมีการตรวจจับผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 30% เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจจับของโมเดลที่ฝึกด้วยชิราคอร์กับโยโลวี 3 พบว่าโยโลวี 3 มีความแม่นยำต่ำกว่าการฝึกด้วยภาพ 500 รูปเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามโยโลวี 3 มีความสามารถในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กและสถานที่โล่งแจ้งแสงสว่างไม่เพียงพอ ได้ดีกว่าโมเดลที่ฝึกจากชุดข้อมูลเฉพาะขนาดเล็กในชิราคอร์

สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบประสิทธิภาพระบบต้นแบบตรวจจับหมวกกันน็อก โดยใช้โปรแกรมชีราคอร์ ร่วมกับกล้องตรวจจับภาพ เพื่อประมวลผลและตรวจจับการสวมหมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย การเตรียมชุดข้อมูลภาพ การกำหนดตำแหน่งวัตถุด้วยการทำป้ายกำกับ การฝึกโมเดลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก และการทดสอบการตรวจจับด้วยโมเดลที่ผ่านการฝึกจากจำนวนภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ 200, 300, 400 และ 500 รูปภาพ รวมถึงนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 ผลการทดสอบพบว่า จำนวนภาพที่ใช้ในการฝึกโมเดล มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับหมวกกันน็อกอย่างชัดเจน โดยโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 200 และ 300 รูป ยังไม่สามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 400 รูป เริ่มสามารถตรวจจับหมวกกันน็อกได้ โดยมีความแม่นยำเฉลี่ย 13.5% และเมื่อเพิ่มจำนวนภาพฝึกเป็น 500 รูป ระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 57.9% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนภาพฝึกช่วยให้โมเดลเรียนรู้ลักษณะของหมวกกันน็อกได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลโยโลวี 3 พบว่าโยโลวี 3 มีความแม่นยำเฉลี่ย 48.3% น้อยกว่าโมเดลที่ฝึกด้วยภาพจำนวน 500 รูปเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามโยโลวี 3 มีความสามารถในการตรวจจับหมวกกันน็อกได้ดีกว่าในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากนี้ ผลการทดสอบด้านมุกกล้องพบว่า มุกกล้อง 45 องศาให้ผลการตรวจจับดีกว่ามุกกล้อง 90 องศา โดยมุกกล้อง 45 องศาตรวจพบรวม 9 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 57.2% ส่วนมุกกล้อง 90 องศาตรวจพบรวม 6 ครั้ง มีความแม่นยำเฉลี่ย 35.4% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า นอกจากจำนวนภาพที่ใช้ฝึกโมเดลแล้ว มุกกล้องยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของระบบตรวจจับหมวกกันน็อก

