หุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบสำหรับแปลงผักยกสูงในโรงเรือนปลูกพืชแบบเกษตรเมือง ด้วยการประมวลผลภาพดัชนีพืชพรรณ

นายณัฐภูมิ สุดแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

FOLIAR FERTILIZER ROBOT FOR RAISED BED GREENHOUSE USING NDVI IMAGE PROCESSING SYSTEM

NUTTAPOOM SUDKAEW

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2021

หุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบสำหรับแปลงผักยกสูงในโรงเรือนปลูกพืชแบบเกษตรเมือง ด้วยการประมวลผลภาพดัชนีพืชพรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)
ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สุรเดช ตัญตรัยรัตน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐภูมิ สุดแก้ว : หุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบสำหรับแปลงผักยกสูงในโรงเรือนปลูกพืชแบบเกษตรเมืองด้วยการประมวลผลภาพดัชนีพืชพรรณ (FOLIAR FERTILIZER ROBOT FOR RAISED BED GREENHOUSE USING NDVI IMAGE PROCESSING SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.สุรเดช ตัญตรัยรัตน์, 150 หน้า.

คำสำคัญ: ปุ๋ยทางใบ/โรงเรือนปลูกพืช/แปลงยกสูง/ดัชนีพืชพรรณ/สุขภาพพืช

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดสอบหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบที่กำหนดปริมาณฉีดพ่นปุ๋ยที่อ้างอิงจากค่าดัชนีพืชพรรณ กลไกการทำงานประยุกต์จากหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน เพื่อเคลื่อนที่โดยทดสอบการทำงานกับต้นผักสลัดกรีนโอ๊คบนแปลงผักยกสูง ขนาด 1 x 6 x 0.25 ม. (ก. x ย. x ส.) ในโรงเรือน ขนาด 10 x 20 x 5 ม. (ก. x ย. x ส.) ผลพบว่า เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในแกน X และ Y ที่ทดสอบในแปลงปลูก เท่ากับ 4.64 และ 3.32 ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับงานฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ ค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณในผักสลัด กรีนโอ๊คที่ให้ปุ๋ยและน้ำปกติในความเข้มแสงต่ำและสูง เท่ากับ 0.577 และ 0.564 ตามลำดับ ในขณะที่ผักสลัดที่งดปุ๋ยและน้ำเป็นเวลา 3 วัน เท่ากับ 0.544 และ 0.546 ตามลำดับ ระยะกล้องที่ 45 ซม.เป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่าดัชนีพืชพรรณค่อนข้างคงที่ ความสูงของหัวฉีดที่ 40 ซม. ให้ปริมาณปุ๋ยน้ำที่เหมาะสม เท่ากับ 4.8 – 9.2 มิลลิลิตรต่อต้น และการฉีดพ่นของปั๊มที่เหมาะสมกับระดับสุขภาพพืชจะกำหนดที่ 0.1, 0.7, 1.4 และ 2.0 วินาที ตามลำดับ โดยได้ปริมาณปุ๋ยที่ฉีดพ่นสอดคล้องตามหลักวิชาการ สมการถดถอยของปริมาณการฉีดพ่นที่ระดับความสูงหัวฉีด 20 เซนติเมตร มีเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำสูงสุดที่ร้อยละ 97.62 และค่าความคลาดเคลื่อน MSE และ MAE เท่ากับ 0.0326 และ 0.1503 ตามลำดับ ความสิ้นเปลืองปุ๋ยเปรียบเทียบจากการใช้หุ่นยนต์ คนใช้เครื่องฉีดพ่นสะพายหลังและระบบให้ปุ๋ยน้ำในโรงเรือน เท่ากับ 0.27, 0.41 และ 1.67 บาท ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ลายมือชื่อนักศึกษา ณัฐภูมิ สุดแก้ว

ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สุรเดช ตัญตรัยรัตน์

NUTTAPOOM SUDKAEW : FOLIAR FERTILIZER ROBOT FOR RAISED BED GREENHOUSE USING NDVI IMAGE PROCESSING SYSTEM. THESIS ADVISOR : SURADET TANTRAIRATN, Ph.D., 150 PP.

FOLIAR FERTILIZER/GREENHOUSE/RAISED BED/NDVI/PLANT HEALTH

This research aims to construct and test a foliar fertilizer robot that determines the volume of fertilizer spraying based on the Vegetation Index (VI). The robot, which was designed to move in a cartesian mechanism, was tested with Green Oak lettuce plants on a raised bed, size of 1 x 6 x 0.25 m (W x L x H) in the greenhouse, size of 10 x 20 x 5 m (W x L x H). The mean percentage error of mechanical movement in the X and Y axes tested on raised bed were 4.64 and 3.32, respectively. The average VI values of fertilized and watered Green Oak lettuces in low and high light intensity were 0.577 and 0.564, respectively. As the result, the lettuces without fertilizer and water for 3 days have decreased to 0.544 and 0.546, respectively. The camera set up in the distance of 45 cm was the most appropriate distance because the VI values were relatively stable. The height of the nozzle at 40 cm shown the appropriate volume of fertilizer solution at 4.8 – 9.2 ml/plant and the optimum spraying time based on plant health level was determined at 0.1, 0.7, 1.4, and 2.0 seconds because spray volume was consistent with the academic principle. The linear regression model from spraying at 20 cm high nozzle shown the highest accuracy at 97.62% and the lowest error with MSE and MAE at 0.0326 and 0.1503, respectively. Fertilizer wastage compared to spraying with the robot and a person with a backpack sprayer and greenhouse fertigation system was 0.27, 0.41, and 1.67, respectively.

School of Mechatronic Engineering   Student's Signature ____________

Academic Year 2021   Advisor's Signature ____________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้ให้คำแนะนำ ปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งเสมอมา ดังนี้

ท่านอาจารย์ ดร.สุรเดช ตัญตรัยรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา ชี้แนะข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย และแนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยความเมตตากรุณาเสมอมา

อาจารย์ ดร.สมพร หงษ์กง สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตพังโคน จังหวัดสกลนคร ที่ช่วยแนะนำและตรวจสอบบทความวิชาการให้โดยเบื้องต้น รวมทั้งสนับสนุนตัวอย่างการวิจัยทางวิศวกรรมเกษตรผ่านผลงานวิจัยเครื่องดำนาขนาดเล็กแบบเดินตามสำหรับปักดำต้นกล้าข้าว เพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้วิจัยอย่างดี

ทีมงานในโครงงานการพัฒนาระบบ Machine Vision เพื่อตรวจจับวัตถุบนเครื่อง Mini CNC ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในโครงการ Robotics Innovation KU 2019 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา อันเป็นที่มาของแนวคิดการออกแบบการทำงานของหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบในเวลาต่อมา

ดร.คมสัน หุตะแพทย์ เลขาธิการ มูลนิธิศูนย์สื่อเพื่อการพัฒนา และบรรณาธิการบริหาร สำนักพิมพ์เกษตรกรรมธรรมชาติ และผู้อำนวยการ ชุมชนนิเวศน์สันติวนา ที่คอยให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่วิจัย ในครั้งนี้

คุณกฤตลักษณ์ วิจิตรกูล และคุณกรชชนก หุตะแพทย์ ที่คอยให้ความร่วมมือสนับสนุนผู้วิจัยตลอดจนสละเวลา แรงกาย แรงใจ ให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ชุมชนนิเวศน์สันติวนา รวมถึงบุคลากรประจำแปลงเกษตรและโรงเรือนปลูกพืช ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู อบรมบ่มนิสัย ให้ความเข้าใจ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และส่งเสริมการศึกษาแก่บุตรเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบผลสำเร็จในชีวิตได้ ขอขอบพระคุณอย่างสูง

ณัฐภูมิ สุดแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2
1.3 ขอบเขตการวิจัย 2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 2
1.5 สถานที่วิจัย 3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 บทนำ 4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) 8
2.4 เอ็นวิเดีย เจ็ทสัน นาโน (Nvidia Jetson Nano) 9
2.5 อาดุยโน (Arduino Board) 12
2.6 ราสเบอรี่พาย (Raspberry Pi) 14
2.6.1 การเก็บข้อมูลของ Raspberry Pi 16
2.6.2 การเชื่อมต่อใช้งาน Raspberry Pi 17
2.6.3 บอร์ด Raspberry Pi 3B 17

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 กล้องสำหรับ Raspberry Pi 18
2.7.1 Web Camera 18
2.7.2 Raspberry Pi Camera Module 19
2.8 หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (Cartesian Robot) 22
2.9 สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor) 23
2.9.1 ประเภทของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ 23
2.9.2 การพันขดลวดของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Coil Wiring Stepping Motor) 24
2.9.3 การควบคุมการหมุนของมอเตอร์สเต็ปปิ้ง (Stepping Motor Rotation) 25
2.10 บอร์ดขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor Driver: TB6600) 26
2.11 ระบบการมองเห็นของเครื่องจักร (Machine Vision System) 27
2.11.1 องค์ประกอบการมองเห็นของเครื่องจักร 27
2.11.2 ระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision System) 29
2.12 การประมวลผลภาพ (Image Processing) 29
2.12.1 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) 30
2.12.2 วิธีการประมวลผลภาพ (Image Processing Methods) 31
2.13 การตรวจสอบโดยใช้สี 34
2.13.1 ปริภูมิสี (Color Space) 34
2.13.2 การแมตชิงสี (Color Matching) 35
2.14 Jetson Inference 38
2.15 DetectNet Object Detection 40
2.16 การให้ปุ๋ยทางใบ (Foliar Fertilization) 41
2.16.1 เทคโนโลยีการฉีดพ่น (Spray application technology) 42
2.16.2 หัวฉีด (Nozzle) 43
2.16.3 ผลการฉีด 44
2.16.4 อันตรกิริยาระหว่างหยดสารละลายกับผิวใบ 44
2.16.5 การเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพ่น 45

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.16.6 วิธีการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบที่ถูกต้อง....45
2.17 ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index)....45
2.18 การใช้งานกล้อง NoIR Camera และกล้อง RGB Camera ในการคำนวณค่า NDVI....47
2.19 การปลูกพืชในแปลงยกสูง (Raised Bed Gardening)....49
2.20 โรงเรือนปลูกพืช (Greenhouse)....51
2.21 เกษตรเมือง (Urban Farming)....51
2.22 การหาความสามารถในการทำงานและอัตราการทำงาน....52
2.23 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อน....53
2.24 การตรวจวัดค่าพิกัดและหาระยะห่างในระบบพิกเซล (Pixel Cooordination)....55

3 วิธีการดำเนินการวิจัย....59
3.1 กล่าวนำ....59
3.2 การออกแบบขั้นตอนการวิจัย....59
3.3 การออกแบบขั้นตอนการสร้าง....61
3.3.1 การศึกษาพื้นที่ในการสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ....61
3.3.2 การออกแบบเพื่อสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ....62
3.3.3 การออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุม....72
3.4 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน....77

4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล....82
4.1 กล่าวนำ....82
4.1.1 การทดสอบความสามารถทั่วไป....82
4.1.2 การทดสอบความแม่นยำของกลไก CNC ของหุ่นยนต์....82
4.1.3 ทดสอบศักยภาพการตรวจจับวัตถุสีเขียว....82
4.1.4 ทดสอบศักยภาพการตรวจจับพืชของ DetectNet Custom Model....82
4.1.5 การทดสอบตรวจวัดค่า NDVI ของชุดตรวจสอบดัชนีพืชพรรณ (VI) กับผักสลัดในแปลงปลูกในโรงเรือน....82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.6 การทดสอบอัตราการฉีดพ่นและความสิ้นเปลืองปุ๋ยทางใบของหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบเปรียบเทียบกับการให้ปุ๋ยทางใบรูปแบบอื่น 83

4.2 การทดสอบความสามารถทั่วไป 84

4.2.1 การทดสอบระยะเวลาการทำงานของกลไก CNC ของหุ่นยนต์ 84

4.2.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนแปลงยกสูง 85

4.2.3 ความสามารถในการทำงานและอัตราการทำงาน (Working Rate, WR) 86

4.2.4 ปริมาณปุ๋ยทางใบที่ปั๊มน้ำสามารถฉีดพ่นได้ตามการหน่วงเวลาที่แตกต่างกัน 87

4.3 การทดสอบความแม่นยำของกลไกคาร์ทีเซียนสำหรับฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ 88

4.4 ทดสอบความสามารถในตรวจจับสีเขียวของพืช (green color object detection) 91

4.5 ทดสอบความสามารถในการตรวจจับพืชโดยใช้ Jetson Inference Custom model 93

4.6 ทดสอบตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณกลุ่มตัวอย่างที่ให้ปุ๋ยและน้ำและความเข้มแสงต่างกัน 95

4.7 ทดสอบการระยะติดตั้งกล้องที่เหมาะสมกับการตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณ 101

4.8 ทดสอบความสิ้นเปลืองสารละลายปุ๋ยทางใบเปรียบเทียบระหว่างการใช้หุ่นยนต์การใช้คนฉีดพ่น และการฉีดพ่นผ่านระบบน้ำโรงเรือน 103

4.9 ปัญหาที่พบ 109

4.10 แนวทางแก้ไข 110

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 111

5.1 สรุปงานวิจัย 111

5.2 ข้อเสนอแนะ 111

รายการอ้างอิง 112

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. รายละเอียดการออกแบบหุ่นยนต์ 116

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. รายละเอียดโปรแกรมควบคุม 120
ภาคผนวก ค. แนวทางการคำนวณค่าเพื่อสั่งการกลไกซีเอ็นซีด้วยระบบ
ประมวลผลภาพ...134
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 142
ประวัติผู้เขียน...150

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติของบอร์ด Nvidia Jetson Nano....11
2.2 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino UNO R3....14
2.3 คุณสมบัติของบอร์ด Raspberry Pi 3 Model B....17
2.4 คุณสมบัติของกล้อง RGB USB camera สำหรับบอร์ด Raspberry Pi....19
2.5 คุณสมบัติของกล้อง NoIR Camera สำหรับบอร์ด Raspberry Pi....21
2.6 คุณสมบัติของ Stepping Motor Driver รุ่น TB6600....26
2.7 โมเดลสำเร็จรูปที่มีให้เลือกใช้งานใน Jetson-Inference....39
4.1 ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ (ไป-กลับ) ของกลไกซีเอ็นซีไปยังพิกัดอ้างอิง....85
4.2 การทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนแปลงยกสูง....86
4.3 ความสามารถและอัตราการทำงานของหุ่นยนต์....86
4.4 อัตราการฉีดพ่นสารละลายปุ๋ยทางใบของปั๊มน้ำที่ติดตั้งกับหุ่นยนต์....87
4.5 Percentage error from potted vegetables test in laboratory....89
4.6 Percentage error from raised beds test in greenhouse....90
4.7 การทดสอบความสามารถในการตรวจจับสีเขียวของผักสลัดกรีนโอ๊คที่แปลงปลูก ในโรงเรือน....92
4.8 ผลการทดสอบตรวจจับต้นผักกรีนโอ๊คด้วย Custom DetectNet Model....95
4.9 The NDVI values of green oak vegetables were measured from raised bed in greenhouses according to the constant change in natural light brightness....98
4.10 NDVI test results of 6 green oak plants at different distances from the camera to the plants....102
4.11 Measuring the volume of liquid fertilizer by spraying at three different heights from the nozzle....105
4.12 The spraying time required for the pump to run is based on the highest and lowest NDVI values measured....106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.13 The linear regression model for prediction the volume of foliar fertilizer in any water pump running rate 107
4.14 The results of the test for finding the wastage of liquid fertilizer from spraying per 1 square meter by different method 109

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 Machine and program show Image processor of sugar cane 5
2.2 Image segmentation systems and diagram of variable rate fertilizer sprayer 5
2.3 Vineyard spraying with a human operated tractor-sprayer and selecting target 6
2.4 Developed Autonomous Pesticide Sprayer and System Overview 7
2.5 Imaging systems of Ncams and hyperspectral camera 7
2.6 UAV-based Agrochemical spraying 8
2.7 ลักษณะทางกายภาพของบอร์ด Nvidia Jetson Nano 10
2.8 รายละเอียดส่วนประกอบของบอร์ด Nvidia Jetson Nano 10
2.9 รายละเอียดเชื่อมต่อของบอร์ด Nvidia Jetson Nano 11
2.10 บอร์ด Arduino UNO R3 12
2.11 การเชื่อมต่อบอร์ด Arduino UNO R3 เพื่อใช้งาน 13
2.12 บอร์ด Raspberry Pi 15
2.13 ส่วนประกอบบนบอร์ด Raspberry Pi 16
2.14 กล้อง RGB USB camera สำหรับบอร์ด Raspberry Pi 19
2.15 Raspberry Pi camera ที่เชื่อมต่อกับช่อง CSI 20
2.16 กล้องที่บันทึกภาพในความมืดสำหรับบอร์ด Raspberry Pi 20
2.17 กล้อง NoIR camera และฟิลเตอร์สีน้ำเงินสำหรับถ่ายภาพอินฟาเรด 21
2.18 โครงสร้างโดยทั่วไปของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน 22
2.19 สเต็ปปิ้งมอเตอร์รูปแบบต่าง ๆ ในท้องตลาด 23
2.20 โครงสร้างของสเต็ปปิ้งมอเตอร์และการทำงาน 24
2.21 การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบต่าง ๆ 26
2.22 การเชื่อมต่อเพื่อใช้งานบอร์ด TB6600 27
2.23 การจัดวางกล้องเพื่อการตรวจสอบในตำแหน่งที่ต่างกัน 28
2.24 ลักษณะของการประมวลผลภาพแบบจุด 30

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.25 ลักษณะของการประมวลผลภาพเฉพาะบริเวณ 31
2.26 การกำหนดค่าเทรชโฮลด์จากฮีสโทแกรม 32
2.27 ค่าระดับความเข้มเทาของภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด 33
2.28 แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียมที่แสดงเซลล์ประสาท....34
2.29 ลักษณะของปริภูมิสีแบบต่าง ๆ ที่ให้เลือกประยุกต์ใช้....35
2.30 สเปกตรัมของสีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน....35
2.31 แบบจำลองสีแบบ HSV ที่นิยมใช้ในการตรวจจับสีวัตถุ....37
2.32 การใช้โปรแกรม Paint บน Windows เพื่อตรวจสอบค่าสีในปริภูมิ HSV 38
2.33 ลักษณะของ Data Training ใน Jetson-Inference ที่นำมาใช้งาน....39
2.34 ชุดโปรแกรมสำเร็จรูปของ Jetson-Inference 39
2.35 ลักษณะการประมวลผลของ DetectNet....40
2.36 การใช้ DetectNet ในงาน Object Detection 41
2.37 ขั้นตอนแพร่ การดูดและใช้ธาตุอาหารและสารทางใบ....41
2.38 การให้ปุ๋ยทางใบในโรงเรือนปลูกพืชโดยใช้เครื่องฉีดพ่นแบบสะพายหลัง 42
2.39 การดูดซึมปุ๋ยทางใบของพืช....43
2.40 หัวฉีดพ่นรูปแบบต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด 43
2.41 การจำแนกหัวฉีดตามรูปแบบการกระจายของหยดน้ำ 44
2.42 มุมของสเปรย์ที่ออกมาจากหัวฉีด....44
2.43 การวัดค่าดัชนีพืชพรรณโดยอาศัยการวัดช่วงคลื่น 46
2.44 การสะท้อนของคลื่นแสงที่ต่างกันของพืชสดและพืชแห้ง....47
2.45 ค่า NDVI โดยพื้นฐานจากการตรวจวัดพืชที่มีสุขภาพต่างกัน 47
2.46 NoIR and RGB Camera process of receiving light wavelength....49
2.47 ลักษณะแปลงผักยกสูงที่มีการติดตั้งในโรงเรือนเพื่อปลูกพืช 50
2.48 โรงเรือนปลูกพืชรูปแบบต่าง ๆ ที่มีการใช้งานในประเทศไทย....51
2.49 ลักษณะของการทำเกษตรในเมือง....52
2.50 การแสดงผลของภาพในระบบพิกเซล....55
2.51 การตรวจวัดพิกัดพิกเซลในตำแหน่งต่าง ๆ ของภาพ 56

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.52 การหาระยะห่างของวัตถุในแบบยูคลิดและแมนฮัตตัน (1) 57
2.53 การหาระยะห่างของวัตถุในแบบยูคลิดและแมนฮัตตัน (2) 58
3.1 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย 59
3.2 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย (ต่อ) 60
3.3 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย (ต่อ) 60
3.4 โรงเรือนปลูกพืชในพื้นที่ชุมชนเกษตรนิเวศสันติวนาที่ได้รับการสนับสนุนโดย สวทช. 61
3.5 ระบบน้ำที่ให้น้ำพร้อมกับปุ๋ยน้ำแก่พืชในโรงเรือนและการฉีดพ่นน้ำและปุ๋ยผ่านท่อพีอี 62
3.6 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์โดยเบื้องต้นและแบบที่สมบูรณ์ที่ใช้บนแปลงผักยกสูง 62
3.7 โครงสร้างของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งเพื่อเคลื่อนที่บนแปลงปลูก 63
3.8 โครงสร้างเครื่องซีเอ็นซีของ WorKBee และการใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์มาขยายขนาด 64
3.9 โครงสร้างซีเอ็นซีที่มีการขยายขนาดและติดล้อให้เหมาะสมกับใช้ในแปลงปลูกพืช 64
3.10 กลไกการฉีดพ่นปุ๋ยที่ติดตั้งในโครงสร้างของเครื่อง 65
3.11 อุปกรณ์ควบคุมที่มีกล่องควบคุมรองรับที่ด้านหลังของเครื่อง 66
3.12 อุปกรณ์สำหรับชาร์จไฟฟ้าและผลิตไฟฟ้าเพื่อเลี้ยงระบบ 66
3.13 แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 20 แอมป์ จำนวน 4 ลูก ต่อแบบผสม 67
3.14 อุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมสำหรับการหุ่นยนต์ 68
3.15 การเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า 68
3.16 การเชื่อมต่อวงจรรชุดระหว่างบอร์ด Nvidia Jetson Nano และบอร์ด
Arduino UNO R3 69
3.17 การเชื่อมต่อวงจรของบอร์ด Arduino UNO R3 และวงจรควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์ 70
3.18 การเชื่อมต่อวงจรของชุดบอร์ด Raspberry Pi ตรวจวัดค่า NDVI และฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ 70
3.19 ตู้ควบคุมที่แยกกันระหว่างบอร์ด Nvidia บอร์ด Arduino และบอร์ด
Raspberry Pi 71
3.20 การประกอบเข้าด้วยกันของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงสร้างหุ่นยนต์ 71
3.21 การเชื่อมโยงกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เพื่อควบคุมการทำงาน 72
3.22 ชุดคำสั่งและการแสดงผลจากการประมวลผลภาพเพื่อกำหนดพิกัดวัตถุในภาพ 73
3.23 ชุดคำสั่งและการแสดงผลในการตรวจจับวัตถุจากการกำหนดค่าสี 73

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.24 ชุดคำสั่งและการแสดงผลการตรวจจับวัตถุที่ผ่านการ Training ของ Jetson-Inference 74
3.25 การใช้โปรแกรม Arduino IDE บนระบบปฏิบัติการ Ubuntu ของ Nvidia Jetson Nano 74
3.26 การเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดค่า NDVI จากกล้อง NoIR และ RGB 75
3.27 แผนผังของระบบการทำงานของหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ 76
3.28 การศึกษาโรงเรือนและแปลงปลูกแบบยกสูงเพื่อออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ 77
3.29 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์เบื้องต้นและแบบที่ใช้จริง 77
3.30 การออกแบบการวางอุปกรณ์ในระบบโดยเบื้องต้น 78
3.31 การประกอบโครงสร้างและติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อเตรียมทดสอบระบบ 78
3.32 การเขียนโปรแกรมควบคุมที่แยกส่วนไปตามบอร์ดควบคุม 79
3.33 การทดสอบระบบโดยเบื้องต้นในห้องทดลอง 79
3.34 ถอดชิ้นส่วนที่ประกอบในห้องทดลองเพื่อขนส่งไปยังพื้นที่วิจัย 80
3.35 ประกอบและติดตั้งเพื่อใช้งานจริงในพื้นที่โรงเรือนของชุมชนนิเวศน์สันติวนา 80
3.36 ทำการทดสอบหุ่นยนต์ที่ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์แล้วเพื่อเก็บข้อมูลวิจัย 81
3.37 ประมวลผลข้อมูลวิจัยด้วยโปรแกรม Minitab 81
4.1 การใช้ Chessboard กำหนดพิกัดอ้างอิงเพื่อทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ 84
4.2 หน้าจอแสดงผลที่ใช้เลือกพิกัดต้นพืชผ่าน Mouse & Keyboard 88
4.3 Experiment on motion error of cartesian mechanism 89
4.4 Average percentage error value from laboratory testing 90
4.5 Average percentage error value from field testing 91
4.6 การประยุกต์ตรวจจับสีเขียวของพืชเพื่อระบุขนาดและจุดกึ่งกลาง (Centroid) 92
4.7 ทดสอบความสามารถในการ Object Detection ผักกรีนโอ๊คในห้องทดลอง และที่แปลงปลูก 93
4.8 การแสดงผล Object Detection ผักกรีนโอ๊คที่ตรวจจับได้ 94
4.9 NDVI measurement of green oak lettuce at different light intensity 97
4.10 NDVI values measuring green oak vegetables with different planting factor 99

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 NDVI value measuring Green Oak lettuces with fertilizer and water as usual........99
4.12 NDVI value measuring Green Oak lettuces without fertilizer and water for 3 days........100
4.13 NDVI measurements with cameras at different distances from plants........101
4.14 Results of NDVI measurements with cameras at different distances from plants........103
4.15 Measuring the wastage of foliar fertilizer from different methods of irrigation........105
4.16 Measuring the volumes of foliar fertilizer with different spraying time of water pump in foliar fertilizer robot system........106
4.17 Graph of Linear Regression Model for prediction foliar fertilizer spraying volume........108
ก.1 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านหน้า)........117
ก.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (มุมเอียง)........117
ก.3 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านบน)........118
ก.4 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านหลัง)........118
ก.5 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านข้าง)........119
ก.6 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบกับแปลงปลูกพืชแบบยกสูง........119
ค.1 โปรแกรมสำหรับคำนวณค่า Step per mm ของกลไกซีเอ็นซี........135
ค.2 ขั้นตอนการใช้ Chessboard เพื่อหาค่าสั่งการกลไกซีเอ็นซีต่อระยะทาง........136
ค.3 การใช้เลเซอร์นำวิถีอ้างอิงพิกัดบนแผ่น Chessboard เพื่อตรวจสอบค่าระยะทางการเคลื่อนที่........137
ค.4 การกำหนดพิกัดอ้างอิงบน Chessboard เพื่อคำนวณค่าพิกเซลต่อเซนติเมตรและตรวจวัดความคลาดเคลื่อนโดยเบื้องต้นเพื่อการปรับเปลี่ยนค่าให้เที่ยงตรงเพิ่มขึ้น........137

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ค.5 ชุดคำสั่งในโปรแกรมสำหรับเปลี่ยนค่าพิกัด XY ระบบ Pixel บนบอร์ด Nvidia Jetson Nano เป็นค่า Step/Pulse เพื่อส่งไปให้บอร์ด Arduino สั่งให้กลไกซีเอ็นซีเคลื่อนที่ 139

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

การให้ปุ๋ยทางใบ (Foliar Fertilizer) เป็นเทคนิควิธีในการปลูกพืชที่มีประโยชน์ การให้ปุ๋ยทางใบเป็นการให้สารอาหารแก่พืชที่ดีกว่าวิธีอื่น ซึ่งจะช่วยเพิ่มทั้งผลผลิตและคุณภาพของพืชได้เป็นอย่างดี (Haytova, 2013) การให้ปุ๋ยผ่านระบบน้ำ (Fertigation) ที่ฉีดพ่นโดยทั่วทั้งโรงเรือนปลูกพืช (Greenhouse) เป็นที่รับรู้ว่าประหยัดทั้งปุ๋ยและแรงงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Jawaharlal and Ganesh, 2020) แต่ทั้งนี้ ละอองปุ๋ยทางใบที่นำมาฉีดพ่นบางส่วนฟุ้งออกนอกเป้าหมาย (spray drift) เช่น ถูกลมพัดออกไป บางส่วนระเหยแห้งก่อนถึงผิวใบ (Schampheleirea, et al., 2008) ในขณะที่ปุ๋ยทางใบมีราคาต่อหน่วยน้ำหนักสูงกว่าปุ๋ยทางดิน จึงควรใช้ด้วยวิธีที่ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลคุ้มค่า การฉีดพ่นให้ละอองอัดพุ่งไปกระแทกพื้นผิวของเป้าหมายโดยใช้หัวฉีดและแรงดันที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ประสิทธิภาพของการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบสูงสุด เนื่องจากตรงเป้าหมายปุ๋ยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในปริมาณที่เหมาะสม และลดการสูญเสียปุ๋ยจากการที่ละอองถูกพัดพาออกนอกทิศทาง (ยงยุทธ, 2557) ซึ่งการพัฒนาระบบ Smart Spray ต้องประเมินการฉีดพ่นปุ๋ยโดยอาศัยข้อมูลที่ตรวจวัดจากพิกัดเป้าหมาย โดยประยุกต์เทคนิคหลากหลาย เช่น การมองเห็นของเครื่องจักร (Machine Vision) การสะท้อนของคลื่นแสง (Spectral Reflectance) การสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) เป็นต้น (Song, et al., 2015)

แนวคิดสำคัญที่ถูกกล่าวถึงมากที่สุดในช่วงเวลานี้ คือ เกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture) และอีกแนวคิดหนึ่งที่มักนำมาเชื่อมโยง คือ เกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) ซึ่งเป็นแนวคิดการจัดการเกษตรที่ทำให้เห็นความแตกต่างชัดเจนกับการทำเกษตรแบบดั้งเดิม (สิริวัฒน์, 2562) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาหุ่นยนต์ที่ทำงานอัตโนมัติ (Autonomous Robots) ในแปลงเกษตรให้ได้อย่างเหมาะสมเป็นเรื่องที่ท้าทาย (Adamides, et al., 2014) งานวิจัยนี้จึงพัฒนาหุ่นยนต์สำหรับฉีดพ่นเคลื่อนที่ได้ (Mobile Spray Robot) ที่มีกลไกการทำงานเป็นเส้นตรงแบบ Cartesian Robot ให้ทำหน้าที่ฉีดพ่นปุ๋ยทางใบอย่างเฉพาะเจาะจง ผู้วิจัยได้นำระบบการมองเห็นของเครื่องจักร (Machine Vision System) มาใช้ประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อตรวจจับวัตถุ (Object Detection) และระบุตำแหน่งในระบบภาพ (Pixel Coordinates System) ของพืชในแปลงปลูก เพื่อนำค่าไปสั่งการกลไกให้เคลื่อนที่ไปยังพืชที่ต้องฉีดพ่นปุ๋ยรวมทั้งบันทึกภาพจากกล้อง NoIR Camera ร่วมกับ RGB Camera เพื่อนำไปคำนวณหาค่า ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index :VI) ที่จะใช้กำหนดปริมาณปุ๋ยทางใบอย่างเหมาะสมกับสุขภาพพืช (Plant Health) ที่คำนวณด้วยวิธี Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบที่ทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ บนแปลงผักยกสูงในโรงเรือนปลูกพืชโดยประยุกต์ใช้กลไกหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน

1.2.2 เพื่อทดสอบความแม่นยำของกลไกเคลื่อนที่สำหรับฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ โดยผู้ควบคุมเลือกพิกัดต้นผักที่ต้องการฉีดพ่นผ่านจอแสดงผลด้วยทคนิคประมวลผลภาพ

1.2.3 เพื่อทดสอบการตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณของต้นผักในแปลงปลูก สำหรับกำหนดปริมาณฉีดพ่นปุ๋ยทางใบจากสุขภาพพืชที่อ้างอิงจากค่าดัชนีพืชพรรณ

1.2.4 เพื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองปุ๋ยทางใบที่ใช้หุ่นยนต์ฉีดพ่นกับการให้ปุ๋ยทางใบด้วยวิธีอื่น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้บนแปลงผักยกสูงขนาด 100 x 800 x 30 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง)

1.3.2 ประมวลผลภาพเพื่อตรวจและเลือกพิกัดพืชที่เป็นเป้าหมายในการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบโดยใช้บอร์ด Nvidia Jetson + Arduino

1.3.3 ตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณที่ประเมินสุขภาพพืชเพื่อนำไปกำหนดปริมาณการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบที่เหมาะสมโดยใช้บอร์ด Raspberry Pi และ NoIR Camera ร่วมกับ RGB Camera

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของกลไกแบบ Linear Motion ของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนและการประยุกต์ใช้ Machine Vision แบบ 2 มิติ เพื่อสั่งการกลไก

1.4.3 ศึกษาและวิเคราะห์วิธีการตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณด้วยวิธี Normalize Different Vegetation Index ด้วยกล้อง No Infrared (NoIR) และกล้อง RGB ร่วมกัน

1.4.4 สำรวจและตรวจวัดขนาดของแปลงปลูกผักและโรงเรือนปลูกพืชเพื่อนำไปออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์

1.4.5 ออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้บนแปลงผักยกสูงและทำงานในโรงเรือนปลูกพืชได้

1.4.6 ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์และโปรแกรมควบคุมบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4.7 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่เหมาะสมและดำเนินการสร้างในห้องทดลองเพื่อทดสอบก่อนนำไปทดสอบในโรงเรือน

1.4.8 ทดสอบในห้องทดลองเพื่อปรับปรุงแก้ไขจึงนำไปทดสอบในโรงเรือนปลูกพืช

1.4.9 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลที่ได้จากการวิจัย

1.4.10 เขียนบทความวิจัยและรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 ชุมชนนิเวศน์สันติวนา (Santi Wana Eco Community) มูลนิธิศูนย์สื่อเพื่อการพัฒนา

1.5.2 โรงเรือนปลูกพืชสนับสนุนโดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้เรียนรู้วิธีการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ฉีดพ่นปุ๋ยทางใบแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับประยุกต์ใช้งานกับแปลงปลูกผักแบบยกสูงในโรงเรือนปลูกพืช

1.6.2 ได้เรียนรู้วิธีการเขียนโปรแกรมสำหรับประมวลผลภาพสำหรับตรวจจับพิกัดพืชและสั่งการกลไก CNC รวมทั้งตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณเพื่อกำหนดอัตราฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ

1.6.3 ได้ต้นแบบหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบแบบเคลื่อนที่ได้เพื่อนำไปพัฒนาต่อยอด

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 1 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 เป็นการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยผลจากการสำรวจสืบค้นจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอขั้นตอนการวิจัย ขั้นตอนการออกแบบ การศึกษาข้อมูลโครงสร้างก่อนการทดลอง และขั้นตอนการปฏิบัติงานในการสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบสำหรับแปลงยกสูงในโรงเรือนปลูกพืชแบบเกษตรเมืองด้วยการประมวลผลภาพดัชนีพืชพรรณ

บทที่ 4 เป็นการศึกษาความสามารถและทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์ในเรื่องความแม่นยำในการเคลื่อนที่ไปยังพิกัดต้นพืช ทดสอบความสามารถในการตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณเพื่อกำหนดอัตราฉีดพ่นปุ๋ยที่อ้างอิงสุขภาพพืช ทดสอบความสิ้นเปลืองในการฉีดพ่นปุ๋ยของหุ่นยนต์

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะของการสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบสำหรับแปลงยกสูงในโรงเรือนปลูกพืชแบบเกษตรเมืองด้วยการประมวลผลภาพดัชนีพืชพรรณ

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Foliar Fertilizer Robot ที่นำค่าดัชนีพืชพรรณมาชี้วัดสุขภาพพืชและอ้างอิงเพื่อกำหนดอัตราการฉีดพ่นสารละลายปุ๋ยทางใบนั้น พบว่า มีงานวิจัยที่ใกล้เคียงกันอยู่จำนวนหนึ่ง โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยในประเด็นต่าง ๆ คือ (1) การพัฒนารูปแบบ Mobile Sprayer Robot (2) การตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณด้วยวิธีการ NDVI เพื่อนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้จัดการพืชในแปลงปลูก ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยเหล่านี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ โดยมีวัตถุประสงค์ให้สามารถเป็นต้นแบบของหุ่นยนต์สำหรับใช้งานฉีดพ่นปุ๋ยทางใบในโรงเรือนปลูกพืชที่ช่วยให้เกิดการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบได้ในปริมาณที่เหมาะสมและลดต้นทุนค่าปุ๋ยทางใบได้มากกว่าการให้ปุ๋ยผ่านระบบน้ำของโรงเรือนปลูกพืช ในบทนี้ได้รวบรวมงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ในรูปแบบ Mobile Sprayer Robot และการประมวลผลภาพเพื่อตรวจวัดค่า NDVI ของพืช เพื่อนำเสนอเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาในงานวิจัยที่จะได้ดำเนินการต่อไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุริยา วรวงศ์ และเกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์ (2017) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแม่นยำในไร่อ้อยโดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์เพื่อระบุตำแหน่ง และปริมาณการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมกับอ้อย เพื่อลดการสูญเสียปุ๋ย และลดต้นทุนการผลิตอ้อย ในการวิจัยจะมีการออกแบบกลไกกำหนดควบคุมปริมาณปุ๋ย (Metering device) แบบเกลียวนำปุ๋ย (Auger Type) ชนิดต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์ให้สามารถปรับอัตราการใส่ปุ๋ยให้กับต้นอ้อยได้ กระบวนการทำงานเริ่มจากบันทึกภาพแบบ Real Time ด้วยกล้อง Light Sensor (SKR 1800) ร่วมกับ Chlorophyll meter (Minota SPAD 502 Meter) และทำการวิเคราะห์หาค่าสีเขียว (Chlorophyll content, Chl (μmol m^{2})) และค่าดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ของอ้อยที่สะท้อนมาจากใบโดยโปรแกรม MATLAB และส่งข้อมูลไปยังบอร์ด Arduino Uno เพื่อกำหนดรอบการหมุนของ Servo motor ที่ถูกติดตั้งกับเกลียวหมุนให้ควบคุมความเร็วรอบของเกลียวเครื่องใส่ปุ๋ยตามอัตราที่กำหนดตามเปอร์เซ็นต์ ความเขียวและค่าเปอร์เซ็นต์ดัชนีพืชพรรณ

รูปที่ 2.1 Machine and program show Image processor of sugar cane
(ที่มา : สุริยา วรวงศ์ และเกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์, 2017)

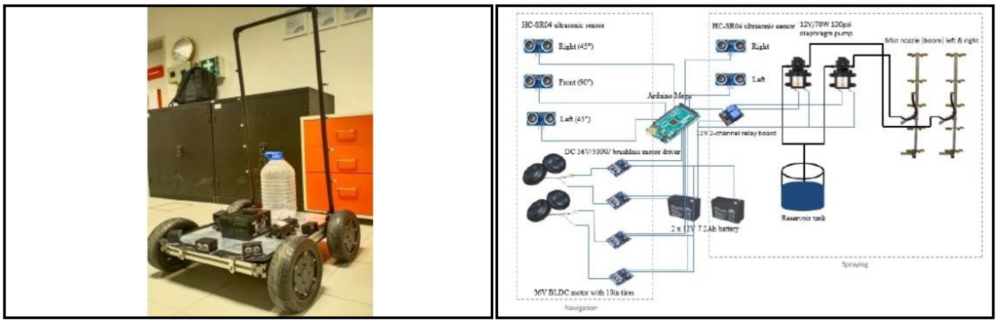
ไชยยันต์ สิริกุล และเกรียงไกร แซมสีม่วง (2021) ได้ทำการพัฒนาระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำแบบแปรผันอัตราด้วยเทคนิคประมวลผลภาพถ่ายแบบติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ไร้คนขับสำหรับพื้นที่ปลูกอ้อยสมัยใหม่ โดยวิเคราะห์แยกค่าสีทรงพุ่มและคำนวณเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของพื้นที่ใบอ้อยต่อพื้นที่รวมของภาพถ่ายที่บันทึกด้วยกล้อง Web camera เมื่อได้ค่าที่ตรวจวิเคราะห์จากบอร์ด Raspberry Pi จะนำไปสั่งการให้เซอร์โวมอเตอร์วาล์วทำงานเพื่อฉีดพ่นปุ๋ยน้ำจากหัวฉีดแบบกรวยกระจายสม่ำเสมอ (full cone) ในปริมาณที่ถูกต้องตามค่าความหนาแน่นของใบอ้อย โดยมีการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำในการประมวลผลของภาพถ่ายกับความสูงของกล้อง ที่ระยะ 0.6 m, 0.8 m และ1.0 m และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงของหัวฉีดพ่นปุ๋ยกับระยะการกระจายตัวของปุ๋ยน้ำ โดยกำหนดความสูงในการทดสอบของหัวฉีดที่ระยะ 0.3 m, 0.5 m และ 0.7 m ตามลำดับ

รูปที่ 2.2 Image segmentation systems and diagram of variable rate fertilizer sprayer
(ที่มา: ไชยยันต์ สิริกุล และเกรียงไกร แซมสีม่วง, 2021)

George Adamides และคณะ (2017) ได้นำเสนอการวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนา Semi-Autonomous Agricultural Vineyard Sprayer และเปรียบเทียบวิธีการสั่งการ 3 วิธี ในการฉีดพ่นปุ๋ยไปยังพวงองุ่น (Grape clusters) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในแง่มุมต่าง ๆ และความพึงพอใจในการใช้งานของเกษตรกร ประกอบด้วย (1) การเลือกเป้าหมายด้วยการใช้เมาส์คลิกกำหนดพิกัดเป้าหมายผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ (2) การเลือกเป้าหมายโดยใช้รีโมทไร้สาย (Gesture-based interface (Wiimote)) ที่กำหนดพิกัดผ่านจอภาพฉายจากโปรเจคเตอร์ และ (3) การเลือกพิกัดเป้าหมายโดยใช้ Digital Pen กำหนดพิกัดผ่าน Smart Interface Whiteboard

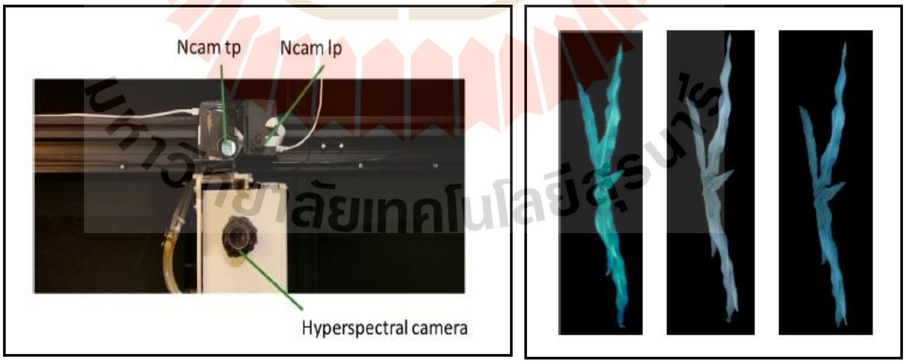
รูปที่ 2.3 Vineyard spraying with a human operated tractor-sprayer and selecting target (ที่มา: George Adamides et al., 2017)

A.M. Kassim และคณะ (2020) ได้มีการวิจัยเพื่อการศึกษาและพัฒนาหุ่นยนต์ฉีดพ่นสารเคมีเกษตรสำหรับจัดการศัตรูพืชแบบอัตโนมัติสำหรับฟาร์มที่มีการให้ปุ๋ยผ่านระบบน้ำโดยทดลองกับพืชต่าง ๆ ในฟาร์ม เช่น แตง มะเขือเทศ มะละกอ สับปะรด และพืชผัก เป็นต้น โดยเป็นหุ่นยนต์ขับเคลื่อน 4 ล้อ ขนาด 122 ซม. x 122 ซม. x 200 ซม. (ยาว x กว้าง x สูง) ควบคุมด้วยบอร์ด Arduino Mega 2560 ขับล้อโดยใช้ Motor Driver และตรวจจับวัตถุที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปพบโดยใช้เซนเซอร์ Ultrasonic ที่ติดตั้งด้านหน้าหุ่นยนต์จำนวน 3 ตัว โดยติดตั้งในมุมที่ต่างกัน (90°, 45° และ 135°) และมีชุดปั๊มน้ำแบบแรงดันที่ทำงานดูดสารละลายเคมีไปยังหัวฉีดพ่นโดยถูกสั่งการผ่าน Relay Module



