

การพัฒนาแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS TOMATO HARVESTING

ROBOT ARM BY IMAGE PROCESSING

ภูเบศร์ พิพิทธิธการ*, อีรวรรณ สัตตะโส, วิภาพร บุญหล้า และ วีรศักดิ์ วิริยานมชัย

Phubet Phiphithirankarn*, Teerawat Sattaso, Wipaporn Boonla, and

Wirasak Wiriyamchai

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

Electrical Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพ และหาประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลที่สร้างขึ้น งานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การออกแบบและสร้างแขนกล การพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพและคำนวณตำแหน่งของผลมะเขือเทศ การทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล การทดลองเก็บผลมะเขือเทศจำลองบนฉากจำลอง และ การทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง

จากผลการวิจัย พบว่า (1) แขนกลเป็นแบบ SCARA มี 4 องศาอิสระ (PPRR) ประกอบด้วยท่อนแขน ข้อต่อ มือจับ กล้อง และเซนเซอร์อินฟราเรด ใช้สแต็ปมอเตอร์เคลื่อนที่แขนกลในแนวตั้ง แนวราบ และเชิงมุม (2) โปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนควบคุม 9 ส่วน ทุกส่วนทำงานได้อย่างถูกต้องและสามารถส่งตำแหน่งของผลมะเขือเทศไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์โดยไม่มีความผิดพลาด (3) แขนกลสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน y ในทิศทางที่ถูกต้อง มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามแนวแกน $+y$ มากที่สุดคือ $y = 5.00 \%$, $\theta_1 = 3.73 \%$, $\theta_2 = 2.15 \%$ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามแนวแกน $-y$ มากที่สุดคือ $y = 0.00 \%$, $\theta_1 = 3.73 \%$, $\theta_2 = 1.65 \%$ (4) แขนกลสามารถเก็บ

* ผู้ประสานงาน: ภูเบศร์ พิพิทธิธการ

อีเมล: dr.phubet@gmail.com

ผลมะเขือเทศบนฉากจำลองได้ถูกต้องทั้งหมดตามลำดับการตรวจพบ โดยไม่มีความผิดพลาด (5) แขนกลสามารถเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริงได้ถูกต้องทั้งหมดตามลำดับการตรวจพบ โดยไม่มีความผิดพลาด จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้นทำงานได้อย่างถูกต้องมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แขนกล SCARA, แขนกลอัตโนมัติ, การประมวลผลภาพ, การเก็บผลมะเขือเทศ

Abstract

The objective of this research were to design and invent an autonomous tomato harvesting robot arm by image processing, and to determine the efficiency of the robot arm invented. The research was divided into 5 steps: designing and inventing of the robot arm, developing an image processing software and calculating the position of the tomato, an experiment the robot arm movement, an experiment tomato harvesting on a simulated screen, and an experiment tomato harvesting on the real tomato plant.

The results of research found that (1) the robot arm is SCARA with 4 degrees of freedom (PPRR), consisting of links, joints, gripper, cameras and infrared sensor. Using the stepping motors to move the robot arm in vertical, horizontal and angular displacement. (2) The developed image processing software consists of 9 control sections, all sections working correctly and the position of the tomato can be transmitted to the microcontroller without error. (3) The robot arm can move along the y axis in the correct direction, the largest +y axis percentage error was $y = 5.00\%$, $\theta_1 = 3.73\%$, $\theta_2 = 2.15\%$, and the largest -y axis percentage error was $y = 0.00\%$, $\theta_1 = 3.73\%$, $\theta_2 = 1.65\%$. (4) The robot arm can accurately harvest all the tomatoes on the simulated screen in order of detection without error. (5) The robot arm was able to accurately harvest all the tomatoes on the real tomato plant in the order of detection without

error. All the experimental results showed that an autonomous tomato harvesting robot arm by image processing can works accurately and efficiently.

Keywords: SCARA Robot Arm, Autonomous Robots, Image Processing, Tomato Harvesting.

บทนำ

ปัจจุบันรูปแบบการปลูกพืชมีความหลากหลาย การปลูกพืชบนดินด้วยเกษตรกรอินทรีย์ การปลูกพืชแบบไฮโดโปนิคส์ การปลูกพืชแบบอควาโปนิคส์ การปลูกพืชในโรงเรือนอัจฉริยะ เป็นต้น การปลูกพืชดังกล่าวล้วนเป็นการนำเอาเทคโนโลยี นวัตกรรม และองค์ความรู้ทางการเกษตรมาผสมผสานกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ลดต้นทุน เพิ่มผลผลิต และลดการใช้แรงงาน ส่งผลทำให้การเพาะปลูกดำเนินไปอย่างสะดวก รวดเร็ว ตั้งแต่ต้นกระบวนการจนกระทั่งเก็บเกี่ยวและนำผลผลิตออกจำหน่าย