แนวทางในการพัฒนาระบบควรเพิ่มจำนวนภาพฝึกโมเดลมากกว่า 500 ภาพ โดยให้ครอบคลุมความหลากหลายของหมวกกันน็อก เช่น สี รูปทรง ขนาด มุมมองของผู้ขับขี่ ระยะห่างจากกล้อง สภาพแสง และฉากหลังที่แตกต่างกัน รวมถึงควรเพิ่มภาพกลุ่มไม่สวมหมวกกันน็อกและภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกับหมวกกันน็อก เพื่อช่วยลดการตรวจจับผิดพลาด ประโยชน์ของงานวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางสามารถเชื่อมต่อระบบแจ้งเตือนผ่านไลน์ จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ หรือระบบบันทึกภาพป้ายทะเบียน เพื่อให้หน่วยงานรักษาความปลอดภัยของมหาวิทยาลัยนำไปเป็นข้อมูลเชิงสถิติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. Road safety [Online]. 2021 [updated 2026; cited 2026 Jun 26]. Available: <https://www.who.int/thailand/our-work/road-safety>
2. บุญญากร ท่องมนต์วิทย์, จิรายุส ดีผาด, เกรียงศักดิ์ เตมีย์. การเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจจับการสวมใส่หมวกกันน็อกของผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ด้วยเทคนิคการเพิ่มข้อมูล. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 2565; 50(2): 93-101. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ/article/view/250302>
3. ตะวัน อันเตปรีก, ชัยพร เขมะภะตะพันธ์. การตรวจจับการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลด้วยการเรียนรู้เชิงลึก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2569; 28(1): 58-69. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/267882
4. ธนาพร จันทักดี, ฐิติรัตน์ ศิริบรรณรัตน์. การเรียนรู้เชิงลึกสำหรับตรวจจับความผิดปกติจากภาพในวิดีโอการเดินสำหรับเด็ก. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2565; 21(2): 1-16. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JASCI/article/view/245319>
5. ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์, ณิช นภาพร จงกะสิกิจ, ปิยธรรณ เร่งเร็ว. การพัฒนากระบวนการคัดแยกภาพถ่ายระดับความรุนแรงของแผลกดทับ ด้วย YOLO และการเรียนรู้เชิงลึก. วิทยสารบูรณาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์. 2567; 17(2): 43-56. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/lttech/article/view/264581>
6. พิศณุ คุ้มชัย. การตรวจจับใบหน้าบุคคลจาก 3 สภาวะแวดล้อมด้วย YOLOv4. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2567; 32(2): 99-114. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/260310>
7. ภาวัต อุดมฐานกุล, ทรงพล นครศรีเรืองศักดิ์. การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับป้ายทะเบียนด้วย YOLO และการรู้จำตัวอักษรด้วยแสง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก. 2567; 4(2): 140-150. <https://doi.org/10.14456/jsci-sbu.2024.19>
8. กิตติกร วิริยะศาสตร์, วรากร เลื่องลือภูมิ, ปิยะรส มาลีเจริญ, สิริภาพ สันติรัตนรงค์, วิชัย แก้วเกษม, พันธุ์เทพ แก้วมงคล, สัญญา มิตรเอน, พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์. การเปรียบเทียบโมเดลตรวจจับวัตถุด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในงานภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. 2567; 6(13): 90-107. <https://sc01.tci-thaijo.org/index.php/dtaj/article/view/240858>
9. นิธิ สหิทธิราช, นนทวัฒน์ วงศ์วาด, สุชนรี ทศนา, มาโนชญ์ แสงศิริ. ระบบตรวจจับบุคคลอันตรายและแนะนำวิธีการหนี ภายในบริเวณโรงเรียนด้วยแพลตฟอร์ม CiRA CORE. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2568; 9(18): 1-9. <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ajsas/article/view/3508>
10. อนันดา สินไชย, ทรงวุฒิ พานิชย์, สุทธิดา ยอดอาษา. การศึกษาประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบของระบบการตรวจจับวัตถุ: กรณีศึกษาการตรวจจับรอยตำหนิบนตัวถังรถยนต์จำลองหลังการพ่นสี. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 2568; 13(1): 65-79. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/fit-ssru/article/view/261262>
11. พรพนม นันทะเสน, พนมขวัญ ธิยะมงคล. ระบบตรวจจับและแจ้งเตือนอุบัติเหตุโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก. Life Sciences and Environment Journal. 2566; 24(2): 338-351. <https://doi.org/10.14456/lsej.2023.26>

12. วสุพล เผือกนำผล, วิชาญ ทุมทอง, ปฏิกม ทองจริง. การพัฒนาระบบเฝ้าระวังช้างป่าบุกรุกในพื้นที่เกษตรกรรม เพื่อลดความขัดแย้งระหว่างคนและช้างด้วยเทคโนโลยีโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน. วารสารศรีปทุม บริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2566; 15(1): 86-100. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/spurst/article/view/247027>
13. วิษุพล หาญทองดี, ภูวิศ ศิริรัตนกุลชัย, ศิรากร องค์ชื่น, สุภาพร บรรดาศักดิ์. การพัฒนาแบบจำลองการตรวจจับพริกชี้ฟ้าสำหรับเครื่องคัดแยก. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์. 2567; 3(2): 25-39. <https://doi.org/10.14456/ksti.2024.13>
14. ปาณิสรา หาดขุนทด, ภัทรพล อาจอาษา, ธนากร แสงกุดเลาะ. การพัฒนาระบบคัดแยกมะขามหวานด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ. วารสารวิทยาสารสนเทศและเทคโนโลยี. 2566; 4(2): 47-61. https://so09.tci-thaijo.org/index.php/jait_ssru/article/view/3036
15. อังวรา ภูมิบุตร, ชลวาล มณีวงศ์, ศศิธร ชูแก้ว, พรชัย กิจเจริญ. การพัฒนาชุดสาคิตการตรวจสอบวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน. Journal of Digital Education and Learning Engineering. 2568; 1(2): 12-23. <https://so18.tci-thaijo.org/index.php/delethailand/article/view/1248>
16. CiRA. CiRA CORE for Windows [Internet]. 2023 [updated 2025; cited 2026 Jun 9]. Available from: <https://git.cira-lab.com/cira/cira-core-windows>
17. Joseph Redmon, Ali Farhadi. YOLOv3: An Incremental Improvement [Internet]. arXiv; 2018 [updated 2028; cited 2026 Jun 9]. Available from: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
18. WEI YANG, GUANG-LE ZHOU, ZHI-WEI GU, XIAO-DAN JIANG, ZHE-MING LU. SAFETY HELMET WEARING DETECTION BASED ON AN IMPROVED YOLOV3 SCHEME. International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 2022; 18(3): 973-988. <http://www.ijicic.org/ijicic-180319.pdf>
19. BlcaKHat. Helmet Detection using YOLOV3 [Internet]. GitHub; 2022 [updated 2022; cited 2026 Jun 9]. Available from: <https://github.com/BlcaKHat/yolov3-Helmet-Detection>