รูปที่ 2.4 Developed Autonomous Pesticide Sprayer and System Overview
(ที่มา: A.M. Kassim et al., 2020)

Liangju Wang และคณะ (2020) ได้ทำการวิจัยเพื่อประเมินความแม่นยำของค่า NDVI ที่สะท้อนถึงระดับคลอโรฟิลด์ โดยใช้ RGBN camera ซึ่งดัดแปลงจากกล้อง RGB camera โดยนำเอา NIR filter ออกไป ใช้แทนกล้อง Multispectral camera (MSC) และกล้อง Hyperspectral camera (HSC) ซึ่งมีราคาแพง น้ำหนักมาก และต้องมีทักษะในการใช้งานเพื่อประมวลผลข้อมูล โดยการศึกษานี้จะนำเสนอการปรับปรุงค่า NDVI ที่ได้ให้ทัดเทียมกับกล้องคุณภาพสูงโดยใช้ Machine learning algorithms เข้ามาช่วยสร้างเป็นโมเดล โดยทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างที่เป็นต้นข้าวโพดที่มีการให้ปุ๋ยไนโตรเจนและน้ำแตกต่างกัน

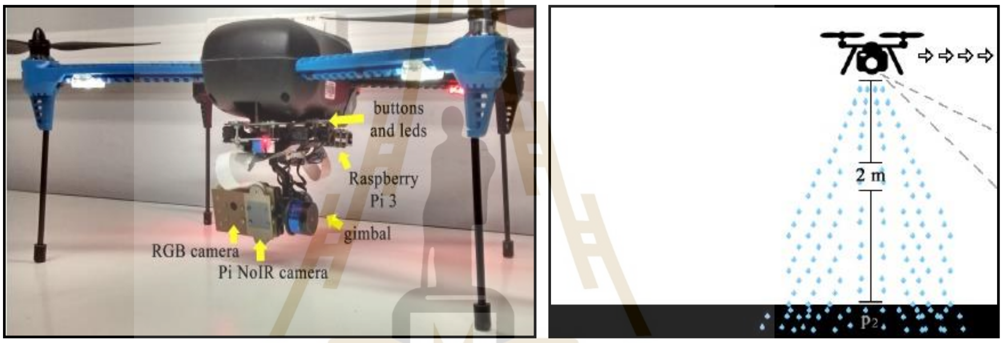


รูปที่ 2.5 Imaging systems of Ncams and hyperspectral camera
(ที่มา: Liangju Wang et al., 2020)

Maik Basso และคณะ (2019) ได้ทำการวิจัยการใช้ระบบสมองกลฝังตัวตรวจวัดค่า GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) ที่ใช้ประเมินอัตราการสังเคราะห์แสง (Rate

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

of photosynthesis) และความเครียดของพืช (Plant stress) เพื่อสนับสนุนอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กที่ใช้ฉีดพ่นสารเคมีทางการเกษตรในแปลงปลูกพืช ในการทดลองจะใช้บอร์ด Raspberry Pi มาเชื่อมต่อกับกล้อง 2 ตัว คือ (1) RGB camera ที่สามารถแยกรับค่า Red channel และ NIR channel ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ (2) NoIR Raspberry Pi camera ที่ใช้ฟิลเตอร์ป้องกันแสงสีน้ำเงินและเขียว กล้องทั้ง 2 ชนิดจะบันทึกภาพแบบ Real-Time และนำข้อมูลที่ได้จากคลื่นแสงที่สะท้อนจากพืชไปคำนวณค่า NDVI โดยมุ่งเน้นที่การคำนวณค่า GNDVI ของจุดพิกเซลทั้งหมดและหาค่าเฉลี่ย และนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปสั่งการ UAV actuators ที่จะกำหนดปริมาณการฉีดพ่นสารเคมีเกษตรแก่พืชตามความต้องการอย่างเฉพาะเจาะจงตามค่าเฉลี่ย GNDVI โดรนจะตรวจวัดค่า GNDVI และฉีดพ่นปุ๋ยในความสูง 2 เมตร และเคลื่อนที่ไปด้านข้างด้วยความเร็ว 3-5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 2.6 UAV-based Agrochemical spraying

(ที่มา: Maik Basso et al., 2019)

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

บุญธรรม ภัทราจารุกุล (2554) อธิบายว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม โดยเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ผลิตจากสารกึ่งตัวนำที่อยู่ภายใน มีโครงสร้างและความสามารถใกล้เคียงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยที่ใช้พลังงานน้อยกว่ามาก ไมโครคอนโทรลเลอร์มีการรวมหน่วยความจำ และพอร์ต I/O ไว้ในชิป (Chip) เดียว แต่ทว่าประมวลผลได้ไม่มากเท่าคอมพิวเตอร์ มีฟังก์ชันการทำงานด้วยการป้อนชุดคำสั่งในภาษาคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์มีส่วนประกอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (Central Processing Unit: CPU) มีการทำงานเหมือนซีพียูของไมโครโพรเซสเซอร์ โดยทำหน้าที่เป็นเหมือนสมองที่ใช้ควบคุมการทำงาน

2. หน่วยความจำ (Memory) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักที่มีความสำคัญ ดังนี้ 1) หน่วยความจำ สำหรับเก็บโปรแกรม (Program Memory) ที่บันทึกข้อมูลอยู่ภายใน โดยจะไม่

หายไปเมื่อตัดไฟเลี้ยงระบบ และ 2) หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ส่วนนี้ข้อมูลจะหายไปเมื่อมีการตัดไฟ เนื่องจากเป็นที่พักชั่วคราวของข้อมูล ทั้งนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่จะมีหน่วยความจำหลายชนิด เช่น หน่วยความจำรอม (Read Only Memory : ROM) หน่วยความจำแรม (Random Access Memory : RAM) หน่วยความจำพรอม (Programmable Read Only Memory : PROM) หน่วยความจำอีพรอม (Erasable Programmable Read Only Memory : EPROM) เป็นต้น

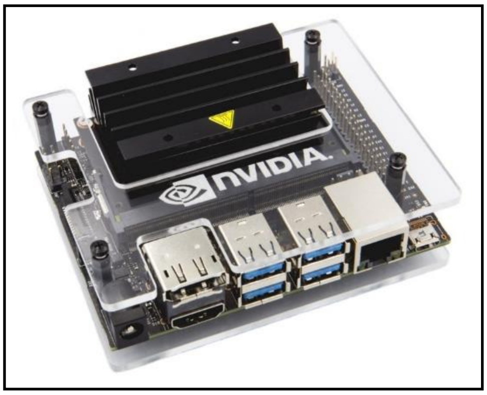
3. ส่วนเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต (Port) ทำงานใน 2 ลักษณะ คือ การรับและส่งสัญญาณข้อมูล โดยเป็นพอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

4. ช่องทางเดินของสัญญาณหรือ (BUS) เป็นทางเดินของสัญญาณของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้เพื่อสื่อสารภายใน ประกอบด้วย บัสข้อมูล (Data Bus) ถูกควบคุมโดยบัสควบคุม (Control Bus) ที่ควบคุมการส่งข้อมูลไปยังบัสแอดเดรส (Address Bus)

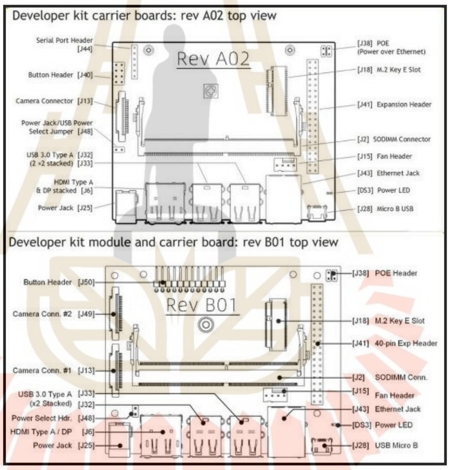
5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Oscillator Generator) เป็นวงจรที่ใช้ความคุมจังหวะการทำงาน โดยเป็นวงจรดิจิทัลที่กำเนิดสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) หากมีความถี่สูงความเร็วในการประมวลผลจะสูงตาม วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาที่นิยมใช้มี 3 วงจร คือ วงจร Ceramic Resonator วงจร Quartz Crystal Oscillator และวงจรแบบ TTL Crystal Square-Wave Oscillator (Transistor-Transistor-Logic : TTL)

2.4 เอ็นวิเดีย เจ็ทสัน นาโน (Nvidia Jetson Nano)

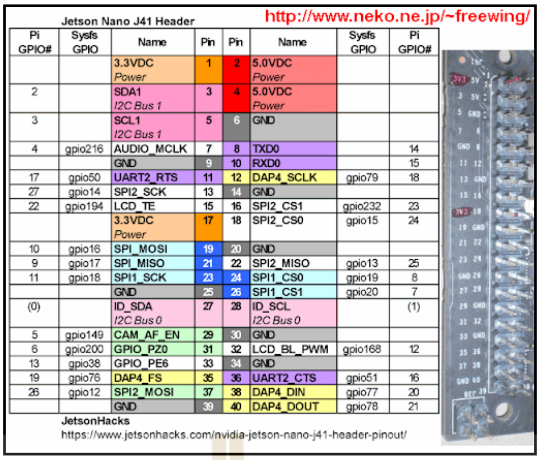
ผลิตภัณฑ์จาก Nvidia โดยพัฒนาเป็นคอมพิวเตอร์ราคาประหยัดชื่อว่า Jetson Nano สำหรับใช้ทำ AI และ Machine learning เช่น Face Recognition, Object Detection, Image Classification, Speech Processing และ Deep Learning เป็นต้น Nvidia Jetson Nano เปรียบเสมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ทรงพลังในการประมวลผลผ่าน GPU ของค่าย Nvidia สามารถรัน Neural Networks ได้หลาย ๆ ตัวพร้อมกัน Jetson Nano จะมาพร้อมซีพียู ARM A57 processor แบบ 4 คอร์, 128-core Nvidia Maxwell GPU และ LPDDR RAM 4GB สนับสนุนการทำงานของ AI frameworks ยอดนิยม เช่น TensorFlow, PyTorch, Caffe, Keras และ MXNet เป็นต้น (อ้างถึงใน Nvidia. Developer, 2021) รุ่นที่ได้รับความนิยมจะเป็น NVIDIA Jetson Nano 4GB B01 Developer Kit ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 ลักษณะทางกายภาพของบอร์ด Nvidia Jetson Nano
(ที่มา : https://www.osaelectronics.com)



รูปที่ 2.8 รายละเอียดส่วนประกอบของบอร์ด Nvidia Jetson Nano
(ที่มา: https://geekworm.com)



Jetson Nano J41 Header http://www.neko.ne.jp/~freewing/

Pi GPIO#	Sysfs GPIO	Name	Pin	Pin	Name	Sysfs GPIO	Pi GPIO#
		3.3VDC *Power*	1	2	5.0VDC *Power*		
2		SDA1 *I2C Bus 1*	3	4	5.0VDC *Power*		
3		SCL1 *I2C Bus 1*	5	6	GND		
4	gpio216	AUDIO_MCLK	7	8	TXD0		14
		GND	9	10	RXD0		15
17	gpio50	UART2_RTS	11	12	DAP4_SCLK	gpio79	18
27	gpio14	SPI2_SCK	13	14	GND		
22	gpio194	LCD_TE	15	16	SPI2_CS1	gpio232	23
		3.3VDC *Power*	17	18	SPI2_CS0	gpio15	24
10	gpio16	SPI_MOSI	19	20	GND		
9	gpio17	SPI_MISO	21	22	SPI2_MISO	gpio13	25
11	gpio18	SPI1_SCK	23	24	SPI1_CS0	gpio19	8
		GND	25	26	SPI1_CS1	gpio20	7
(0)		ID_SDA *I2C Bus 0*	27	28	ID_SCL *I2C Bus 0*		(1)
5	gpio149	CAM_AF_EN	29	30	GND		
6	gpio200	GPIO_PZ0	31	32	LCD_BL_PWM	gpio168	12
13	gpio38	GPIO_PE6	33	34	GND		
19	gpio76	DAP4_FS	35	36	UART2_CTS	gpio51	16
26	gpio12	SPI2_MOSI	37	38	DAP4_DIN	gpio77	20
		GND	39	40	DAP4_DOUT	gpio78	21

JetsonHacks
https://www.jetsonhacks.com/nvidia-jetson-nano-j41-header-pinout/

รูปที่ 2.9 รายละเอียดเชื่อมต่อของบอร์ด Nvidia Jetson Nano

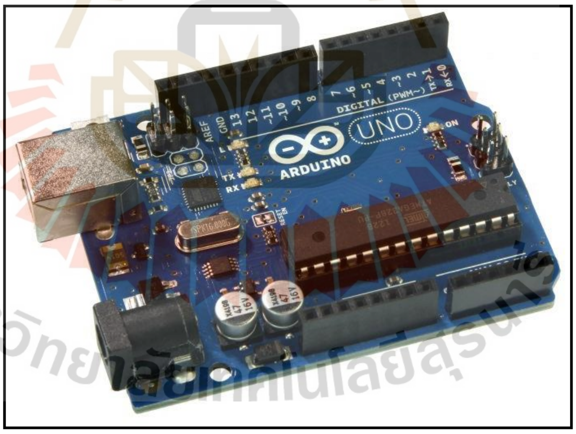
(ที่มา: https://stackoverflow.com)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของบอร์ด Nvidia Jetson Nano

Specification	Nvidia Jetson Nano
GPU	128-core Maxwell
CPU	Quad-core ARM A57 1.43 GHz
Memory	4 GB 64-bit LPDDR4 25.6 GB/s
Storage	microSD
Video Encoder	4K @ 30 | 4x 1080p @ 30 | 9x 720p @ 30 [H.264/H.265]
Video Decoder	4K @ 60 | 2x 4K @ 30 | 8x 1080p @ 30 | 18x 720p @ 30| [H.264/H.265]
Camera	1x MIP | CSI-2 DPHY lanes
Connectivity	Gigabit Ethernet, M.2 Key E
Display	HDMI 2.0 and eDP 1.4
USB	4x USB 3.0, USB 2.0 Micro-B
Other	GPIO, I^2C, I^2S, SPI, UART
Mechanical	100 mm x 80 mm x 29 mm

2.5 อาดุยโน (Arduino Board)

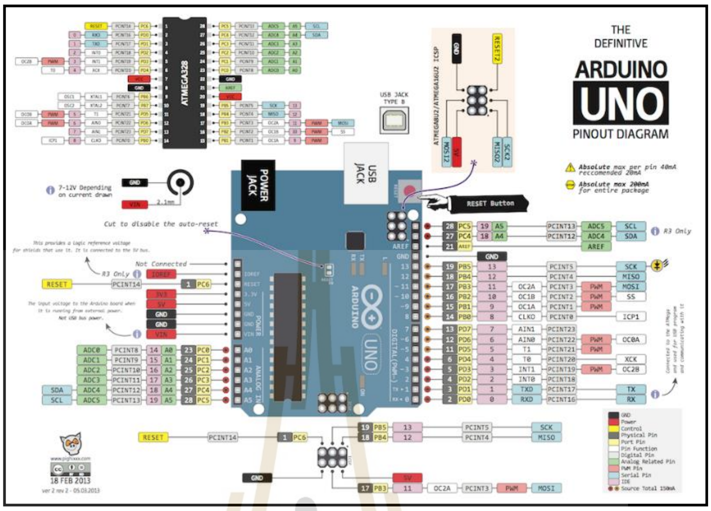
เดชฤทธิ์ มณีธรรม (2560) อธิบายว่า Arduino Board คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR มีการพัฒนามาจากโครงการ Open Source ที่มีชื่อว่า Wiring โดย AVR เป็น Chip เบอร์ ATmega128 มีตัวถังแบบ SMD และมีหน่วยความจำและพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตค่อนข้างมาก เมื่อพัฒนาเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขึ้นมาทำให้สามารถเชื่อมต่อวงจรเพื่อใช้งานได้ง่ายขึ้น แต่ถึงอย่างไรตัวบอร์ดก็มีขนาดใหญ่ทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน ต่อมามีโครงการพัฒนาต่อยอด โดยที่โครงการ Arduino โดยได้เปลี่ยนมาใช้ Mega8 และ Mega168 ที่มีขนาดเล็ก บอร์ดที่พัฒนาขึ้นใหม่จึงมีขนาดเล็กลง ใช้งานได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดความนิยมใช้บอร์ด ที่พัฒนาขึ้นใหม่ในชื่อว่า Arduino เกิดขึ้นทั่วโลก โดยที่บอร์ด Arduino สามารถนำไปพัฒนาโครงงานได้หลากหลาย เรียนรู้ง่าย และเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น ทั้งนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR มีส่วนของโปรแกรมพิเศษที่เรียกว่า บูตโหลดเดอร์ (Boot Loader) โดยจะเป็นส่วนโปรแกรมที่ถูกเรียกขึ้นมาก่อนการเรียกโปรแกรมปกติ ทำให้สามารถเขียนคำสั่งการทำงานได้ก่อน เรียกโปรแกรมปกติ อาศัยโปรแกรมพิเศษนี้ในการทำให้ชิปสามารถโปรแกรมผ่านพอร์ตอนุกรมชนิด UART ได้ จึงทำให้การเขียนโปรแกรมลงไปในชิปใช้เพียง USB ติดต่อกับ UART ก็สามารถทำงานได้



รูปที่ 2.10 บอร์ด Arduino UNO R3
(ที่มา: https://opencircuit.com)

การพัฒนาบอร์ด Arduino ทำให้สามารถต่อรวมกับอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ โดยผู้พัฒนาสามารถต่อวงจรควบคุมจากภายนอกเพื่อเป็นตัวเชื่อมต่อเข้ามาที่ขาอินพุตหรือเอาท์พุตของบอร์ดได้โดยตรง นอกจากนี้ ยังสามารถต่ออุปกรณ์เสริมอื่น ๆ เช่น โมดูลบูลทูธ โมดูลไวฟาย (Wi-Fi) โมดูลจีเอสเอ็ม โมดูลรีเลย์ และโมดูลอินเทอร์เน็ต เป็นต้น โดยที่บอร์ด Arduino มีข้อดีต่าง ๆ เช่น คำสั่งในการพัฒนาไม่

ซับซ้อน มีกลุ่มที่เป็นผู้พัฒนามากมาย ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ไม่มีลิขสิทธิ์ มีราคาถูก และสามารถพัฒนาโปรแกรมได้หลายระบบปฏิบัติการ เป็นต้น (อ้างถึงใน ประภาส พุ่มพวง, 2561, น.13)



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่อบอร์ด Arduino UNO R3 เพื่อใช้งาน

(ที่มา: http://www.123microcontroller.com)

Arduino เป็นแพลตฟอร์มแบบเปิดที่ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ในส่วนของฮาร์ดแวร์แบบเปิดนี้ ทำให้มีการนำไปพัฒนาต่อยอดแตกแขนงเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่อยู่บนฐานของ Arduino อีกหลายตัว ในส่วนของซอฟต์แวร์ นั้น ก็มีโปรแกรม Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโปรแกรม ตรวจสอบแก้ไข และอัพโหลดส่งเข้าตัวบอร์ด ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาแจกจ่ายไลบรารี่เสริม (Libraries) จากนักพัฒนาทั่วโลก โดยภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของบอร์ด มีหลักไวยากรณ์เช่นเดียวกับภาษา C ซึ่งผู้เริ่มต้นสามารถเรียนรู้ได้ไม่ยาก (อ้างถึงใน กอบเกียรติ สระอุบล, 2561, น.24)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 เป็นบอร์ดที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยมีขาในการทำงานทั้งหมด 14 ขา คือ Pin 0 – 13 โดยแต่ละขามีการทำงานที่แตกต่างกันออกไป เช่น ขาสัญญาณที่ติดต่อทางพอร์ตอนุกรม (Serial Port) คือ Pin 0, 1 เป็นขา Rx, Tx ส่วนขาสัญญาณที่ใช้ติดต่อสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต (Input and Output) คือ Pin 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 และบางขาสัญญาณยังทำหน้าที่นอกเหนือจากขาสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต เช่น Pin 3, 5, 6, 9, 10 และ 11 ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นขาสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation) หรือที่เรียกว่า PWM และยังมีขาที่รับสัญญาณแอนะล็อกอีก 6 ขา คือ Pin A0, A1,

A2, A3, A4 และ A5 อีกด้วย (อ้างถึงใน เดชฤทธิ์ มณีธรรม, 2560, น.4) บอร์ด Arduino UNO R3 มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino UNO R3

Specification	Arduino UNO R3
Microcontroller	ATmega328P
Operating Volt.	5 V
Input Volt. (recommended)	7 – 12 V
Input Volt. (limit)	6 – 20 V
Digital I/O Pins	14 (6 PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3 V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6 ราสเบอรี่พาย (Raspberry Pi)

ทวีชัย อวยพรกชกร (2562, น. 142 - 143) อธิบายความเป็นมาของ Raspberry Pi ไว้ว่าถูกผลิตโดย Raspberry Pi Foundation ประเทศอังกฤษ โดยมีวัตถุประสงค์เริ่มแรกเพื่อใช้เป็นคอมพิวเตอร์ราคาถูกสำหรับเด็กนักเรียน แต่ด้วยประสิทธิภาพทำให้กลายเป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Single-computer Board, Credit Card-sized Computer) ที่ได้รับความนิยมในหมู่นักพัฒนาระบบฝังตัว บอร์ด Raspberry Pi ที่วางจำหน่ายนั้นอาจแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มการใช้งานทั่วไป กลุ่มการใช้งานทั่วไปแต่ลดขนาด และกลุ่มที่ใช้งานเพื่อประมวลผลเป็นหลัก ดังนี้

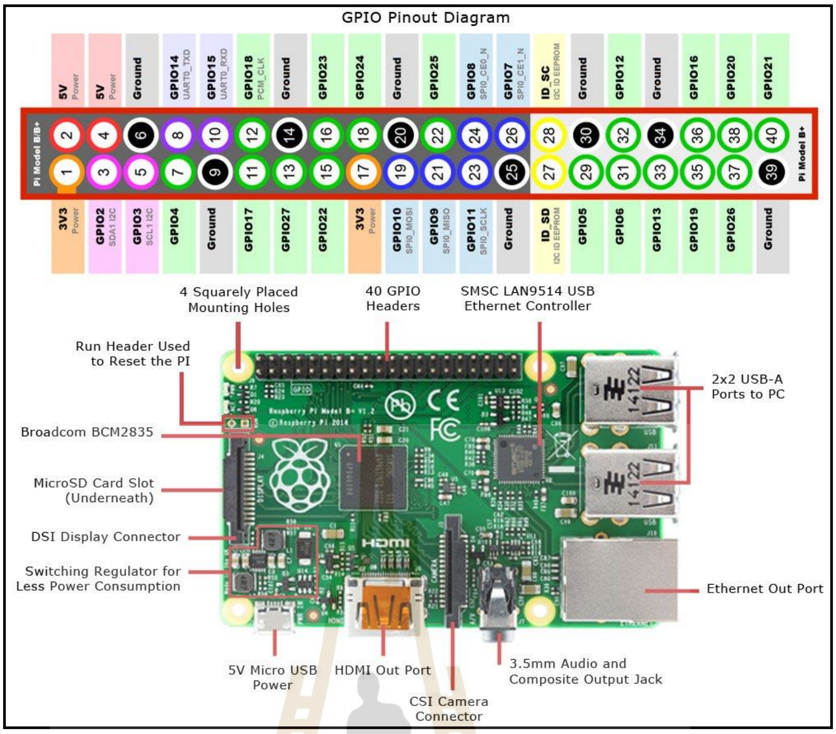
1. กลุ่มการใช้งานทั่วไป ได้แก่ Raspberry Pi 4 Model B, Raspberry Pi 1-3 Model A ถึง B+ โดยที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Linux สามารถเชื่อต่อจอ สาย USB และเชื่อมเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบไร้สายได้ในรุ่นใหม่

2. กลุ่มการใช้งานทั่วไปแต่ลดขนาด ได้แก่ Raspberry Pi Zero หรือ Raspberry Pi Zero W/WH ซึ่งเป็นรุ่นที่ลดขนาดลงโดยตัดการเชื่อมต่อแบบอีเทอร์เน็ตออก

3. กลุ่มที่ใช้งานเพื่อประมวลผล ได้แก่ Raspberry Computer Module CM1, CM3, CM3+ ที่ตัดส่วนการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกออกจากแผงวงจรทั้งหมด เหมาะสำหรับงานที่มีการพัฒนาแผงวงจรเอง

รูปที่ 2.12 บอร์ด Raspberry Pi
(ที่มา: https://th.element14.com)

สุรพนธ์ ตุ้มนาค (2561) ให้ความหมายว่า Raspberry Pi คือ บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่มีราคาถูก ทว่ามีความสามารถเทียบเท่าคอมพิวเตอร์ขนาดย่อม รองรับการใช้งานได้เหมือนคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่ง ต่อจอภาพและอุปกรณ์ USB เพื่อใช้งานได้ ทั้งยังมีจุดเด่นที่ต่างจากคอมพิวเตอร์ทั่วไป คือ มีพอร์ตอินพุตละเอาท์พุต หรือ GPIO ให้ใช้งาน จึงสามารถนำไปต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อประยุกต์การทำงานที่เกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์ได้



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบบนบอร์ด Raspberry Pi

(ที่มา: https://www.jameco.com)

2.6.1 การเก็บข้อมูลของ Raspberry Pi

ข้อมูลการทำงานทั้งหมดของ Raspberry Pi โดยปกติจะถูกเก็บไว้ใน SD Card ซึ่งรวมไปถึงไฟล์ระบบปฏิบัติการด้วย ข้อมูลที่บรรจุอยู่ใน SD Card ที่บรรจุระบบปฏิบัติการของ Raspberry Pi แม้ว่าดูเหมือนจะมองเห็นได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows แต่ยังมีข้อมูลบาส่วนที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถมองเห็นได้ โครงสร้างการเก็บข้อมูล (Partition) ของ SD Card ที่ใช้กับ Raspberry Pi ประกอบด้วย

1. Boot Partition มีหน้าที่เก็บรายละเอียดในการเข้าถึงข้อมูลใน Recovery Partition
2. Recovery Partition มีหน้าที่เก็บโปรแกรม NOOBS (New Out of Box System) และไฟล์ระบบปฏิบัติการ
3. Root Partition มีหน้าที่เก็บไฟล์ระบบปฏิบัติการที่ใช้ทำงานจริง
4. Data Partition มีหน้าที่เก็บข้อมูลอื่น ๆ
5. Setting Partition มีหน้าที่เก็บตั้งค่าของระบบปฏิบัติการที่ใช้เมื่อเริ่มต้นทำงาน

2.6.2 การเชื่อมต่อใช้งาน Raspberry Pi

การเชื่อมต่อใช้งานกับ Raspberry Pi สามารถทำได้ 2 แบบ คือ เชื่อมต่อโดยตรง และเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายแบบรีโมต (Remote) ดังนี้

1. การเชื่อมต่อใช้งานโดยตรง

การเชื่อมต่อโดยตรงสามารถทำได้โดยเชื่อมต่อจอภาพ (Monitor) ผ่าน Port HDMI และเชื่อมต่อ Keyboard และ Mouse แบบ USB โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้ง Driver รวมถึงเชื่อมต่อสาย LAN หรือ Wi-Fi หากต้องการใช้งานกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เมื่อเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายสำเร็จ Raspberry Pi จะถูกกำหนดหมายเลข IP Address โดยอัตโนมัติ

2. การเชื่อมต่อใช้งานแบบรีโมต

การเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายได้รับความนิยมมากกว่า ซึ่งผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับจอภาพ คีย์บอร์ด หรือเมาส์ แต่ผู้ใช้จำเป็นต้องทราบหมายเลข IP Address ของ Raspberry Pi ก่อน โดยใช้คำสั่ง ifconfig จึงจะใช้วิธีแบบรีโมตได้ ซึ่งทำได้ 2 วิธี คือ (1) การรีโมตผ่านโปรโตคอล SSH (Secure Shell) ด้วยโปรแกรม เช่น Putty วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับทำงานผ่าน Terminal Shell (Text Base) และ (2) การรีโมตผ่านโปรแกรม VNC ซึ่งมีความเร็วในการเชื่อมต่อมากกว่าแบบผ่านโปรโตคอล สำหรับบอร์ด Raspberry Pi เวอร์ชั่นใหม่จะมีโปรแกรม VNC Server ติดตั้งมากับระบบปฏิบัติการแล้ว

2.6.3 บอร์ด Raspberry Pi 3B

บอร์ด Raspberry Pi รุ่น Model B และ B+ จะเป็นรุ่นที่มีการใช้งานแพร่หลาย Raspberry Pi 3 Model B ถูกพัฒนาให้เน้นไปในด้าน Embedded Computer คือ มีการเพิ่มอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถใช้งานระบบปฏิบัติการ Raspbian OS ให้มีความทัดเทียมกับคอมพิวเตอร์แลปทอปทั่วไปมากขึ้น เช่น ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของ Application Manu ที่มีโปรแกรมเพิ่มขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการสำหรับผู้สร้างและพัฒนาโปรแกรม ไม่จำกัดแค่เพียงการควบคุมและสั่งการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น Wireless LAN และ Bluetooth เป็นต้น (อ้างถึงใน นพ มหิษานนท์, 2560, น.21) มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของบอร์ด Raspberry Pi 3 Model B

Microcontroller	Raspberry P 3 Model B
SoC	Broadcom BCM2837
CPU	4x ARM Cortex-A53, 1.2 GHz
GPU	Broadcom VideoCore IV
RAM	1GB LPDDR2 (900 MHz)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของบอร์ด Raspberry Pi 3 Model B (ต่อ)

Microcontroller	Raspberry P 3 Model B
Networking	10/100 Ethernet, 2.4 GHz 802.11n wireless
Bluetooth	Bluetooth 4.1 Classic, Bluetooth Low Energy
Storage	microSD
GPIO	40-pin header, populated
Ports	HDMI, 3.5 mm analogue audio-video jack, 4x USB 2.0, Ethernet, Camera Serial Interface (CSI), Display Serial Interface (DSI)

2.7 กล้องสำหรับ Raspberry pi

กอบเกียรติ สระอุบล (2561, น.468-469) อธิบายว่า การใช้งานกล้องกับบอร์ด Raspberry Pi ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะมีทั้งช่องเสียบสำหรับกล้องแบบ USB (Webcam) และช่องเชื่อมต่อสำหรับกล้องแบบ Camera Serial Interface (CSI) ของ Raspberry Pi โดยเฉพาะ เรียกว่า Raspberry Pi Camera Module ส่วนด้านซอฟต์แวร์จะมีไลบรารี่และโมดูลต่าง ๆ รองรับการใช้งานครบถ้วน เช่น การถ่ายภาพนิ่ง การถ่ายภาพเคลื่อนไหว และการสตรีมมิ่งภาพผ่านเครือข่ายไร้สาย

2.7.1 Web Camera

กล้อง Web Camera สามารถนำมาติดตั้งผ่าน USB Port ได้โดยไม่ต้องติดตั้ง Driver ระบบจะมองเห็นตัวกล้องเอง กล้อง Webcam ที่นำมาใช้กับบอร์ด Raspberry Pi ต้องรองรับการทำงานเป็น Webcam ถ้าเป็นกล้องประเภทอื่นจะต้องเปิดโหมดให้ทำงานเป็น Webcam หรือ PC Camera เสียก่อน กล้อง Webcam มีทั้งที่ราคาถูกไปจนถึงราคาแพง ในการใช้งานโดยเบื้องต้นนิยมใช้ USB Camera สำหรับ Raspberry Pi ซึ่งมีราคาถูก โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.4

รูปที่ 2.14 กล้อง RGB USB camera สำหรับบอร์ด Raspberry Pi
(ที่มา: https://hub360.com)

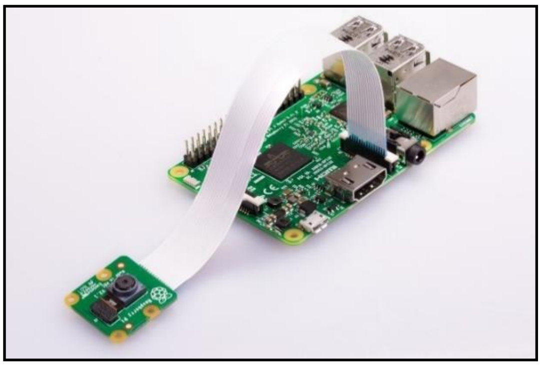
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของกล้อง RGB USB camera สำหรับบอร์ด Raspberry Pi

Specification	USB Camera for Raspberry Pi
Lens focal length	F 6.0 mm
Focus range	20 mm far away
Video resolution	640 x 480
Camera size	4 x 3.1 x 2.5cm
Line length	Up to 65 cm
Package Weight	30 g

2.7.2 Raspberry Pi Camera Module

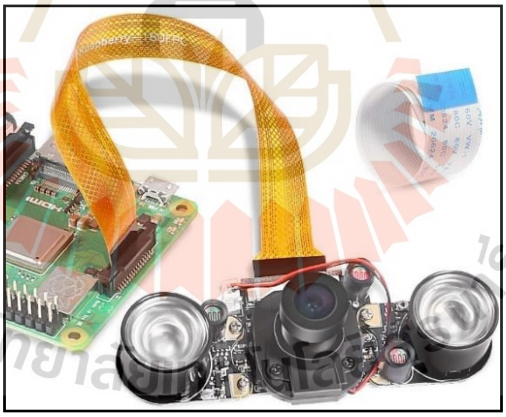
Raspberry Pi Camera Module เป็นโมดูลกล้องถ่ายภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวสำหรับบอร์ด Raspberry Pi โดยเฉพาะ โดยมีรุ่น V1 ความละเอียด 5 MP และรุ่น V2 ความละเอียด 8 MP โดยกล้องจะมาพร้อมกับสายแพ การติดตั้งเพียงเสียบสายแพเข้ากับช่อง CSI เท่านั้น และทำการตั้งค่าเปิดใช้งาน ทั้งนี้ Raspberry Pi Camera Module แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. ใช้ถ่ายในแสงปกติ โดยใช้งานปกติทั่วไปที่มีแสงเพียงพอ ซึ่งจะได้ภาพที่มี สีสดใสเหมือนจริงเหมือนกล้องทั่วไป รองรับการถ่ายภาพเคลื่อนไหว 1080p30, 720p60 และ VGA90



รูปที่ 2.15 Raspberry Pi camera ที่เชื่อมต่อกับช่อง CSI
(ที่มา: https://projects.raspberrypi.org)

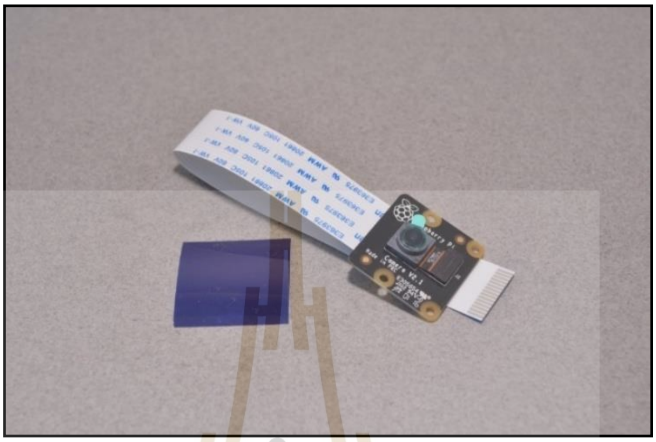
2. ใช้ถ่ายในที่ซึ่งมีแสงน้อย หรือที่มืด (Night-vision Camera) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการบันทึกภาพในที่ซึ่งมีแสงน้อย ในกรณีที่บันทึกภาพตอนกลางคืนควรใช้หลอดไฟอินฟราเรด (Infrared Light) ตรงบริเวณที่จับภาพ ทำให้ถ่ายภาพในที่มืดได้ชัดเจน



รูปที่ 2.16 กล้องที่บันทึกภาพในความมืดสำหรับบอร์ด Raspberry Pi
(ที่มา: https://www.amazon.com)

3. กล้องบันทึกภาพอินฟราเรด (Infrared Camera) หรือ Raspberry Pi NoIR Camera เป็น Raspberry Pi Camera Module อีกแบบหนึ่ง โดยเป็นกล้องที่ไม่มี Infrared Filter (IR Filter) การไม่มี IR Filter ทำให้กล้องมีความสามารถรับค่าคลื่นแสงความถี่ต่ำกว่าแสงที่ตามองเห็น (Invisible Light) ในช่วง NIR สามารถใช้ร่วมกับตัวฉายแสงอินฟราเรดสำหรับการมองเห็นใน

ที่มืดได้ ประโยชน์ของการถ่ายภาพอินฟราเรดก็มีหลายอย่าง เช่น ใช้รักษาความปลอดภัยกลางคืน ถ่ายภาพในแนวดาราศาสตร์ ถ่ายภาพเพื่อใช้ตรวจค่า NDVI ของพืช เป็นต้น Raspberry Pi NoIR Camera Module v2 ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน มีคุณสมบัติรายละเอียดดังตารางที่ 2.5



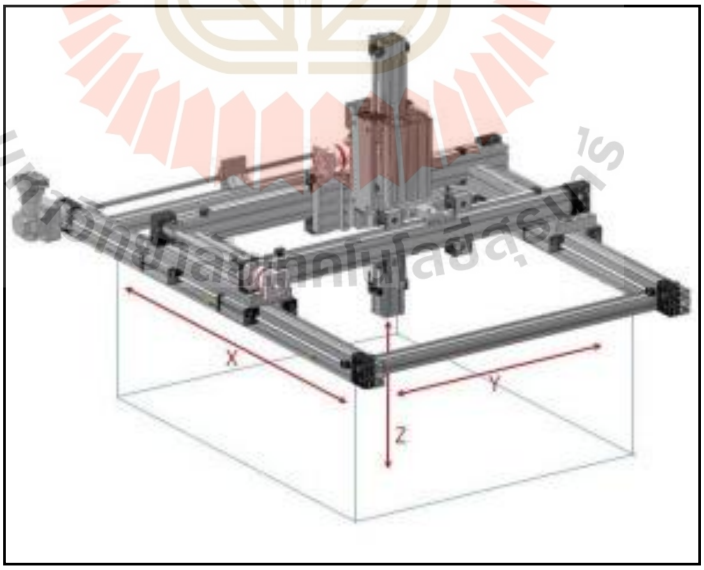
รูปที่ 2.17 กล้อง NoIR camera และฟิลเตอร์สีน้ำเงินสำหรับถ่ายภาพอินฟาเรด
(ที่มา: https://bc-robotics.com)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของกล้อง NoIR Camera สำหรับบอร์ด Raspberry Pi

Specification	**Raspberry Pi NoIR Camera Module v2**
Image sensor	Sony IMX219
Quality	8 MP
Capable of taking infrared photographs	3280 x 2464 pixel
Capture video	1080p30, 720p60,
Video resolution	640x480p60/90
Camera size	0.25 x 0.24 x 0.01 cm
Package Weight	3 g
IR Filter	No

2.8 หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (Cartesian Robot)

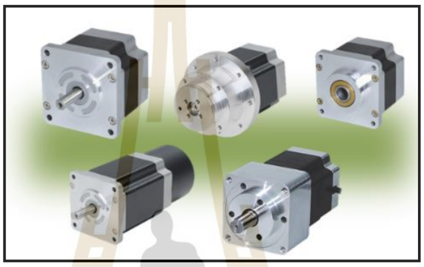
หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนมีการใช้งานในด้านอุตสาหกรรมมานาน ให้ความหมายว่าเป็นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงทั้ง 3 แกน (Three Linear Axes) ตัวอย่างของหุ่นยนต์ชนิดนี้ เช่น เครนในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องจักร CNC เป็นต้น ในอุตสาหกรรมส่วนมากจะคุ้นเคยกับหุ่นยนต์คาร์ทีเซียนที่เป็นเครื่องซีเอ็นซี (CNC) ซึ่งปัจจุบันมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย (อ้างถึงใน เดชฤทธิ์ มณีธรร, 2559, น. 4) เครื่องซีเอ็นซี คือ ระบบของเครื่องจักรกลที่ควบคุมทำงานด้วยคำสั่งเชิงตัวเลข โดย C มาจาก Computer, N มาจาก Numerical หรือตัวเลข, และ C มาจาก Control ซึ่งหมายถึงการควบคุมการทำงานโดยกำหนดค่าตำแหน่งที่ให้เครื่องจักรเคลื่อนไปทำงาน การเคลื่อนที่ในแกน X, Y หรือ Z จะถูกคำนวณและสั่งการชุดคำสั่งที่เรียกว่า G-code ที่ใช้ควบคุมเครื่องซีเอ็นซี โดยกำกับตำแหน่ง, ทิศทาง, ความเร็วในการทำงานของเครื่อง เครื่องจักร CNC เป็นเครื่องจักรที่ทำงานอย่างอัตโนมัติ โดยสามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดหรือรูปทรงได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถกำหนดรายละเอียดชิ้นงานโดยตรงได้ที่โปรแกรม ดังนั้น จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) หรือผลิตชิ้นงานอุตสาหกรรม การรับส่งข้อมูลจะผ่านตัวกลางส่งสัญญาณต่าง ๆ เช่น แถบกระดาษเจาะรู (Paper Punched Tape) เทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape) และแผ่นดิสก์ (Micro Floppy Disk) หรือป้อนข้อมูลโดยตรงที่แป้นพิมพ์ของแผงควบคุม (Keyboard) (อ้างถึงใน ปฏิพัทธ์ หงส์สุวรรณ, 2556, น.3-4)



รูปที่ 2.18 โครงสร้างโดยทั่วไปของหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน
(ที่มา: https://www.macrondynamics.com)

2.9 สเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor)

เดชฤทธิ์ มณีธรรม (2559, น. 28 - 33) ได้อธิบายถึง มอเตอร์ไฟฟ้าโดยทั่วไปทั้งที่เป็นกระแสตรงและกระแสสลับจะมีการหมุนต่อเนื่องไม่ขาดช่วง ไม่สามารถที่จะควบคุมให้เคลื่อนที่อย่างเป็นมุมองศาต่าง ๆ หรือหมุนเป็นจังหวะได้ การทำงานที่ต้องอาศัยความแม่นยำในการเคลื่อนที่จึงต้องใช้มอเตอร์สเต็ปปิ้ง (Stepping Motor) หรือสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) ซึ่งมาการหมุนเป็นจังหวะโดยมีแม่เหล็ก เป็นชุด ๆ ในวงจร มอเตอร์ชนิดนี้มีรูปแบบและลักษณะแตกต่างกันไปแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สเต็ปปิ้งมอเตอร์รูปแบบต่าง ๆ ในท้องตลาด
(ที่มา: https://www.factomart.com)

เมื่อมีการป้อนสัญญาณพัลส์ (Pulse) ให้กับขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ของมอเตอร์ มีผลให้โรเตอร์ (Rotor) ถูกผลักดันจนหมุนได้ ทั้งนี้ มอเตอร์จะหมุนตามสัญญาณพัลส์ที่ป้อน ซึ่งจะเป็นจังหวะ (Step) การหมุนของมอเตอร์สเต็ปปิ้งครบ 1 รอบ เท่ากับ 360 องศา หรือสั่งหมุนอย่างต่อเนื่องก็ได้ รวมทั้งสามารถหยุดได้อย่างรวดเร็ว ประเภทและการพันขดลวดของสเต็ปปิ้งมอเตอร์จะมีรายละเอียดดังนี้