การเก็บเกี่ยวถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการเพาะปลูก หากเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการที่เหมาะสมย่อมทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ สดใหม่ พร้อมออกจำหน่ายได้ทันเวลา ในทางกลับกันหากใช้วิธีการที่ไม่เหมาะสมย่อมทำให้เกิดการเสียหายกับผลผลิตทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ ผลผลิตตกค้าง จำหน่ายไม่ได้ราคา เป็นต้น นอกจากนี้ ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเก็บเกี่ยว คือ การขาดแคลนแรงงานฝีมือ การใช้แรงงานที่ขาดประสบการณ์ย่อมก่อปัญหาต่อการเก็บเกี่ยวโดยตรง เช่น ความล่าช้าในการเก็บเกี่ยว ความเสียหายระหว่างเก็บเกี่ยวเนื่องจากการขาดความชำนาญและความประณีต เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ไม่ตรงกับลักษณะที่ต้องการ และค่าจ้างแรงงานที่สูงไม่สอดคล้องกับประสิทธิภาพการทำงาน ทำให้ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยี นวัตกรรม และระบบอัจฉริยะมาช่วยในการเก็บเกี่ยวเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว เช่น การใช้หุ่นยนต์เก็บเกี่ยวผลผลิต (Xiong et al., 2019), การใช้หุ่นยนต์เก็บเกี่ยวผลผลิตในโรงเรือน (Zhao et al., 2016) และการนำวิธีการประมวลผลภาพมาเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยว (Malik et al., 2018) ทำให้การเก็บเกี่ยวมีความรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น (Afonso et al., 2020) และยังสามารถเลือกลักษณะของผลผลิตที่ต้องการเก็บเกี่ยวได้ (Khoshroo et al., 2014)

จากเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะการพัฒนาแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพที่มีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยว ลดการสูญเสีย และลดปัญหาด้านแรงงานฝีมือ พร้อมกับส่งเสริมให้เกษตรกรไทยนำเทคโนโลยีสมัยใหม่และระบบอัจฉริยะมาช่วยในการเกษตรมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพ
2. หาประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลที่สร้างขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ออกแบบและสร้างแขนกล

ออกแบบแขนกลด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) แขนกลเป็นแบบ SCARA Robot Arm มี 4 องศาอิสระ (PPRR) ประกอบด้วยท่อนแขน 2 ท่อน ข้อต่อ มือจับ สเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนแขนกลในแนวตั้ง (แกน z) สเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนแขนกลในแนวนอน (แกน x) และสเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนแขนท่อนที่ 1 และแขนท่อนที่ 2 แบบเชิงมุม

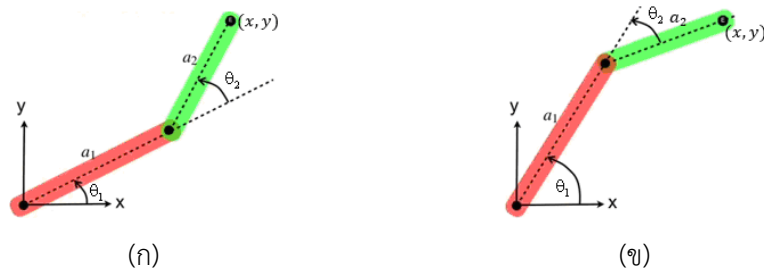
2. พัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพและคำนวณตำแหน่งของผลมะเขือเทศ

พัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก (Microsoft Visual Basic Express Edition) เขียนโปรแกรมตรวจจับผลมะเขือเทศโดยใช้คำสั่งจากไลบรารี Emgu CV ใช้ภาพจากกล้อง 2 ตัว โดยกล้องตัวที่ 1 (กล้องไกล) จับภาพมุมกว้างของผลมะเขือเทศโดยนำภาพที่ปรากฏในโปรแกรม (ตำแหน่งพิกเซล) ไปคำนวณหาตำแหน่งจริงของผลมะเขือเทศ (หน่วยเมตร) กล้องตัวที่ 2 (กล้องใกล้) และเซนเซอร์อินฟราเรด (ติดตั้งอยู่ที่มือจับ) จะตรวจสอบระยะห่างระหว่างมือจับกับผลมะเขือเทศและการเคลื่อนที่ของแขนกลไปยังผลมะเขือเทศนั้น

3. ทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกล

ตำแหน่งของผลมะเขือเทศที่คำนวณได้จากโปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก (x, y, z) จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ผ่านพอร์ตอนุกรม

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำตำแหน่งไปคำนวณหาจำนวนสเต็ปเพื่อควบคุมการหมุนของสเต็ป มอเตอร์แกน x แกน y และแกน z ร่วมกับการป้อนกลับระยะห่างระหว่างมือจับกับผล มะเชื้อเทศที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด เนื่องจากเป็นแขนกลแบบ SCARA ดังนั้น ตำแหน่งในแนวแกน x และ y จะถูกแปลงให้เป็นมุมของแขนท่อนที่ 1 (θ_1) และมุมของ แขนท่อนที่ 2 (θ_2) ดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) การคำนวณหามุม θ_1 และ θ_2 สามารถ คำนวณได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ (Corke, 2017)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งในแนวแกน x แกน y และมุมของแขนกล