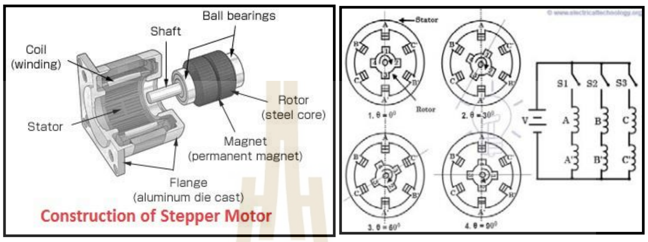
2.9.1 ประเภทของสเต็ปปิ้งมอเตอร์

1. มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PM : Permanent Magnet) โครงสร้างโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร กลุ่มของขดลวดจะอยู่ในส่วนของสเตเตอร์ (Stator) ดังภาพที่ 2.15 ทำงานโดยการเปลี่ยนเฟสของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเมื่อจ่ายไฟฟ้าจะเกิดแรงผลักที่โรเตอร์จนมอเตอร์หมุนในองศาเท่ากันโดยมีวงจรการขับ 2 แบบ คือ (1) วงจรแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) และแบบไบโพลาร์ (Bipolar)

2. มอเตอร์แบบเปลี่ยนแปลงค่ารีลักแตนซ์ (VR : Variable Reluctance) การทำงานขึ้นกับเส้นแรงแม่เหล็กที่ค่ารีลักแตนซ์ต่ำสุดไหลผ่านสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ ซีโรเตอร์หมุนไปในพิกัดขั้วแม่เหล็กที่ค่ารีลักแตนซ์สูงสุด ในวงจรจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน แต่ส่วน

โรเตอร์มีอิสระที่ความเฉื่อยน้อย ทั้งนี้ มอเตอร์สเต็ปปิ้งแบบ PM จะมีความเร็วต่ำกว่าแบบ VR ซึ่งโดยทั่วไปมีความเร็วมากกว่า

3. มอเตอร์แบบผสม หรือไฮบริด (Hybrid) โดยรวมข้อดีของแบบ PM และ VR ไว้ด้วยกัน ส่งผลให้แบบไฮบริดมีแรงบิด (Torque) สูงกว่าแบบ PM และแบบ VR รวมทั้งมีมุมการหมุนที่เล็กมาก นิยมใช้ในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ที่ต้องการความแม่นยำสูง



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของสเต็ปปิ้งมอเตอร์และการทำงาน

(ที่มา: https://www.electricaltechnology.org)

2.9.2 การพันขดลวดของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Coil Wiring Stepping Motor)

1. แบบไบโพลาร์ (Bipolar) จะมีการพันขดลวด 1 ขด บนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดขั้วแม่เหล็กของ สเตเตอร์ ขั้วแม่เหล็กจะเกิดทิศทางตรงกันข้ามโดยการกลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้ การพันขดลวดแบบไบโพลาร์มีผลให้เกิดแรงบิด (Torque) สูงกว่าการพันแบบยูนิโพลาร์

2. แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) จะมีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดจะแบ่งออกเป็น 2 เฟส รวมทั้งหมดมี 4 เฟส คือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 โดยทั่วไปมอเตอร์สเต็ปปิ้งชนิดนี้จะมีแบบ 5 สาย 4 เฟส และ 6 สาย 4 เฟส โดยที่แบบ 5 สาย 4 เฟส จะมีสายออกมาจากมอเตอร์ 6 เส้น เส้นแรกจะต่อที่เฟสของมอเตอร์ และมี 2 เส้น (Common) จะนำมาต่อรวมกัน

2.9.3 การควบคุมการหมุนของมอเตอร์สเต็ปปิ้ง (Stepping Motor Rotation)

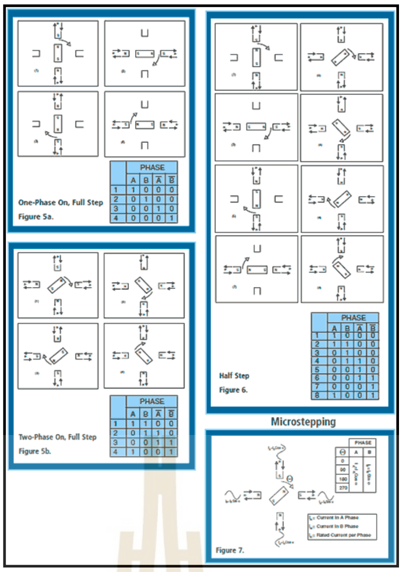
มอเตอร์สเต็ปปิ้งหมุนได้โดยการป้อนสัญญาณพัลส์ที่ขดลวดแต่ละเฟสของมอเตอร์ให้ไปทิศทางเดียวกันหรือเรียงลำดับ (Sequence) หากต้องการให้มอเตอร์สเต็ปปิ้งหมุนกลับทิศทางจะต้องป้อนสัญญาณพัลส์ในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้ การควบคุมการหมุนของมอเตอร์สามารถทำได้ 3 แบบ ดังนี้

1. แบบฟูลสเต็ป 1 เฟส (Full-Step 1 Phase) การควบคุมลักษณะนี้จะเป็นการกระตุ้นขดลวดทีละขด เรียงตามลำดับ 1, 2, 3, 4 การกระตุ้นจะมีขดลวดขดเดียวในเวลาหนึ่งที่ถูกกระตุ้นเท่านั้น เช่น ขดที่ 1, 2, 3, 4 หรือ ถ้าต้องการให้หมุนสวนทิศทางกัน ก็จะกระตุ้นขดลวดที่ 4, 3, 2, 1 เป็นต้น การกระตุ้นแบบนี้จะทำงานง่ายที่สุดและกินกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดด้วย

2. แบบฟูลสเต็ปสองเฟส (Full-Step 2 Phase) การควบคุมลักษณะนี้จะเป็นการกระตุ้นขดลวดทีละ 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันให้ทำงานพร้อมกัน และเรียงลำดับกันไป เช่น ขดที่ 12, 23, 34, 41 หรือถ้าต้องการให้หมุนสวนทิศทางกันก็จะกระตุ้นขดที่ 14, 43, 32, 21 เป็นต้น ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้คือ มอเตอร์สเต็ปปิ้งจะมีแรงบิด (Torque) มากกว่าแบบ 1 เฟส ส่วนข้อเสียของการกระตุ้นแบบนี้คือ จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของแบบ 1 เฟส เพราะต้องกระตุ้นขดลวด 2 ขดลวดพร้อมกัน

3. แบบฮาล์ฟสเต็ป (Half Step) การกระตุ้นแบบนี้เป็นการกระตุ้นแบบ 1 เฟส กับ 2 เฟส มารวมกัน โดยการกระตุ้นจะเรียงลำดับกันไปมา เช่น ขดที่ 1, 12, 2, 23, 3, 34, 4, 41 หรือถ้าต้องการให้หมุนสวนทิศทางกันก็จะกระตุ้นขดลวดที่ 1, 41, 4, 43, 3, 32, 2, 21 เป็นต้น ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้คือ สเต็ปปิ้งมอเตอร์จะมีแรงบิด (Torque) เพิ่มมากขึ้น ละเอียดขึ้นและควบคุมตำแหน่งถูกต้องมากยิ่งขึ้น ข้อเสียของการกระตุ้นแบบนี้คือ จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เหมือนกับการกระตุ้นแบบ 2 เฟส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



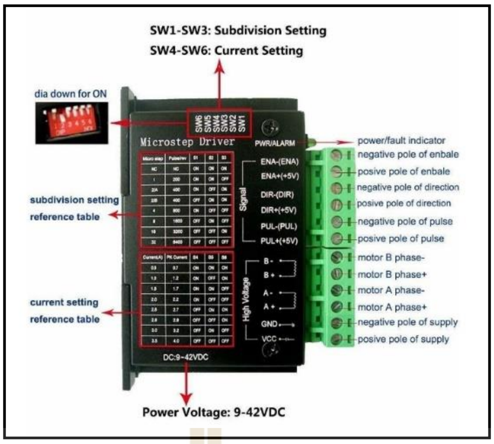
รูปที่ 2.21 การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบต่าง ๆ
(ที่มา : http://www.nmbtc.com)

2.10 บอร์ดขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor Driver: TB6600)

โมดูลควบคุม Stepper Motor หรือ DC Motor ที่มีช่องสาหรับเชื่อมต่อเข้ากับ Stepper Motor จำนวน 4 เส้น และมีช่องป้อนสัญญาจากคอนโทรลเลอร์ 3 เส้น คือ PUL, DIR และ ENABLE โดยที่ PUL และ DIR เป็นขาควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็นการระบุทิศทางองศา และความเร็ว ในการหมุน ENABLE เป็นช่องที่ถูกปล่อยให้เป็น LOW ตลอดการใช้งาน เนื่องจากถ้ามีสถานะ เป็น HIGH จะทำให้ Output ไปยัง Motor เป็น Disable Mode (อ้างถึงใน Sorotec, 2018)

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของ Stepping Motor Driver รุ่น TB6600

Stepping Motor Driver	Specification
Input Current	0 ~ 5.0A
Output Current	0.5-4.0A
Power (Max)	160W
Micro Step	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32
Temperature	-10 ~ 45°C
Humidity	No Condensation
Weight	0.2 kg
Dimension	96*56*33 mm



รูปที่ 2.22 การเชื่อมต่อเพื่อใช้งานบอร์ด TB6600
(ที่มา : https://www.zonemaker.com)

2.11 ระบบการมองเห็นของเครื่องจักร (Machine Vision System)

บุญธรรม ภัทราจารุกุล (2556, น. 324-338) ได้กล่าวถึงระบบการมองเห็นของเครื่องจักรว่าเป็นการใช้การมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ในการประมวลผลภาพ (Image Processing) จากกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัล (Digital Camera) ที่ส่องไปยังวัตถุเป้าหมาย และมีการปรับปรุงคุณภาพของภาพโดยให้เครื่องจักรหรือหุ่นยนต์มองเห็นผ่านโปรแกรม (Software) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้หาความเหมือน การจดจำ และแยกแยะวัตถุ สำหรับ การตัดสินใจตามคำสั่ง ตัวอย่างของระบบการมองเห็นของเครื่องจักร เช่น การเปลี่ยนภาพเป็นขาวดำ (Thresholding) การแยกส่วนภาพ (Segmentation) การหาขอบภาพ (Edge Detection) การจดจำแบบ (Pattern Recognition) เป็นต้น

2.11.1 องค์ประกอบของการมองเห็นของเครื่องจักร

ระบบการมองเห็นของเครื่องจักรโดยเบื้องต้น ประกอบด้วย

1. กล้องถ่ายภาพ

กล้องถ่ายรูปที่ใช้ในกรบวนการมองเห็นของเครื่องจักรจะมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ (1) กล้องถ่ายภาพธรรมดา ซึ่งเป็นกล้องแบบดิจิทัลที่เมื่อบันทึกภาพได้ต้องมีการต่อกับการ์ด และให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพต่อไป และ (2) กล้องถ่ายภาพอัจฉริยะ (Smart Camera) เป็นกล้องที่ประยุกต์เซนเซอร์ภาพ เช่น CCD และ CMOS เป็นต้น ระบบการมองเห็น ระบบโปรแกรม และระบบควบคุมอัตโนมัติไว้ในกล้อง มีการทำงานแบบเวลาจริง (Real Time) โดยมีอุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อการสื่อสาร อาทิ I/O Port Ethernet Port RS232 สำหรับเชื่อมต่อกับบอร์ดควบคุมต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ผู้พัฒนาระบบสามารถพัฒนาโปรแกรมของตนเองเพื่อใช้งานกับกล้อง

2. หลอดไฟ

การมีชุดอุปกรณ์ที่ช่วยส่องสว่างในระบบการมองเห็นของเครื่องจักรจะช่วยให้ภาพที่ตรวจจับมีคุณภาพที่เหมาะสม หลอดไฟที่ติดตั้งจึงต้องมีลักษณะที่พิเศษและถูกยึดไว้อย่างมั่นคงในตำแหน่งที่เหมาะสม ติดตั้งหลอดไฟมีหลายลักษณะ ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนี้

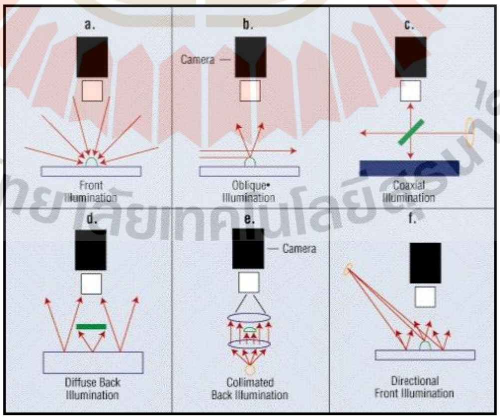
1) หลอดไฟติดตั้งด้านหน้า การจัดวางแบบนี้จะติดตั้งหลอดไฟไว้ด้านเดียว กับกล้อง เมื่อมีการส่องไปยังวัตถุจะทำให้เกิดการสะท้อนแสงของวัตถุเข้ากล้อง รูปแบบนี้จะใช้ตรวจสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของผิวหน้าวัตถุ

2) หลอดไฟติดตั้งด้านหลัง การจัดวางรูปแบบนี้วัตถุจะอยู่ระหว่างกล้องและหลอดไฟ ซึ่งจะทำให้เกิดภาพเงามืดของวัตถุคมชัดขึ้น รูปแบบนี้ใช้ในการตรวจสอบมิติของชิ้นงาน

3) หลอดไฟติดตั้งด้านข้าง การจัดวางรูปแบบนี้จะเอียงทำมุมกับกล้องจนทำให้เกิดเงาที่ไม่เรียบในผิวหน้าของวัตถุ ประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับจุดตำหนิหรือรอยร้าวของวัตถุ

4) หลอดไฟติดตั้งแบบโครงสร้าง การจัดวางแบบนี้ลำแสงจะเป็นแบบแถวหน้ากระดานที่มีจุดรวมความเข้มแสง และเป็นมุมเอียงไปยังผิวด้านหน้าของวัตถุ เกิดแนวเส้นแสงที่ตัดกับผิวหน้าวัตถุ การจัดวางเช่นนี้เหมาะกับการความคลาดเคลื่อนในผิวหน้าวัตถุ

5) หลอดไฟติดตั้งแบบสโตรบ (Strobe) หรือเรียกว่า ไทมิ่งไลต์ (Timing Light) การจัดวางรูปแบบนี้เพื่อส่งสัญญาณพัลส์สั้น ๆ ของลำแสงที่มีความเข้มสูงไปยังวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ทำให้มองเห็นวัตถุเหมือนอยู่กับที่ได้



รูปที่ 2.23 การจัดวางกล้องเพื่อการตรวจสอบในตำแหน่งที่ต่างกัน
(ที่มา: https://www.edn.com)

3. ซอฟต์แวร์ในการประมวลผลภาพ

ซอฟแวร์จะทำหน้าที่ตรวจสอบวัตถุโดยการประมวลผลหลายขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะลดสัญญาณรบกวนในภาพ ตามด้วยการตรวจนับหรือวัดเอกลักษณ์ของวัตถุ จากนั้นจะทำการประเมินวัตถุตามเงื่อนไขที่กำหนดเพื่อส่งสัญญาณไปสั่งการอุปกรณ์ทางกลในระบบเครื่องจักรต่อไป

2.11.2 ระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision System)

1. การมองเห็นของหุ่นยนต์แบบ 2D (2D Robot Vision)

ระบบการมองเห็นแบบ 2 มิติ จะใช้กล้องติดตั้ง 90° เหนือวัตถุ มีการแสกนเส้นหรือพื้นที่เพื่อตรวจจับภาพวัตถุในแนวแกนตั้ง (y) และแนวนอน (x) และมุมของชิ้นงาน แต่ไม่มีความลึก (z) กระบวนการประมวลผลภาพจะวัดคุณลักษณะที่ชัดเจนของวัตถุที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ เช่น การมีอยู่ของวัตถุ ตำแหน่งวัตถุ และคุณภาพผิวของวัตถุ เป็นต้น

2. การมองเห็นของหุ่นยนต์แบบ 3D (3D Robot Vision)

ระบบการมองเห็นแบบ 3D จะใช้ตรวจจับตำแหน่งและรูปร่างของวัตถุใน 3 มิติ เช่น ขนาด ความหนาบาง หรือรูปร่าง เป็นต้น โดยใช้กล้องชนิดพิเศษหรือแสงเลเซอร์ที่มีความเร็วสูง เพื่อวิเคราะห์หาขนาดและทิศทางของวัตถุ โดยตรวจวัดได้ทั้งความสูง ความกว้าง และความลึกของวัตถุ สามารถมองเห็นวัตถุได้ถึง 6 ขั้นความอิสระ (6 DOF) (ตำแหน่งและทิศทาง)

3. การมองเห็นระบบสเตอริโอ (3D Stereo System Vision)

เป็นการติดตั้งกล้อง 2 ตัว โดยส่องไปยังวัตถุเพื่อให้มีการมองเห็นได้เหมือนตาของมนุษย์ การมองเห็นในระบบสเตอริโอจะดึงข้อมูล 3 มิติ จากภาพดิจิทัลของกล้องหลายตัวที่ส่องไปยังบริเวณวัตถุ การมองเห็นแบบ 3 มิติใช้ในงานระบบอัตโนมัติในสาขาหุ่นยนต์ที่ช่วยให้หาตำแหน่งชิ้นงานได้ด้วยความละเอียดสูงและรวดเร็ว

2.12 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

สมเกียรติ อุดมหรรษากุล (2554) กล่าวถึงการประมวลผลภาพ (Image Processing) คือ การกระทำการอย่างใดอย่างหนึ่งกับภาพต้นฉบับ (Input Image) เพื่อให้ได้ภาพผลลัพธ์ (Output Image) มีลักษณะภาพที่เป็นไปตามต้องการ ซึ่งการกระทำการกับภาพที่ใช้ในการประมวลผลภาพดิจิทัลมีอยู่มากมายหลายแบบ ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณลักษณะและการแยกแยะประเภทของ การกระทำกับภาพ จะช่วยให้สามารถคาดคะเนภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการกระทำการแต่ละแบบ หรือประมาณความซับซ้อนของการกระทำการกับภาพที่จะนำไปใช้ได้

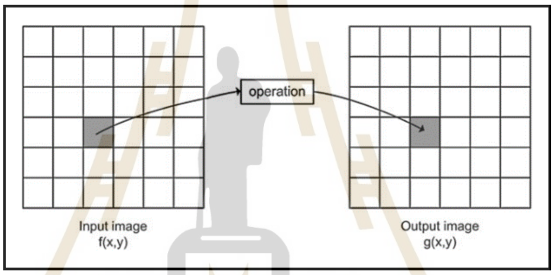
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.12.1 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

การกระทำการกับภาพในการประมวลผลภาพดิจิทัลสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ การประมวลผลแบบจุด (Point Image Processing) และการประมวลผลภาพ แบบบริเวณ (Local Image Processing) นอกจากนี้ ยังมีการประมวลผลโดยวัตถุประสงค์เฉพาะ อย่างการแยกส่วนของภาพ (Image Segmentation) ดังนี้

1. การประมวลผลภาพแบบจุด (Point Image Processing)

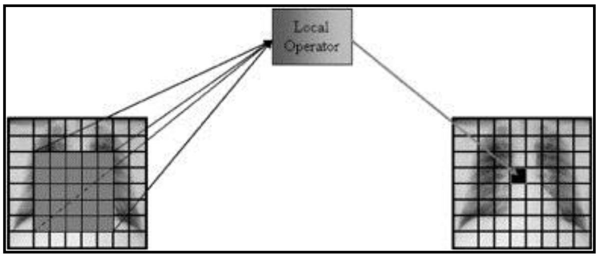
การประมวลผลภาพแบบจุด (Point Image Processing) เป็นวิธีการจัดการกับภาพต้นฉบับที่ค่าระดับความเข้มเท่าที่แสดงในแต่ละพิกเซลของภาพ ผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มเทาของพิกเซลในภาพต้นฉบับพิกเซลต่อพิกเซลที่ตำแหน่งสมนัยกัน โดยที่ค่าเปลี่ยนแปลงของพิกเซลของผลลัพธ์ไม่ได้ขึ้นกับค่าพิกเซลที่อยู่บริเวณใกล้เคียงของภาพต้นแบบ



รูปที่ 2.24 ลักษณะของการประมวลผลภาพแบบจุด
(ที่มา: https://slideplayer.com)

2. การประมวลผลภาพแบบบริเวณ (Local Image Processing)

กระบวนการทำภาพแบบบริเวณนี้ ค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลในแต่ละจุดในภาพผลลัพธ์จะขึ้นอยู่กับค่าระดับความเข้มเทาของกลุ่มพิกเซลที่อยู่ในบริเวณข้างเคียงกัน (Neighborhood Pixels) ของภาพต้นฉบับ ตัวอย่างของการประมวลผลภาพทางดิจิทัลแบบนี้ ได้แก่ การกรองสัญญาณภาพในสเปเชียลโดเมน (Spatial Domain Filtering) หรือที่นิยมเรียกว่า การคอนโวลูชั่น (Convolution) เป็นต้น



รูปที่ 2.25 ลักษณะของการประมวลผลภาพเฉพาะบริเวณ
(ที่มา: https://www.jmirs.org)

3. การแยกส่วนของภาพ (Image Segmentation)

เป็นเทคนิคหรือวิธีการประมวลผลภาพที่มีวัตถุประสงค์ในการแยกวัตถุ (Object) หรือลักษณะจุดเด่น (Feature) ในภาพออกจากพื้นหลัง (Background) ของภาพ วิธีการพื้นฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการแยกวัตถุหรือลักษณะจุดเด่นของภาพออกจากพื้นหลัง มี 2 วิธี คือ การหาขอบภาพ (Edge Detection) และเทคนิคการทำเทรชโฮลด์ (Threshold) เนื่องจากในบางครั้งการวิเคราะห์หรือการประมวลผลข้อมูลภาพจำเป็นที่จะต้องทำการแยกวัตถุหรือสิ่งที่สนใจในข้อมูลภาพออกมาจากพื้นหลังของภาพ เช่น การแยกตัวอักษรสีดำออกจากพื้นหลังสีขาวในงานทางด้านรู้จำตัวอักษร (Character Recognition) หรือการประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพทางด้านการรู้จำใบหน้าคน (Face Recognition) นั้น จำเป็นต้องที่ต้องแยกส่วนตัวอักษรหรือใบหน้าคนออกจากพื้นหลังภาพ จากนั้นจึงนำตัวอักษรหรือภาพหน้าคนที่แยกส่วนออกมาได้นำไปวิเคราะห์ หรือประมวลผลภาพในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้เรียนรู้ประเภทของตัวอักษรหรือจดจำใบหน้าคนได้

2.12.2 วิธีการประมวลผลภาพ (Image Processing Methods)

บุญธรรม ภัทราจารุสกุล (2556, น. 341) อธิบายว่า ในทางปฏิบัติโปรแกรมการมองเห็นของเครื่องจักรจะมีการรวมเทคนิคการประมวลผลภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ทั้งในเรื่องความแม่นยำและความถูกต้อง ดังนี้

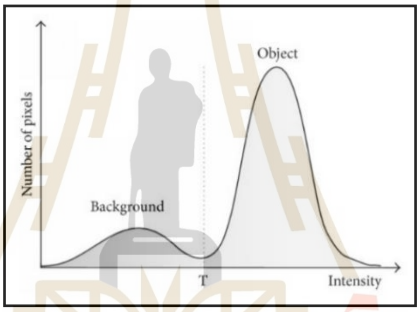
1. การนับจุดพิกเซล (Pixel)

เป็นองค์ประกอบ หรือหน่วย ซึ่งในภาพหนึ่ง ๆ จะประกอบไปด้วยจุดภาพหรือจุดพิกเซลจำนวนมาก ความหนาแน่นของจุดภาพบ่งบอกถึงความละเอียดหรือความคมชัดที่ต่างกัน จำนวนพิกเซลมีมากหมายถึงความละเอียดสูง การระบุค่าพิกเซลจะบอกได้โดยการใช้ค่าแนวนอนคูณแนวตั้ง เช่น 1,000 x 1,000 พิกเซล = 1,000,000 พิกเซล หรือ 1 ล้านพิกเซล

2. การแบ่งแยกบริเวณ (Segmentation)

เป็นกระบวนการแบ่งแยกภาพดิจิทัลออกเป็นส่วน ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์วัตถุ การแบ่งแยกวัตถุจะใช้ระบุตำแหน่งและขอบเขตของวัตถุในภาพ ผลของการแบ่งแยกภาพจะเป็นกลุ่มของวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ที่ถูกครอบคลุมไว้ทั้งหมด หรือถูกดึงออกจากภาพ เทคนิคการแบ่งแยกวัตถุที่เป็นที่นิยม ประกอบด้วย

1) การทำเทรชโฮลด์ (Thresholding) เป็นเทคนิคการประมวลผลภาพอย่างง่าย เพื่อจะแบ่งแยกส่วนพื้นหน้า (Foreground) หรือวัตถุ (Object) ออกจากพื้นหลัง (Background) โดยใช้ค่าระดับเทรชโฮลด์ (T) หรือค่าระดับความเข้มเทาคงที่ค่าหนึ่งเป็นตัวกำหนดในการแยกแยะส่วนของภาพ เพื่อทำให้ภาพผลลัพธ์ที่ได้เป็นภาพแบบไบนารี (Binary) ที่มีค่าระดับความเข้มเทาเพียง 2 ระดับเท่านั้น คือ ขาวและดำ



รูปที่ 2.26 การกำหนดค่าเทรชโฮลด์จากฮีสโทแกรม
(ที่มา: https://www.researchgate.net)

2) การหาขอบภาพ (Edge Detection) เป็นส่วนของข้อมูลที่แสดงถึงโครงร่างของวัตถุภายในภาพ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของภาพที่มีความสำคัญและมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ขอบของภาพ สามารถนำไปใช้ในการระบุถึงขนาดของวัตถุที่อยู่ในภาพ การนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกแยะระหว่างวัตถุหรือข้อมูลในภาพกับส่วนของพื้นหลังภาพ (Background) หรือการนำไปใช้ในการระบุวัตถุที่อยู่ภายในภาพ ขอบต่าง ๆ ภายในภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าระดับความเข้มเทาแบบทันทีทันใด จากค่าระดับต่ำ ๆ ไปเป็นค่าระดับความเข้มเทาสูง ๆ หรือในทางตรงกันข้าม เปลี่ยนจากค่าระดับค่าความเข้มเทาสูง ๆ ไปเป็นค่าระดับความเข้มเทาต่ำ ๆ อีกนัยหนึ่งคือ ส่วนที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลที่อยู่บริเวณด้านติดกัน (Neighborhood Pixels) กล่าวคือ ค่าระดับความเข้มเทาของพิกเซลที่อยู่ติดกันมีค่าแตกต่างกันมาก

0	0	0	10	10	10
0	0	0	10	10	10
0	0	0	10	10	10
0	0	0	10	10	10
0	0	0	10	10	10
0	0	0	10	10	10

รูปที่ 2.27 ค่าระดับความเข้มเทาของภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด
(ที่มา: http://datahacker.rs)

3. การรับรู้ (Recognition)

การจะทำให้คอมพิวเตอร์มองเห็นหรือรับรู้ว่าวัตถุในภาพเป็นวัตถุประเภทใด ขนาดใด สีใด รูปร่างเป็นอย่างไร ตลอดจนมีคุณลักษณะเฉพาะประการใด รายละเอียดต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นสิ่งที่คอมพิวเตอร์จะต้องแยกแยะความแตกต่างและหลากหลายให้ออก โดยที่ปัญหาในการรับรู้ของคอมพิวเตอร์โดยเบื้องต้น ประกอบด้วย

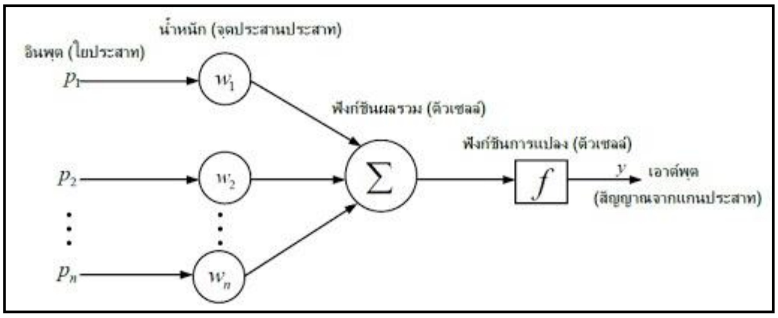
1) การรับรู้วัตถุ (Object Recognition) เป็นการกำหนดวัตถุไว้ล่วงหน้าในการเรียนรู้ หรือการจัดลำดับชั้นการรับรู้ของวัตถุในภาพแบบ 2 มิติ

2) การระบุเอกลักษณ์ (Identification) เป็นการระบุลักษณะเด่นหรือลักษณะสำคัญเฉพาะของวัตถุเพื่อการรับรู้

3) การตรวจสอบ (Detection) เป็นการแสกนข้อมูลภาพเอกำหนดเงื่อนไขที่เฉพาะเจาะจง การตรวจสอบจะอยู่บนพื้นฐานของการคำนวณที่ง่ายและรวดเร็ว เช่น การหาพื้นที่หรือขนาดของวัตถุ

4. เครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network : ANN)

เครือข่ายประสาทเทียม คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ที่อาศัยแนวคิดการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ ซึ่งเครือข่ายประสาทในระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์จะประกอบไปด้วยการเชื่อมกันของเซลล์ประสาทเทียม และการประมวลผลข้อมูล โดยหน้าที่ของเครือข่ายประสาทเทียมจะถูกนำเพื่อประยุกต์ใช้จดจำวัตถุ เช่น รูปทรงของวัตถุ สีของวัตถุ ชนิดของวัตถุ เป็นต้น



รูปที่ 2.28 แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียมที่แสดงเซลล์ประสาท
(ที่มา: http://www.mut.ac.th)

2.13 การตรวจสอบโดยใช้สี

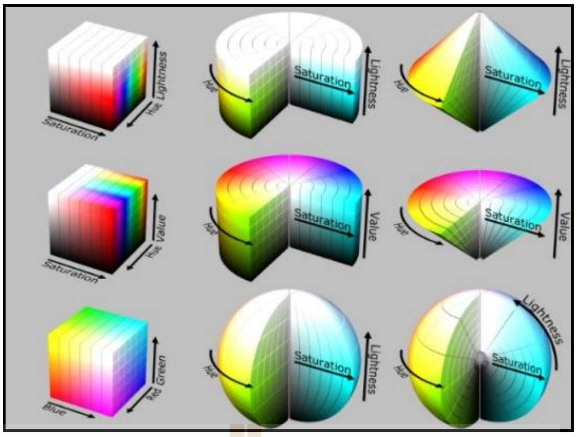
ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์ (2559) อธิบายถึงหลักการการตรวจสอบโดยใช้สีว่าเป็นลักษณะสำคัญที่ช่วยให้เพิ่มมิติของข้อมูลเพื่อระบุหรือจำแนกวัตถุได้ง่ายขึ้น ซึ่งการจะระบุสีใด ๆ ได้ด้วยบริเวณภายในปริภูมิสี โดยที่ปริภูมิสีที่หลากหลายประเภทและการใช้งานมีความแตกต่างกัน เช่น RGB HSL CMY และ YIQ เป็นต้น การศึกษาเรื่องการตรวจสอบโดยการใช้สี (Color inspection) ต้องทำความเข้าใจในเรื่องต่าง ๆ เช่น ปริภูมิสีและการแปลงค่า ระหว่างปริภูมิสี สเปกตรัมของสี การจับคู่สี การค้นหาวัตถุจากสี เป็นต้น

2.13.1 ปริภูมิสี (Color spaces)

อยู่ในระบบโคออร์ดิเนต 3 มิติ (3D Coordinates) แต่ละสีจะเป็นหนึ่งจุดในปริภูมิสี ปริภูมิสีมีหลายชนิด ดังรูปที่ 2.29 โดยถูกใช้ในอุตสาหกรรมและประยุกต์ในงานต่าง ๆ ดังนี้

- RGB ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ซึ่งใช้กับการแสดงผลในคอมพิวเตอร์
- HSL ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ สีสัน (Hue) ความอิ่มตัว (Saturation) และความส่องสว่าง (Luminance) ซึ่งใช้ในการประมวลผลภาพ
- CMY ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ สีฟ้า (Cyan) สีบานเย็น (Magenta) และสีเหลือง (Yellow) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์
- YIQ ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ความส่องสว่าง (Luminance) และองค์ประกอบข้อมูลสี I และ Q ซึ่งมักใช้ในอุตสาหกรรมโทรทัศน์

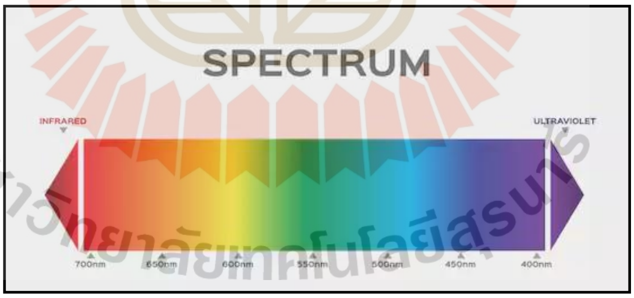
- .



รูปที่ 2.29 ลักษณะของปริภูมิสีแบบต่าง ๆ ที่ให้เลือกประยุกต์ใช้
(ที่มา: https://commons.wikimedia.org)

2.13.2 สเปกตรัมของสี (Color spectrum)

เป็นข้อมูลชนิดอาร์เรย์ 1 มิติ ที่ใช้แทนข้อมูลสี 3 มิติของภาพหรือพท้นที่ภายในภาพ ซึ่งใช้โดยฟังก์ชันประมวลผลภาพสีต่าง ๆ เช่น การจับคู่สี การค้นหาตำแหน่งวัตถุจากสี เป็นต้น ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 สเปกตรัมของสีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน
(ที่มา: https://medium.com)

2.13.3 การแมตชิงสี (Color matching)

การคำนวณความคล้ายกันของสีที่กำหนดและสีภายในบริเวณภาพที่ต้องการตรวจสอบ การแมตชิงสีจะให้คะแนน (Score) ที่บอกว่าสีในพื้นที่ที่ทดสอบมีความคล้ายกับสีที่กำหนดไว้โดยใช้สเปกตรัมของสีเป็นโมเดลในการเปรียบเทียบ วิธีเปรียบเทียบจะใช้หลักการของ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระยะทางแมนฮัตตัน (Manhattan distance) มาเป็นเครื่องมือ ค่าคะแนนการแมตชิงสีอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1000 โดยที่ยิ่งค่ามากหมายถึงมีสัดส่วนสีเหมือนกันมากขึ้น การแมตชิงสีถูกนำไปประยุกต์ เช่น การระบุวัตถุจากสี การตรวจสอบสี การค้นหาตำแหน่งวัตถุจากสี เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การระบุวัตถุจากสี (Color identification) เป็นการระบุวัตีโดยเปรียบเทียบข้อมูลสีบนวัตถุกับฐานข้อมูลสีอ้างอิง (Reference colors) ซึ่งได้มีการกำหนดไว้ก่อน โดยวัตถุจะถูกกำหนดให้มีฉลาก (Label) ตามชนิดวัตถุที่อ้างอิงที่มีคะแนนการแมตชิงสูงสุด

2. การตรวจสอบวัตถุจากสี (Color inspection) เป็นการตรวจสอบข้อบกพร่องของชิ้นงาน เช่น การหายไป หรือการประกอบผิดตำแหน่งของชิ้นส่วน ซึ่งจะใช้วิธีการแมตชิงสี กับบริเวณที่ต้องการทดสอบภายในภาพ

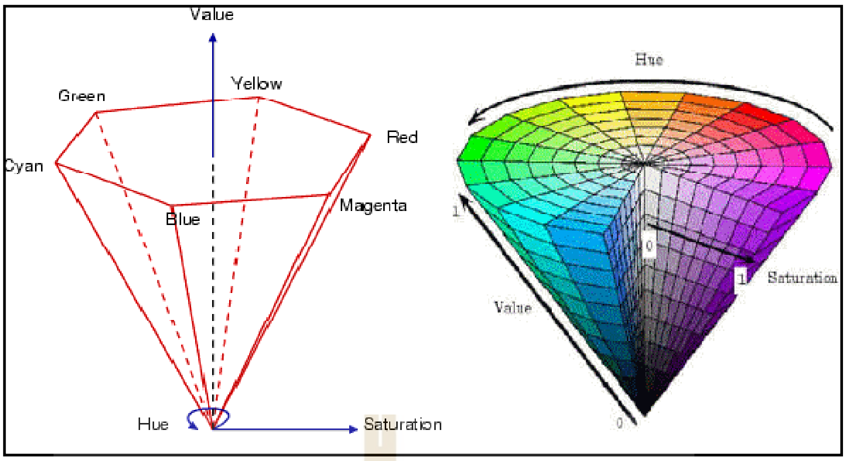
3. การค้นหาตำแหน่งวัตถุจากสี (Color object location) เป็นวิธีการค้นหาวัตถุอย่างรวดเร็วภายในภาพ ซึ่งต้องสร้างโมเดลสเปกตรัมของสีของวัตถุอ้างอิง การค้นหาตำแหน่งวัตถุจากสีจะระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้สัดส่วนสีในภาพรวมที่ไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ ตำแหน่ง และมุมการวางตัวของวัตถุ

สมเกียรติ อุดมหรรษากุล (2554, น. 147) อธิบายว่าแบบจำลองสีที่มีการใช้กันสามารถแสดงถึงค่าความสว่างในระดับหนึ่ง ๆ ได้ยาก ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถลดหรือเพิ่มค่อความสว่างของสีใดสีหนึ่งได้ง่ายขึ้น แบบจำลองสี HSV จึงถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าแบบอื่น เนื่องความเข้มขนของสีไม่ได้ขึ้นอยู่กับเนื้อสีเพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับค่าความสว่างด้วย โมเดลสี HSV แสดงดังรูปที่ 2.31 และมีรายละเอียดดังนี้

1) H (Hue) คือ ค่าของแม่สีหลัก ประกอบด้วย สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 โดยที่สีแดงจะเริ่มต้นที่ 0 เมื่อค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้สีเปลี่ยนไปตามสเปกตรัมจนวนกลับมาเป็นค่าของสีแดงอีกครั้ง

2) S (Saturation) คือ ความบริสุทธิ์ของสี อาจหมายถึงปริมาณของสีที่ถูกทำให้เจือจางด้วยสีขาว ยิ่งปริมาณสีขาวมีมากจะทำให้ความอิ่มตัวของสีน้อยลง เช่น สีแดงมีความอิ่มตัวมากกว่าสีชมพู ดังนั้น หาก Saturation มีค่าเท่ากับ 0 จะเท่ากับไม่มีสี และหากเท่ากับ 1 จะหมายถึงไม่มีแสงสีขาวอยู่เลย

3) V (Value) คือ ค่าความสว่างของสี ซึ่งวัดได้จากค่าความสว่างของสีแต่ละสีที่ประกอบกัน โดยค่าความสว่างของสีจะต่างระดับกันไป



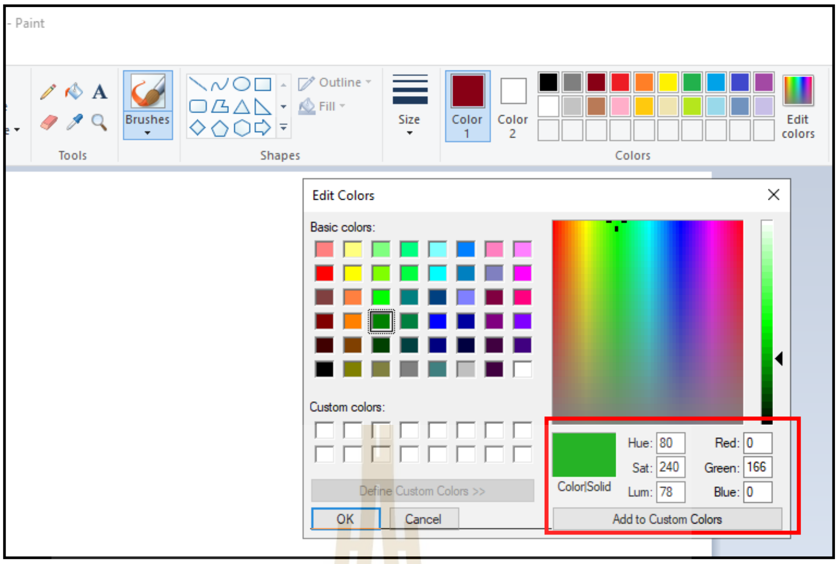
รูปที่ 2.31 แบบจำลองสีแบบ HSV ที่นิยมใช้ในการตรวจจับสีวัตถุ
(ที่มา: https://www.semanticscholar.org)

การแปลงค่าแบบจำลองสี RGB เป็นค่าแบบจำลองสี HSV ต้องทำให้ค่าปริมาณของแม่สีหลัก R, G และ B อยู่ระหว่าง 0 และ 1 แต่หากค่าเหล่านั้นอยู่ระหว่าง 0 และ 255 ต้องทำการหารค่าต่าง ๆ ด้วย 255 เพื่อให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าปริมาณของระดับสี HSV ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$V = \max\{R, G, B\}$$
$$\delta = V - \min\{R, G, B\}$$
$$S = \frac{\delta}{V} \quad (2.1)$$

โดยที่ min (R, G, B) คือ ค่าที่น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าสีเขียว สีแดง และสีน้ำเงิน
Max (R, G, B) คือ ค่าที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าสีเขียว สีแดง และสีน้ำเงิน

การจะตรวจจับสีของวัตถุด้วยชุดคำสั่งในภาษา Python จะต้องแปลงค่าแบบจำลองสี RGB เป็น HSV หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าสีของ H S และ V ตามลำดับ ในโปรแกรม วิธีการหนึ่งที่จะสามารถตรวจสอบค่า HSV เพื่อกำหนดในโค้ดโปรแกรมได้คือการใช้โปรแกรม Paint ที่ติดตั้งมาพร้อมกับระบบปฏิบัติการ Windows ที่ใช้เลือกสีและตรวจสอบค่า HSV เพื่อนำไประบุในโค้ดโปรแกรมสำหรับเลือกตรวจจับวัตถุที่มีสีต่าง ๆ ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 การใช้โปรแกรม Paint บน Windows เพื่อตรวจสอบค่าสีในปริภูมิ HSV

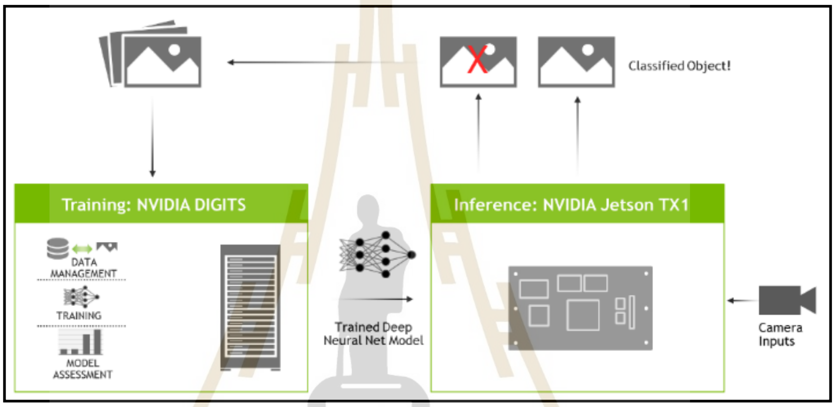
2.14 Jetson Inference

Dustin Franklin (2019) Jetson Inference เป็น Training Guide ที่มีการพัฒนาขึ้นมาแบบสำเร็จรูปสำหรับใช้งานในการวินิจฉัยข้อมูลบนบอร์ด Nvidia Jetson เช่น NVIDIA Jetson Nano NVIDIA Jetson TX1 และ TX2 เป็นต้น โดยใช้ Nvidia DIGITS (NVIDIA Deep Learning GPU Training System) ที่ใช้ประยุกต์ในงาน Neural Networks และ Deep Learning บน Jetson Platformโดยใช้ซอฟแวร์ Nvidia TensorRT ที่ศักยภาพในการรีดประสิทธิภาพในตอนรัน (RT = runtime) ให้สูงสุด โดยออกแบบมาสำหรับปรับแต่งประสิทธิภาพก่อนเพื่อที่ในขณะรันงานจริง (production) จะได้ใช้งานทรัพยากรเครื่องอย่างคุ้มค่าที่สุด โดยที่เทคนิคจะคล้ายกับการแปลง bytecode ของ Java หรือการคอมไพล์แบบ ahead-of-time

Jetson Inference มีฟังก์ชันสำเร็จรูปในการใช้งาน โดยมี Model สำเร็จรูปให้เลือกใช้หลากหลายเพื่อใช้งานมนด้านต่าง ๆ ประกอบด้วย Image Recognition Object Detection Segmentation Pose Estimation และ Monocular Depth โดยมีรายละเอียดของ Libraries ในการใช้งานเป็น Model ต่าง ๆ เช่น imageNet detectNet segNet poseNet และ depthNet เป็นต้น โดยทั้ง ในส่วนที่เป็นภาษา C++ และ Python ดังตารางที่ 2.7

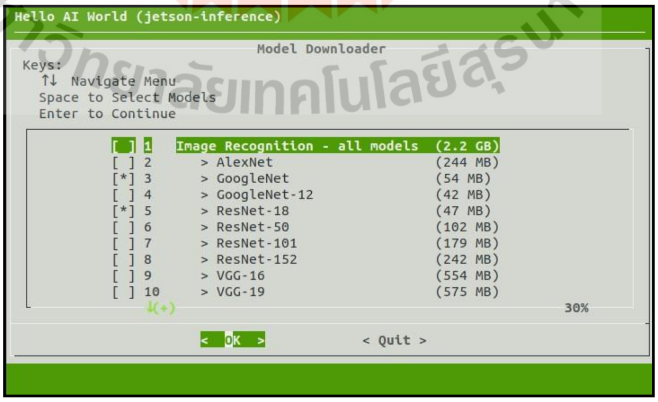
ตารางที่ 2.7 โมเดลสำเร็จรูปที่มีให้เลือกใช้งานใน Jetson-Inference

	C++	Python
Image Recognition	imageNet	imageNet
Object Detection	detectNet	detectNet
Segmentation	segNet	segNet
Pose Estimation	poseNet	poseNet
Monocular Depth	depthNet	depthNet



รูปที่ 2.33 ลักษณะของ Data Training ใน Jetson-Inference ที่นำมาใช้งาน

(ที่มา: https://github.com)



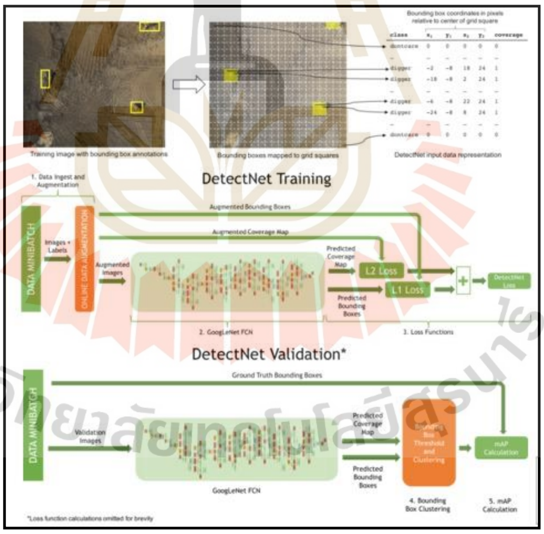
รูปที่ 2.34 ชุดโปรแกรมสำเร็จรูปของ Jetson-Inference

(ที่มา: https://dnjooiopa.medium.com)

2.15 DetectNet Object Detection

Dustin Franklin (2019) ให้ความหมายของ DetectNet เป็น Model สำเร็จรูปที่ติดตั้งอยู่ใน Jetson Inference โดยมีไว้ใช้งานในด้าน Object Detection โดยที่สามารถใช้ในรูปแบบ Custom Model ที่ผ่านการ Training มาให้เป็นที่เรียบร้อย หรือ Training ให้โปรแกรมรู้จัก Object ที่ต้องการเพื่อนำสร้างเป็น Model ที่ตรวจจับและระบุพิกัดวัตถุ (Locating Object) อย่างเฉพาะเจาะจงได้ ซึ่งจะมีการแสดงผลเป็น Bounding boxes ที่ล้อมกรอบวัตถุไว้ และจะมี Bounding coordinate labelsที่แสดงตัวหนังสือเพื่อจำแนกชื่อของวัตถุตามที่ได้มีการ Training Dataset ไว้ ทั้งนี้ DetectNet ตรวจจับได้ทั้งวัตถุบนภาพ (2D Image) วัตถุในไฟล์วีดิโอ และวัตถุที่มีการบันทึกภาพแบบ Real-Time จาก Web Camera หรือ CSI Camera

DetectNet ที่ผ่านการ Training วัตถุมาแล้วจะทำนายข้อมูลที่อยู่บนภาพหรือวีดีโอ โดยคาดการณ์ว่าในตาราง (grid square) มีวัตถุอยู่หรือไม่ และทำการล้อมกรอบวัตถุดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับการทำนายข้อมูลตามช่องตาราง (อ้างถึงใน Andrew Tao, Jon Barker and Sriya Sarathy, 2016) ดังรูปที่ 2.35

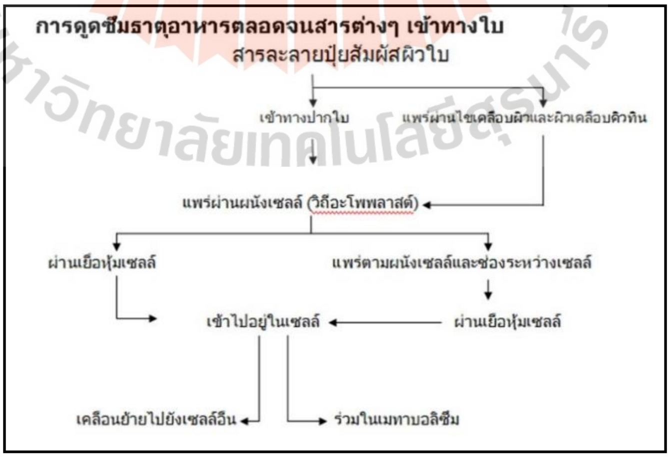


รูปที่ 2.35 ลักษณะการประมวลผลของ DetectNet
(ที่มา: https://developer.nvidia.com)

รูปที่ 2.36 การใช้ DetectNet ในงาน Object Detection
(ที่มา: https://github.com)

2.16 การให้ปุ๋ยทางใบ (Foliar Fertilization)

ยงยุทธ โอสถสภา (2560) กล่าวว่า ปุ๋ยทางใบ คือ ปุ๋ยละลายน้ำง่าย ให้แก่พืชในรูปของเหลวที่มีความเข้มข้นเหมาะสม โดยนำปุ๋ยซึ่งมีสถานะของแข็งหรือของเหลว มาเตรียมเป็นสารละลายเจือจาง แล้วฉีดพ่นสารละลายนี้เป็นละอองไปยังใบและต้น เพื่อให้ส่วนเหนือดินของพืชดูดไปใช้ประโยชน์ สำหรับรูปของธาตุอาหารในสารละลายปุ๋ยที่พืชใช้ประโยชน์ได้ ก็เป็นไอออนหรือโมเลกุลเล็ก (เช่น กรดบอริก ยูเรียและคีเลต) เช่น เดียวกับที่พืชดูดใช้ทางราก สำหรับไอออนของธาตุอาหารต่าง ๆ เป็นรูปที่เซลล์พืชดูดไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย ปุ๋ยทางใบส่วนมากจึงเป็นปุ๋ยเคมี ซึ่งประกอบด้วยสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์สังเคราะห์



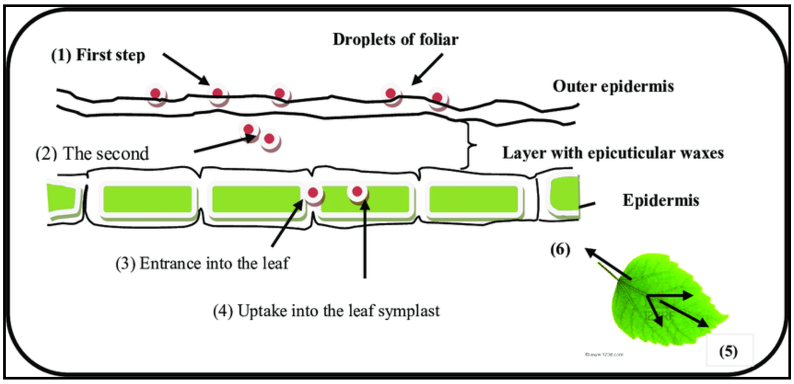
รูปที่ 2.37 ขั้นตอนแพร่ การดูดและใช้ธาตุอาหารและสารทางใบ
(ที่มา: https://sites.google.com)

การเสริมด้วยปุ๋ยทางใบใช้ใน 2 กรณี คือ เมื่อพืชได้รับบางธาตุจากดินไม่เพียงพอ และเพื่อบรรเทาความเครียดจากสภาพแวดล้อม ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ยทางใบ คือ การฉีดพ่น เกษตรกรจึงต้องให้ความสำคัญกับเรื่องนี้เช่นเดียวกับเรื่องปัจจัยอื่น ๆ ประกอบด้วย 6 ประเด็น ดังนี้

2.16.1 เทคโนโลยีการฉีดพ่น (Spray application technology)

เทคโนโลยีการให้ปุ๋ยทางใบประกอบด้วย 3 เรื่อง คือ (1) องค์ประกอบของปุ๋ย (2) ทำให้สารละลายปุ๋ยเป็นละออง (atomization) และ (3) การเคลื่อนที่ของละอองปุ๋ยไปจนกระทบกับพื้นผิวของพืช ซึ่งมีผลของการฉีดพ่นตามมา 2 ประการ คือ (1) การกระจายและการยึดเกาะของละอองปุ๋ยกับพื้นผิวของพืช และ (2) การซึมผ่านของปุ๋ยเข้าไปในอวัยวะของพืชที่ได้รับปุ๋ย ดังนั้นเทคนิคการฉีดพ่นจึงประกอบด้วย 2 เรื่อง คือ การเลือกอุปกรณ์การฉีดพ่นที่เหมาะสม และดำเนินการฉีดพ่นอย่างถูกต้อง สารละลายปุ๋ยในรูปของละอองที่ฉีดพ่นไปโดยใช้อุปกรณ์การฉีดพ่นแบบต่าง ๆ นั้น มีลักษณะของละอองปุ๋ยที่แตกต่างกันตามประเภทของหัวฉีด ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของปุ๋ยที่ได้แตกต่างกัน อันเนื่องจากการสูญเสียปุ๋ยในกระบวนการฉีดดังนี้ (1) หยดน้ำปุ๋ยสัมผัสพื้นผิวแต่สะท้อนกลับ (droplet reflection) จึงไม่เกาะกับอวัยวะพืช (2) ไหลออกจากพื้นผิว (run-off) และ (3) ละอองปุ๋ยฟุ้งออกนอกเป้าหมาย (spray drift) เช่น ถูกลมพัดออกไป และบางส่วนระเหยน้ำจนแห้งก่อนถึงผิวใบ (in-flight evaporation)

รูปที่ 2.38 การให้ปุ๋ยทางใบในดรงเรือนปลูกพืชโดยใช้เครื่องฉีดพ่นแบบสะพายหลัง
(ที่มา: https://www.maximumyield.com)

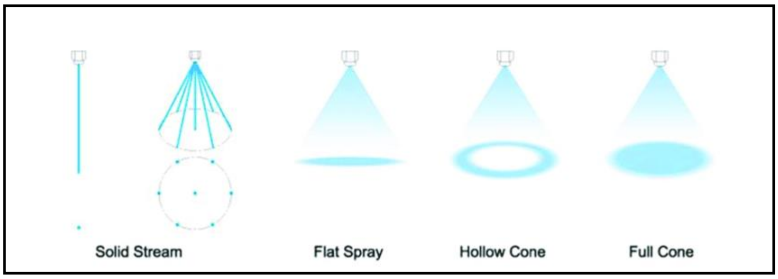


รูปที่ 2.39 การดูดซึมปุ๋ยทางใบของพืช
(ที่มา: https://www.researchgate.net)

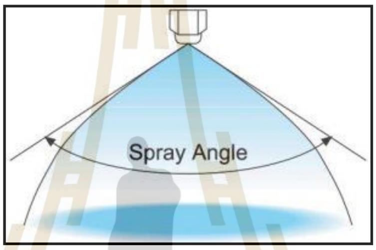
2.16.2 หัวฉีด (Nozzle)

แม้ว่าอุปกรณ์การฉีดพ่นปุ๋ยจะมีหลายส่วน แต่หัวฉีด (nozzle) เป็นตัวกำหนดขนาดของละออง รูปแบบของสเปรย์ และมุมของสเปรย์ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย นอกจากนี้หัวฉีดยังเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กที่เกษตรกรสามารถเลือกให้เหมาะกับวัตถุประสงค์ ของงานได้ จึงเน้นในเรื่องหัวฉีดมากกว่าเรื่องอื่น ทั้งนี้ หัวฉีดมีหน้าที่ควบคุมอัตราการปล่อยของเหลว ช่วยให้สามารถกำหนดปริมาตรของสารละลายและอัตราของปุ๋ยที่ต้องการฉีดพ่นได้ อย่างถูกต้อง ทำให้ของเหลวกลายเป็นหยดเล็ก ๆ แต่ละหยดที่ออกไปจากหัวฉีดมีปุ๋ยละลายอยู่ จึงช่วยนำปุ๋ยไปสัมผัสกับพื้นที่ผิวอวัยวะอันเป็นเป้าหมาย และทำให้หยดของเหลวที่ฉีดพ่น ไปกระทบและกระจายบนพื้นผิวอันเป็นเป้าหมาย ช่วยให้ผิวอวัยวะเปียกอย่างทั่วถึง และมีการสูญเสียปุ๋ยน้อย

รูปที่ 2.40 หัวฉีดพ่นรูปแบบต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
(ที่มา: https://www.pnr.co.uk)



รูปที่ 2.41 การจำแนกหัวฉีดตามรูปแบบการกระจายของหยดน้ำ
(ที่มา: https://www.researchgate.net)



รูปที่ 2.42 มุมของสเปรย์ที่ออกมาจากหัวฉีด
(ที่มา: https://www.ikeuchi.eu)

2.16.3 ผลการฉีด

ผลการฉีดพ่นขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวฉีด และหยดน้ำปุ๋ยที่ออกจากหัวฉีดอาจฟุ้งออกนอกเป้าหมาย โดยที่ลักษณะของหัวฉีดของหัวฉีดที่ใช้สำหรับการฉีดปุ๋ยทางใบมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยของพืชอย่างมาก เนื่องจากหัวฉีดและแรงอัดในการฉีด มีผลต่อขนาด ของหยดน้ำปุ๋ย (droplet size) และความเร็วของหยดสารละลายที่ถูกส่งออกไป รวมทั้งการฟุ้งของละอองสารละลายปุ๋ยออกนอกเป้าหมาย (spray drift) คือ ปริมาณของสารละลายปุ๋ยที่ฉีดพ่นออกไปแล้วถูกกระแสของอากาศ (air current) ทำให้เหหรือเบี่ยงออกจากพื้นผิวเป้าหมาย การฟุ้งของหยดสารละลายปุ๋ยดังกล่าวเกิดจากอิทธิพลของปัจจัย 4 ประการ คือ (1) สภาพอากาศ (2) เทคนิคการฉีดพ่น (3) ลักษณะของสภาพแวดล้อมโดยรอบ และ (3) สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ปุ๋ย

2.16.4 อันตรกิริยาระหว่างหยดสารละลายกับผิวใบ

อันตรกิริยาระหว่างหยดสารละลายกับผิวใบ (spray droplet : leaf surface interaction) เกิดขึ้นเพราะทั้งหยดสารละลายและพื้นผิวใบมีลักษณะที่แตกต่างกันหลายแบบ ในส่วนของหยดของสารละลายนั้น ความแตกต่างมาจาก 2 เรื่อง คือ 1) ลักษณะของหยดสารขึ้นอยู่กับความ

ตึงผิว (surface tension) และความหนืด (viscosity) และ 2) พลังงานจลน์ที่หยดสารละลายเข้าปะทะ (dynamics of droplet impaction) ขึ้นอยู่กับมวล ความเร็ว มุมของการกระแทก และสภาพประจุของตัวละลาย ส่วนลักษณะผิวใบก็อาจแตกต่างกัน 2 เรื่อง คือ 1) ผิวใบเรียบหรือหยาบขรุขระ และ 2) องค์ประกอบทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับสภาพขั้วของหมู่ทำหน้าที่ (functional group) ในสารประกอบบนผิวใบ

2.16.5 การเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพ่น

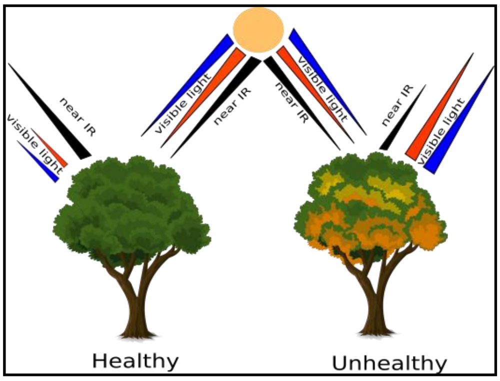
การเพิ่มประสิทธิภาพการฉีดพ่นโดยลดการฟุ้งออกนอกทิศทางของหยดน้ำปุ๋ย มีวิธีดำเนินการได้ 2 วิธี คือ 1) การปรับปรุงวิธีฉีดพ่น โดยที่การปรับหัวฉีดและแรงดันให้ได้หยดน้ำ มีขนาดเหมาะสม รวมทั้งกำหนดระยะของหัวฉีดกับเป้าหมายให้ถูกต้อง ไม่ฉีดพ่นตอนลมพัดแรงเกินไป จำทำให้การสูญเสียปุ๋ยที่เกิดจากลมหอบออกไปนอกทิศทางเกิดน้อยลง และ 2) การพัฒนาหัวฉีด โดยที่ ปรับปรุงหัวฉีดให้สามารถปล่อยหยดน้ำปุ๋ยออกมา 2 ขนาด คือ หยดขนาดเล็กอยู่ด้านใน ล้อมรอบด้วยหยดที่มีขนาดใหญ่กว่า เพื่อให้หยดน้ำปุ๋ยชั้นนอกควบคุมการฟุ้งของหยดขนาดเล็กภายใน

2.16.6 วิธีการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบที่ถูกต้อง

หัวฉีดของเครื่องมือโดยทั่วไปปล่อยละอองของสารละลายขนาด <20-800 ไมโครเมตรแต่โดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 160-210 ไมโครเมตร และการฉีดพ่นให้สารละลายกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวใบ ช่วยให้การให้ปุ๋ยมีประสิทธิภาพสูง ปริมาตรของสารละลายปุ๋ยที่เกาะอยู่บนพื้นผิวประมาณ 5-30 ไมโครเมตรต่อตารางเซนติเมตร ในกรณีการฉีดพ่นปุ๋ยเพื่อแก้ปัญหา การขาดแคลนธาตุอาหาร ควรฉีดพ่นซ้ำทุก ๆ 7 วัน จนกระทั่งใบที่แสดงอาการนั้นหายเป็นปรกติ ต่อจากนั้นก็ต้องกำหนดโปรแกรมการฉีดพ่นปุ๋ยทุก ๆ 2 หรือ 3 สัปดาห์ เพื่อป้องกันมิให้พืชขาดธาตุนั้นอีก

2.17 ดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index)

ภานุพันธ์ ไมตรี (2561, น. 13) อธิบายว่า ดรรชนีพืชพรรณ (Vegetation Index: VI) คือค่าที่บอกสัดส่วนของพืชพรรณในพื้นที่ใด ๆ โดยคำนวณได้จากจากการนำช่วงค่าคลื่นแสงมาคำนวณกัน ดังภาพที่ 2.43 วิธีการนี้เรียกว่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) วิธีการนี้มักถูกใช้อย่างเป็นสากล ทั้งการติดตามภัยแล้ง พยากรณ์การผลิตทางการเกษตร ช่วยในการพยากรณ์เขตเพลิงไหม้ นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์เป็นแอพพลิเคชันสำหรับการทำฟาร์ม เช่น การตรวจสอบพืชผลเพื่อกำหนดความแม่นยำในการให้น้ำและปุ๋ย



รูปที่ 2.43 การวัดค่าดัชนีพืชพรรณโดยอาศัยการวัดช่วงคลื่น
(ที่มา: http://tosakunmeeting.blogspot.com)

วิธีการนี้จะตรวจจับค่าการสะท้อนของคลื่นใกล้อินฟราเรด (Near-infrared) มาคำนวณร่วมกับค่าในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red light) โดยมีการคำนวณค่าการกระจายแบบปกติ โดยปกติค่า NDVI ที่ผ่านการคำนวณจะอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ดังภาพที่ 2.45 ซึ่งช่วยให้ใช้ในการแปลผลได้อย่างสะดวกในการใช้

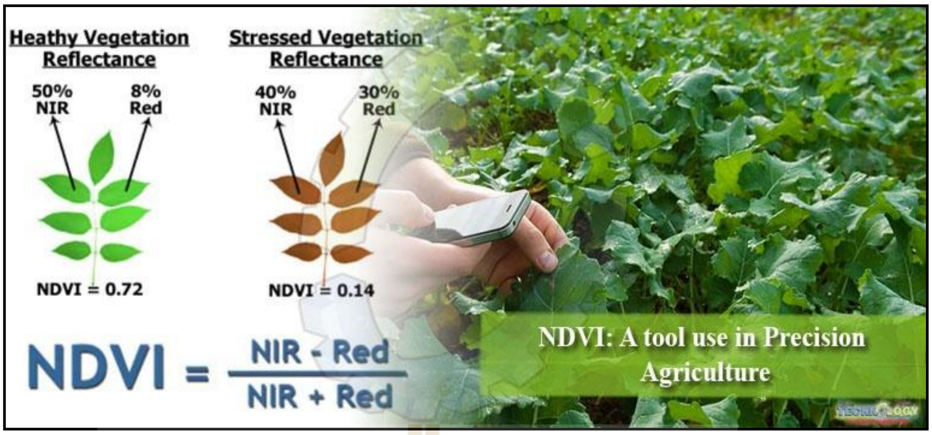
เมื่อผลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง ไม่มีพืชใบเขียวอยู่ในพื้นที่ดังกล่าว หากค่าที่ได้เท่ากับ 0.8 - 0.9 หมายถึง พืชใบเขียวมีการปกคลุมอย่างหนาแน่น โดยที่จะสะท้อนค่าในช่วงคลื่นอินฟราเรดสูงกว่าแสงสีแดง ซึ่งมีผลให้ค่า NDVI ที่คำนวณได้มีผลบวก ส่วนผิวดินจะมีการสะท้อนค่าระหว่างสองช่วงคลื่นใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่า NDVI ลดต่ำลงไปใกล้กับ 0 ในขณะที่ผิวน้ำ มีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรดต่ำกว่าช่วงคลื่นสีแดง ค่า NDVI จึงติดลบ การวัด ความสมบูรณ์ของพืชแสดงดังภาพที่ 2.44 การคำนวณค่า NDVI สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$NDVI = (NIR-Red)/(NIR+Red)$$

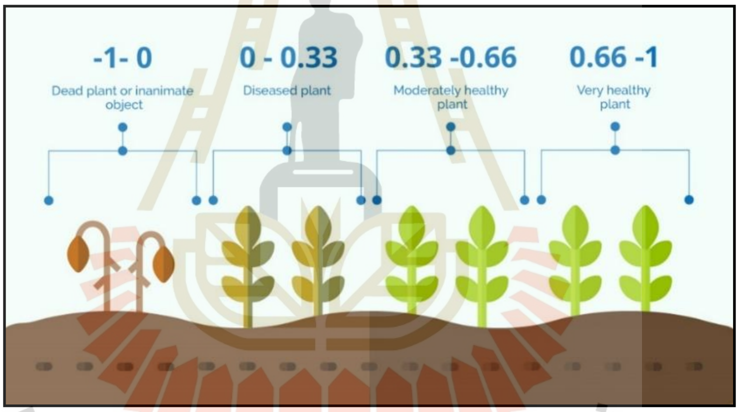
เมื่อ NIR = ค่าสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (%)

RED = ค่าสะท้อนในช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง (%)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.44 การสะท้อนของคลื่นแสงที่ต่างกันของพืชสดและพืชแห้ง
(ที่มา: https://www.plantagbiosciences.org)



รูปที่ 2.45 ค่า NDVI โดยพื้นฐานจากการตรวจวัดพืชที่มีสุขภาพต่างกัน
(ที่มา: https://www.auravant.com)

2.18 การใช้กล้อง NoIR Camera และกล้อง RGB Camera ในการคำนวณค่า NDVI

การตรวจวัดค่า NDVI ได้รับความนิยมมากขึ้นในการทำเกษตรแบบแม่นยำ การใช้กล้องเพื่อตรวจวัดและบันทึกภาพดัชนีพืชพรรณ (NDVI Image) พบมากสำหรับการใช้โดรนเพื่อสำรวจพื้นที่โดยใช้กล้องที่สามารถถ่ายภาพแบบ NIR และบันทึกภาพเป็นแบบ False-color NDVI Image ที่แสดงพื้นที่ที่บันทึกภาพเป็นแถบสีที่บอกถึงระดับต่ำสูงของค่า NDVI ได้โดยเบื้องต้น ทั้งนี้ ในขณะบินจะบันทึกภาพพื้นที่ลงการ์ดความจำ (Memory card) หลังจากนั้นจึงนำภาพที่บันทึกมาประมวลผล

ด้วยโปรแกรมเฉพาะทาง เช่น โปรแกรม Fiji ImageJ และโปรแกรม Theremino NDVI เป็นต้น เพื่อคำนวณค่า NDVI ที่สามารถแสดงค่าแบบขอบเขตพื้นที่หรือค่าเฉลี่ยระดับพิกเซลทั้งหมดของพื้นที่ได้

Liangju Wang (2020) อธิบายถึงการตรวจวัดค่า NDVI แบบ Real-Time จำเป็นต้องใช้กล้องที่เชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะสามารถนำค่าสีที่ได้จากการบันทึกของกล้องมาทำการประมวลผลเพื่อใช้กำหนดการทำงานต่าง ๆ โดยปกติกล้องที่ถ่ายภาพแบบ NIR และ RGB พร้อมกันได้จะเป็นกล้องที่มีต้นทุนสูง จึงมีการประยุกต์ใช้งานกล้องต้นทุนต่ำมาใช้เพื่อคำนวณ ค่า NDVI แบบ Real-Time โดยที่จะต้องใช้กล้อง 2 ชนิด ที่แบ่งหน้าที่บันทึกภาพแบบ NIR และ RGB จากนั้น จึงนำค่าที่ได้ไปประมวลผลร่วมกัน ซึ่งกล้องต้นทุนต่ำที่นิยมใช้คือ NoIR Camera ที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้งานร่วมกับบอร์ด Raspberry Pi และกล้อง RGB แบบ USB ทั่วไป ดังรูปที่ 2.46 และมีรายละเอียดดังนี้

(1) NoIR Camera ที่ใช้แผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน (Blue Filter) เพื่อคัดกรองเฉพาะแสง NIR (Near-Infrared) แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงินมา โดยที่แสงที่แดงไม่สามารถผ่านเข้ามาได้ ซึ่งการรับค่าแสงโดยไม่ใช้แผ่นกรองแสง สามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.2)

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ N \end{bmatrix} = [a \quad b \quad c \quad d] \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ N \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

จากสมการ R_c , G_c และ B_c คือ ค่าแสงสีใน RGB Channel และ a, b, c และ d คือ ค่าความไวแสงต่อย่านแสงสีต่าง ๆ ของกล้อง ในส่วนของ R, G, B และ N คือ ย่านแสงสี ที่สามารถผ่านเข้ากล้องได้ (Liangju, 2020) โดยจะเห็นว่าแสงสีที่สะท้อนจากพืชผ่านกล้อง NoIR Camera ได้ มีทั้งย่านแสงสี Red Green Blue และ NIR เนื่องจาก ไม่มีการใช้ Filter Blocking เพื่อปิดกั้นแสงสีในย่านใดเลย ส่วนการใช้แผ่นกรองแสงสีน้ำเงินจะสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.3)

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{ip} \\ B_{ip} \\ N_{ip} \end{bmatrix} = [i \quad j \quad k] \begin{bmatrix} G_{ip} \\ B_{ip} \\ N_{ip} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่อใช้แผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน แสงที่ที่ผ่านได้จะมีเพียงย่านแสงสี Blue Green และ NIR (B_{ip}, G_{ip}, และ N_{ip})

(2) RGB Camera ที่นำเข้าทั้งแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน แต่จะถูกนำมาใช้เฉพาะแสงสีแดงมาใช้เท่านั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (2.4)

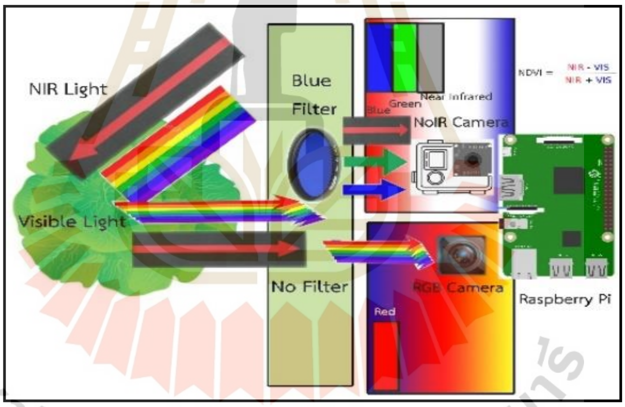
$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{gp} \\ G_{gp} \\ B_{gp} \end{bmatrix} = [l \quad m \quad n] \begin{bmatrix} R_{gp} \\ G_{gp} \\ B_{gp} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าแสงที่ที่ผ่านได้ คือ Red Green และ Blue (R_{gp}, G_{gp}, และ B_{gp}) ทั้งนี้ แสงสีที่บันทึกได้จากกล้องทั้ง 2 ประเภทจะถูกนำมาคำนวณในสมการ NDVI ซึ่งจะเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ย NDVI จากค่าทั้งหมดในกรอบพื้นที่ที่กำหนด และการประมวลผลเพื่อคำนวณในสมการ NDVI จะหาได้จากสมการที่ (2.5)

NDVI = NIR - Red/ NIR+ Red (2.5)

เมื่อ NIR คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

RED คือ ช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง



รูปที่ 2.46 NoIR and RGB Camera process of receiving light wavelength

2.19 การปลูกพืชในแปลงยกสูง (Raised bed gardening)

Marie Iannotti (2020) ให้ความหมาย Raised bed gardening ว่าเป็นการปลูกพืชบนดินที่ยกให้สูงขึ้นกว่าพื้น โดยปกติจะทำเป็นโครงสร้างที่เป็นกรอบขึ้นมารองรับการบรรจุดิน ซึ่งอาจทำจากไม้ อิฐ หิน ปูน หรือวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

แปลงปลูกพืชยกสูงเป็นรูปแบบการปลูกพืชที่เป็นที่นิยมสำหรับแปลงเกษตรในเมือง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ความสมบูรณ์ของดินต่ำ พื้นดินมีการบดอัดจนแน่น หรือมีพื้นที่ปูด้วยคอนกรีต ซึ่งใช้แปลงปลูกผัก (Raised Bed) มาเป็นเหมือนภาชนะสำหรับปลูก โดยที่นำดินที่ปรับปรุงใหม่มาบรรจุ แปลงยกสูง

สามารถออกแบบให้เหมาะกับการจัดวางในแปลงเกษตรได้โดยง่าย โดยเบื้องต้นแปลงปลูกผักยกสูงจะทำเป็นขอบสูงขึ้นมาประมาณ 10 – 12 นิ้ว หรืออาจมากกว่านี้ โดยขึ้นอยู่กับชนิดพืชที่ปลูก ทั้งนี้ยิ่งแปลงมีขอบสูงมากเท่าใดจะทำให้ต้องเติมดินมากขึ้นเท่านั้น (Gardener's Supply, 2021)

การปลูกพืชโดยจัดทำแปลงดินแบบยกสูงมีข้อได้เปรียบกว่าการปลูกพืชบนดิน David Berle และ Robert Westerfield (2013) แจกแจงถึงประโยชน์จากการปลูกพืชบนแปลง แบบยกสูง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

- ระบายน้ำได้ดีกว่าพื้นดินทั่วไป การที่เป็นดินที่มีการผสมปุ๋ย อินทรียวัตถุ วัสดุปรับสภาพดิน ช่วยให้เกิดการระบายน้ำที่ดี ดินที่ร่วนซุยทำให้มีออกซิเจนในดินทั่วทั้งแปลงสำหรับ การหายใจของพืช
- พืชเติบโตได้เร็วกว่าปลูกบนพื้นดิน ดินในแปลงยกสูงจะมีการเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิที่เร็วกว่าดินบนพื้น เมื่อมีการปลูกด้วยเมล็ดหรือย้ายกล้าลงปลูกในแปลงยกสูง จะช่วยให้ความอบอุ่นของดินส่งเสริมให้พืชเชิญเติบโตเร็วกว่า
- วัชพืชในแปลงมีน้อย เมื่อดินที่ผสมในแปลงยกสูงมีความร่วนซุยจึงไม่ต้องมีการไถพรวนบ่อยเหมือนดินบนพื้นที่มีการอัดตัวกันแน่นกว่า เมื่อไม่จำเป็นต้องไถพรวนจึงช่วยลดการเกิดและเติบโตของวัชพืชในแปลงปลูก และหากมีการคลุมดินด้วยชีวมวลที่เป็นเศษซากพืชจะช่วยให้วัชพืชเกิดน้อยลงไปอีกด้วย

รูปที่ 2.47 ลักษณะแปลงผักยกสูงที่มีการติดตั้งในโรงเรือนเพื่อปลูกพืช
(ที่มา: https://web.facebook.com/santiwanaBKK)

2.20 โรงเรือนปลูกพืช (Greenhouse)

ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ (2550) อธิบายว่า โรงเรือน (greenhouse or glasshouse) ซึ่งเป็นสิ่งก่อสร้างที่มุงด้วยวัสดุโปร่งแสงที่ให้แสงซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชผ่านเข้ามาภายในได้ และสิ่งก่อสร้างนี้ควรมีความสูงเพียงพอที่มนุษย์จะเข้าไปทำงานได้โดยสะดวก มีคำนิยมใช้เรียกโรงเรือนอยู่ 2 คำ คือ greenhouse ซึ่งใช้เรียกโรงเรือนโดยทั่วไป คำนี้มาจากการที่โรงเรือนมุงด้วยวัสดุโปร่งแสง เมื่อมองจากภายนอกจึงมองเห็นพืชที่ปลูกอยู่ภายในซึ่งส่วนใหญ่เป็นสีเขียว (green) และ glasshouse ซึ่งเป็นโรงเรือนกระจก ใช้เรียกโรงเรือนที่ใช้กระจกเป็นวัสดุมุงโรงเรือน โรงเรือนกระจกเป็นโรงเรือนปลูกในยุคแรก ๆ แต่ต่อมาเมื่อมีการประดิษฐ์วัสดุโปร่งแสงชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น พลาสติก โพลีคาร์โบเนต และไฟเบอร์กลาสขึ้น โรงเรือนในระยะหลังจึงนิยมใช้วัสดุชนิดใหม่เหล่านี้ในการมุง เพราะมีน้ำหนักเบากว่าและมีราคาถูกกว่า การผลิตพืชในโรงเรือนจึงเป็นการปลูกพืชภายใต้สิ่งก่อสร้างที่มุงด้วยวัสดุโปร่งแสงที่ยอมให้แสงซึ่งจำเป็นต่อการปลูกพืชผ่านเข้ามาได้ และเพื่อปกป้องพืชจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่ไม่เหมาะสม

รูปที่ 2.48 โรงเรือนปลูกพืชรูปแบบต่าง ๆ ที่มีการใช้งานในประเทศไทย
(ที่มา: วารสารเกษตรกรรมธรรมชาติ ฉบับที่ 5/2559)

2.21 เกษตรเมือง (Urban Farming)

การเกษตรในเมือง (Urban Agriculture) คือ การเพาะปลูกพืช เลี้ยงสัตว์และเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในพื้นที่เมืองและรอบๆ พื้นที่เมือง รวมถึงการจัดการและจำหน่ายผลิตภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์

ยาที่ได้จากพืชและสัตว์ เส้นใย และเชื้อเพลิง ด้วยวิธีการเกษตรแบบเข้มข้น โดยรักษาทรัพยากรธรรมชาติ ใช้วิธีนำกลับมาใช้ใหม่และรีไซเคิลขยะในพื้นที่เมือง

การทำการเกษตรในพื้นที่เมืองและรอบ ๆ เขตพื้นที่เมือง เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบเศรษฐกิจและสังคมและระบบนิเวศของพื้นที่เมือง โดยการทำการเกษตรในพื้นที่เมืองและรอบๆ เขตพื้นที่เมือง อาศัยทรัพยากรในพื้นที่เมือง (ที่ดิน แรงงาน และขยะมูลฝอยในเขตเมือง) และเงื่อนไขต่าง ๆ ของพื้นที่เขตเมือง (นโยบายและกฎระเบียบในเขตเมือง การแข่งขันในการจัดซื้อที่ดินสูง ตลาดในเขตเมือง ราคาสินค้าและบริการ ฯลฯ) ในการรักษาความมั่นคงด้านอาหาร ให้กับประชากรในเขตเมือง รวมถึงการบรรเทาความยากจนและส่งผลต่อนิเวศวิทยาและสุขภาพ (อ้างถึงใน : Mougeot, 2000)

รูปที่ 2.49 ลักษณะของการทำเกษตรในเมือง
(ที่มา: https://labgov.city)

2.22 การหาความสามารถในการทำงานและอัตราการทำงาน

ความสามารถในการทำงาน และอัตราการทำงาน (Working Rate) มีความเกี่ยวข้องกับพื้นที่ทำงาน และเวลาในการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4) ดังนี้

$$\text{ความสามารถในการทำงาน} = \frac{\text{พื้นที่การทำงาน}}{\text{เวลาในการทำงาน}} \qquad (2.6)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมพร หงษ์กง (2561) มีการประยุกต์ใช้การหาอัตราการทำงานของเครื่องจักรกลการเกษตรในการทดสอบกับพื้นที่แปลงเกษตร โดยสามารถคำนวณได้ด้วยด้วยสมการ (2.7) ดังนี้

$$Working\ Rate = \frac{Area}{Time_1 + Time_2 + Time_3 + Time_4} \times 100\% \qquad (2.7)$$

เมื่อ *Area* คือ ขนาดของพื้นที่การทำงานในแปลงเกษตร

$Time_1$ คือ เวลาในการทำงาน (การบรรจุวัตถุดิบหรือติดตั้งอุปกรณ์ในระบบเครื่องจักร)

$Time_2$ คือ เวลาในการทำงาน (การดำเนินการกับชุดควบคุมเครื่องเพื่อสั่งการทำงาน)

$Time_3$ คือ เวลาในการทำงาน (การเคลื่อนที่ของกลไกเครื่องเพื่อทำภาระงาน)

$Time_4$ คือ เวลาในการทำงาน (การเคลื่อนที่ของเครื่องเพื่อไปยังพิกัดงาน)

2.23 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อน

ศักรินทร์ โสนันทะ (2553) ให้ความหมายของการวัดว่า การวัด (Measurement) เป็นกระบวนการที่ทำการเปรียบเทียบปริมาณที่ไม่ทราบค่าของตัวแปรกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ หากค่าที่มีการวัดได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริงมากแสดงว่าการวัดนั้นมีความแม่นยำ หรือความถูกต้องสูง

วิศรุต ศรีรัตนะ (2554, น.18-19) ยังอธิบายความหมายของการวัดว่าหมายถึง การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณค่าของตัวแปรสองค่า คือ ค่าของตัวแปรที่ต้องการทราบ (Measure Value) และค่าอ้างอิง (Reference Value) โดยที่ลักษณะของการวัดจำแนก ตามวัตถุประสงค์ได้ 2 ลักษณะ ประกอบด้วย การวัดเพื่อความรู้ และการวัดเพื่อควบคุม นอกจากวัตถุประสงค์ของการวัดดังกล่าว ยังสามารถแบ่งรูปแบบการวัดได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

- การวัดทางตรง (Direct Comparison) คือ การวัดปริมาณตัวแปรโดยค่าที่ได้จากการวัดคือผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยเป็นค่าที่ใช้ได้เลยโดยไม่ต้องนำมาทำการคำนวณเปรียบเทียบ
- การวัดทางอ้อม (Indirect Comparison) คือ การวัดในทางวิศวกรรมหรือทางวิทยาศาสตร์ โดยที่ที่ค่าหรือผลลัพธ์ที่ได้จะต้องนำมาคำนวณละแปลงหน่วยให้เหมาะสมกับปริมาณการวัด

ในส่วนของความคิดพลาดจากการวัด ศักรินทร์ โสนันทะ (2553) ยังแจกแจงถึงความผิดพลาดจากการวัดว่ามี 3 ชนิด ดังนี้

- ความผิดพลาดโดยผู้วัด (Human Errors or Gross Errors) โดยเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์เอง เช่น การอ่านค่าผิด บันทึกพลาด เป็นต้น

- ความผิดพลาดของระบบ (Systematic Errors) โดยจะแบ่งออกเป็น 3 อย่าง ประกอบด้วย ความผิดพลาดของเครื่องมือวัด (Instrument Errors) ความผิดพลาดจากสิ่งแวดล้อม (Environmental Errors) ความผิดพลาดจากการอ่าน (Observational Errors)

- ความผิดพลาดแบบแรนดอม (Random Errors) เป็นความผิดพลาดที่ไม่แน่นอน ไม่ทราบว่ามีสาเหตุมาจากสิ่งใด

นอกจากลักษณะของความผิดพลาดที่มีส่วนสำคัญ ผู้ศึกษาต้องเข้าใจเกี่ยวกับนิยาม ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ความแม่นยำหรือความถูกต้อง (Accuracy) เป็นความใกล้เคียงกันระหว่างค่าที่วัดได้ กับค่าความจริงของตัวแปรที่ถูกวัด ทั้งนี้ ค่าความถูกต้องหรือความแม่นยำ และเปอร์เซ็นต์ ความถูกต้อง (%Acc) หาได้จากสมการ (2.8) ดังนี้

$$\text{Accuracy} = 1 - \%\text{Error}$$

$$\%\text{Acc} = \text{Accuracy} \times 100\% \tag{2.8}$$

2) ความเที่ยงตรง (Precision) เป็นความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะวัดค่าได้ในแต่ละครั้ง แล้วมีค่าการวัดที่แตกต่างกันน้อยมากเมื่อใช้เครื่องมือดังกล่าววัดปริมาณของตัวแปรเดิมซ้ำ ทั้งนี้ ค่าความเที่ยงตรงหาได้จากสมการที่ (2.9) ดังนี้

$$\text{Precision} = 1 - \left|\frac{x_n - \bar{x}_n}{\bar{x}_n}\right| \tag{2.9}$$

เมื่อ x_n คือ ค่าเฉลี่ยของการวัด

$\bar{x}_n$ คือ ค่าของการวัดแต่ละครั้ง

3) ความไว (Sensitivity) เป็นความไวในการตอบสนองของเครื่องมือวัด

4) ความผิดพลาด (Error) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าวัด (Measured Value) และค่าจริง (True Value) ทั้งนี้ การหาค่าความผิดพลาดจากการวัด ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดสัมพันธ์ หรือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ได้จากค่าความผิดพลาดสมบูรณ์เปรียบเทียบกับค่าจริงสามารถหาได้จากสมการ (2.10) ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\%\text{Error} = \left\{\left|\frac{X_m - X_t}{X_t}\right|\right\} \text{x}100\% \quad (2.10)$$