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \mp \tan^{-1}\left(\frac{a_2 \sin(\theta_2)}{a_1 + a_2 \cos(\theta_2)}\right) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \pm \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2}\right) \quad (2)$$

เมื่อ a_1 และ a_2 คือ ความยาวของแขนท่อนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (หน่วยเมตร)

4. ทดลองเก็บผลมะเชื้อเทศจำลองบนฉากจำลอง

เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือทั้งระบบ ได้แก่ โปรแกรม ประมวลผลภาพ การคำนวณตำแหน่งของผลมะเชื้อเทศ และการเคลื่อนที่ของแขนกล เพื่อหาข้อผิดพลาดนำไปปรับปรุงแก้ไขก่อนนำไปใช้งานจริง โดยทำการทดลองเก็บผล มะเชื้อเทศบนฉากจำลองขนาด (กว้าง x ยาว) 0.6m x 1.0m โดยการสุ่มติดผลมะเชื้อเทศ บนฉากจำลอง 3 รูปแบบ แบบละ 7 ผล บันทึกตำแหน่งผลมะเชื้อเทศ (พิกเซล) ตำแหน่งที่ ได้จากการคำนวณ (เมตร) มุมของแขนกลทั้ง 2 ท่อน และผลการเก็บผลมะเชื้อเทศ

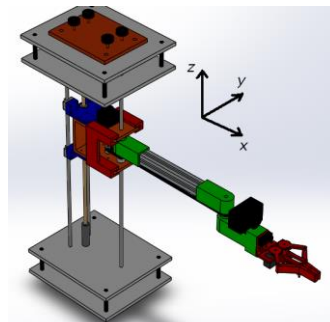
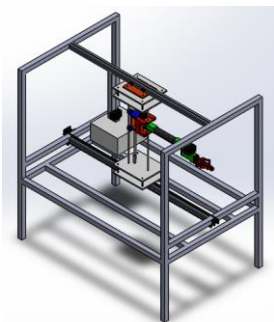
5. ทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง

เป็นการหาประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติ ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ โดยการนำผลมะเขือเทศจำลองจำนวน 7 ผลไปติดยังตำแหน่งต่างๆ บนต้นมะเขือเทศจริง โดยติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม 2 รูปแบบ จากนั้นทำการทดลองและบันทึกผลการเก็บผลมะเขือเทศ พร้อมศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บผลมะเขือเทศ เช่น กิ่ง ก้าน และใบของต้นมะเขือ เพื่อนำไปปรับปรุงวิธีการประมวลผลภาพให้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับผลมะเขือเทศมากขึ้น

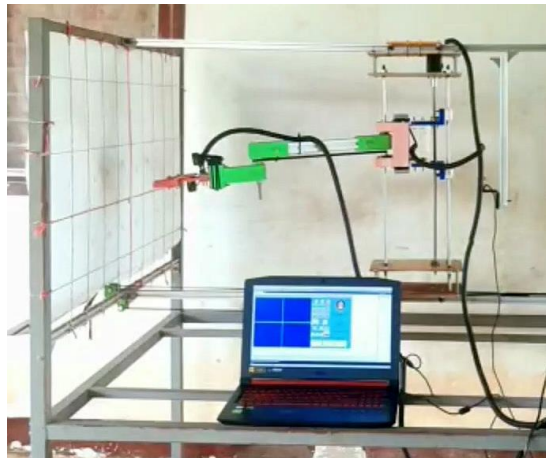
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการออกแบบและสร้างแขนกล

ผลการออกแบบแขนกลด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์คแสดงดังรูปที่ 2 แขนกลเป็นแบบ SCARA Robot Arm มี 4 องศาอิสระ (PPRR) ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) เท่ากับ 0.15m x 0.85m x 0.70m ท่อนแขน (Link) 2 ท่อนสร้างด้วยอลูมิเนียมโปรไฟล์ แขนท่อนที่ 1 ยาว 0.35m แขนท่อนที่ 2 ยาว 0.27m ข้อต่อ (Joint) และมือจับ (Gripper) สร้างด้วยวัสดุเส้นใยพลาสติก (Filament) ฐานแขนกลติดตั้งสเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนให้แขนกลเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (แกน z) และสเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนให้แขนกลเคลื่อนที่ในแนวนอน (แกน x) แขนท่อนที่ 1 (ติดกับฐาน) และแขนท่อนที่ 2 ใช้สเต็ปมอเตอร์ขับเคลื่อนและสายพานให้เคลื่อนที่แบบเชิงมุม โดยแขนแต่ละท่อนเคลื่อนที่ได้ระยะทางเชิงมุมไม่เกิน ± 90 องศาที่แขนกลติดตั้งกล้อง 2 ตัว โดยกล้องตัวที่ 1 (กล้องไกล) ติดตั้งอยู่หลังฐานของแขนกล กล้องตัวที่ 2 (กล้องใกล้) ติดตั้งอยู่ที่แขนท่อนที่ 2 และเซนเซอร์อินฟราเรดติดตั้งอยู่ที่มือจับ แขนกลที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การออกแบบแขนกล SCARA Robot Arm 4 องศาอิสระ (PPRR)