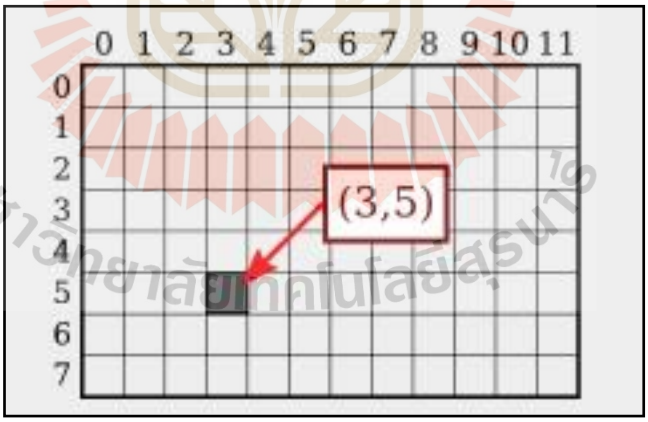
เมื่อ X_t คือ ค่าจริง (True)

X_m คือ ค่าที่ได้จากการวัด (Measure)

5) ความละเอียด (Resolution) เป็นความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะตอบสนองหรือวัดค่าที่เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (Smallest Change)

2.24 การตรวจวัดค่าพิกัดและหาระยะห่างในระบบพิกเซล (Pixel Coordination)

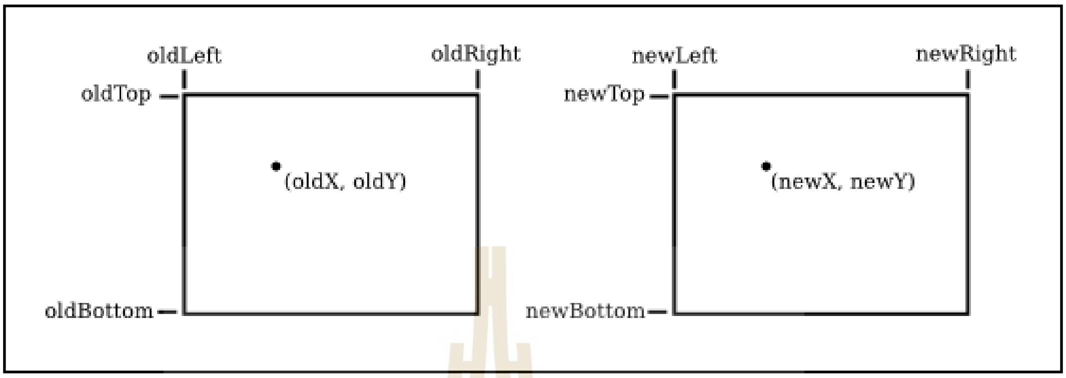
Devid J. Eck (2021) อธิบายว่า รูปภาพดิจิทัลประกอบด้วยแถวและคอลัมน์ของพิกเซล โดยที่พิกเซลในภาพดังกล่าวจะสามารถระบุได้ว่าอยู่ในคอลัมน์หรือแถวใด พิกัดพิกเซลในแถว หรือคอลัมน์ใด ๆ จะถูกระบุด้วยเลขจำนวนเต็ม ยกตัวอย่างเช่น (3, 5) หมายถึง คอลัมน์ที่ 3 และแถวที่ 5 ทั้งนี้ คอมลัมน์และแถวจะสามารถมีได้มากเพียงใดขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพ (Resolution) เช่น (480, 640) เป็นต้น โดยปกติแล้วคอลัมน์จะถูกกำหนดจากซ้ายไปขวา และแถวถูกกำหนดจากบนลงล่าง



รูปที่ 2.50 การแสดงผลของภาพในระบบพิกเซล
(ที่มา: https://math.hws.edu)

การที่จะทราบค่าพิกัดพิกเซลเมื่อมีการเคลื่อนที่จากจุดอ้างอิงจากพิกัดเดิม (พิกัดที่ 1: (oldX, oldY)) ไปยังพิกัดใหม่ (พิกัดที่ 2: (newX, newY)) ในภาพ ดังรูปที่ 2.51 โดยที่จุดกำหนดที่จะใช้ในการคำนวณในพิกัดที่ 1 คือ oldLeft oldRight oldTop และ oldBottom และจุดกำหนดที่จะใช้ใน

การคำนวณพิกัดที่ 2 คือ newLeft newRight newTop และ newBottom จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาจุด newX และ newY ได้จากสมการ (2.11)



รูปที่ 2.51 การตรวจวัดพิกัดพิกเซลในตำแหน่งต่าง ๆ ของภาพ
(ที่มา: https://math.hws.edu)

newX = newLeft + ((oldX - oldLeft) / (oldRight - oldLeft)) x (newRight - newLeft)) (2.11)
newY = newTop + ((oldY - oldTop) / (oldBottom - oldTop)) x (newBotom - newTop)

การหาระยะทางในระบบภาพ Noreen Garrison (2018) อธิบายว่า ในการประมวลผลภาพเพื่อหาระยะห่างหรือพิกัดของวัตถุโดยวิเคราะห์จากความใกล้หรือไกลจากกรอบภาพเป็นเครื่องมือสำคัญ ในระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ทั้งนี้ ระยะห่างที่แปลงค่าออกมาจะได้จากการวิเคราะห์ค่าพิกเซลของภาพและวัตถุในภาพ ในการหาระยะห่างของวัตถุมีหลายวิธี แต่วิธีที่ง่าย และที่ได้รับความนิยมจะมีอยู่ 2 วิธี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีพีทาโกรัส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- **ระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean *distance)*** คือ การวัดระยะห่างแบบยูคลิเดียนที่เป็นการวัดค่าความห่างระหว่างข้อมูล 2 ข้อมูล ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งเป็นแนวเส้นตรง โดยคำนวณได้จากสมการ (2.12) แสดงดังภาพที่ 2.52 และ 2.53 ดังนี้

$$D(a,b) = \sqrt[2]{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad (2.12)$$

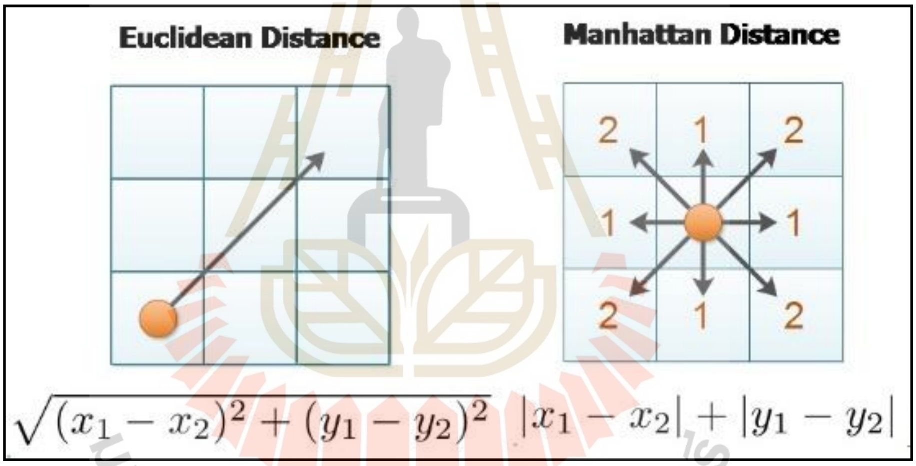
เมื่อ x_1, y_1 คือ พิกัดพิกเซลของจุด a
x_2, y_2 คือ พิกัดพิกเซลของจุด b

- **ระยะทางแบบแมนฮัตตัน (Manhattan *distance*)** เป็นการวัดระยะทางตามวิธีการวัดตามระบบพิกัดฉากระหว่างข้อมูลจำนวน 2 ข้อมูล บนแกน X และแกน Y และจากพิกัดของจุดทั้ง 2 จะสามารถลากเส้นตรงให้มาบรรจบกันเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากได้ อาศัยหลักการระบบพิกัดสามเหลี่ยม (Image rectangular coordinate system) แสดงดังภาพที่ 2.52 และ 2.53 โดยนำมาคำนวณได้จากสมการ (2.13) ดังนี้

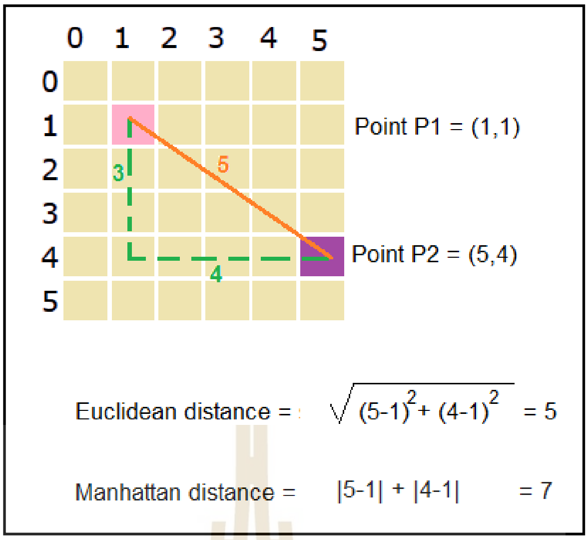
$$D(a,b) = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1| \tag{2.13}$$

เมื่อ x_1, y_1 คือ พิกัดพิกเซลของจุด a

x_2, y_2 คือ พิกัดพิกเซลของจุด b



รูปที่ 2.52 การหาระยะห่างของวัตถุในแบบยูคลิดและแมนฮัตตัน (1)
(ที่มา: https://iq.opengenus.org)



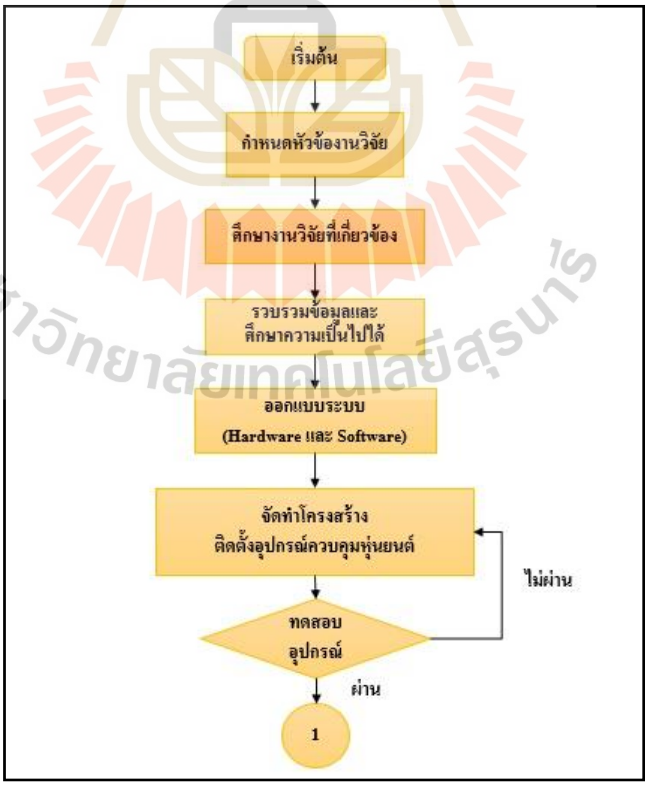
รูปที่ 2.53 การหาระยะห่างของวัตถุในแบบยูคลิดและแมนฮัตตัน (2)
(ที่มา: https://towardsdatascience.com)

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

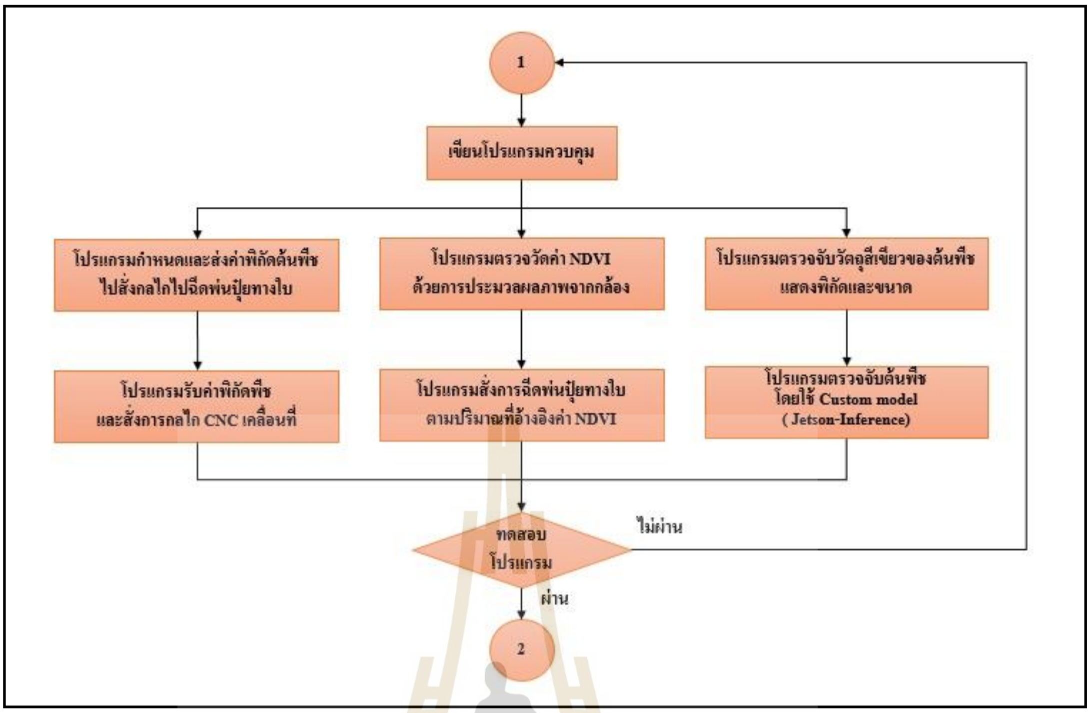
งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบที่ทำงานบนแปลงผักยกสูง ในโรงเรือนปลูกพืชโดยประยุกต์ใช้กลไกหุ่นยนต์คาร์ทีเซียน โดยเป็นการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้สำหรับให้ปุ๋ยทางใบที่แปรผันอัตราการฉีดพ่นตามสุขภาพพืชโดยใช้ค่าดัชนีพืชพรรณเป็นตัวชี้วัด ในส่วนของการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ การออกแบบขั้นตอนการวิจัย และส่วนที่ 2 คือ การออกแบบเพื่อสร้างต้นแบบหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบที่ทำงานบนแปลงผักยกสูง ในโรงเรือนและทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ โดยมีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.2 การออกแบบขั้นตอนการวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย (ต่อ)

รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 การออกแบบขั้นตอนการสร้าง

ในการออกแบบขั้นตอนการสร้างแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การศึกษาพื้นที่ในการสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ

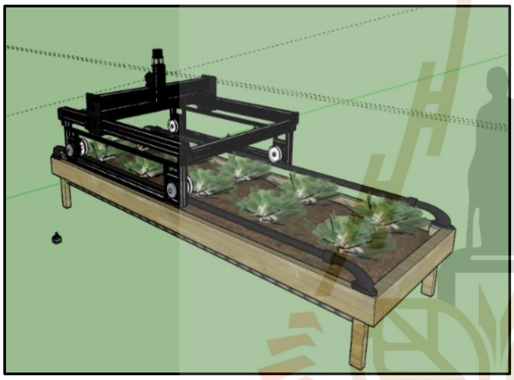
ผู้วิจัยได้ทำการลงพื้นที่ศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ ของชุมชนสันติวนา จังหวัดปทุมธานี ซึ่งมีพื้นที่ 33 ไร่ เพื่อเก็บข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการออกแบบหุ่นยนต์ พบว่า มีโรงเรือนปลูกพืช ขนาด กว้าง 10 เมตร ยาว 20 เมตร และสูง 5 เมตร จำนวน 1 โรง ดังรูปที่ 3.4 โดยเป็นโรงเรือนแบบมุงด้วยผ้าใบกันรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) และมีการพรางแสงด้วยแสลนสีดำเป็นแนว ด้านข้างโรงเรือนมุงด้วยตาข่ายกันแมลงขนาดความละเอียด 40 x 40 Mesh รวมทั้งมีระบบให้น้ำอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้ปั๊มขนาด 3 แรงม้า ทำหน้าที่สูบน้ำจากคลองส่งผ่านท่อพีอี (PE) ไปยังหัวฉีดพ่นที่ติดตั้งกับท่อไปตามแนวยาวของแปลงปลูก ระบบสูบน้ำสามารถให้ปุ๋ยน้ำไปพร้อมกับน้ำที่สูบได้

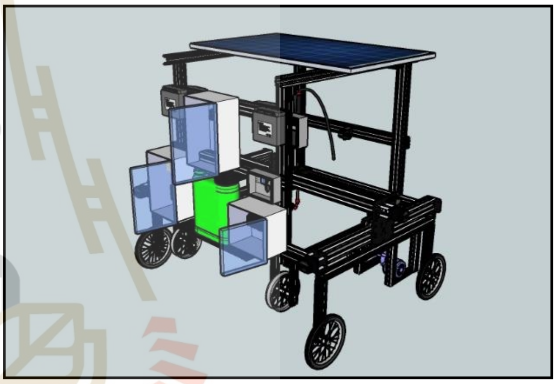
โรงเรือนที่ใช้ในการทดลองจะเป็นโรงเรือนที่มีการปลูกผักพืชหลายชนิดและผักมูลค่าสูงอย่างผักสลัดบนแปลงแบบยกสูงจากพื้นดิน โดยที่แปลงปลูกเป็นกระบะบรรจุดินปลูกที่มีการรองพื้นด้วยกาบมะพร้าว 1 ชั้น และโรยทับด้วยดินปลูก 1 ส่วน ผสมแกลบดิบหรือแกลบดำ 1 ส่วน และปุ๋ยอินทรีย์ 1 ส่วน โดยมีฟางคลุมดินปลูก แปลงที่ใช้ในการทดลองจะเป็นแปลงที่ใช้ปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค (Green Oak Lettuce) โดยที่มีขนาดแปลง ยาว 6 - 8 เมตร กว้าง 1 เมตร สูง 0.25 เมตร ดังนั้น หุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบที่มีการออกแบบและสร้างจึงต้องสอดคล้องกับบริบทของพื้นที่ทำการวิจัย โดยต้องเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวบนแปลงปลูกได้ รวมทั้งกลไกการฉีดพ่นปุ๋ยสามารถเคลื่อนที่ไปยังพืชที่ปลูกในแปลงได้ ดังรูปที่ 3.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.4 โรงเรือนปลูกพืชในพื้นที่ชุมชนเกษตรนิเวศน์สันติวนาที่ได้รับการสนับสนุนโดย สวทช.

รูปที่ 3.5 ระบบน้ำที่ให้น้ำพร้อมกับปุ๋ยน้ำแก่พืชในโรงเรือนและการฉีดพ่นน้ำและปุ๋ยผ่านท่อพีอี





รูปที่ 3.6 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์โดยเบื้องต้นและแบบที่สมบูรณ์ที่ใช้บนแปลงผักยกสูง

3.3.2 การออกแบบเพื่อสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ

1. ระบบโครงสร้าง

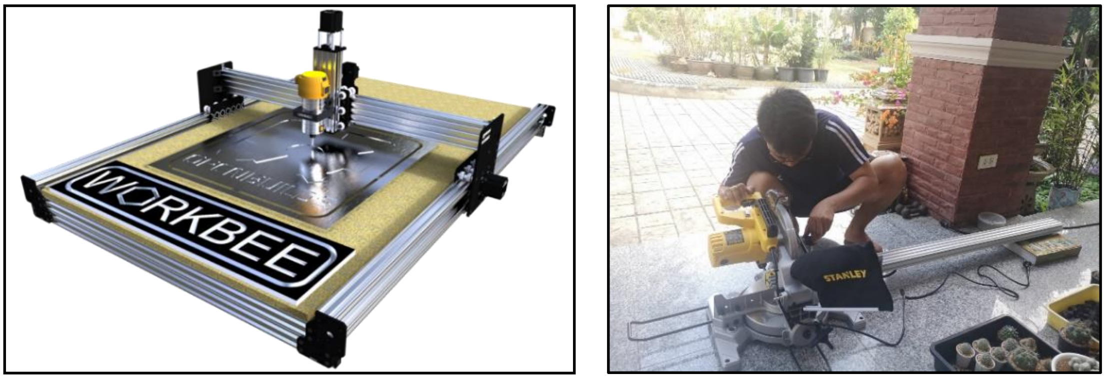
1) โครงสร้างเคลื่อนที่บนแปลงปลูก

กลไก CNC จะอยู่บนโครงสร้างสำหรับการเคลื่อนที่ขนาด 1.5 ม. x 1.4 ม. x 1.7 ม. (กว้าง x ยาว x สูง) โดยใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์แบบ V-Slot ขนาด 40 x 40 มม. ร่วมกับขนาด 20 x 40 มม. ซึ่งมีการติดตั้งล้อยางจำนวน 4 ล้อ ขนาด 12 นิ้ว เพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด และมีอีก 4 ล้อ สำหรับวางบนขอบแปลง โดยมี 2 ล้อ ที่เป็นล้อช่วยพยุง และอีก 2 ล้อ ที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ Gear DC 24 V สำหรับส่งกำลังให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้านหน้าเพื่อฉีดพ่นปุ๋ยให้ผักต้นอื่นต่อไปตลอดแนวยาว ของแปลงปลูก ดังรูปที่ 3.7 และด้านหน้าของหุ่นยนต์จะมีชุดไฟ LED ติดตั้งอยู่ 4 หลอด โดยจะมี Dimmer สำหรับปรับค่าความสว่างให้เหมาะสมกับการจับภาพของกล้อง

รูปที่ 3.7 โครงสร้างของหุ่นยนต์ที่ติดตั้งเพื่อเคลื่อนที่บนแปลงปลูก

2) โครงสร้างเคลื่อนที่ฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ

2.1) กลไกคาร์ทีเซียนสำหรับเคลื่อนที่ เลือกใช้กลไกสำเร็จรูปที่มีจำหน่าย เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบติดตั้งและใช้งาน โดยจะใช้กลไกสำเร็จรูปของเครื่อง WorkBee CNC มาใช้ ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งประกอบด้วยแบบ V-Slot (C-Beam) ขนาด 40 x 80 มม. และแบบ V-Slot ขนาด 20 x 40 มม. โดยที่ปรับขนาดอะลูมิเนียมโปรไฟล์ (Aluminum Profile) ให้ใหญ่ขึ้นเป็น 1.2 ม. X 1.5 ม. ซึ่งเป็นแกน X และแกน Y ตามลำดับ เพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานบนแปลงปลูกยกสูงขนาดกว้าง 1 เมตร ที่อยู่ในโรงเรือนปลูกพืช การเคลื่อนที่ของกลไกจะอาศัยต้นกำลังจาก Stepping Motor จำนวน 3 ตัว แบ่งเป็น ขับแกน X จำนวน 2 ตัว และขับเคลื่อนแกน Y จำนวน 1 ตัว โดยเชื่อมต่อกับ Leadscrew โดยที่มี Pitch ขนาด 2 มม. และ Lead ขนาด 14 มม. จำนวน 3 เส้น แบ่งเป็น แกน X จำนวน 2 เส้น และแกน Y จำนวน 1 เส้น ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 โครงสร้างเครื่องซีเอ็นซีของ WorkBee และการใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์มาขยายขนาด

รูปที่ 3.9 โครงสร้างซีเอ็นซีที่มีการขยายขนาดและติดล้อให้เหมาะสมกับใช้ในแปลงปลูกพืช

2.2) กลไกฉีดพ่นปุ๋ยน้ำและกล่องควบคุม เป็นชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนแกน Y ของกลไกที่ใช้เคลื่อนที่ไปหาต้นพืช โดยจะติดตั้งชุดฉีดพ่นสเปรย์กระจายน้ำแบบกรวยกลวง (Hollow Cone) เชื่อมต่อกับท่อลำเลียงปุ๋ยน้ำจากถังบรรจุ (Storage Tank) ขนาด 20 ลิตร ซึ่งทำงาน โดยอาศัย

ปั๊มสูบน้ำแรงดัน 9 บาร์ ที่ควบคุมโดยกล่องควบคุมที่เคลื่อนที่ไปด้วยกันบนกลไก คาร์ทีเซียนแกน Y ดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 กลไกการฉีดพ่นปุ๋ยที่ติดตั้งในโครงสร้างของเครื่อง

3) โครงสร้างรองรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

ใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์แบบ V-Slot ขนาด 20x60 มม. ตั้งเป็นโครงสี่เหลี่ยมครอบกลไกคาร์ทีเซียน โดยโครงสร้างด้านบนมีไว้รับแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งเป็นหลังคาโครงสร้างหุ่นยนต์ ด้านหน้าจะมีไว้รองรับการติดตั้งกล้อง Industrial HD Camera และ Web Camera ที่ใช้ประมวลผลภาพที่จะถูกติดตั้งอยู่ใต้แผงโซลาร์เซลล์ และด้านหลังของโครงสร้างหุ่นยนต์ จะติดตั้ง Control Box จำนวน 4 ชิ้น ที่บรรจุอุปกรณ์ควบคุม ดังรูปที่ 3.11

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ควบคุมที่มีกล่องควบคุมรองรับที่ด้านหลังของเครื่อง

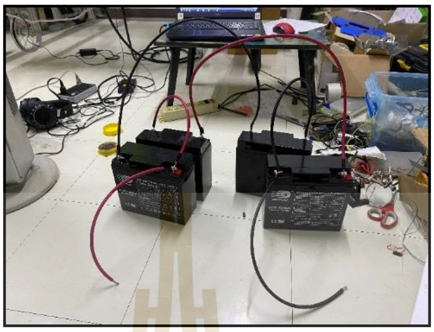
2. ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานของหุ่นยนต์จะอาศัยแหล่งพลังงานจากไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเอง และทำการแปลงไฟฟ้าให้ได้แรงดันให้เหมาะสมตามที่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบต้องการ โดยมีการเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 3.14 และ 3.15 และมีรายละเอียด ดังนี้

1) ระบบผลิตไฟฟ้าเลี้ยงระบบ ใช้แผงโซลาร์เซลล์แบบ Monocrystalline ขนาด 170 วัตต์ ติดตั้งเป็นหลังคาสำหรับผลิตไฟฟ้า โดยมีวงจรควบคุมการประจุไฟฟ้าลงแบตเตอรี่ และมีเครื่องประจุไฟฟ้าลงแบตเตอรี่สำหรับเชื่อมต่อไฟฟ้า 220 โวลต์ จากสายส่งเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ในกรณีที่ไม่มีแสงแดดมาผลิตไฟฟ้า ดังรูป 3.12

รูปที่ 3.12 อุปกรณ์สำหรับชาร์จไฟฟ้าและผลิตไฟฟ้าเพื่อเลี้ยงระบบ

2) ระบบสำรองเก็บไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกประจุลงแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ขนาดความจุ 20 แอมป์ จำนวน 4 ลูก โดยทำการต่อแบบผสมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 40 แอมป์ ดังรูป 3.13



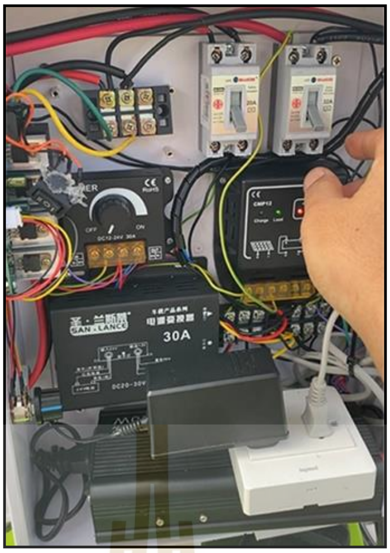
รูปที่ 3.13 แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 20 แอมป์ จำนวน 4 ลูก ต่อแบบผสม

3) ระบบแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้งาน จากแบตเตอรี่ที่ต่อแบบผสมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 V จะถูกนำมาใช้โดยตรงและแปลงแรงดันเพื่อใช้งาน ดังนี้

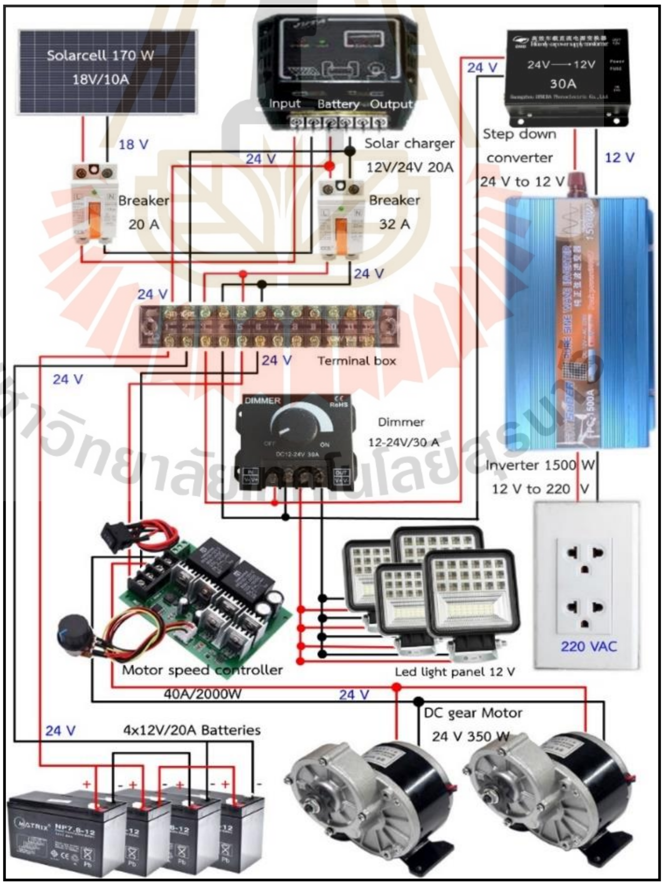
3.1) ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 V เชื่อมต่อสายไฟจากขั้วแบตเตอรี่ เพื่อใช้งานโดยตรง ซึ่งจะนำไปจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เกียร์ (DC Gear Motor) 24 โวลต์ ขนาด 350 วัตต์ ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อของหุ่นยนต์ โดยเชื่อมต่อสายไฟที่มาจากแบตเตอรี่ผ่านวงจร ควบคุมความเร็วมอเตอร์ 10 – 50 VDC 40 Amp 2,000 Watt

3.2) ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V เชื่อมต่อสายไฟจากขั้วแบตเตอรี่ ที่เป็นแรงดันกระแสตรง 24 VDC ไปยังวงจรลดแรงดัน (Step down Rectifier) เพื่อลดแรงดัน 20 – 30 VDC ให้เป็น 12 VDC เพื่อนำแรงดัน 12 V ที่ได้ไปเชื่อมต่อกับวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับต่อไป อีกส่วนหนึ่งจะนำไปต่อเชื่อมกับวงจรหรี่แสง (Dimmer) 12 – 24 V 30 Amp สำหรับปรับความสว่างของหลอดแอลอีดี (LED Panels) จำนวน 4 แผง ที่ติดตั้งอยู่ด้านในของโครงสร้างหุ่นยนต์

3.3) ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ใช้วงจรอินเวอเทอร์ (Inverter 12 VDC to 220 VAC) แบบ Digital ขนาด 1,500 วัตต์ แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 12 V เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 220 V 50 Hz เพื่อจ่ายกระแสไฟสำหรับเลี้ยงบอร์ด Nvidia Jetson Nano, บอร์ด Arduino Uno R3 และบอร์ด Raspberry Pi 3B



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมสำหรับการหุ่นยนต์

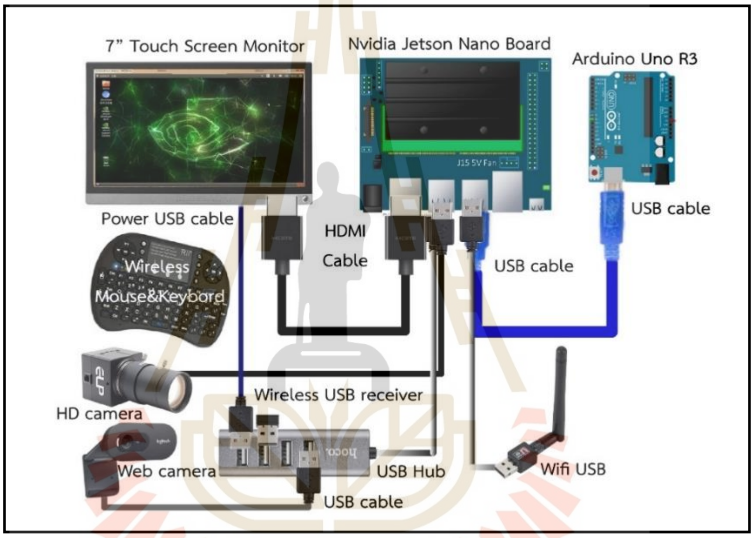


รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า

3. ระบบควบคุมการทำงาน

อุปกรณ์ทั้งหมดจะประกอบเข้าด้วยกันเพื่อทำงานประสานทั้งระบบดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 โดยที่ระบบควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ 3 ชนิด ซึ่งบอร์ดแต่ละชนิดจะมีหน้าที่ต่างกันไป ดังนี้

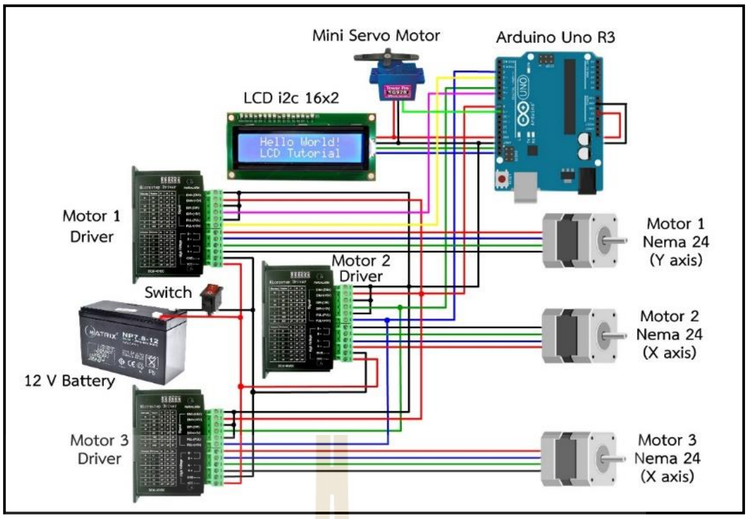
1) บอร์ด Nvidia Jetson Nano ที่เชื่อมต่อจอ Monitor 7 นิ้ว มีกล้อง Industrial HD Camera ของ ELP และ Web Camera ของ Logitech สำหรับการ Object Detection ต้นพืช และควบคุมการสั่งการให้กลไกเคลื่อนที่ไปยังพิกัดต้นพืชที่ระบุ โดยที่จะมีการเชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อวงจรรชุดระหว่างบอร์ด Nvidia Jetson Nano และบอร์ด Arduino UNO R3

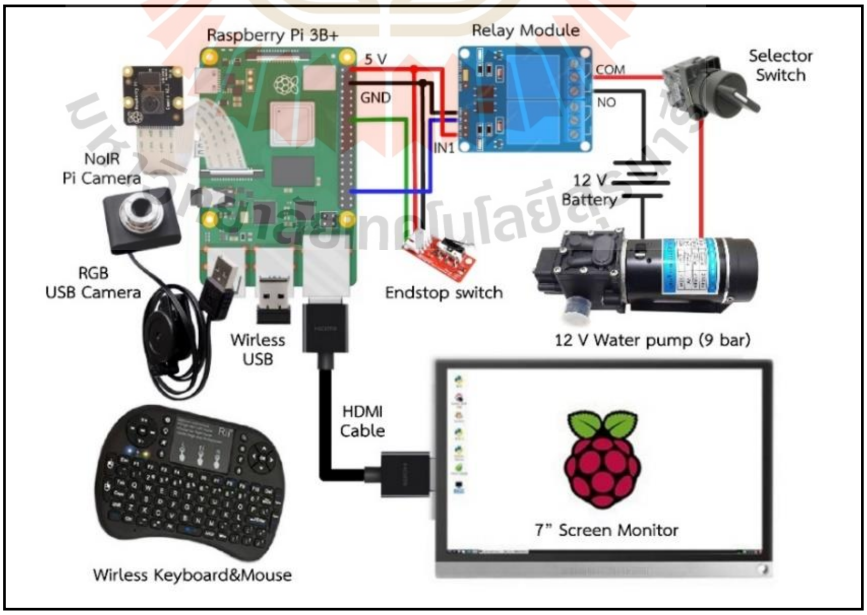
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) บอร์ด Arduino Uno R3 สำหรับรับค่าพิกัด XY-Coordinates จากบอร์ด Nvidia Jetson Nano ที่สื่อสารกันแบบอนุกรม โดยค่าที่ส่งผ่านสาย USB มีการคำนวณเป็นค่า Step เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่กลไก CNC แล้ว ซึ่งจะสั่งการ Stepping Motor จำนวน 3 ตัว ที่ติดตั้งอยู่กับแกน X และ Y ผ่านบอร์ดควบคุม TB6600 จำนวน 3 บอร์ด ที่ตั้งค่าขับไว้ ที่ 8 Microstep 1,600 Pulse/rev โดยมีรายละเอียดการเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.17

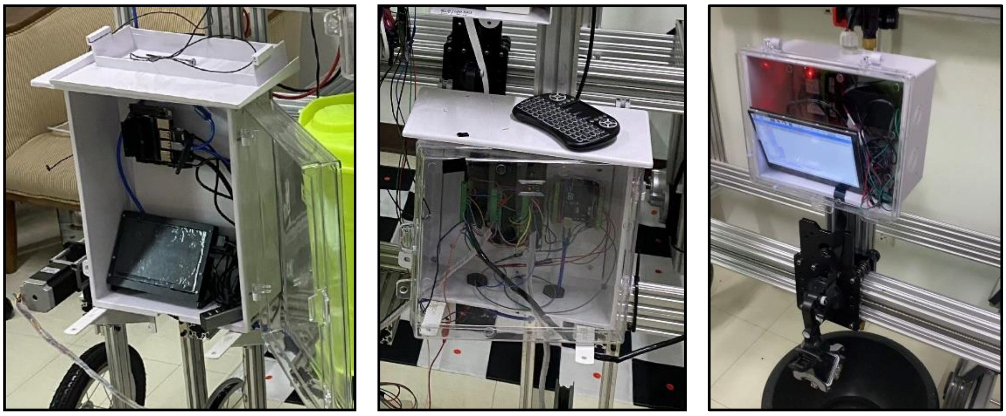


รูปที่ 3.17 การเชื่อมต่อวงจรของบอร์ด Arduino UNO R3 และวงจรควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์

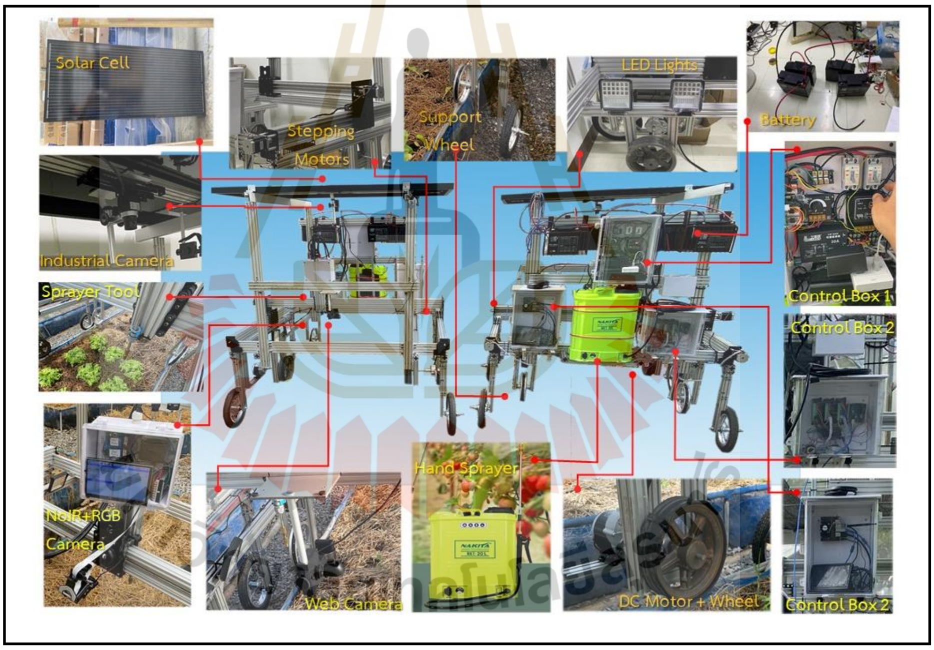
3) บอร์ด Raspberry Pi 3B ที่ติดตั้งจอ Monitor 7 นิ้ว รวมทั้งกล้อง NoIR Pi Camera และ RGB Camera โดยรับคำสั่งผ่านการกดสวิตซ์ จาก Servo Motor ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino เพื่อให้บันทึกภาพและคำนวณค่า NDVI ของต้นพืชที่กลไกเคลื่อนที่ไปถึง และทำการสั่งการอุปกรณ์ฉีดพ่นปุ๋ยทางใบทำงาน โดยมีรายละเอียดการเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.18



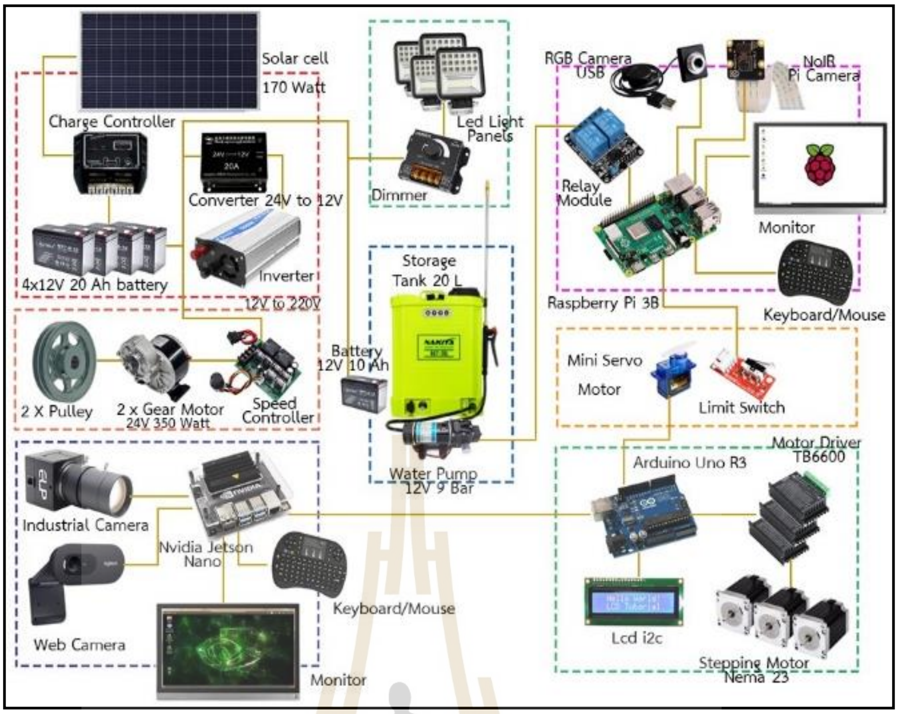
รูปที่ 3.18 การเชื่อมต่อวงจรของชุดบอร์ด Raspberry Pi ตรวจวัดค่า NDVI และฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ



รูปที่ 3.19 ตู้ควบคุมที่แยกกันระหว่างบอร์ด Nvidia บอร์ด Arduino และบอร์ด Raspberry Pi



รูปที่ 3.20 การประกอบเข้าด้วยกันของชุดอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงสร้างหุ่นยนต์



รูปที่ 3.21 การเชื่อมโยงกันของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เพื่อควบคุมการทำงาน

3.3.3 การออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุม

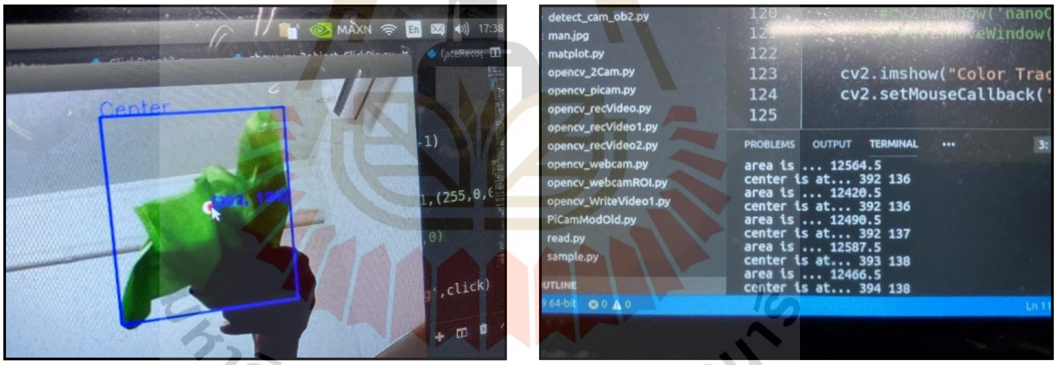
เนื่องจากมีบอร์ดควบคุม 3 ชนิด โปรแกรมควบคุมจะถูกเขียนแยกกันตามชนิดของบอร์ด โปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นในแต่ละบอร์ดจะมีหน้าที่ในการทำงานที่ต่างกันไป โดยมีผัง การทำงานดังรูปที่ 3.27 ทั้งนี้ ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้เขียนโปรแกรมจะมี 2 ภาษา คือ ภาษา C และภาษา Python โดยที่มีรายละเอียดโปรแกรมที่เขียนบนบอร์ดควบคุมทั้ง 3 ชนิด ดังนี้

1. การเขียนโปรแกรมบนบอร์ด Nvidia Jetson Nano ออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ภาษา Python ผ่านโปรแกรม VsCode ที่ติดตั้งภายในระบบปฏิบัติการ Linux โดยโปรแกรมที่พัฒนาในบอร์ด Nvidia Jetson Nano จะประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ดังนี้

1) โปรแกรมที่เป็นชุดคำสั่งสำหรับตรวจและแสดงค่าพิกัด XY-Position ซึ่งจะแสดงผลในระบบ Camera Frame จากกล้อง ดังรูปที่ 3.22 สั่งการโดยการเลือกพิกัดต้นพืชผ่านการคลิก Mouse&Keyboard หรือกดผ่านจอมอนิเตอร์แบบ Touch Screen ที่เชื่อมต่อกับบอร์ดและแปลงเป็นค่า Step/Pulse ผ่านสมการในโค้ดโปรแกรมเพื่อส่งต่อไปให้บอร์ด Arduino UNO R3 ที่ใช้สั่งการ Stepping Motor ที่เป็นต้นกำลังกลไก CNC ต่อไป

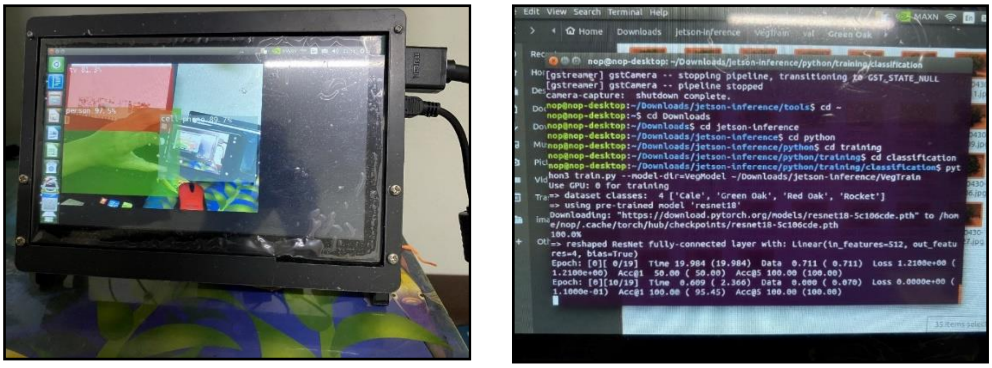
รูปที่ 3.22 ชุดคำสั่งและการแสดงผลจากการประมวลผลภาพเพื่อกำหนดพิกัดวัตถุในภาพ

2) โปรแกรม Color Detection ที่เป็นชุดคำสั่งสำหรับตรวจจับค่าสี ซึ่งจะตั้งค่าให้ตรวจจับพิกัด XY และขนาดในหน่วยตารางพิกเซลของวัตถุที่มีสีเขียว (Green Area) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดตำแหน่งของพืชในกระถางหรือแปลงปลูก ดังรูปที่ 3.23



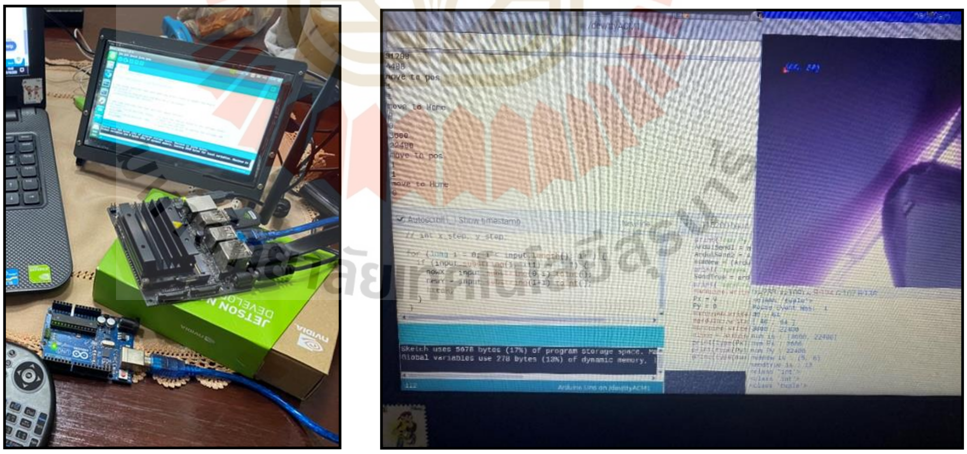
รูปที่ 3.23 ชุดคำสั่งและการแสดงผลในการตรวจจับวัตถุจากการกำหนดค่าสี

3) โปรแกรม DetectNet ซึ่งชุดคำสั่งสำเร็จรูปใน Custom Object Detection Model ของ Jetson Inference ที่ผ่านการ Training ในการตรวจจับวัตถุที่หลากหลายมาให้เพื่อใช้งานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้เลย ซึ่งในนำมาใช้ตรวจจับต้นพืชในกระถางหรือในแปลงปลูก ดังรูป 3.24



รูปที่ 3.24 ชุดคำสั่งและการแสดงผลการตรวจจับวัตถุที่ผ่านการ Training ของ Jetson-Inference

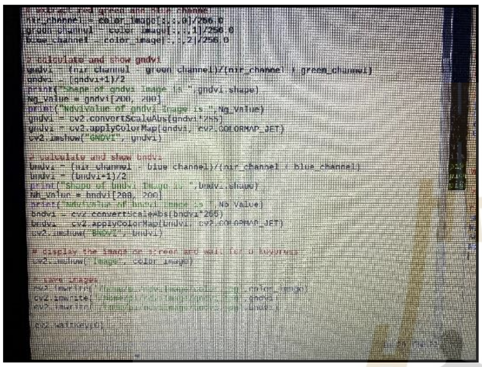
2. การเขียนโปรแกรมบนบอร์ด Arduino Uno R3 ออกแบบโปรแกรมควบคุม การทำงานโดยใช้ภาษา C++ ผ่านโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งติดตั้งในบอร์ด Nvidia Jetson Nano ดังรูปที่ 3.25 และบันทึกลงในหน่วยความจำของบอร์ด Arduino UNO R3 ซึ่งจะเป็นโปรแกรม ที่รับค่า Step/Pulse ของแกน X และ Y ที่จะให้ Stepping Motor ขับกลไก CNC ที่มีชุดฉีดพ่นปุ๋ยน้ำไปยังตำแหน่งต้นพืชที่ต้องการ(Target Position) และย้อนกลับมายังพิกัดตั้งต้น (Home Position) เพื่อรอรับคำสั่งเคลื่อนที่ครั้งใหม่ต่อไป

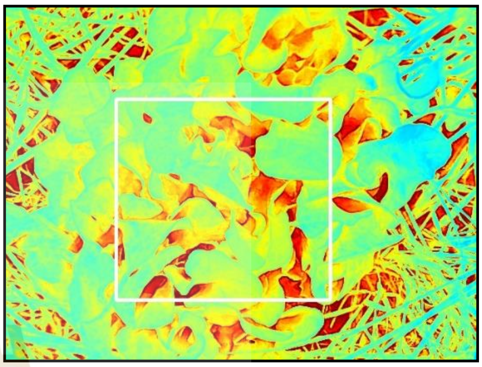


รูปที่ 3.25 การใช้โปรแกรม Arduino IDE บนระบบปฏิบัติการ Ubuntu ของ Nvidia Jetson Nano

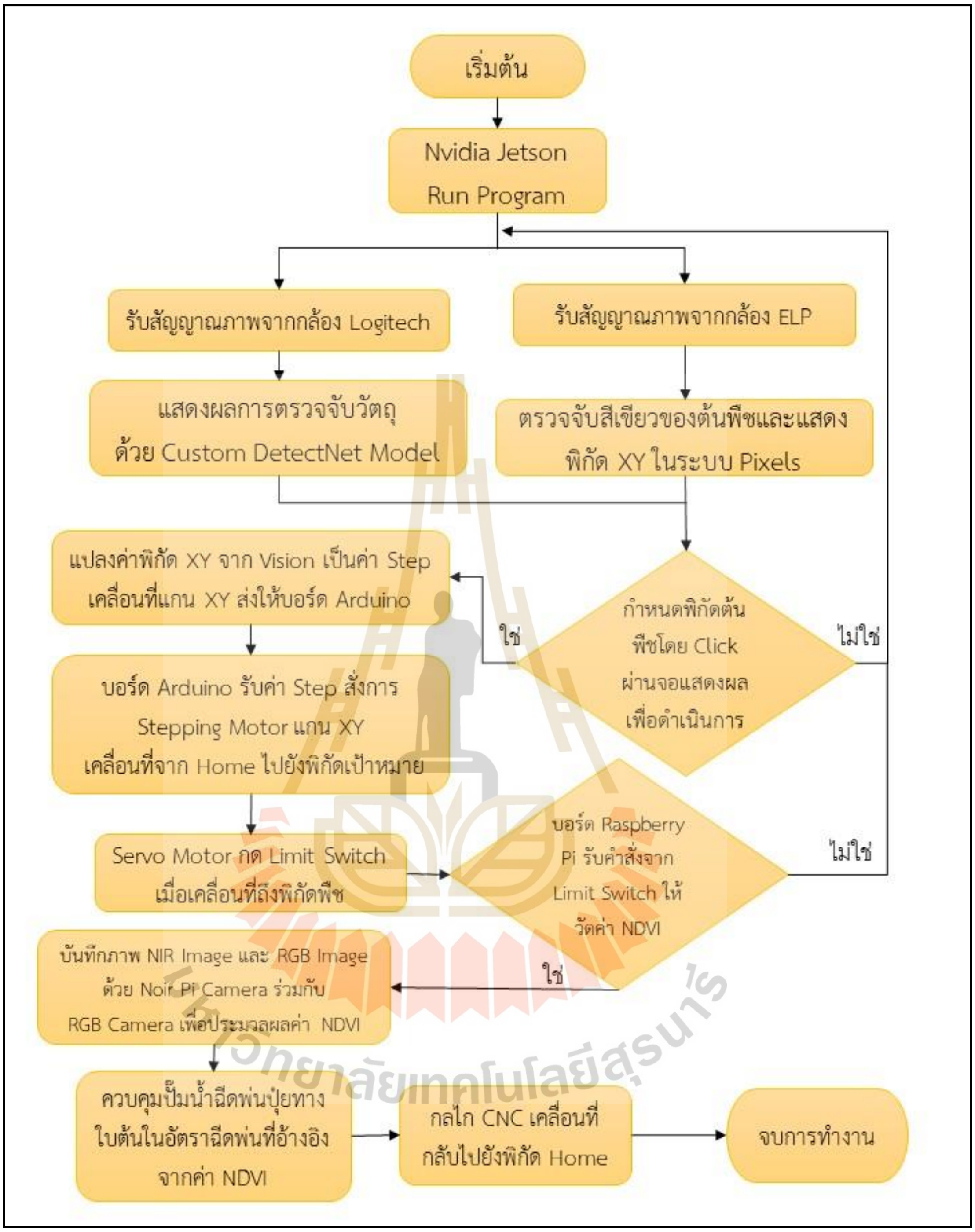
3. การเขียนโปรแกรมบนบอร์ด Raspberry Pi 3B ออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานโดยใช้ภาษา Python ผ่านโปรแกรม Python IDLE ที่ติดตั้งในระบบปฏิบัติการ Linux บนบอร์ด โดยเป็นชุดคำสั่งสำหรับการบันทึกภาพจากกล้อง NoIR Pi Camera และ RGB Camera โดย

จะทำงานก็ต่อเมื่อกลไกที่ติดตั้งชุดฉีดพ่นเคลื่อนที่ไปถึงพิกัดเป้าหมายและสวิตช์ถูกกด โดย Mini Servo Motor ที่ส่งการจากบอร์ด Arduino UNO R3 จากนั้น นำค่าที่ได้จากภาพไปคำนวณผ่านสมการ NDVI เพื่อให้ได้ค่าดัชนีพืชพรรณที่ชี้วัดสุขภาพพืชที่กลไกฉีดพ่นปุ๋ยน้ำเคลื่อนที่ไปถึง และฉีดพ่นปุ๋ยน้ำทางใบในอัตราที่เหมาะสมกับสุขภาพต้นพืช นั้น โดยสั่งมอเตอร์ปั๊มน้ำผ่านสวิตซ์ไฟฟ้า (Relay Module) โดยหน่วงเวลาการทำงานของปั๊มต่างกัน เพื่อให้ปริมาณปุ๋ยน้ำที่ฉีดพ่นต่างกัน





รูปที่ 3.26 การเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดค่า NDVI จากกล้อง NoIR และ RGB



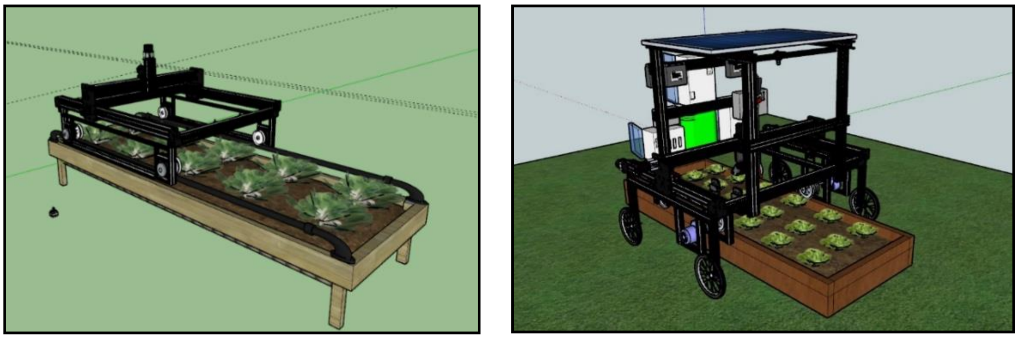
รูปที่ 3.27 แผนผังของระบบการทำงานของหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ

3.4 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาบริบทพื้นที่ในโรงเรือนและแปลงปลูกเพื่อออกแบบหุ่นยนต์ที่เหมาะสม

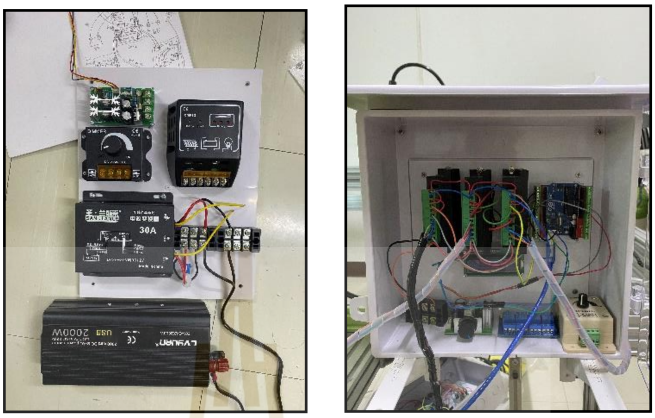
รูปที่ 3.28 การศึกษาโรงเรือนและแปลงปลูกแบบยกสูงเพื่อออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานบนแปลงยกสูงในโรงเรือนได้



รูปที่ 3.29 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์เบื้องต้นและแบบที่ใช้จริง

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบการจัดวางและการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ควบคุมและแหล่งจ่ายพลังงานในระบบ

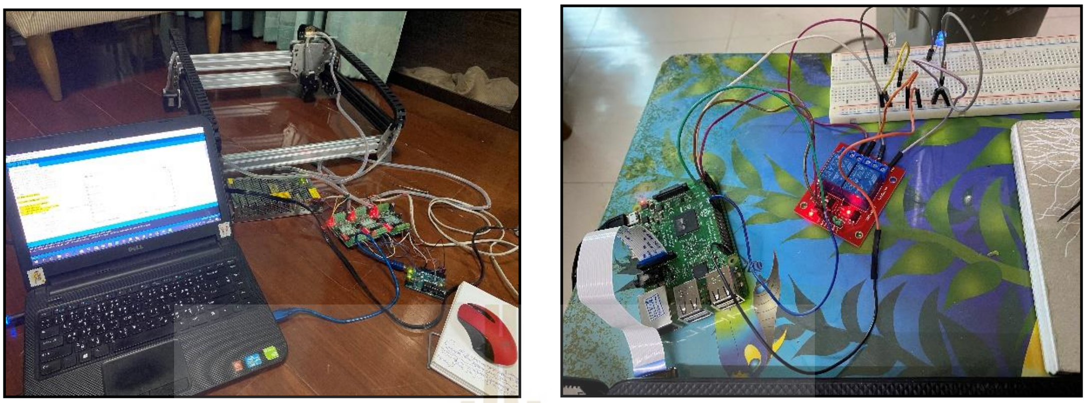


รูปที่ 3.30 การออกแบบการวางอุปกรณ์ในระบบโดยเบื้องต้น

ขั้นตอนที่ 4 ทดลองประกอบโครงสร้างและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเตรียมทดสอบในห้องทดลอง

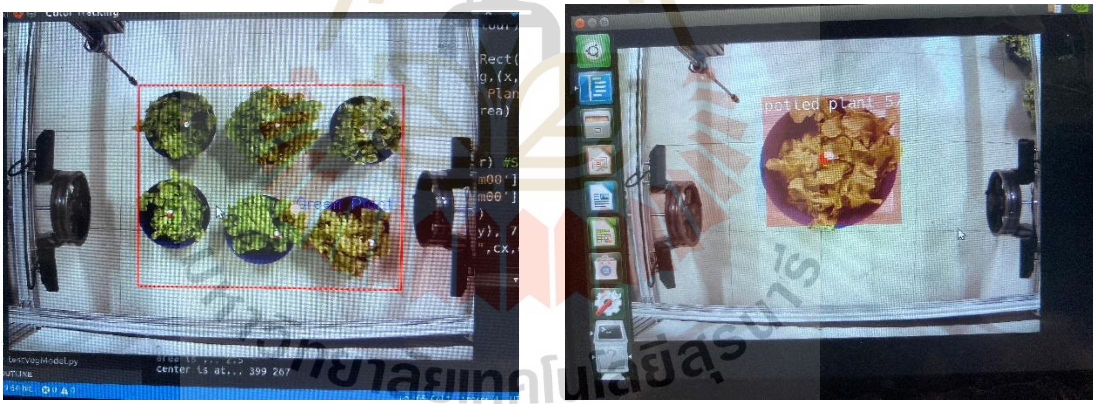
รูปที่ 3.31 การประกอบโครงสร้างและติดตั้งชุดอุปกรณ์เพื่อเตรียมทดสอบระบบ

ขั้นตอนที่ 5 ออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุมลงบนบอร์ดควบคุมในระบบ



รูปที่ 3.32 การเขียนโปรแกรมควบคุมที่แยกส่วนไปตามบอร์ดควบคุม

ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่เขียนในห้องทดลอง



รูปที่ 3.33 การทดสอบระบบโดยเบื้องต้นในห้องทดลอง

ขั้นตอนที่ 7 ขนส่งเพื่อนำไปทดสอบในพื้นที่วิจัย

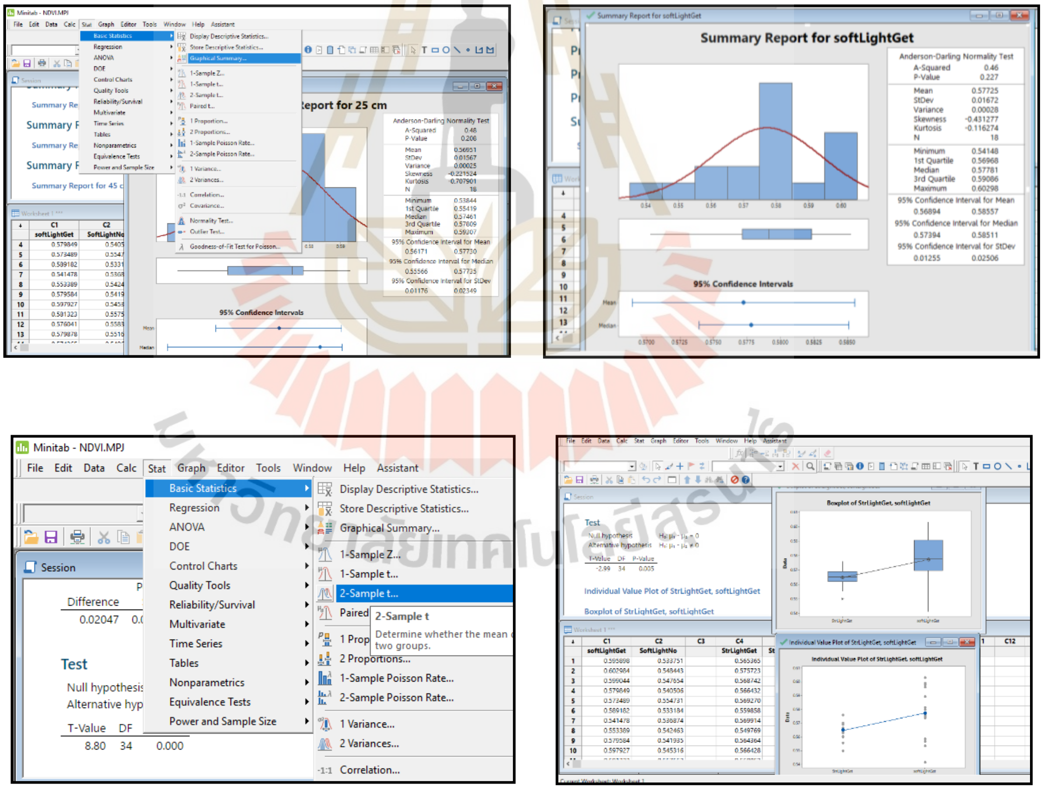
รูปที่ 3.34 ถอดชิ้นส่วนที่ประกอบในห้องทดลองเพื่อขนส่งไปยังพื้นที่วิจัย

ขั้นตอนที่ 8 ประกอบและติดตั้งบนแปลงผักยกสูงในโรงเรือนปลูกพืช

รูปที่ 3.35 ประกอบและติดตั้งเพื่อใช้งานจริงในพื้นที่โรงเรือนของชุมชนนิเวศน์สันติวนา

รูปที่ 3.36 ทำการทดสอบหุ่นยนต์ที่ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์แล้วเพื่อเก็บข้อมูลวิจัย

ขั้นตอนที่ 9 นำข้อมูลบันทึกมาประมวลผลทางสถิติ



รูปที่ 3.37 ประมวลผลข้อมูลวิจัยด้วยโปรแกรม Minitab

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบการใช้งานหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบเพื่อแสดงผลถึงศักยภาพ ในการทำงานและเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงระบบต่อไป โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 การทดสอบความสามารถทั่วไป โดยการตรวจวัดความสามารถของหุ่นยนต์ โดยเบื้องต้น ประกอบด้วย ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของกลไกซีเอ็นซีเพื่อฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนแปลงยกสูง อัตราการทำงาน (Working Rate, WR) และปริมาณปุ๋ยทางใบที่ปั๊มน้ำสามารถฉีดพ่นได้ตามการหน่วงเวลาที่แตกต่างกัน

4.1.2 การทดสอบความแม่นยำของกลไก CNC ของหุ่นยนต์ โดยทดสอบความแม่นยำในห้องทดลองโดยใช้กระถางผักและในแปลงปลูกผักแบบยกสูงภายในโรงเรือนปลูกพืช โดยใช้หลักการมองเห็นของหุ่นยนต์แบบ 2D หรือ 2 มิติ ในการทดสอบจะทำกับผักกระถางในห้องทดลองและผัก ที่ปลูกในแปลง จำนวน 6 ต้น โดยตั้งอยู่ในตำแหน่งต่างกัน และทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อตำแหน่งทดสอบ นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน

4.1.3 ทดสอบศักยภาพการตรวจจับวัตถุสีเขียว โดยการตรวจจับพื้นที่สีเขียว (Green Color Object Detection) ของวัตถุจะแสดงผลลัพธ์เป็นขนาดพื้นที่ (Area) ของวัตถุและพิกัดพิกเซลกึ่งกลาง (Centroid) ของวัตถุ เก็บข้อมูลที่แสดงผลเพื่อประเมินความสามารถในการตรวจจับพืชสีเขียวที่จะนำไปประยุกต์ใช้ระบุขนาดและพิกัดตำแหน่งของพืชเพื่อส่งค่าไปยังกลไกเคลื่อนที่เพื่อฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ

4.1.4 ทดสอบศักยภาพการตรวจจับพืชของ DetectNet Custom Model โดยตรวจสอบศักยภาพการตรวจจับวัตถุของโมเดลสำเร็จรูปเพื่อประเมินความสามารถตรวจจับพืชที่ผ่านการ Training โดยผู้พัฒนาโปรแกรม Jetson Inference ซึ่งจะแบ่งเป็นทดสอบกับต้นผักสลัดกรีนโอ๊คในกระถางที่ห้องทดลอง และต้นผักกรีนโอ๊คที่ปลูกในแปลงปลูกยกสูงในโรงเรือน โดยทดสอบความสามารถในการตรวจจับพืชจากกล้องที่ตั้งในมุมสูง 90 องศา และมุมเอียง 45 องศา กับวัดในระยะห่างที่ต่างกัน

4.1.5 การทดสอบตรวจวัดค่า NDVI ของชุดตรวจสอบดัชนีพืชพรรณ (VI) กับผักสลัดในแปลงปลูกในโรงเรือน โดยที่ในการวิจัยครั้งนี้ เลือกนำค่า NDVI มาใช้ เนื่องจาก ซึ่งค่า NDVI มี

ความสัมพันธ์กับอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Photosynthetic Rate) และการเจริญเติบโตของพืช (Vegetation Growth) ผู้วิจัยจึงนำค่า NDVI ที่คำนวณได้มาชี้วัดสุขภาพพืช เพื่อกำหนดอัตราการให้ปุ๋ยทางใบที่เหมาะสม โดยมีการทดสอบย่อย ดังนี้

1. การทดสอบตรวจวัดค่า NDVI ของผักที่มีการให้ปุ๋ยและน้ำและในความเข้มแสงต่างกัน ค่า NDVI จากการทดสอบกับต้นผักให้น้ำตามปกติและงดน้ำและปุ๋ย 3 วัน ในความเข้มแสงต่างกัน ค่าที่ตรวจวัดได้จะนำมาทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ t-Test คำนวณด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อให้ทราบความแตกต่างในการตรวจวัดจากการให้ปัจจัยการผลิตและสภาวะแสงที่ต่างกัน

2. การทดสอบตรวจวัดค่า NDVI ของผักที่มีการตรวจวัดจากความระยะห่างจากกล้อง ที่ต่างกัน เพื่อให้ทราบว่าระยะห่างของกล้องที่จะมีผลต่อการตรวจวัดค่า NDVI จึงทำการทดสอบตรวจวัดค่า NDVI จากต้นผัก 6 ต้น (อายุ 45-50 วัน) ในโรงเรือนปลูกพืช โดยทดสอบเปรียบเทียบจากระยะห่างจากกล้องถึงต้นพืชที่ 15 ซม. 25 ซม. และ 45 ซม. จากนั้น หาค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (C.V.) ด้วยโปรแกรม Minitab

4.1.6 การทดสอบอัตราการฉีดพ่นและความสิ้นเปลืองปุ๋ยทางใบของหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบเปรียบเทียบกับการให้ปุ๋ยทางใบรูปแบบอื่น โดยเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองของวิธีการให้ปุ๋ยน้ำที่ต่างกัน ดังนี้

1. ตรวจวัดปริมาตรการฉีดพ่นของหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิลิตร โดยการตรวจวัด 2 วิธี ประกอบด้วย

1) วัดปริมาตรปุ๋ยน้ำที่ฉีดพ่นออกมาทั้งหมดจากหัวฉีด โดยหน่วงเวลา การทำงานของปั๊มน้ำตั้งแต่ 0.1 – 2.0 วินาที เก็บข้อมูลปริมาณปุ๋ยน้ำโดยเพิ่มอัตราการหน่วงครั้งละ 0.1 วินาที เพื่อนำข้อมูลตัวเลขมาประมวลผลโดยใช้ Regression สร้าง Model ด้วย Scikit-learn ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับ Machine Learning และประเมินความแม่นยำ

2) วัดปริมาตรปุ๋ยน้ำที่พื้นผิวพุ่มใบต้นผักสามารถรับไว้จากการฉีดพ่น ในระดับความสูงจากหัวฉีดถึงยอดพืชที่ต่างกัน 3 ระดับ (20 ซม., 30 ซม. และ 40 ซม.) เพื่อนำไปกำหนดอัตราการฉีดพ่นปุ๋ยที่เหมาะสมกับค่า NDVI ที่ตรวจวัดได้

2. การให้ปุ๋ยทางใบด้วยระบบน้ำของโรงเรือนผ่านท่อ PE ที่มีหัวพ่นฝอย โดยทดสอบปริมาตรการฉีดพ่นต่อ 1 หัวพ่นฝอย ซึ่งจะมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 1 ตารางเมตร (ผักสลัด 9 ต้น) ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลโดยเปิดน้ำในโรงเรือนเป็นเวลา 5 นาที ตามระยะเวลาการฉีดพ่นปกติช่วงเวลาเช้าและเย็นในโรงเรือน

3. การใช้คนฉีดพ่นปุ๋ยทางใบด้วยเครื่องฉีดพ่นแบบสะพาย โดยทดสอบกับผักสลัด 9 ต้น ในพื้นที่ 1 ตารางเมตร (ผักสลัด 9 ต้น) ตรวจวัดโดยการปูผ้าใบรองรับน้ำบนแปลง โดยกำหนดให้ใช้เวลาฉีดต่อต้นตามที่เคยปฏิบัติ

4.2 การทดสอบความสามารถทั่วไป

4.2.1 การทดสอบระยะเวลาการทำงานของกลไก CNC ของหุ่นยนต์

1. กำหนดจุดอ้างอิงเพื่อทดสอบ

กำหนดจุดอ้างอิงบนผ้าตารางหมากรุก จำนวน 9 จุด เป็นเป้าหมายเพื่อให้กลไกเคลื่อนที่ไปยังพิกัดดังกล่าว จับเวลา (ไป-กลับ) ของกลไก จากจุดตั้งต้น (Home) ที่พิกัด X = 190 และ Y = 105 ในระบบ XY-Coordination

รูปที่ 4.1 การใช้ Chessboard กำหนดพิกัดอ้างอิงเพื่อทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่

2. บันทึกผลการจับเวลาการเคลื่อนที่ไปยังพิกัด 9 จุด

เก็บข้อมูลโดยใช้นาฬิกาจับเวลา โดยการตรวจวัด 3 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย โดยมีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ (ไป-กลับ) ของกลไกซีเอ็นซีไปยังพิกัดอ้างอิง

ลำดับ จุดอ้างอิง	พิกัด XY (พิกเซล)	ระยะเคลื่อนที่ แกน XY (เซนติเมตร)	ระยะเวลา ต่ำสุด-สูงสุด (วินาที)	ระยะเวลาเฉลี่ย (ไป-กลับ) (วินาที)
1	X = 250 Y = 165	X = 86 Y = 14	49.13 – 50.25	49.59
2	X = 312 Y = 166	X = 43 Y = 14	37.96 – 38.78	38.38
3	X = 373 Y = 169	X = 14 Y = 14	28.23- 28.79	28.49
4	X = 373 Y = 229	X = 86 Y = 43	60.14 – 60.28	60.23
5	X = 312 Y = 228	X = 43 Y = 43	49.36 – 49.53	49.46
6	X = 250 Y = 229	X = 14 Y = 43	38.53 – 38.71	38.62
7	X = 372 Y = 291	X = 86 Y = 86	60.10 – 60.42	60.24
8	X = 313 Y = 291	X = 43 Y = 86	59.78 – 60.04	59.91
9	X = 250 Y = 291	X = 14 Y = 86	49.32 – 49.53	49.44

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนแปลงยกสูง

ทดสอบโดยการกำหนดระดับความเร็วของ Motor Speed Controller ไว้ 2 ระดับ จากการหมุนปรับของวงจรควบคุมความเร็ว ประกอบด้วย ความเร็วต่ำ ความเร็วปานกลาง ตามลำดับ ทั้งนี้ ระดับความเร็วสูงสุดไม่ได้ใช้งานจริงในทางปฏิบัติ รวมทั้งกำหนดพิกัดปลายทาง ที่ต้องการให้เครื่องเคลื่อนที่ไปถึงไว้ที่ 5 เมตร จากนั้น ทำการจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา บนโทรศัพท์ Smart Phone ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ทำการบันทึกและสรุปผลแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การทดสอบความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนแปลงยกสูง

ระดับความเร็ว	**ระยะเวลา ต่ำสุด-สูงสุด (วินาที)**	**ระยะเวลาเฉลี่ย (วินาที)**
ความเร็วต่ำ	5.46 – 6.13	5.76
ความเร็วปานกลาง	8.49 – 8.63	8.54

4.2.3 ความสามารถในการทำงานและอัตราการทำงาน (Working Rate, WR)

จากการเก็บข้อมูลระยะเวลาการทำงานในพื้นที่ทดสอบ 1 ตารางเมตร (ต้นผัก จำนวน 9 ต้น) โดยที่ภาระงานที่บันทึกเวลาเพื่อนำมาคำนวณ ประกอบด้วย 1) การบรรจุวัตถุดิบหรือติดตั้งอุปกรณ์ในระบบเครื่องจักร 2) การดำเนินการกับชุดควบคุมเครื่องเพื่อสั่งการทำงาน 3) การเคลื่อนที่ของกลไกเครื่องเพื่อทำภาระงาน 4) การเคลื่อนที่ของเครื่องเพื่อไปยังพิกัดงาน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความสามารถและอัตราการทำงานของหุ่นยนต์

ข้อมูลที่นำมาประมวลผล	**รายละเอียด**
พื้นที่ทำงาน (ตารางเมตร)	1 (10,000 ตารางเซนติเมตร)
การบรรจุสารละลายปุ๋ย ในถังบรรจุขนาด 20 ลิตร (วินาที)	172.28 (2.88 นาที)
การเลือกพิกัดต้นพืชรวม 9 ต้น สำหรับการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ (วินาที)	24.16 (0.4 นาที)
การเคลื่อนที่ของกลไกฉีดพ่นปุ๋ย ไปยังต้นพืชทั้งหมด 9 ต้น (วินาที)	434.36 (7.24 นาที)
การเคลื่อนที่ของเครื่อง เพื่อทำงานในพื้นที่ถัดไป (วินาที)	3.57 (0.06 นาที)
การคำนวณอัตราการทำงาน ความสามารถในการทำงาน = $\frac{\text{พื้นที่การทำงาน}}{\text{เวลาในการทำงาน}}$ อัตราการทำงาน $= \frac{A}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4} \times 100\%$	$\frac{1}{2.88 + 0.4 + 7.24 + 0.06}$ เท่ากับ 0.1 ตารางเมตร/นาที $\frac{1}{2.88 + 0.4 + 7.24 + 0.06} \times 100\%$ เท่ากับ 9.45 %

4.2.4 ปริมาณปุ๋ยทางใบที่ปั๊มน้ำสามารถฉีดพ่นได้ตามการหน่วงเวลาที่แตกต่างกัน

ทดสอบปั๊มน้ำ 12 โวลต์ 10 แอมป์ ขนาดแรงดัน 10 บาร์ ซึ่งจะทดสอบหน่วงเวลาการทำงานของปั๊ม 0.1 – 2 วินาที โดยเพิ่มการหน่วงเวลาครั้งละ 0.1 วินาที จนครบ 2 วินาที และตรวจสอบปริมาณสารละลายปุ๋ยโดยการตวงวัดจากกระบอกตวง (Cylinder) จำนวน ขนาด คือ 50 มิลลิลิตร และ 100 มิลลิลิตร และบันทึกผล ดังนี้

ตารางที่ 4.4 อัตราการฉีดพ่นสารละลายปุ๋ยทางใบของปั๊มน้ำที่ติดตั้งกับหุ่นยนต์

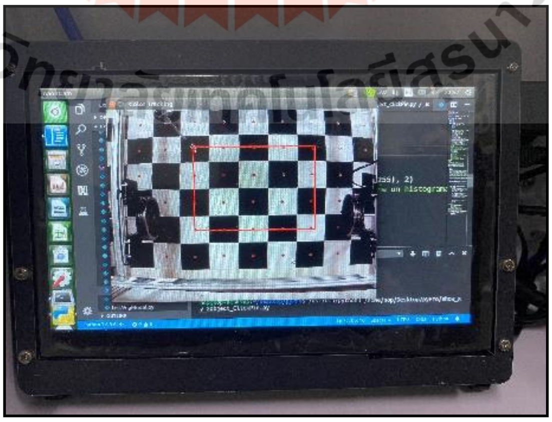
อัตราการหน่วงเวลาปั๊มน้ำ (วินาที)	**ปริมาณสารละลายปุ๋ย ต่ำสุด-สูงสุด (มิลลิลิตร)**	**ปริมาณสารละลายปุ๋ย เฉลี่ย (มิลลิลิตร)**
0.1 วินาที	9.5 – 10	9.67
0.2 วินาที	14 – 14.5	14.17
0.3 วินาที	18.5 – 19	18.83
0.4 วินาที	22.5 – 23	22.83
0.5 วินาที	25.5 – 26	25.67
0.6 วินาที	29 – 29.5	29.33
0.7 วินาที	32 – 32.5	32.33
0.8 วินาที	36 – 37	36.33
0.9 วินาที	39 – 40	39.33
1 วินาที	42 – 42.5	42.33
1.1 วินาที	45 – 46	45.67
1.2 วินาที	47.5 – 48.5	48.17
1.3 วินาที	50 – 51	50.67
1.4 วินาที	54 – 54.5	54.17
1.5 วินาที	56.5 – 57	56.67
1.6 วินาที	59 – 60	59.5
1.7 วินาที	62 – 63	62.5
1.8 วินาที	65	65
1.9 วินาที	67 – 68	67.67
2 วินาที	69 - 70	69.67

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

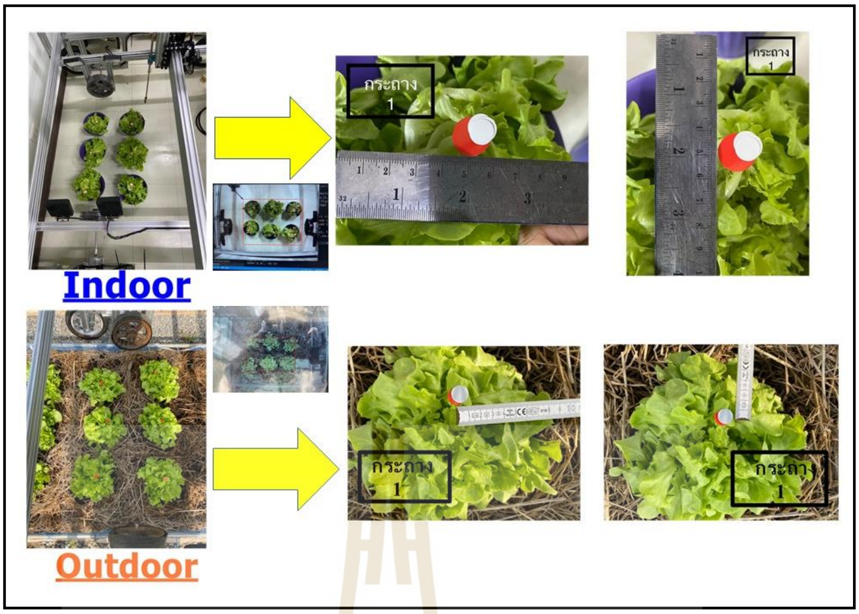
4.3 การทดสอบความแม่นยำของกลไกคาร์ทีเซียนสำหรับฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ

ทดสอบความแม่นยำในห้องทดลองโดยใช้กระถางผักและในแปลงปลูกผักแบบยกสูงภายในโรงเรือนปลูกพืช โดยใช้หลักการมองเห็นของหุ่นยนต์แบบ 2D หรือ 2 มิติ แสดงภาพด้วยกล้อง Industrial Camera ติดตั้งมุมสูง (90° เหนือวัตถุ) ผ่านจอโดยแสดงภาพที่ความละเอียด 640 x 480 พิกเซล เพื่อทำการประมวลผลภาพวัตถุในแนวตั้ง (y) แนวนอน (x) และมุมวัตถุ แต่ไม่มีความลึก (z) เพื่อตรวจสอบเฉพาะการมีอยู่ และตำแหน่งของวัตถุ

การทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน พบว่า การทดสอบกับผักกระถาง ในห้องทดลองมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าการทดสอบกับผักที่ปลูกในแปลง และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกับต้นผักในตำแหน่งที่ใกล้กับพิกัด Home โดยที่การทดสอบในกระถางและในแปลงปลูกพบว่า ต้นที่ 3 และต้นที่ 6 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูงอย่างเห็นได้ชัด ดังกราฟในรูปที่ 4.4 และ 4.5 นอกจากนี้ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองกับต้นผัก ในแปลงปลูกมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าการทดลองกับผักกระถางในโรงเรือน ซึ่งอาจมาจากการที่ยอดของใบผักที่ติดสติกเกอร์เพื่อเป็นจุดอ้างอิงการสั่งการเคลื่อนที่ของต้นผักที่ปลูกในแปลงมีความสูงต่ำไม่เท่ากัน ดังภาพที่ 4.3 ในขณะที่ผักกระถางในห้องทดลองจะมีระดับความสูงต่ำของสติกเกอร์ใกล้เคียงกันมากกว่า ตลอดจนการทดลองในห้องทดลองและแปลงปลูกจำเป็นต้องปรับความสูงของกล้องต่างกัน ทำให้ต้องมีการกำหนดจุด Home ใหม่และใช้ตารางหมากรุก (Chessboard) เพื่อทดสอบและคำนวณ ค่า Step การเคลื่อนที่ใหม่ที่เหมาะสม ซึ่งมีผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแตกต่างจากเดิม ทั้งนี้ แม้จะมีความคลาดเคลื่อนจากจุดกึ่งกลางต้นผัก แต่สามารถยอมรับได้สำหรับผลการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบลงบนต้นผัก เนื่องจากเป็นลักษณะงานที่ไม่ต้องการความแม่นยำเป็นพิเศษ



รูปที่ 4.2 หน้าจอแสดงผลที่ใช้เลือกพิกัดต้นพืชผ่าน Mouse & Keyboard



รูปที่ 4.3 Experiment on motion error of cartesian mechanism

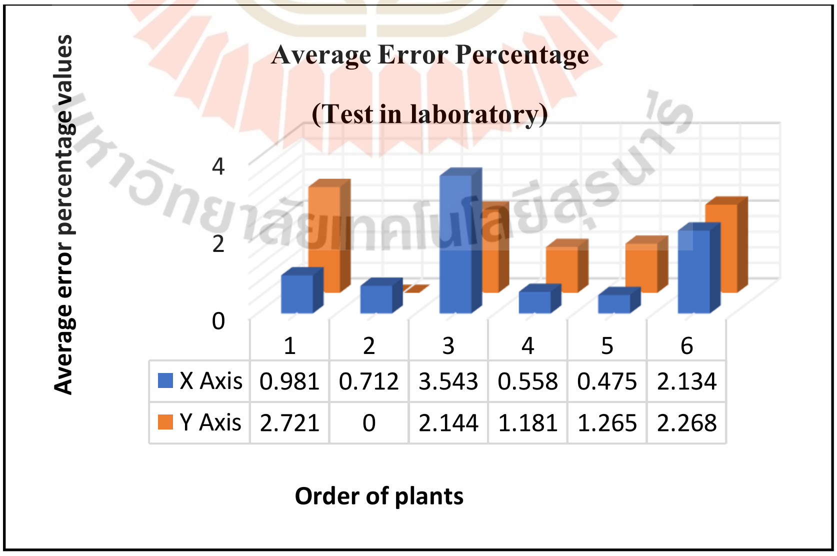
ตารางที่ 4.5 Percentage error from potted vegetables test in laboratory

Order of Vegetables	Average distance according to coordinates ordered from program (cm.)		Average distance according to real coordinates (cm.)		Average error percentage (%)	
	X axis	Y axis	X axis	Y axis	X axis	Y axis
1	56.042	11.025	56.592	11.325	0.981	2.721
2	35.095	10.474	35.345	10.473	0.712	0
3	11.760	10.106	12.176	10.322	3.543	2.144
4	56.777	39.219	57.094	39.972	0.558	1.181
5	31.604	38.219	31.754	38.702	0.475	1.265
6	9.371	35.279	9.571	36.079	2.134	2.268
Total average error percentage (%)					1.4	1.596
Standard deviation (SD)					1.347	1.321
Coefficient of variation (CV)					96.187	82.742

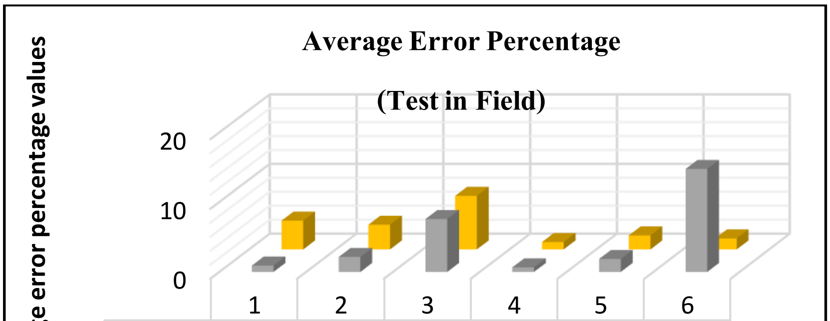
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.6 Percentage error from raised beds test in greenhouse

Order of Vegetables	Average distance according to coordinates ordered from program (cm.)		Average distance according to real coordinates (cm.)		Average error percentage (%)	
	X axis	Y axis	X axis	Y axis	X axis	Y axis
1	60.177	8.498	60.727	8.8482	0.914	4.119
2	30.318	8.498	30.968	8.7982	2.144	3.530
3	5.283	8.269	5.6827	8.9019	7.572	7.660
4	59.028	42.721	59.412	43.171	0.649	1.053
5	29.629	37.438	30.179	38.188	1.856	2.003
6	6.8905	40.194	7.907	40.828	14.755	1.575
Total average error percentage (%)					4.648	3.323
Standard deviation (SD)					5.249	2.31
Coefficient of variation (CV)					112.93	69.507



รูปที่ 4.4 Average percentage error value from laboratory testing.