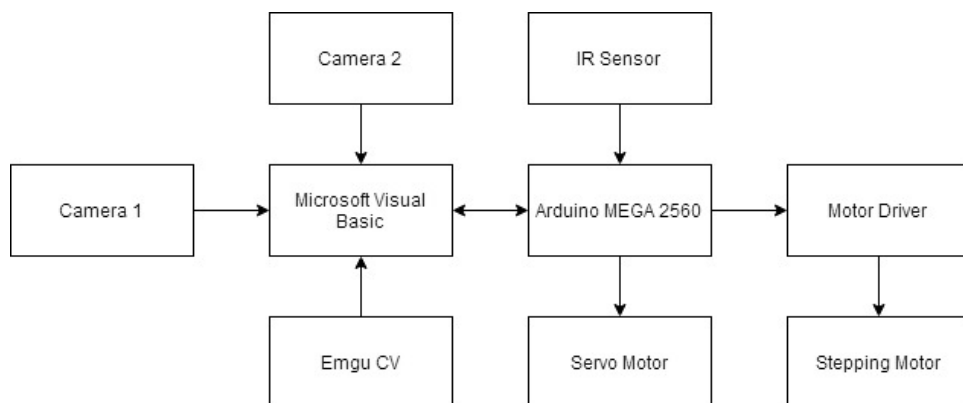
รูปที่ 3 แขนกลเก็บผลมะเขือเทศที่สร้างเสร็จตามที่ได้ออกแบบไว้

2. ผลการพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพและคำนวณตำแหน่งของผลมะเขือเทศ

ผลการพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพด้วยโปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก (Microsoft Visual Basic Express Edition) แสดงดังรูปที่ 4 โปรแกรมประมวลผลภาพ ประกอบด้วยส่วนควบคุมการทำงาน 9 ส่วนคือ (1) ส่วนกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพ (2) ส่วนการควบคุมกล้อง (3) ส่วนควบคุมเคลื่อนที่ของแขนกลและมือจับแบบ Manual (4) ส่วนกำหนดพอร์ตเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (COM Port) และอัตราการส่งข้อมูล (Baud Rate) (5) พิกัดของเมาส์บนหน้าต่างแสดงตำแหน่งของผลมะเขือเทศ (6) ส่วนกำหนดความยาวของแขนกล (x) และระยะยกกล้องตัวที่ 1 ถึงปลายมือจับ (7) โหมดการทำงานของแขนกลและการสั่งงาน (8) ส่วนแสดงจำนวนผลมะเขือเทศที่ตรวจจับได้และระยะห่างจากเซนเซอร์อินฟราเรด ถึงผลมะเขือเทศผลที่กำลังจะเก็บ และ (9) ส่วนแสดงตำแหน่งผลมะเขือเทศที่ตรวจจับได้ (Object Position (Pixel)) ตำแหน่งผลมะเขือเทศที่คำนวณได้ (Object Position (m)) และมุมองศาของแขนกลตอนที่ 1 (θ_1) และตอนที่ 2 (θ_2) โดยทุกส่วนทำงานได้อย่างถูกต้องทุกครั้งโดยไม่มีความผิดพลาด วิธีการตรวจจับและหาตำแหน่งของผลมะเขือเทศด้วยวิธีการประมวลผลภาพแสดงดังรูปที่ 6 ตำแหน่งของผลมะเขือเทศ (y, z) ที่ได้และระยะห่างที่ได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด (x) จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อขับเคลื่อนแขนกลเก็บผลมะเขือเทศต่อไปตามแผนผังการทำงานดังรูปที่ 5

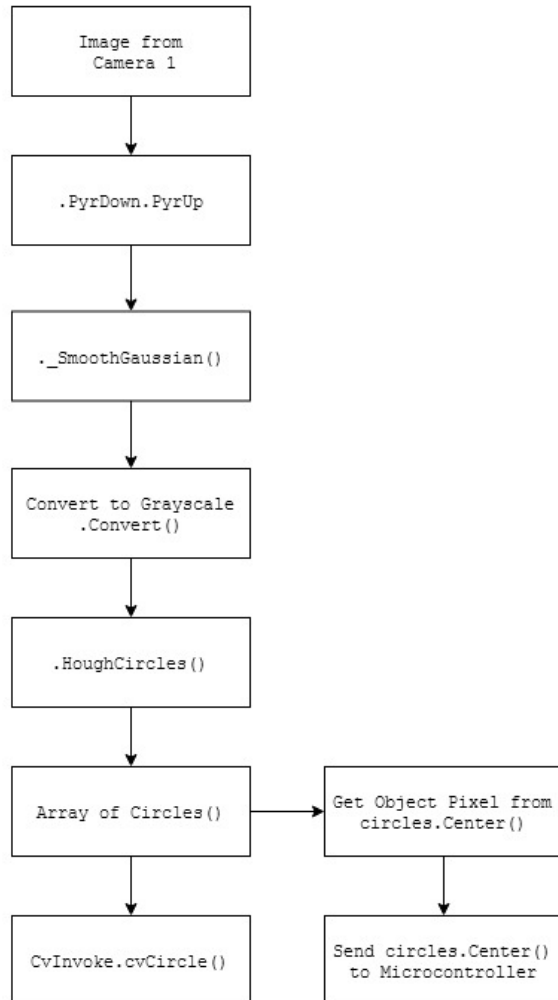


รูปที่ 4 หน้าจอโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานของแขนกลเก็บผลมะเขือเทศแบบอัตโนมัติ

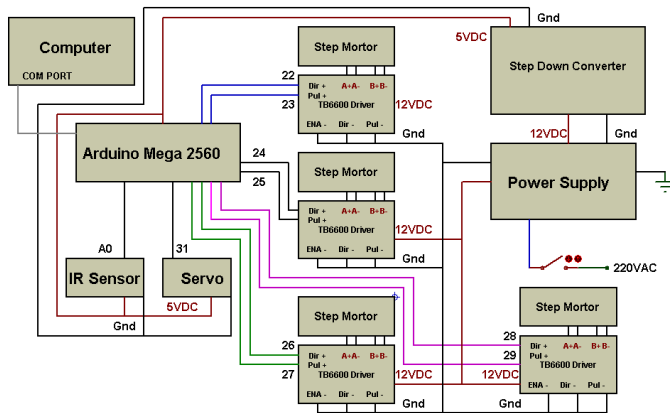
ด้วยวิธีการประมวลผลภาพ



รูปที่ 6 การตรวจจับตำแหน่งของผลมะเขือเทศด้วยวิธีการประมวลผลภาพ

3. ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล

เมื่อโปรแกรมประมวลผลภาพส่งตำแหน่งของผลมะเขือเทศ (x, y, z) มายังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ผ่านพอร์ตอนุกรม ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำตำแหน่งไปคำนวณหาจำนวนสเต็ปเพื่อควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์แกน x แกน y และแกน z ร่วมกับการป้อนกลับระยะห่างระหว่างมือจับกับผลมะเขือเทศที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด โดยมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล

เนื่องจากแขนกลแบบ SCARA ตำแหน่งในแนวแกน x และ y จะถูกแปลงให้เป็นมุมของแขนท่อนที่ 1 (θ_1) และมุมของแขนท่อนที่ 2 (θ_2) ดังสมการที่ (2) และ (1) ตามลำดับ การทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองการเคลื่อนที่ตามแนวแกน $+y$ ($x, +y, z$) และการเคลื่อนที่ตามแนวแกน $-y$ ($x, -y, z$) เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้ โดยกำหนดให้ $x = 0.4 \text{ m}$, $z = 0 \text{ m}$ และเปลี่ยนค่า y จาก $0 - 0.35 \text{ m}$ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ผลทดลองการเคลื่อนที่ตามแนวแกน $+y$ ($0.4, +y, 0$)

ค่าจากการคำนวณ			ค่าจากการวัด			เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด		
y (เมตร)	θ_1 (องศา)	θ_2 (องศา)	y (เมตร)	θ_1 (องศา)	θ_2 (องศา)	y	θ_1	θ_2
0.00	41.55	-100.80	0.00	40	-100	0.00	3.73	0.79
0.05	48.34	-100.20	0.05	48	-100	0.00	0.70	0.19
0.10	54.54	-97.72	0.10	54	-98	0.00	0.99	0.28
0.15	59.90	-93.91	0.15	60	-94	0.00	0.16	0.09
0.20	63.67	-88.61	0.21	63	-87	5.00	1.05	1.81
0.25	66.44	-81.76	0.26	68	-80	4.00	2.34	2.15
0.30	68.01	-73.21	0.31	70	-73	3.33	2.92	0.28
0.35	68.01	-62.56	0.36	70	-62	2.85	2.92	0.89

ตารางที่ 2 ผลทดลองการเคลื่อนที่ตามแนวแกน -y (0.4, -y, 0)

ค่าจากการคำนวณ			ค่าจากการวัด			เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด		
y (เมตร)	θ_1 (องศา)	θ_2 (องศา)	y (เมตร)	θ_1 (องศา)	θ_2 (องศา)	y	θ_1	θ_2
0.00	-41.55	100.80	0.00	-40	100	0.00	3.73	0.79
-0.05	-48.39	100.02	-0.05	-49	100	0.00	1.26	0.19
-0.10	-54.50	97.72	-0.10	-55	98	0.00	0.91	0.28
-0.15	-59.65	93.91	-0.15	-59	94	0.00	1.08	0.09
-0.20	-63.69	88.61	-0.20	-64	88	0.00	0.48	0.68
-0.25	-66.51	81.76	-0.25	-66	83	0.00	0.76	1.51
-0.30	-68.00	73.21	-0.30	-68	72	0.00	0.00	1.65
-0.35	-67.93	62.56	-0.35	-68	63	0.00	0.10	0.70