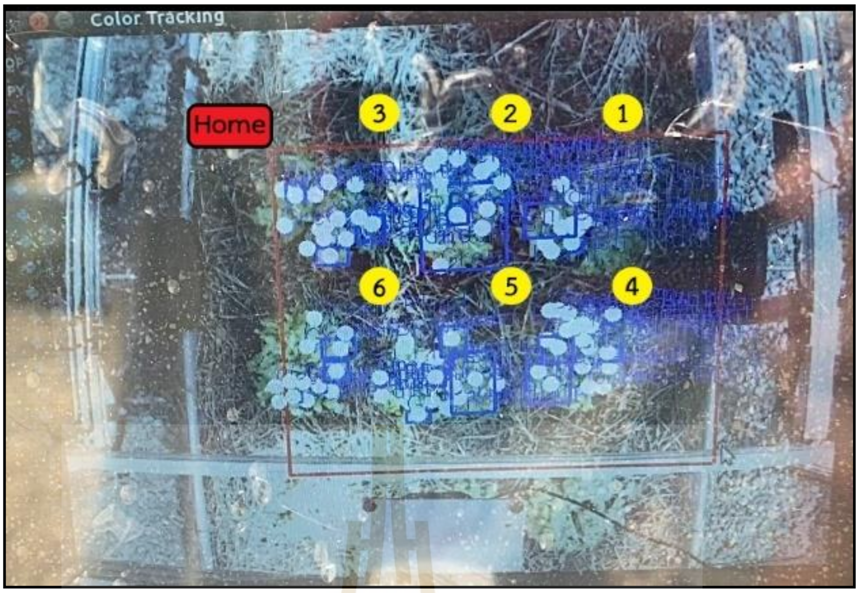
	1	2	3	4	5	6
X Axis	0.914	2.1439	7.5719	0.6494	1.8563	14.755
Y Axis	4.1185	3.5301	7.6595	1.0533	2.0033	1.5757

รูปที่ 4.5 Average percentage error value from field testing.

4.4 ทดสอบความสามารถในตรวจจับสีเขียวของพืช (green Color object detection)

การตรวจจับพื้นที่สีเขียว (Green Color Object Detection) ของวัตถุจะแสดงผลลัพธ์ เป็นขนาดพื้นที่ (Area) ของวัตถุและพิกัดพิกเซลกึ่งกลาง (Centroid) ของวัตถุ เก็บข้อมูลที่แสดงผลเพื่อประเมินความสามารถในการตรวจจับพืชสีเขียวที่จะนำไปประยุกต์ใช้ระบุขนาดและพิกัดตำแหน่งของพืชเพื่อส่งค่าไปยังกลไกเคลื่อนที่เพื่อฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ

ทดสอบโดยการจับภาพจากกล้องมุมสูงเพื่อตรวจสอบความสามารถในการตรวจจับพื้นที่เป็นสีเขียว (Green Color Area) ของต้นผลักสลัดกรีนโอ๊ค จำนวน 6 ต้น ในแปลงปลูก โดยมี การเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของค่าความเข้มแสงที่ส่องมายังแปลงปลูกในช่วง 17,200 – 20,800 Lux การทำงานของ Green Color Detection จะแสดงผลเป็นจุดกึ่งกลาง (Centroid) ในกรอบที่ล้อมพื้นที่สีเขียวไว้ และแสดงพิกัด XY-Coordination ของวัตถุ และขนาดของกรอบพื้นที่ตรวจจับ (Detected Area) ในหน่วยตารางพิกเซล (square pixels) ดังรูปที่ 4.6 ทั้งนี้ ต้นผักสลัดกรีนโอ๊ค 1 ต้นจะต้องมีพื้นที่กรอบตรวจจับเฉลี่ยประมาณ 10,450 ตารางพิกเซล ในการทดสอบและเก็บข้อมูลความสามารถในการตรวจจับจะทำในระยะเวลา 5 นาที ประกอบด้วย (1) ค่าเฉลี่ยขนาดกรอบพื้นที่ที่ตรวจจับ (2) ค่าสูงสุดของขนาดกรอบพื้นที่ตรวจจับ (3) ค่าต่ำสุดของขนาดกรอบพื้นที่ตรวจจับ (4) ค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งที่มีการแสดงพิกัด Centroid ของต้นพืช ทั้งนี้ ผลการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 3



รูปที่ 4.6 การประยุกต์ตรวจจับสีเขียวของพืชเพื่อระบุขนาดและจุดกึ่งกลาง (Centroid)

ตารางที่ 4.7 การทดสอบความสามารถในการตรวจจับสีเขียวของผักสลัดกรีนโอ๊คที่แปลงปลูกในโรงเรือน

ลำดับต้นผัก	**ขนาดกรอบตรวจจับเฉลี่ย** (square pixels)	**ขนาดสูงสุด** (square pixels)	**ขนาดต่ำสุด** (square pixels)	**จุด Centroid เฉลี่ยที่แสดงผล** (Dots)
ต้นที่ 1	7.83	25.5	0.5	53
ต้นที่ 2	34.44	386	0.5	122
ต้นที่ 3	16.34	91.5	0.5	68
ต้นที่ 4	6.81	40	0.5	31
ต้นที่ 5	10.85	72.5	0.5	120
ต้นที่ 6	7.57	33	0.5	92

จากการทดสอบ พบว่า ไม่สามารถตรวจจับผักสลัดกรีนโอ๊คภายใต้กรอบตรวจจับเพียงกรอบเดียวต่อต้นได้ แต่มีแสดงผลกรอบตรวจจับย่อยและจุดกึ่งกลางกระจายทั่วบริเวณสีเขียวทั่วทั้งต้นพืช เมื่อการประมวลผลจุดกึ่งกลางของวัตถุไม่มีความเสถียร จึงไม่สามารถนำไปคำนวณค่า Step การหมุน

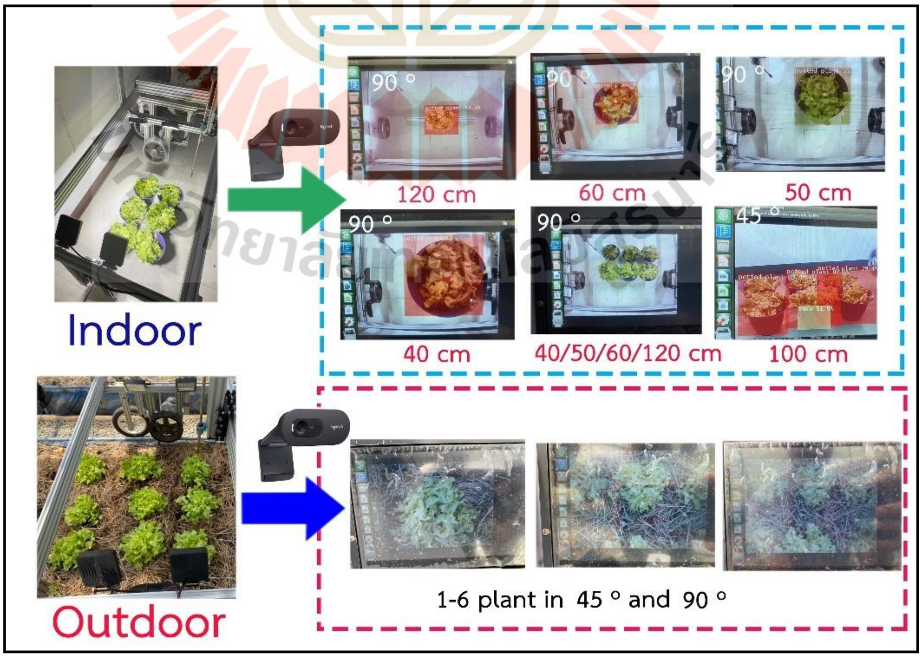
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ของมอเตอร์ที่จะสั่งการกลไกคาร์ทีเซียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งความสามารถ ในการตรวจจับขึ้นอยู่กับความเข้มแสงที่ส่องมากระทบต้นพืชหากต้นพืชสัมผัสแสงมากจะทำให้ ค่าสีที่แสดงบนจอมีการจางลง ลดทอนความสามารถในการตรวจจับ

4.5 ทดสอบความสามารถในการตรวจจับพืชโดยใช้ Jetson Inference Custom model

ตรวจสอบศักยภาพการตรวจจับวัตถุของโมเดลสำเร็จรูปเพื่อประเมินความสามารถตรวจจับพืชที่ผ่านการ Training โดยผู้พัฒนาโปรแกรม Jetson Inference ซึ่งจะแบ่งเป็นทดสอบกับต้นผักสลัดกรีนโอ๊คในกระถางที่ห้องทดลอง และต้นผักกรีนโอ๊คที่ปลูกในแปลงปลูกยกสูง ในโรงเรือน โดยทดสอบความสามารถในการตรวจจับพืชจากกล้องที่ตั้งในมุมสูง 90 องศา และมุมเอียง 45 องศา กับวัดในระยะห่างที่ต่างกัน

ทดสอบโดยตั้งกล้อง 90 องศากับพื้น และตั้งผักกระถางห่างจากกล้อง 3 ระดับ ดังนี้ (1) ระยะห่าง 40 ซม. (2) ระยะห่าง 50 ซม. (3) ระยะห่าง 60 ซม. และ (4) ระยะห่าง 120 ซม. และทดสอบโดยตั้งกล้องทำมุม 45 องศา กับต้นผักในกระถางระยะห่าง 1 เมตร หากมีการตรวจจับต้นพืชได้จะปรากฏตัวหนังสือ Plotted Plant รวมทั้งแสดงเปอร์เซ็นต์การตรวจจับ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ทดสอบความสามารถในการ Object Detection ผักกรีนโอ๊คในห้องทดลองและที่แปลงปลูก

รูปที่ 4.8 การแสดงผล Object Detection ผักกรีนโอ๊คที่ตรวจจับได้

จากการทดสอบโดยใช้ Custom DetectNet Model ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลดังตารางที่ 4.8 พบว่า สามารถตรวจจับผักสลัดกรีนโอ๊คที่อยู่ในกระถางได้ โดยที่การตรวจจับในมุม 90 องศา จะสามารถตรวจจับได้ดีกับผักกระถางเพียง 1 ต้น ในระยะใกล้ไปจนถึงระยะไกล (40 – 120 ซม.) แต่ตรวจจับกระถางผักที่มีจำนวน 6 ต้นที่ตั้งเป็นกลุ่มไม่ได้ ในส่วนของการตรวจจับในมุม 45 องศา สามารถตรวจจับผักกระถางจำนวน 6 ต้น ที่ตั้งเป็นกลุ่มได้ ส่วนการทดลองกับผักสลัดกรีนโอ๊คในแปลงปลูก พบว่า ไม่สามารถตรวจจับต้นผักได้เลยทั้งมุม 90 องศา และ 45 องศา ในการตรวจจับผักตั้งแต่ 1 – 6 ต้น

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบตรวจจับต้นผักกรีนโอ๊คด้วย Custom DetectNet Model

รายละเอียดการทดสอบ			ผลลัพธ์	ความเชื่อมั่น (%)
ทำมุม 90 องศา ระยะห่างกล้อง 40 ซม.	ผักกระถาง	1 กระถาง	ตรวจจับได้	73 - 91
		6 กระถาง	ตรวจไม่ได้	0
	ผักในแปลง	1-6 ต้น	ตรวจไม่ได้	0
ทำมุม 90 องศา ระยะห่างกล้อง 50 ซม.	ผักกระถาง	1 กระถาง	ตรวจจับได้	50 - 86
		6 กระถาง	ตรวจไม่ได้	0
	ผักในแปลง	1-6 ต้น	ตรวจไม่ได้	0
ทำมุม 90 องศา ระยะห่างกล้อง 60 ซม.	ผักกระถาง	1 กระถาง	ตรวจจับได้	50 – 59
		6 กระถาง	ตรวจไม่ได้	0
	ผักในแปลง	1-6 ต้น	ตรวจไม่ได้	0
ทำมุม 90 องศา ระยะห่างกล้อง 120 ซม.	ผักกระถาง	1 กระถาง	ตรวจจับได้	50 - 70
		6 กระถาง	ตรวจไม่ได้	0
	ผักในแปลง	1-6 ต้น	ตรวจไม่ได้	0
ทำมุม 45 องศา ระยะห่างกล้อง 1 ม.	ผักกระถาง	1 กระถาง	ตรวจจับได้	56 – 87
		6 กระถาง	ตรวจจับได้	79 – 94
	ผักในแปลง	1-6 ต้น	ตรวจไม่ได้	0

4.6 ทดสอบตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณกลุ่มตัวอย่างที่ให้ปุ๋ยและน้ำและความเข้มแสงต่างกัน

ติดตั้งตัวกล้องให้ทำมุม 45° กับต้นพืชและบันทึกภาพที่ระยะห่างจากพืช 45 ซม. ซึ่งเป็นระยะที่ตัวกล้องไม่สัมผัสกับละอองพ่นฝอยของปุ๋ยน้ำ โดยที่การเก็บผลการทดสอบจะนำค่า NDVI ที่ประมวลได้ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระดับพิกเซล ที่กำหนด ณ จุดกึ่งกลางของภาพพืชที่บันทึก จำนวน 78,880 ตารางพิกเซล สำหรับต้นผักที่ให้น้ำและปุ๋ยตามปกติ และลดจำนวนลงเหลือ 19,800 ตารางพิกเซล สำหรับต้น

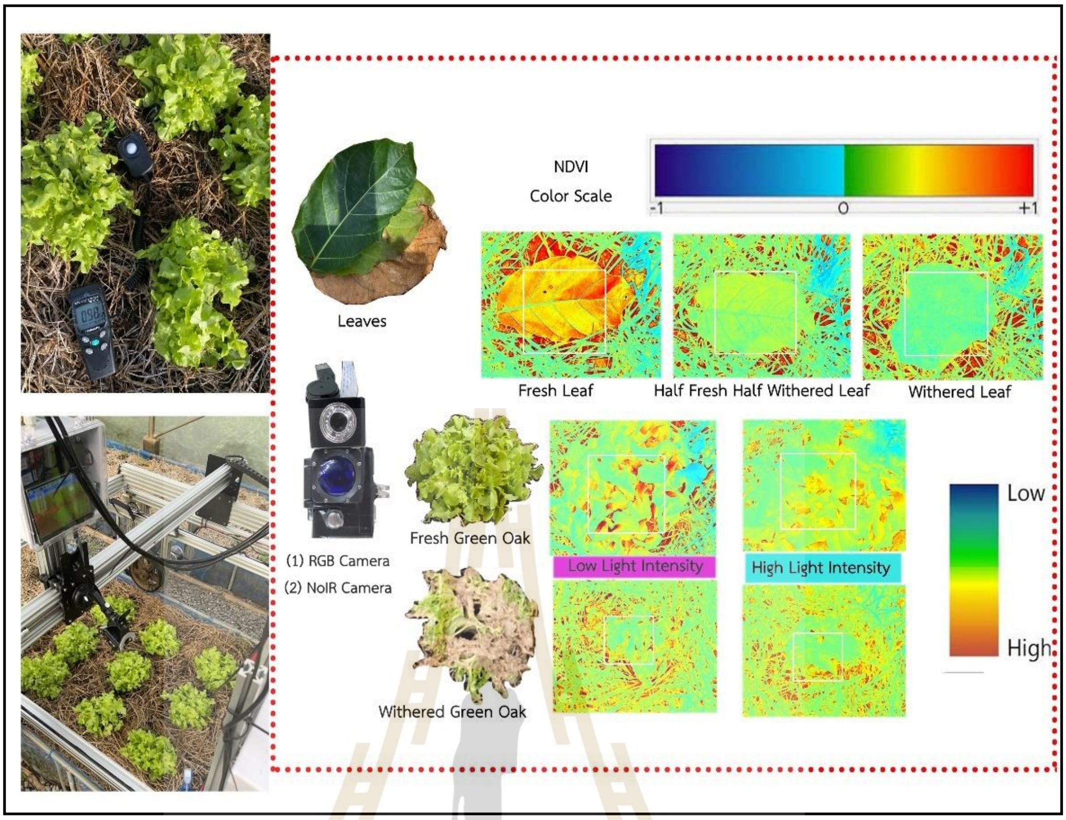
ผักที่งดน้ำและปุ๋ย 3 วัน เนื่องจากต้นผักมีขนาดเล็กลงทำให้ต้องลดขนาดกรอบการตรวจวัดตาม โดยจากการพื้นที่ที่กำหนดตรวจวัดค่า NDVI จะเป็นตัวแทนของค่าเฉลี่ยของผัก ทั้งต้น การทดสอบกับผักที่ปลูกในแปลงจะใช้ต้นผักกรีนโอ๊ค จำนวน 6 ต้น (อายุ 45-50 วัน) โดยบันทึกภาพซ้ำเพียงต้นละ 3 ภาพจากมุมกล้องเดียวกัน โดยตรวจวัดภายใต้สภาพแวดล้อมจริงที่ค่าความสว่างของแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอันเนื่องมาจากมีเมฆบัง การตรวจวัดเปรียบเทียบตามความเข้มแสง 2 ระดับ คือ (1) ความเข้มแสงต่ำ (แสงแดดอ่อน) โดยมีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในช่วง 4,800 – 8,600 ลักซ์ (Lux) และ (2) ความเข้มแสงสูง (แสงแดดเข้ม) โดยมีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในช่วง 17,000 – 36,700 ลักซ์ (Lux) ในการตรวจวัดจะใช้กล้อง 2 ชนิด ดังรูปที่ 4.9 ประกอบด้วย

1) NoIR Camera ที่ใช้แผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน (Blue Filter) เพื่อคัดกรองเฉพาะแสง NIR (Near-Infrared) แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงินมา โดยที่แสงที่แดงไม่สามารถผ่านเข้ามาได้

2) RGB Camera ที่นำเข้าทั้งแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน แต่จะถูกนำมาใช้เฉพาะแสงสีแดงมาใช้เท่านั้น

เมื่อได้ค่า NDVI จากการทดสอบกับต้นผักให้น้ำตามปกติและงดน้ำและปุ๋ย 3 วัน ในความเข้มแสงต่างกัน ค่าที่ตรวจวัดได้จะนำมาทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยใช้ t-Test เพื่อให้ทราบความแตกต่างในการตรวจวัดจากการให้ปัจจัยการผลิตและสภาวะแสงที่ต่างกัน

จากตารางที่ 4.9 และกราฟดังรูปที่ 4.10 – 4.12 แสดงผลการทดสอบ พบว่า ค่าเฉลี่ย NDVI ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ตรวจวัดได้ในแปลงปลูกในโรงเรือนภายใต้แสงธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ย NDVI ที่ตรวจวัดในสภาพความเข้มแสงต่ำมีค่าเฉลี่ยมากกว่า การตรวจวัดในสภาพความเข้มแสงสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเปรียบเทียบค่า NDVI ที่ตรวจวัดจากใบ Tobacco จากการเพิ่มความเข้มแสงจาก 740 เป็น 88,800 ลักซ์ (30 – 1,200 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) ค่า NDVI ลดลงจากร้อยละ 72.7 เป็นร้อยละ 69.9 (Suh , 2017) แต่เมื่อทดสอบสมมติฐานของผลต่าง พบว่า ค่าเฉลี่ย NDVI ของผักที่ให้ปุ๋ยและน้ำตามปกติในความเข้มแสงต่ำและสูงมีค่าแตกต่างกันทางสถติ โดยที่ค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) ในขณะที่ค่าเฉลี่ย NDVI ของผักที่งดปุ๋ยและน้ำ 3 วัน ในความเข้มแสงต่ำและสูงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถติ โดยที่ค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) นอกจากนี้ ลักษณะของผักกรีนโอ๊คที่พื้นผิวมีสีเขียวอ่อนและบางส่วน เป็นสีเขียวแกมขาว ซึ่งต่างจากพืชสีเขียวอื่น เมื่อมีความเข้มแสงสูงมาตกกระทบและสะท้อน เข้ากล้อง พบว่า ระดับความเข้มของสีเขียวจางลงและระดับสี (Scale) ของภาพ NDVI Colormap บริเวณดังกล่าวมีค่าสีอยู่ในระดับที่ต่ำลง รวมทั้งลักษณะใบหยักซ้อนกันละเอียดทำให้เกิดเงาบังใบ ทั่วทั้งพุ่ม การตรวจวัดค่า NDVI ในผักสลัดกรีนโอ๊คจึงอาจได้ค่าไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.9 NDVI measurement of green oak lettuce at different light intensity

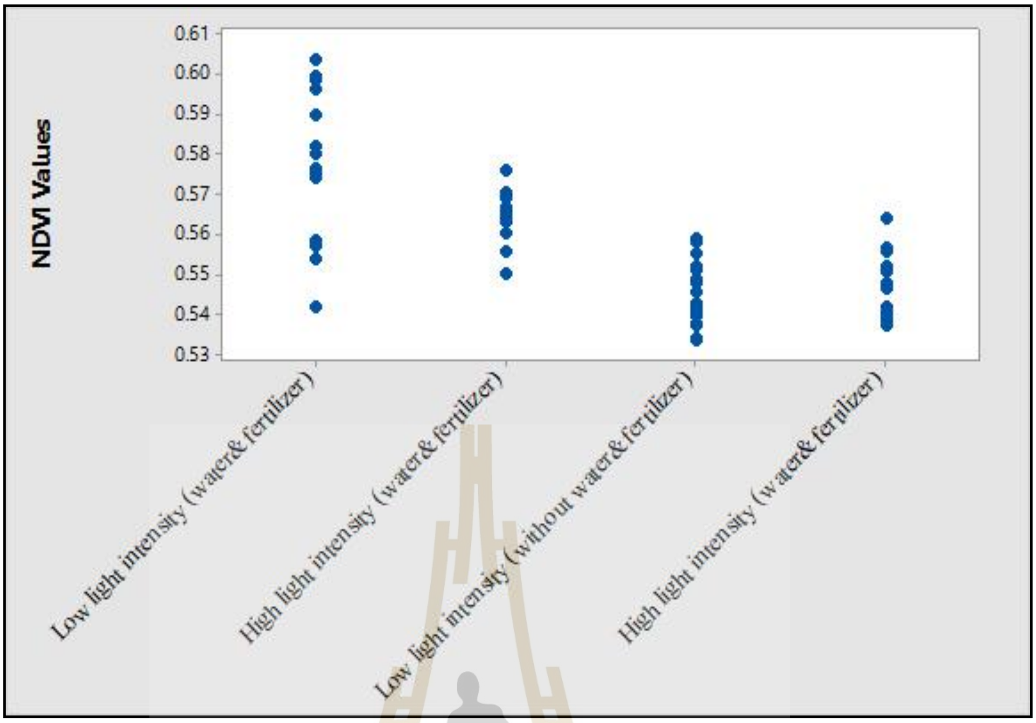
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.9 The NDVI values of green oak vegetables were measured from raised bed in greenhouses according to the constant change in natural light brightness.

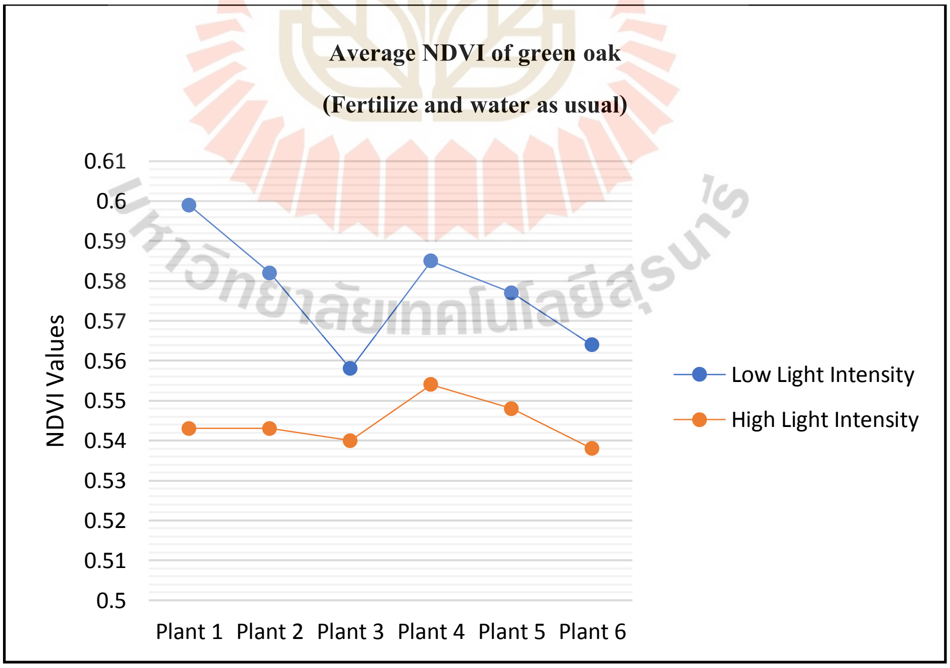
Order of Vegetables	Light Intensity	Average NDVI of green oak (Fertilize and water as usual)	Average NDVI of green oak (No Fertilize and water for 3 days)
1	Low Light Intensity	0.599	0.543
2		0.581	0.543
3		0.558	0.540
4		0.585	0.554
5		0.577	0.548
6		0.564	0.538
Average of 6 plants		0.577^{a}	0.544^{c}
1	High Light Intensity	0.570	0.540
2		0.565	0.544
3		0.561	0.547
4		0.565	0.551
5		0.562	0.556
6		0.565	0.538
Average of 6 plants		0.564^{b}	0.546^{c}

Means of a, b and c in a column followed by the same character are not significantly different at 0.05 significant levels

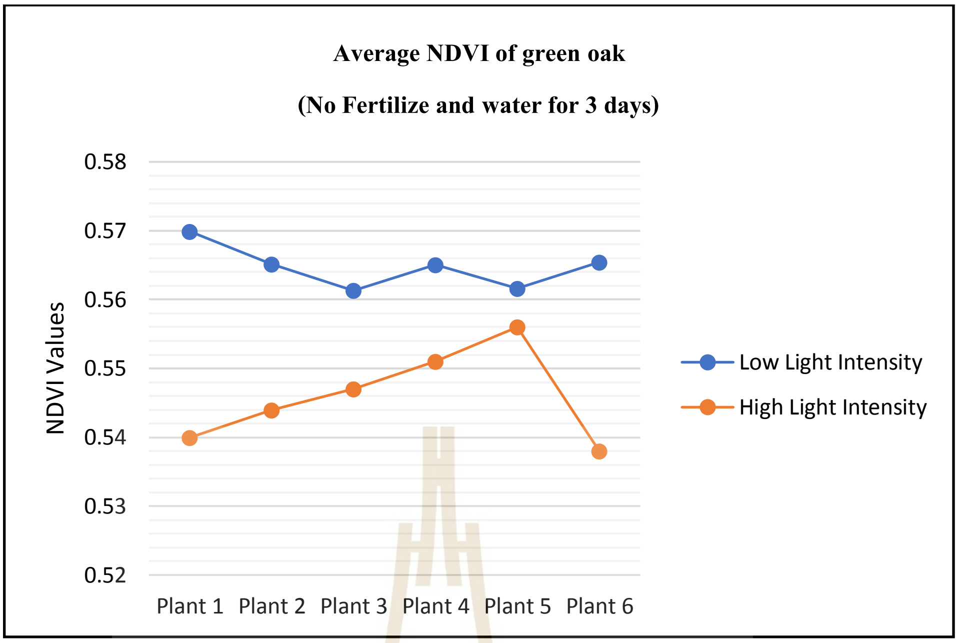
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.10 NDVI values measuring green oak vegetables with different planting factors



รูปที่ 4.11 NDVI value measuring Green Oak lettuces with fertilizer and water as usual



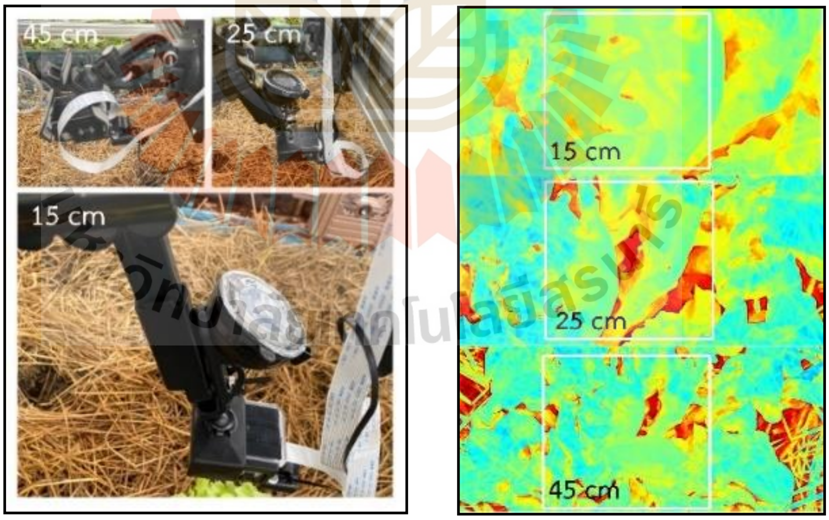
รูปที่ 4.12 NDVI value measuring Green Oak lettuces without fertilizer and water for 3 days

จากการทดสอบตรวจวัดค่า NDVI จากผักกรีนโอ๊คที่ให้น้ำและปุ๋ยตามปกติเพื่อให้เป็น กลุ่มตัวอย่างของพืชสุขภาพดี และที่งดน้ำและปุ๋ยเป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้เป็นกลุ่มตัวอย่างของพืช ที่สุขภาพไม่ดี พบว่า ทั้งการวัดเปรียบเทียบในความเข้มแสงต่ำและความเข้มแสงสูง ค่าเฉลี่ย NDVI ของผักที่มีการให้ปุ๋ยและน้ำตามปกติกับงดปุ๋ยและน้ำเป็นเวลา 3 วัน มีความแตกต่างกันทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อเทียบเคียงกับค่าการตรวจวัดโดยบันทึกจากภาพถ่ายดาวเทียม (GIS) จะสอดคล้องในส่วนที่ระบุว่าค่า NDVI ที่ชี้วัดว่าเป็นบริเวณ ที่มีพืชจะอยู่ที่ 0.2 – 1 แต่พบว่า ค่า NDVI ที่ตรวจวัดได้จากการทดลองมีช่วงกว้างที่ค่อนข้างแคบ ซึ่งส่งผลให้การนำค่าไปกำหนดชี้วัดสุขภาพพืชค่อนข้างยาก และต่างจากค่าพื้นฐานที่มีการอ้างอิงโดยทั่วไป คือ ค่า -1 – 0 หมายถึง พืชตาย (Dead Plant) ค่า 0 – 0.33 หมายถึง พืชสุขภาพไม่ดี (Unhealthy Plant) ค่า 0.33 – 0.66 หมายถึง พืชสุขภาพดีปานกลาง (Moderately Healthy Plant) และ ค่า 0.66 – 1 หมายถึง พืชสุขภาพดีมาก (very Healthy Plant) อย่างไรก็ตาม ค่าที่มีการอ้างอิง จะเป็นค่าโดยทั่วไป ค่า NDVI จะมีความแตกต่างไปตามชนิดของพืชและสภาพแวดล้อมซึ่งต้องมีการตรวจวัดอย่างเฉพาะเจาะจงจึงจะทราบค่าที่ถูกต้อง (Sentera, Inc., 2017)

4.7 ทดสอบการระยะติดตั้งกล้องที่เหมาะสมกับการตรวจวัดค่าดัชนีพืชพรรณ

เพื่อให้ทราบว่าระยะห่างของกล้องที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดค่า NDVI จึงทำการทดสอบตรวจวัดค่า NDVI จากต้นผัก 6 ต้น (อายุ 45-50 วัน) ในโรงเรือนปลูกพืช โดยทดสอบเปรียบเทียบจากระยะห่างจากกล้องถึงต้นพืชที่ 15 ซม. 25 ซม. และ 45 ซม. (ระยะติดตั้งเดิม) ค่า NDVI ที่ตรวจวัดจะเป็นค่าเฉลี่ยระดับพิกเซล ที่กำหนด ณ จุดกึ่งกลางของภาพพืชที่บันทึก จำนวน 78,880 ตารางพิกเซล โดยตรวจวัดในช่วงความเข้มแสง 15,800 – 40,170 ลักซ์ ซึ่งถือเป็นช่วงที่มีความเข้มแสงสูง จากนั้น หาค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (C.V.)

การตรวจวัดค่า NDVI จำนวน 6 ต้น จากกล้องที่ถูกติดตั้งในระยะห่างจากต้นพืชในแปลง 3 ระดับ ดังรูปที่ 4.13 โดยใช้การปรับระยะตัวยึดกล้อง เนื่องด้วยเลนส์กล้องไม่สามารถปรับระยะได้ ผลสรุปแสดงดังตารางที่ 4.10 และแสดงผลดังกราฟในรูปที่ 4.14 พบว่า ระยะตั้งกล้องที่ใกล้ต้นผักมีแนวโน้มที่ค่า NDVI ที่สูงกว่าระยะกล้องที่ห่างกว่า แต่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (C.V.) ที่สูงกว่าด้วย ระยะการตั้งกล้องที่เหมาะสมที่สุดเพื่อตรวจวัดค่า NDVI จึงควรอยู่ที่ 45 ซม. เนื่องจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย และค่าสัมประสิทธิ์ การกระจายมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงค่า NDVI ที่ตรวจวัดได้ค่อนข้างคงที่กว่าระยะอื่น นอกจากนี้ระยะติดตั้งกล้องที่ความห่าง 45 ซม. ถือเป็นระยะที่กล้องจะปลอดภัยจากละอองของปุ๋ยน้ำ ที่ฉีดพ่นจากหัวฉีด

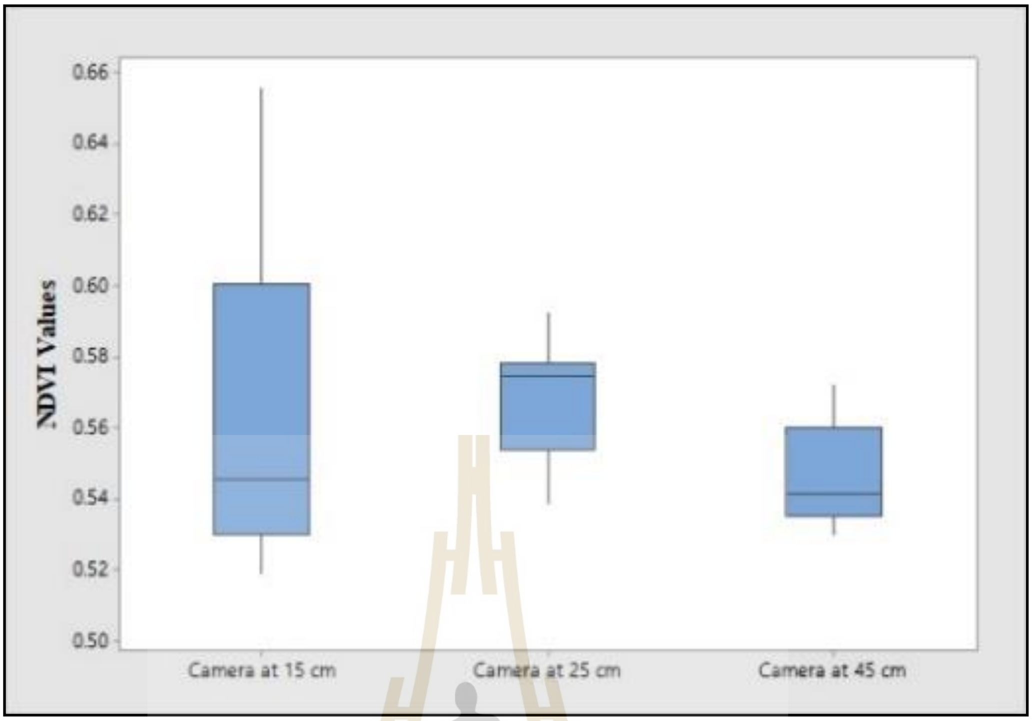


รูปที่ 4.13 NDVI measurements with cameras at different distances from plants

ตารางที่ 4.10 NDVI test results of 6 green oak plants at different distances from the camera to the plants.