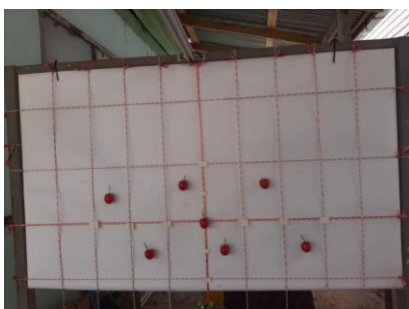
จากผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล พบว่า แขนกลสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน y ($x, \pm y, z$) ในทิศทางที่ถูกต้อง มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามแนวแกน +y มากที่สุด คือ $y = 5.00 \%$, $\theta_1 = 3.73 \%$, $\theta_2 = 2.15 \%$ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามแนวแกน -y มากที่สุด คือ $y = 0.00 \%$, $\theta_1 = 3.73 \%$, $\theta_2 = 1.65 \%$

4. ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศจำลองบนฉากจำลอง

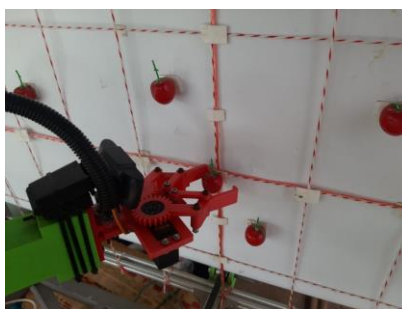
ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลองขนาด (กว้าง x ยาว) 0.6 m x 1.0 m โดยการติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม 3 รูปแบบ ($\pm y, \pm z$) แบบละ 7 ผล ดังรูปที่ 8, 9, และ 10 โดยภาพ (ก) ภาพถ่ายมุมกว้าง (ข) มือจับเก็บผลมะเขือเทศ (ค) ภาพจากกล้องตัวที่ 1 และ (ง) การตรวจจับผลมะเขือเทศ เมื่อกำหนดให้ $x = 0.52$ m แขนกลจะเก็บผลมะเขือเทศตามลำดับการตรวจพบจากการประมวลผลภาพ (ตัวเลขข้างผลมะเขือเทศ) ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศจำลองบนฉากจำลองแสดงดังตารางที่ 3, 4, และ 5

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลองแบบที่ 1

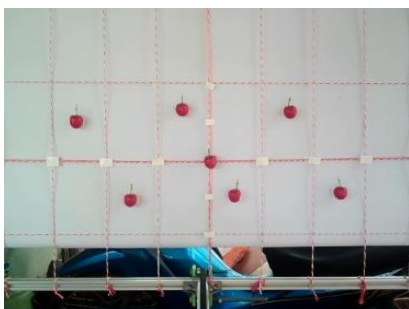
ผลที่	ตำแหน่ง (พิกเซล)		ตำแหน่ง (เมตร)		มุมแขนกล (องศา)		ผลการเก็บมะเขือเทศ
	แนวนอน	แนวตั้ง	y	z	θ_1	θ_2	
1	191	163	0.00	0.00	28.69	-66.62	✓
2	267	109	-0.16	0.09	-41.74	58.26	✓
3	169	106	0.05	0.10	33.42	-65.86	✓
4	71	119	0.25	0.08	44.39	-42.86	✓
5	121	203	0.15	-0.07	-33.42	65.86	✓
6	215	199	-0.05	-0.06	41.27	-59.16	✓
7	313	194	-0.25	-0.05	-44.39	42.86	✓
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด							0 %



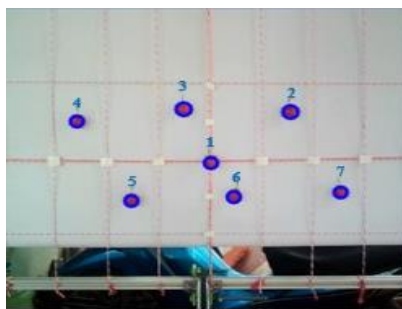
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 8 การติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม แบบที่ 1

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลองแบบที่ 2

ผลที่	ตำแหน่ง (พิกเซล)		ตำแหน่ง (เมตร)		มุมแขนกล (องศา)		ผลการเก็บมะเขือเทศ
	แนวนอน	แนวตั้ง	y	z	θ_1	θ_2	
1	123	117	0.14	0.08	41.02	-59.59	✓
2	311	115	-0.25	0.08	-44.41	43.78	✓
3	189	161	0.01	0.00	29.15	-66.61	✓
4	266	195	-0.15	-0.07	-41.63	58.49	✓
5	71	203	0.25	-0.08	44.39	-42.86	✓
6	69	123	0.26	0.07	44.36	-41.90	✓
7	310	197	-0.25	-0.07	-44.41	44.23	✓
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด							0 %



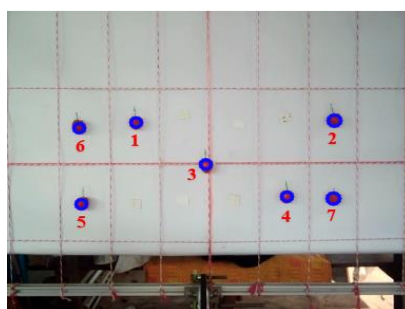
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 9 การติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม แบบที่ 2

ตารางที่ 5 ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลองแบบที่ 3

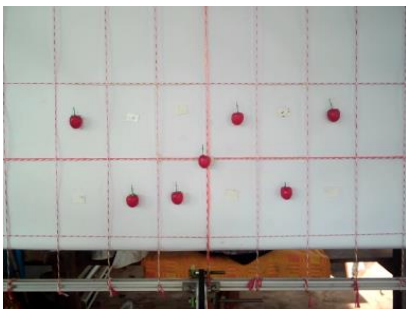
ผลที่	ตำแหน่ง (พิกเซล)		ตำแหน่ง (เมตร)		มุมแขนกล (องศา)		ผลการเก็บ มะเขือเทศ
	แนวนอน	แนวตั้ง	y	z	θ_1	θ_2	
1	164	202	0.06	-0.08	34.40	-65.49	✓
2	122	204	0.15	-0.08	41.15	-59.38	✓
3	68	121	0.26	0.07	44.33	-41.42	✓
4	188	163	0.01	-0.01	29.37	-66.60	✓
5	267	196	-0.16	-0.07	-41.74	58.26	✓
6	219	118	-0.06	0.08	-34.21	65.57	✓
7	312	114	-0.25	0.09	-44.40	43.32	✓
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด							0 %



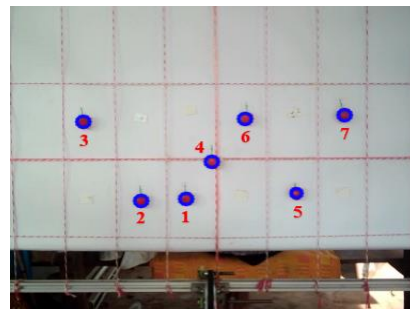
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 10 การติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม แบบที่ 3

จากการทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลอง โดยการติดผลมะเขือเทศแบบสุ่มบนฉากจำลอง 3 รูปแบบ พบว่า แขนกลสามารถเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลองได้ถูกต้องทั้งหมด โดยไม่มีความผิดพลาด

5. ผลการทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง

ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง โดยการติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม 2 รูปแบบ แบบละ 7 ผล ดังรูปที่ 11 และ 12 แขนกลจะเก็บผลมะเขือเทศตามลำดับการตรวจพบ (ตัวเลขข้างผลมะเขือเทศ) ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริงแสดงดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง แบบที่ 1

ผลที่	ตำแหน่ง (พิกเซล)		ตำแหน่ง (เมตร)		มุมแขนกล (องศา)		ผลการเก็บมะเขือเทศ
	แนวนอน	แนวตั้ง	y	z	θ_1	θ_2	
1	256	152	-0.13	0.02	-34.61	48.64	✓
2	75	216	0.24	-0.11	36.16	-28.23	✓
3	323	162	-0.27	0.00	-33.40	16.10	✓
4	92	168	0.21	-0.02	36.87	-37.22	✓
5	318	203	-0.26	-0.08	-34.80	21.37	✓
6	74	153	0.25	0.01	36.06	-27.57	✓
7	277	176	-0.18	-0.03	-36.39	42.90	✓
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด							0 %



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 11 การเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง แบบที่ 1(ก) ภาพถ่ายมุมกว้าง (ข) การตรวจจับผลมะเขือเทศ (ค) มือจับเก็บผลมะเขือเทศ (ง) ภาพจากกล้องตัวที่ 2

ตารางที่ 6 ผลการทดลองเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง แบบที่ 2

ผลที่	ตำแหน่ง (พิกเซล)		ตำแหน่ง (เมตร)		มุมแขนกล (องศา)		ผลการเก็บ มะเขือเทศ
	แนวนอน	แนวตั้ง	y	z	θ_1	θ_2	
1	273	103	-0.17	0.11	-36.14	44.17	✓
2	305	103	-0.24	0.11	36.49	30.69	✓
3	104	165	0.18	-0.01	36.55	-41.88	✓
4	72	218	0.25	-0.11	35.82	-26.19	✓
5	272	140	-0.17	0.04	-36.07	44.47	✓
6	76	155	0.24	0.01	36.26	-28.87	✓
7	329	157	-0.29	0.01	-29.12	3.90	✓
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด							0 %



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 12 การเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง แบบที่ 2

(ก) ภาพถ่ายมุมกว้าง (ข) การตรวจจับผลมะเขือเทศ

(ค) มือจับเก็บผลมะเขือเทศ (ง) ภาพจากกล้องตัวที่ 2

จากผลการทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง โดยการติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม 2 รูปแบบ พบว่า แขนกลสามารถเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริงได้ถูกต้องทั้งหมด โดยไม่มีความผิดพลาด และพบว่า กิ่ง ก้าน และใบของต้นมะเขือ ไม่มีผลกระทบต่อการตรวจจับผลมะเขือเทศด้วยวิธีการประมวลผลภาพและการเก็บผลมะเขือเทศของแขนกล

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแขนกลเก็บผลมะเขือแบบอัตโนมัติด้วยวิธีการประมวลผลภาพ แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างแขนกล ออกแบบแขนกลด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) แขนกลเป็นแบบ SCARA Robot Arm มี 4 องศาอิสระ (PPRR) ประกอบด้วยท่อนแขน 2 ท่อน ข้อต่อ มือจับ ใช้สเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนแขนกลในแนวตั้ง (แกน z) แนวนราบ (แกน x) และเคลื่อนแขนทั้ง 2 ท่อนแบบเชิงมุม แขนกลติดตั้งกล้อง 2 ตัว กล้องตัวที่ 1 จับภาพระยะไกลเพื่อนำไปประมวลผลภาพหาตำแหน่งของผลมะเขือเทศ กล้องตัวที่ 2 และเซนเซอร์อินฟราเรดตรวจวัดระยะห่างระหว่างแขนกล มือจับ และผลมะเขือเทศ

2. การพัฒนาโปรแกรมประมวลผลภาพและคำนวณตำแหน่งของผลมะเขือเทศ โปรแกรมประมวลผลภาพพัฒนาโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก โปรแกรมประมวลผลภาพประกอบด้วยส่วนควบคุม 9 ส่วน โดยที่ทุกส่วนทำงานได้อย่างถูกต้องทุกครั้ง ไม่มีความผิดพลาด วิธีการตรวจจับและคำนวณตำแหน่งของผลมะเขือเทศด้วยวิธีการประมวลผลภาพแสดงดังรูปที่ 6 ตำแหน่งของผลมะเขือเทศ (y, z) และระยะห่างที่ได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด (x) จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์

3. การทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำตำแหน่งของผลมะเขือเทศไปคำนวณหาจำนวนสเต็ปเพื่อควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์แกน x แกน y และแกน z โดยการแปลงตำแหน่งในแนวแกน x และ y ให้เป็นมุมของแขนท่อนที่ 1 (θ_1) และมุมของแขนท่อนที่ 2 (θ_2) ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล พบว่า แขนกลสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน y ($x, \pm y, z$) ในทิศทางที่ถูกต้อง มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามแนวแกน +y มากที่สุด คือ $y = 5.00\%$, $\theta_1 = 3.73\%$, $\theta_2 = 2.15\%$ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดตามแนวแกน -y มากที่สุด คือ $y = 0.00\%$, $\theta_1 = 3.73\%$, $\theta_2 = 1.65\%$

4. การทดลองเก็บผลมะเขือเทศจำลองบนฉากจำลอง จากผลทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลอง โดยการติดผลมะเขือเทศแบบสุ่มบนฉากจำลอง 3 รูปแบบ แบบละ 7 ผล พบว่า แขนกลสามารถเก็บผลมะเขือเทศบนฉากจำลองได้ถูกต้องทั้งหมดตามลำดับการตรวจพบ โดยไม่มีความผิดพลาด

5. การทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง จากผลการทดลองการเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริง โดยการติดผลมะเขือเทศแบบสุ่ม 2 รูปแบบ พบว่า แขนกลสามารถเก็บผลมะเขือเทศบนต้นมะเขือเทศจริงได้ถูกต้องทั้งหมดตามลำดับการตรวจพบ โดยไม่มีความผิดพลาด และพบว่า กิ่ง ก้าน และใบของต้นมะเขือ ไม่มีผลกระทบต่อการตรวจจับผลมะเขือเทศด้วยวิธีการประมวลผลภาพและการเก็บผลมะเขือเทศของแขนกล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องมือวัด และเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- Afonso, M., Fonteijn, H., Fiorentin, F. S., & Lensink, D. (2020). Tomato Fruit Detection and Counting in Greenhouses Using Deep Learning. *Frontiers in Plant Science*, 11. 571299. DOI:10.3389/fpls.2020.571299.
- Corke. (2017). *Inverse Kinematics for a 2-Joint Robot Arm Using Geometry*. Australian Centre for Robotic Vision (ACRV).
- Khoshroo, A., Arefi, A., & Khodaei, J. (2014). Detection of Red Tomato on Plants using Image Processing Techniques. *Agricultural Communications*, 2, 9-15.
- Malik, M. H., Zhang, T., Li, H., Zhang, M., Shabbir, S., & Saeed, A. (2018). Mature Tomato Fruit Detection Algorithm Based on improved HSV and Watershed Algorithm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 431-436.

- Xiong, Y., Peng, C., Grimstad, L., From, P. J., & Isler, V. (2019). Development and field evaluation of a strawberry harvesting robot with a cable-driven gripper. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 392-402.
- Zhao, Y., Gong, L., Liu, C., & Huang, Y. (2016). Dual-arm Robot Design and Testing for Harvesting Tomato in Greenhouse. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 161-165.