Distance (cm)	Order of Vegetables	Average NDVI of green oak	Range	Mean	SD	CV (%)
15	1	0.5285	0.5186 – 0.6558	0.5646	0.0462	8.1863
	2	0.5487				
	3	0.5278				
	4	0.5358				
	5	0.6112				
	6	0.6354				
25	1	0.5515	0.5384 – 0.5931	0.5695	0.0157	2.7514
	2	0.5656				
	3	0.5921				
	4	0.5546				
	5	0.5751				
	6	0.5781				
45	1	0.5375	0.5295 – 0.5725	0.5466	0.0139	2.5430
	2	0.5661				
	3	0.5557				
	4	0.5343				
	5	0.5368				
	6	0.5492				

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.14 Results of NDVI measurements with cameras at different distances from plants

4.8 ทดสอบความสิ้นเปลืองสารละลายปุ๋ยทางใบเปรียบเทียบระหว่างการใช้หุ่นยนต์ การใช้คนฉีดพ่น และการฉีดพ่นผ่านระบบน้ำโรงเรือน

เปรียบเทียบความสิ้นเปลืองของวิธีการให้ปุ๋ยน้ำที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.15 ดังนี้

1. ตรวจวัดปริมาตรการฉีดพ่นของหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิลิตร โดยการตรวจวัด 2 วิธี ดังนี้

1.1) วัดปริมาตรปุ๋ยน้ำที่ฉีดพ่นออกมาทั้งหมดจากหัวฉีด โดยหน่วงเวลาการทำงาน ของปั๊มน้ำตั้งแต่ 0.1 – 2.0 วินาที เก็บข้อมูลปริมาณปุ๋ยน้ำโดยเพิ่มอัตราการหน่วงครั้งละ 0.1 วินาที

1.2) วัดปริมาตรปุ๋ยน้ำที่พื้นผิวพุ่มใบต้นผักสามารถรับไว้จากการฉีดพ่น ในระดับความสูงจากหัวฉีดถึงยอดพืชที่ต่างกัน 3 ระดับ (20 ซม. 30 ซม. และ 40 ซม.) โดยใช้ภาชนะ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดพุ่มใบผักกรีนโอ๊ครองรับที่ผิวดินใต้หัวฉีดพ่น โดยหน่วงเวลาการทำงานของปั๊มน้ำตั้งแต่ 0.1 – 2.0 วินาที เก็บข้อมูลปริมาณปุ๋ยน้ำโดยเพิ่มอัตราการหน่วงครั้งละ 0.1 วินาที

การตรวจวัดในข้อ 1.1 และ 1.2 แสดงในตารางที่ 4.11 และกราฟดังรูปที่ 4.16 ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในข้อ 1.1 – 1.2 จะถูกใช้อ้างอิงกับปริมาณฉีดพ่นปุ๋ยที่เหมาะสมตามหลักวิชาการและใช้กำหนดอัตราการหน่วงเวลาการทำงานของปั๊มน้ำที่อ้างอิงค่าดัชนีพืชพรรณ

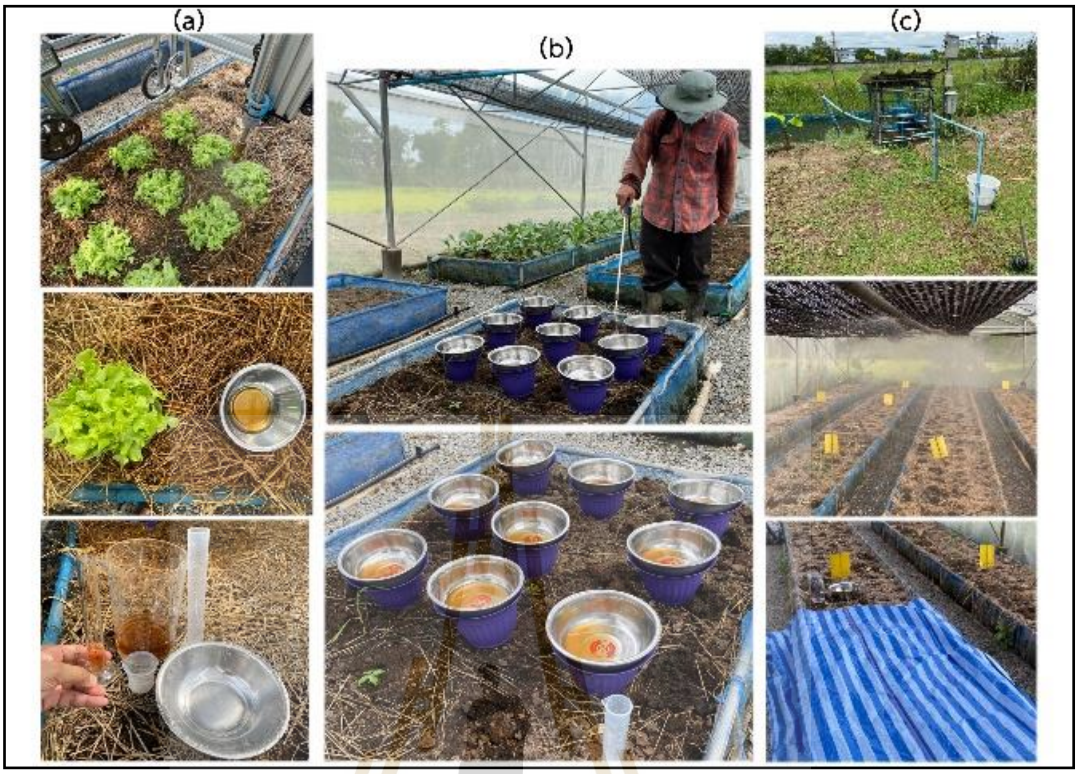
รวมทั้งจะนำไปประมวลผลด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อหาสมการที่จะใช้เป็น Linear Regression Model สำหรับการทำนายปริมาณปุ๋ยน้ำที่ฉีดพ่นจากการหน่วงเวลาการทำงานของปั๊มที่แตกต่างกัน

2. การให้ปุ๋ยทางใบด้วยระบบน้ำของโรงเรือนผ่านท่อ PE ที่มีหัวพ่นฝอย โดยทดสอบปริมาตรการฉีดพ่นต่อ 1 หัวพ่นฝอย ซึ่งจะมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 1 ตารางเมตร (ผักสลัด 9 ต้น) ตรวจวัดโดยการปูผ้าใบรองรับน้ำบนแปลง ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลโดยเปิดน้ำในโรงเรือนเป็นเวลา 5 นาที ตามระยะเวลาการฉีดพ่นปกติช่วงเวลาเช้าและเย็นในโรงเรือน

3. การใช้คนฉีดพ่นปุ๋ยทางใบด้วยเครื่องฉีดพ่นแบบสะพาย กับผักสลัด 9 ต้น ในพื้นที่ 1 ตารางเมตร (ผักสลัด 9 ต้น) ตรวจวัดโดยการปูผ้าใบรองรับน้ำบนแปลง โดยกำหนดให้ใช้เวลาฉีดต่อต้นตามที่เคยปฏิบัติ

อัตราการฉีดพ่นสารละลายปุ๋ยทางใบโดยพื้นฐานที่มีการแนะนำจะอยู่ที่ 5-30 ไมโครลิตรต่อตารางเซนติเมตร (0.005-0.03 มิลลิลิตรต่อตารางเซนติเมตร) (ยงยุทธ, 2557) ต้นผักกรีนโอ๊คอายุ 45 – 50 วัน มีพื้นที่พุ่มใบเท่ากับ 400 ตารางเซนติเมตร โดยประมาณ ดังนั้น อัตราการฉีดพ่นที่เหมาะสมจึงอยู่ที่ประมาณ 2 – 12 มิลลิลิตรต่อต้น เมื่อทดสอบปริมาตรปุ๋ยทางใบที่ฉีดพ่นลงภาชนะในระยะเวลา 0.1- 2.0 วินาที และระดับความสูง 20, 30, 40 ซม. พบว่า ระดับความสูงจากหัวฉีดถึงยอดพืชที่ 30 ซม. และ 40 ซม. จะทำให้ปริมาตรปุ๋ยน้ำที่ฉีดพ่นลงในภาชนะที่ใช้เป็นตัวแทนพื้นที่ผิวใบสำหรับรับละอองปุ๋ยมีค่าอยู่ที่ 5.7 – 12 มล. และ 4.8 – 9.2 มล. ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงปริมาณฉีดพ่นที่เหมาะสมตามหลักการ ในขณะเดียวกัน พบว่า ยิ่งหัวฉีดพ่นมีระยะห่างจากยอดผักกรีนโอ๊คมาก ปุ๋ยทางใบที่ฉีดพ่นจะร่วงออกนอกพุ่มใบจะมากขึ้นด้วย ซึ่งอาจมีทั้งส่วน ที่ร่วงลงผิวดินหรือกระจายไปยังพุ่มใบของต้นข้างเคียง

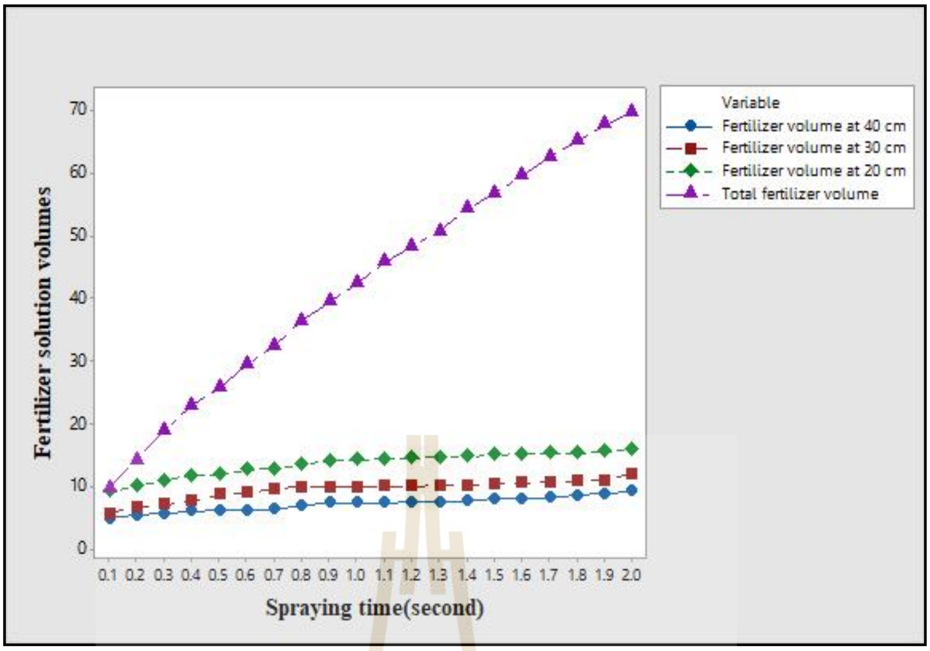
ทั้งนี้ เพื่อให้มีการสิ้นเปลืองปริมาณปุ๋ยทางใบน้อยที่สุดจึงเลือกระดับความสูงของหัวฉีดพ่นถึงพืชที่ 40 ซม. เนื่องจากมีผลต่างในช่วงค่าปริมาตรปุ๋ยน้ำเท่ากับ 4.4 มล. ซึ่งน้อยกว่าช่วงอื่น ดังตารางที่ 4.11 เมื่อนำค่าปริมาตรปุ๋ยน้ำที่ได้จากระยะความสูงหัวฉีดที่ 40 ซม. แบ่งออกในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน 4 ระดับ คือ 4.8, 6.3, 7.7 และ 9.2 มล. พบว่า การกำหนดระยะเวลาการทำงานของปั๊มน้ำที่ 0.1, 0.7, 1.4 และ 2.0 วินาที ตามลำดับ จะได้ค่าปริมาตรปุ๋ยน้ำที่ฉีดพ่นใกล้เคียงกับปริมาตรปุ๋ยน้ำที่แบ่งไว้ดังกล่าว ดังนั้น จึงนำระยะเวลาดังกล่าวไปกำหนดเป็นค่าหน่วงเวลาการทำงานของปั๊มน้ำเพื่อฉีดพ่นปุ๋ยทางใบตามระดับสุขภาพพืชที่อ้างอิงค่าดัชนีพืชพรรณจากการทดลองก่อนหน้านี้ ดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.15 Measuring the wastage of foliar fertilizer from different methods of irrigation

ตารางที่ 4.11 Measuring the volume of liquid fertilizer by spraying at three different heights from the nozzle

Testing	Height of nozzle (cm)	Liquid fertilizer mean volume range (ml)	difference of mean volume range (ml)
Liquid fertilizer expected to obtain on leaves area (Pump spraying period 0.1 – 2.0 seconds)	20	9.2 – 16	6.8
	30	5.7 – 12	6.3
	40	4.8 – 9.2	4.4
Total liquid fertilizer from nozzle (Pump spraying period 0.1 – 2.0 seconds)	All height	9.7 – 69.7	60



รูปที่ 4.16 Measuring the volumes of foliar fertilizer with different spraying time of water pump in foliar fertilizer robot system

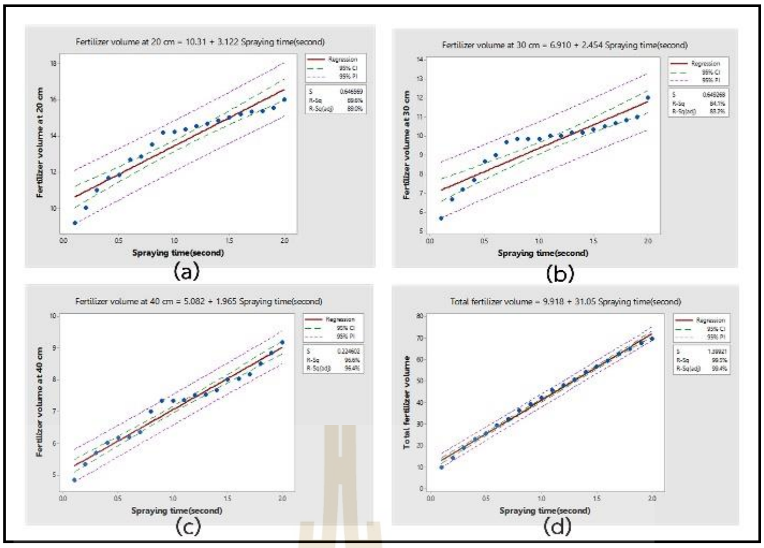
ตารางที่ 4.12 The spraying time required for the pump to run is based on the highest and lowest NDVI values measured.

NDVI Standard Value	Pump spraying period (sec)	All average volume from fertilizer nozzle (ml)	Average volume expected to obtain on leave area (ml)
very healthy plant (NDVI >= 0.6)	0.1	9.67	4.8
healthy plant (0.58 < NDVI < 0.6)	0.7	32.33	6.3
moderately healthy plant (0.56 < NDVI <= 0.58)	1.4	54.17	7.7
unhealthy plant (0.54 < NDVI <= 0.56)	2	69.67	9.2
very unhealthy plant (NDVI <= 0.54)	Not Spray	Not Spray	Not Spray

โดยทั่วไปปุ๋ยทางใบจะมีหลายสูตร โดยจะมีธาตุอาหารแตกต่างกัน รวมทั้งมีอัตราการฉีดพ่นที่แนะนำแตกต่างดันไปด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลปริมาตรปุ๋ยน้ำที่มีการฉีดพ่น จากการกำหนดเวลาทำงานของปั๊มที่ 0.1 -2.0 วินาที ซึ่งได้จากการทดลองมาสร้างเป็นสมการ Linear Regression Model ของความสูงหัวฉีดที่ 20, 30 และ 40 ซม. อย่างเฉพาะเจาะจง โดยสามารถนำไปใช้ในการทำนายปริมาตรปุ๋ยทางใบที่แปรผันไปตามระยะเวลาการทำงานของปั๊มน้ำได้ รวมทั้ง ประเมินความแม่นยำของสมการด้วย R^2 score และหาค่าความผิดพลาดด้วย Mean Square Error (MSE) และ Mean Absolute Error (MAE) ร่วมด้วย ดังนั้น เมื่อมีการใช้ปุ๋ยทางใบสูตรอื่นก็จะสามารถพิจารณาเลือกนำสมการ Linear Regression Model ไปใช้คำนวณ เพื่อกำหนดระยะเวลาการทำงานของปั๊มน้ำให้ฉีดพ่นปุ๋ยได้ในปริมาณที่เหมาะสมตามคำแนะนำ ของปุ๋ยสูตรดังกล่าวได้ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.13 และกราฟในรูปที่ 4.17 เมื่อทำการประเมินโมเดล สมการการถดถอยเชิงเส้นของข้อมูลปริมาณการฉีดพ่นของหัวฉีดที่ 20 ซม. มีค่าความแม่นยำสูงที่สุด เท่ากับ 97.62 % และมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยที่ MSE และ MAE เท่ากับ 0.0326 และ 0.1503 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 The linear regression model for prediction the volume of foliar fertilizer in any water pump running rate

Testing	Height from the spray nozzle to top of the plant (cm)	Linear Regression Model	R^2 score	MSE	MAE
Liquid fertilizer expected to obtain on leaves area	20	Y = (2.0044 * X) + 4.9738	0.9762	0.0326	0.1503
	30	Y = (2.4523 * X) + 6.912	0.8409	0.3783	0.5121
	40	Y = (1.9668 * X) + 5.0799	0.9658	0.0455	0.1697
Total liquid fertilizer from nozzle	All height	Y = (31.0556 * X) + 9.9171	0.9945	1.7584	1.0461



(a) Linear Model of spraying volume at 20 cm (b) Linear Model of spraying volume at 30 cm (c) Linear Model of spraying volume at 40 cm (d) Linear Model of total spraying volume

รูปที่ 4.17 Graph of Linear Regression Model for prediction foliar fetilizer spraying volume

จากการเทียบเคียงข้อมูลกับปุ๋ยทางใบยี่ห้อหนึ่งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดซึ่งมีปริมาตรบรรจุ 1,000 มิลลิลิตร ราคาจำหน่ายอยู่ที่ 450 บาท หรือ 0.45 บาท ต่อ 1 มิลลิลิตร ดังนั้น อัตราการใช้ผสมเป็นสารละลายปุ๋ยที่แนะนำ คือ 20 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 20 ลิตร (อัตราส่วน ปุ๋ยทางใบ : น้ำ เท่ากับ 1 : 1,000 ส่วน) เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายที่ต้องลงทุนปุ๋ยทางใบที่ผสมเจือจางน้ำเพื่อใช้งานด้วย วิธีการที่ต่างกัน สำหรับการให้ปุ๋ยทางใบกับต้นผัก 9 ต้น ในพื้นที่ประมาณ 1 ตารางเมตร จาก การเปรียบเทียบวิธีการให้ปุ๋ยทางใบ 3 วิธี พบว่า มีการสิ้นเปลืองปุ๋ยเปรียบเทียบวิธีให้ผ่านระบบน้ำโรงเรือน การให้ปุ๋ยโยใช้คนฉีดพ่น และการใช้หุ่นยนต์ เท่ากับ 1.67 บาทต่อมิลลิลิตร 0.41 บาทต่อมิลลิลิตร และ 0.27 บาทต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ สรุปได้ว่าการใช้หุ่นยนต์ฉีดพ่นปุ๋ยจะสิ้นเปลืองน้อยที่สุด รองลงมาจะเป็นการให้คนฉีดพ่นด้วยเครื่องพ่นปุ๋ยแบบสะพายหลัง และที่สิ้นเปลือง มากที่สุดจะเป็นการให้ปุ๋ยผ่านระบบการให้น้ำของโรงเรือนปลูกพืช โดยแสดงผลตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 The results of the test for finding the wastage of liquid fertilizer from spraying per 1 square meter by different method.

Method for foliar spraying	Spraying time	Volume of liquid fertilizer spraying (ml)	Foliar fertilizer cost (Baht/ml)
1 spray nozzle in greenhouse Fertigation system (9 plants in square meter area)	5 minutes/Area	3,700	1.67 (3.7 ml. x 0.45 Baht)
man using liquid fertilizer sprayer (9 plants in square meter area)	3 seconds/plant	918	0.41 (0.9 ml x 0.45 Baht)
Foliar fertilizer robot (9 plants in square meter area)	Maximum at 2 seconds/plant	603	0.27 (0.6 ml x 0.45 Baht)

4.9 ปัญหาที่พบ

1. Stepping Motor Driver รุ่น TB66000 มีราคาถูก และประสิทธิภาพต่ำ เมื่อเลือกนำมาใช้จึงมีปัญหา Losing Step มีผลให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามค่า Pulse/step และ Pulse/rev ที่ตั้งค่า ไว้ได้ ทั้งนี้ ได้นำค่าต่าง ๆ ของ Leadscrew และ Stepping Motor ไปคำนวณผ่านโปรแกรมแล้ว พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณไม่ตรงกับค่าการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดสอบจริง

2. เนื่องจากเลือกใช้ Stepping Motor Nema 24 ที่ราคาถูก กำลังน้อย และความเร็วต่ำ จึงทำให้การเคลื่อนที่ไปยังพิกัดต้นพืชเพื่อฉีดพ่นปุ๋ยใช้เวลามาก ตลอดจนโปรแกรมที่พัฒนา จะเลือก

พิกัดการเคลื่อนที่ได้ครั้งละพิกัด กลไกจะเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายก่อนและกลับมา ยังตำแหน่งตั้งต้นถึงสามารถเลือกพิกัดต้นพืชครั้งต่อไปได้ ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงานโดยรวมมากขึ้น

3. พื้นโรงเรือนมีการโรยหินจึงทำให้มีความสูงต่ำต่างกัน ล้อยาง 4 ล้อที่รับน้ำหนักโครงสร้างทั้งหมดไม่ได้ติดตั้งโช๊คอัพ (Shock Absorber) ไว้ เมื่อมีการเคลื่อนที่ไปบางตำแหน่ง ตามความยาวของแปลงปลูก พบว่า ล้อด้านนอกมีการยกตัวตามความสูงของพื้นที่โรยหินจนทำให้พูลเลย์ที่ทำหน้าที่เป็นล้อที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ต้นกำลังเกิดการยกตัวจากขอบแปลงจนทำให้ไม่สามารถแล่นต่อไปได้

4. กล้อง Industrial HD Camera ที่นำมาใช้ในการแสดงผลต้นพืชในแปลงจากมุมด้านบน มีการแสดงภาพที่บิดเบี้ยวเล็กน้อย ซึ่งเป็นการบิดเบี้ยวในแนวรัศมี (Radial distortion) อันเนื่องมาจากเลนส์ของกล้อง การสั่งการให้กลไกเคลื่อนที่ไปยังพิกัดต้นพืชผ่านจอแสดงผลที่ได้บันทึกภาพจากกล้องจึงมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย โดยเฉพาะวัตถุที่อยู่ใกล้กับขอบของภาพที่แสดงผล เมื่อมีการบิดเบี้ยวเพียงเล็กน้อยจึงไม่ได้ค้นหาโค้ดโปรแกรมที่ใช้สำหรับแก้ปัญหา ความบิดเบี้ยวของภาพมาแก้ไขปัญหา

4.10 แนวทางแก้ไข

1. ใช้ Stepping Motor Driver ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้การควบคุม Stepping Motor เป็นไปอย่างมีมาตรฐานและประสิทธิภาพ

2. เลือกใช้ Stepping Motor ที่มีกำลังและความเร็วรอบสูงขึ้น เพื่อให้กลไกสามารถทำงานได้เร็วขึ้น

3. ติดตั้งโช๊คอัพให้กับล้อที่รับน้ำหนักโครงสร้างเพื่อช่วยลดปัญหาจากความสูงต่ำ ของพื้นโรงเรือนที่จะมีผลต่อการเคลื่อนที่บนแปลงปลูกของหุ่นยนต์

4. เลือกใช้โค้ดโปรแกรมที่เป็นฟังก์ชันใน OpenCV เพื่อช่วยปรับภาพที่มีการบิดเบี้ยวให้กลับมาแสดงผลตามปกติก่อนนำไปใช้กับงานที่อาศัยความเที่ยงตรง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปงานวิจัย

การใช้กลไกคาร์ทีเซียนมาฉีดพ่นปุ๋ยทางใบเป็นลักษณะงานเชิงประยุกต์ ซึ่งต่างจากการใช้ในเครื่องจักรซีเอ็นซีในงานอื่น ๆ ที่เป็นการเคลื่อนที่เพื่อขับภาระงานแบบ 3 มิติ และต้องอาศัย ความแม่นยำสูง ความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ไปยังพิกัดพืชเพื่อฉีดพ่นปุ๋ยทางใบซึ่งสั่งการ โดยการเลือกพิกัดของพืชผ่านจอ Monitor ที่มีการเคลื่อนที่ตามหลักการการมองเห็นของหุ่นยนต์แบบ 2 มิติ จึงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยที่แม้จะคลาดเคลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางของต้นพืช แต่ก็ยังสามารถตรวจวัดค่า NDVI และฉีดพ่นปุ๋ยน้ำที่มีละอองฝอยละเอียดให้เกาะกับใบของพืชได้อย่างน่าพอใจ จากการทดสอบในแปลงปลูกพืชมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 5 % แม้จะมีปุ๋ยน้ำบางส่วนสูญเสียไปนอกพื้นที่พุ่มใบจากที่หัวฉีดพ่นคลาดเคลื่อนจากจุดกึ่งกลางก็ตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

สิ่งที่ควรให้ความสำคัญเพิ่มขึ้น คือ การตรวจวิเคราะห์ข้อมูลพืชให้มีความละเอียด หรือหลากหลายขึ้นในการตรวจครั้งเดียวกัน อาจตรวจวัดดัชนีพืชพรรณแบบอื่น ๆ มาประกอบกัน เช่น SRI, SAVI, OSAVI, ARVI, GNDVI, GBNDVI และ EVI เป็นต้น รวมทั้งอาจประมวลผลค่าสีที่ผิดปกติของใบพืชเพื่อใช้วินิจฉัยภาวะการขาดธาตุอาหารหรือเป็นอาการจากโรคพืช (Plant Disease) ร่วมด้วย เพื่อตอบโจทย์ในเรื่องความแม่นยำและเที่ยงตรงของข้อมูลพืชที่ตรวจ รวมทั้งสามารถนำข้อมูลที่ตรวจวัดไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น สำหรับการ Object Detection ทั้งการใช้ Color Classification และ Training Model หากมีการพัฒนาให้ควบรวม โปรแกรมการหาพิกัด XY-Coordination และการตรวจวัดค่า NDVI อย่างเป็นโมเดลเดียวกันได้ รวมถึงการทดสอบในกลุ่มตัวอย่างในพืชผักที่หลากหลายให้เป็น Big Data เพื่อให้การประมวลผลสุขภาพพืชโดยการตรวจวัดค่า NDVI มีความครอบคลุมชนิดพืชมากขึ้น

รายการอ้างอิง

กอบเกียรติ สระอุบล. (2561). **พัฒนา IOT บนแพลตฟอร์ม Arduino และ Raspberry Pi**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ไชยยันต์ สิริกุล และเกรียงไกร แซมสีม่วง. (2021). **การพัฒนาระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำแบบแปรผันอัตราได้ ด้วยเทคนิคประมวลผลภาพถ่ายแบบติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ไร้คนขับสำหรับพื้นที่ปลูกอ้อยสมัยใหม่**. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 2(2564): 19 – 26.

เดชฤทธิ์ มณีธรรม. (2559). **คัมภีร์การใช้งานหุ่นยนต์**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

เดชฤทธิ์ มณีธรรม. (2560). **คัมภีร์การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ทวีชัย อวยพรกชกร. (2562). **เรียนรู้ระบบฝังตัวด้วย RASPBERRY PI EMBEDDED SYSTEM WITH RASPBERRY PI**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. (2550). **การปลูกพืชผักในโรงเรือน.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นพ มหิษานนท์. (2560). Raspberry Pi PROJECTS. นนทบุรี: สำนักพิมพ์ คอร์ฟังชั่น.

บุญธรรม ภัทราจารุกุล (2554). **แมคคาทรอนิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

บุญธรรม ภัทราจารุกุล (2556). **การประมวลผลภาพดิจิตอลเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ปกรณ์ แก้วตระกูลพงษ์ (2559). **การประยุกต์อัลกอริทึมแมชีนวิชันโดยใช้ NI Vision**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปฏิพัทธ์ หงส์สุวรรณ. (2556). SolidWork SolidCAM **การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตขั้นพื้นฐาน**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประภาส พุ่มพวง. (2561). **การเขียนและการประยุกต์ใช้งานโปรแกรม ARDUINO**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ภานุพันธ์ ไมตรี. (2561). **การประยุกต์ใช้ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ในการศึกษาศักยภาพการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย**. (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร, คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, สาขาภูมิศาสตร์.

ยงยุทธ โอสถสภา (2557). **การใช้ปุ๋ยและสารเร่งทางใบ**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิศรุต ศรีรัตนะ. (2554). **เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม.** กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

ศักรินทร์ โสนันทะ (2553). **เครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

สมเกียรติ อุดมหรรษากุล. (2554). **การประมวลผลภาพดิจิตอลเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด.

สมพร หงษ์กง และวัชรายุทธ ลำดวน. (2561). **เครื่องดำนาขนาดเล็กแบบเดินตามสำหรับปักดำกล้าข้าวแบบล้างรากในการปลูกข้าวนาน้ำฝน**. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (10): 144 – 156.

สิริวัฒน์ สาครวาสี (2562). **The Agriculture of The Future**. นนทบุรี: มิตรเกษตรการตลาดและโฆษณา.

สุรพนธ์ ตุ้มนาค. (2561). **เรียนรู้และพัฒนาอุปกรณ์ Internet of Things (IOT) อย่างง่ายด้วย Raspberry Pi กับ Blynk**. กรุงเทพฯ: บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด.

สุริยา วรวงค์ และ เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์. (2560). "การออกแบบและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแม่นยำในไร่อ้อยด้วยเทคนิคประมวลผลภาพ", **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10**.

Adamides, G., Christou, G., Katsanos, C., Kostaras, N., Xenos, M., Hadzilacos, T. and Edan, Y. (2014). A Reality-Based Interaction Interface for An Agricultural Teleoperated Robot Sprayer. **Second International Conference on ROBOTICS AND ASSOCIATED HIGH-TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR AGRICULTURE AND FORESTRY**, Madrid Spain, May 23, 2014.

Basso, M., Stocchero, D., Henriques, R. V. B., Vian, A. L., Bredeier, C., Konzen, A. A. and Freitas, P.,. (2019). **Proposal for an Embedded System Architecture Using a GNDVI Algorithm to Support UAV-Based Agrochemical Spraying**. Sensors 19, pp. 5397, 2019.

Haytova, D. (2013). **A Review of Foliar Fertilization of Some Vegetables Crops**. Annual Review & Research in Biology 3(4): 455-465.

Jawaharlal, M. and Ganesh, S. (2020). **Studies on the effect of fertigation in greenhouse chrysanthemum**. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry Sp9(2): 254-259.

Kassim, A. M., Termezai, M. F. N., Jaya, A. K. R. A., Azahar, A. H., Sivarao, S., Jaafar, F. A. and Aras, M. S. M. (2020). **Design and Development of Autonomous Pesticide Sprayer Robot for Fertigation Farm**. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 11, No. 2, 2020.

Santos, P. and Negri, J. A. (1996). **A Comparison of the Normalized Difference Vegetation Index and Rainfall for the Amazon and Northeastern Brazil**. Journal of Applied Meteorology 36: 958-965.

Schampheleirea, D.M., Baetensb, K., Nuyttensc, D. and Spanoghea, P. 2008. **Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops**. Crop Protection 27: 577–589.

Song, Y., Sun, H., Li, M. and Zhang, Q.,. (2015). **Technology Application of Smart Spray in Agriculture: A Review**. Intelligent Automation and Soft Computing 21: 319–333.

Suh, K. (2017). **Effect of a Sudden Increase in Light Intensity on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Reflected from Leaves of Tobacco**. Journal of Environmental Science International 26: 543-547.

Tucker, CJ. (1979). **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation**. Remote Sens Environ 8: 127–150.

W. Wang, Y. Duan, L. Zhang, TU. Rehman, D. Ma, and J. Jin,. (2020). **Precise Estimation of NDVI with a Simple NIR Sensitive RGB Camera and Machine Learning Methods for Corn Plans**. Sensors 20, pp. 3208, 2020.

Andrew Tao, Jon Barker and Sriya Sarathy. (2016). **DetectNet: Deep Neural Network for Object Detection in DIGITS** [On-line]. Available: https://developer.nvidia.com/blog/detectnet-deep-neural-network-object-detection-digits/.

Angela. (2017). **Camera Coordinates : Pixel to Centimeter Conversion** [On-line]. Available: http://www.robogrok.com/1-2-5_Camera_Coordinates.php.

David Berle and Robert Westerfield. (2013). **The Basics: Gardening in Raised Beds** [On-line]. Available: https://www.gardeners.com/how-to/raised-bed-basics/8565.Html.

Devid J. Eck. (2021). Pixels, Coordinates, and Colors [On-line]. Available: https://math.hws.edu/ graphicsbook/c2/s1.html

Dustin Franklin. (2019). **Deploying Deep Learning** [On-line]. Available: https://github.com/dusty-nv/jetson-inference.

Emmalea. (2016). **Foliar Fertilization of Vegetable Crops** [On-line]. Available: https://sites.udel.edu/weeklycropupdate/?p=8837.

EOS Data Analytics inc. (2021). **NDVI** [On-line]. Available: https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi

Gpolder. (2016). **Plant Health Camera** [On-line]. Available: https://www.element14.com/community/community/design-challenges/pi-iot/blog/2016/05/24/smart-camera-for-measuring-plant-health

Marie Iannotti. (2020). **15 Raised Bed Garden Design Ideas** [On-line]. Available: https://www.thespruce.com/raised-bed-garden-ideas-4172154

Mougeot, L. J. A.,. **Urban Agriculture: Definition, Presence, Potentials and Risks, and Policy Challenges** [On-line]. Available: https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/26429/117785.pdf?sequence=12

Noreen Garrison. (2018). **Methods for Measuring Distance in Images** [On-line]. Available: https://silo.tips/download/chapter-4-4-methods-for-measuring-distance-in-images

Nvidia Corporation. (2021). **Autonomous Machines: Jetson Nano Developer Kit** [On-line]. Available: https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit

Sentera, Inc. (2017). **NDVI and Your Farm: Understand NDVI for Plant Health Insights** [On -line] Available:https://www.agriculture-xprt.com/news/ndvi-and-your-farm- understanding -ndvi -for-plant-health-insights-702065

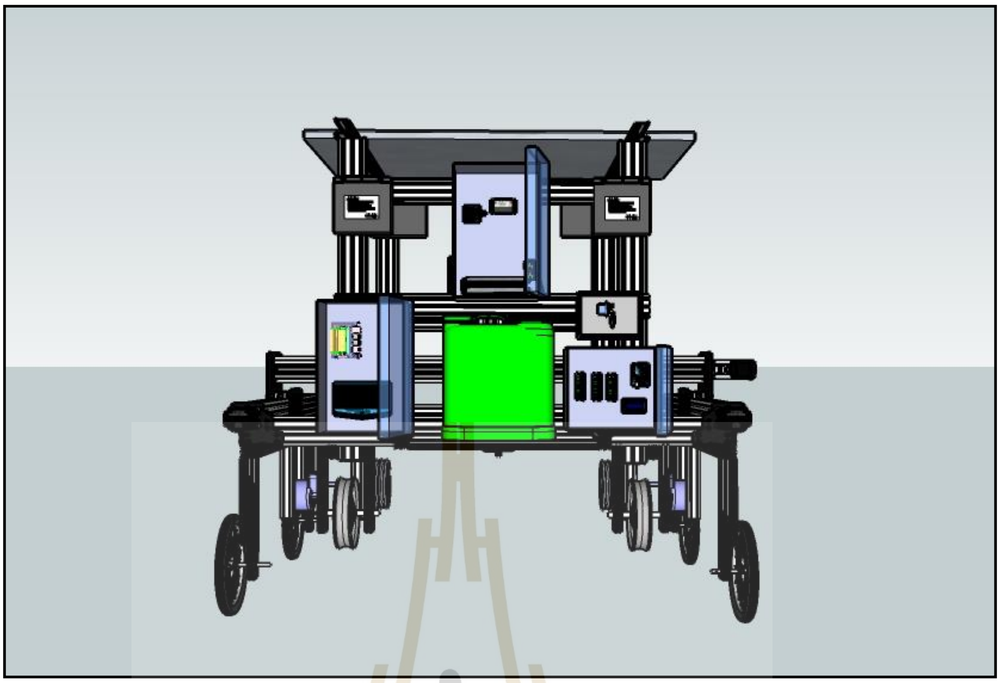
Sorotec. (2018). The **TB6600 single axis drive : Low cost microstepping driver** [On-line]. Available:https://www.upload.sorotec.de/doku/manuals/TB6600_data_sheet_ de_ Soro_180122.pdf

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

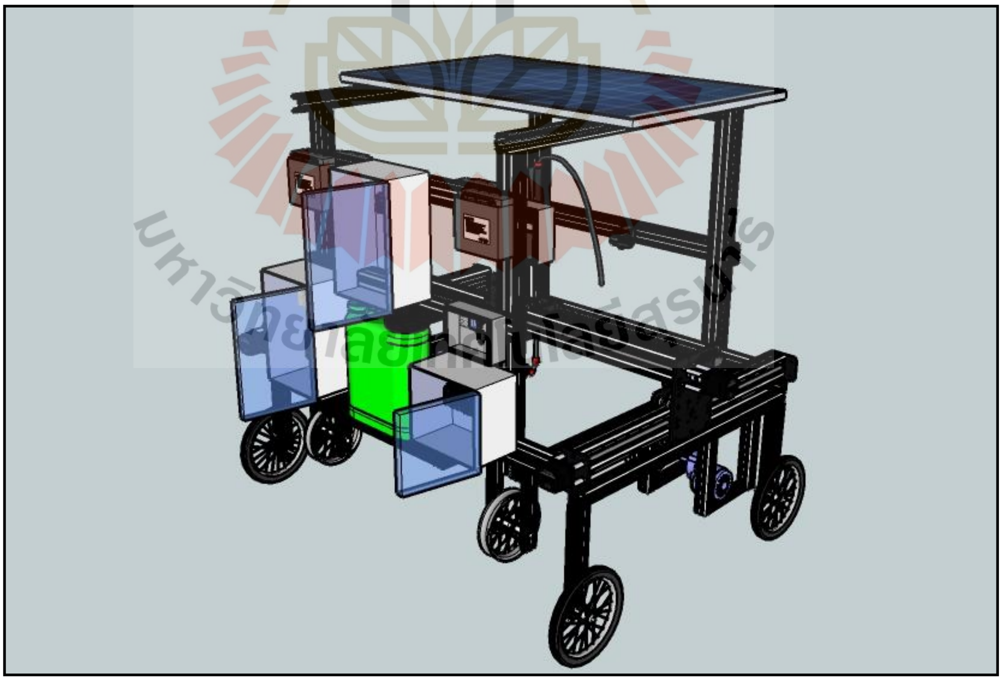
ภาคผนวก ก

รายละเอียดการออกแบบหุ่นยนต์

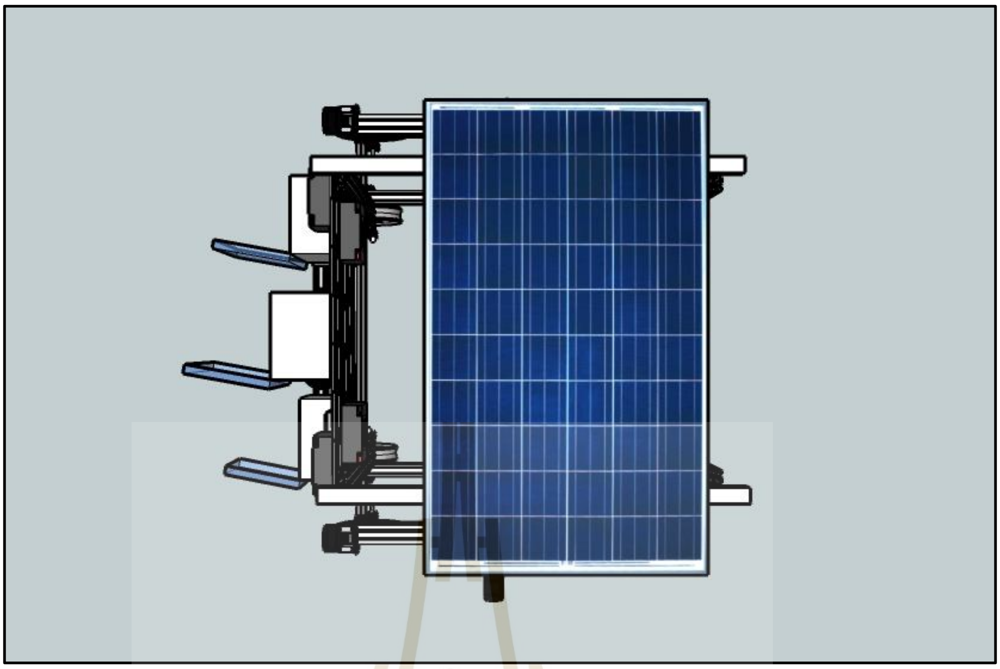
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



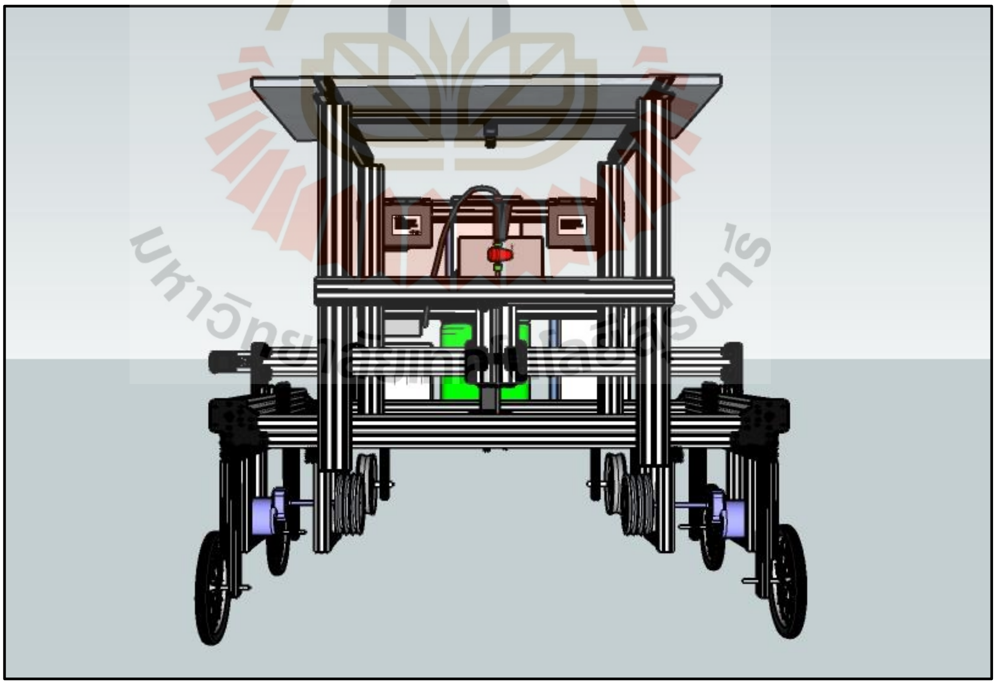
รูปที่ ก.1 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านหน้า)a



รูปที่ ก.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (มุมเอียง)

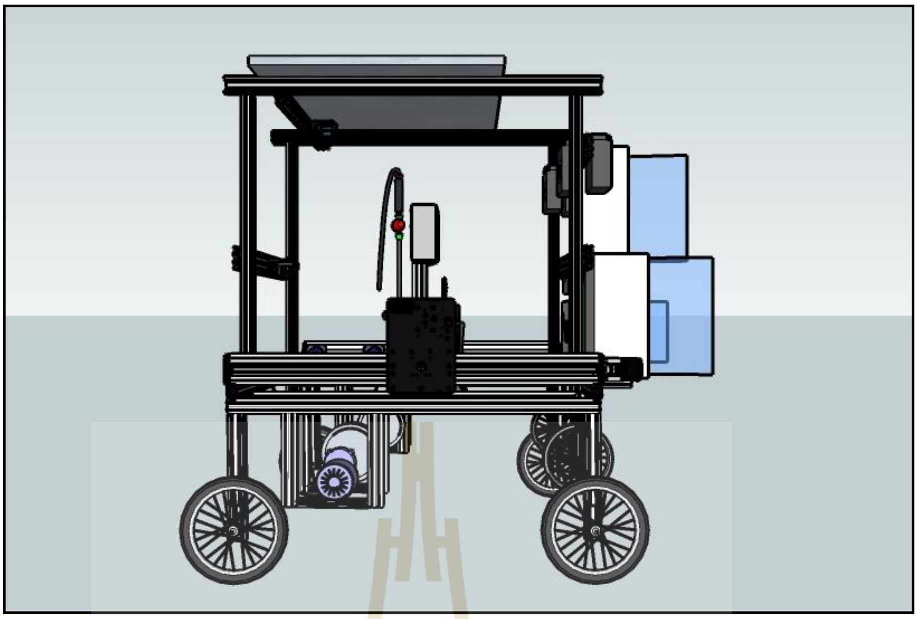


รูปที่ ก.3 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านบน)



รูปที่ ก.4 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านหลัง)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.5 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบ (ด้านข้าง)

รูปที่ ก.6 โครงสร้างหุ่นยนต์ให้ปุ๋ยทางใบกับแปลงปลูกพืชแบบยกสูง

ภาคผนวก ข

รายละเอียดโปรแกรมควบคุม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชุดคำสั่งบนบอร์ด Nvidia Jetson Nano

```
import serial
from time import sleep
import cv2
import numpy as np
import jetson.inference
import jetson.utils
arduino = serial.Serial(port='/dev/ttyACM0', baudrate=115200, timeout=.1)
evt=-1
def click(event,x,y,flags,params):
    global pnt
    global evt
    global xnt
    global ynt
    global num
    global numNew
    if event==cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        print('Mouse Event Was: ',event)
        print(x,',',y)
        pnt=(x,y)
        evt=event
        xnt=x
        ynt=y
        X_home = 190
        Y_home = 105
        StepPix_X = 69
        StepPix_Y = 69
        print('[',xnt,',',ynt,']')
        Px = abs(xnt-X_home)*StepPix_X
        Py = abs(ynt-Y_home)*StepPix_Y
        PxCM = Px/283
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        PyCM = Py/283
        print("{: .2f} cm,{: .2f} cm".format(PxCM,PyCM))
        num = (Px,Py)
        num2 = (num[0],num[1])
        print('num is :',num)
        print('num Px :',num[0])
        print('num Py :',num[1])
        ArduiSend1 = arduino.write( str(Px).encode( 'ascii' ) + b'\n' )
        ArduiSend2 = arduino.write( str(Py).encode( 'ascii' ) + b'\n' )
        numNew = (ArduiSend1,ArduiSend2)
        print('numnew is :',numNew)
        SendTrue = arduino.write(bytes(str(num2),'ascii'))
        print('sendtrue is :',SendTrue)
        Px = 0
        Py = 0
        print(type(Px))
        print(type(Py))
        print(type(num))
dispW=640
dispH=480
flip=2
cap=cv2.VideoCapture(0)
cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH,dispW)
cap.set(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT,dispH)
net = jetson.inference.detectNet("ssd-mobilenet-v2", threshold=0.5)
camera = jetson.utils.gstCamera(640, 480, "/dev/video1")
display = jetson.utils.glDisplay()
while display.IsOpen():
    img, width, height = camera.CaptureRGBA()
    detections = net.Detect(img, width, height)
    display.RenderOnce(img, width, height)
```

```
display.SetTitle("Object Detection | Network {:.0f} FPS".format(net.GetNetworkFPS()))
d=0.1
centers=[]
_, img = cap.read()
hsr=cv2.rectangle(img, (190,105), (450,290), (0,0,255), 2)
hsv=cv2.cvtColor(img,cv2.COLOR_BGR2HSV)
green_lower=np.array([40,50,50],np.uint8)
green_upper=np.array([80,255,255],np.uint8)
green=cv2.inRange(hsv,green_lower,green_upper)
kernal = np.ones((5 ,5), "uint8")
green=cv2.erode(green,kernal, iterations=1)
res1=cv2.bitwise_and(img, img, mask = green)
contours,hierarchy=cv2.findContours(green,cv2.RETR_TREE,cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
for pic, contour in enumerate(contours):
    area = cv2.contourArea(contour)
    if(area>0):
        x,y,w,h = cv2.boundingRect(contour)
        img = cv2.rectangle(img,(x,y),(x+w,y+h),(255,0,0),2)
        print("area is ...", area)
        M = cv2.moments(contour)
        cx = int(M['m10'] /M['m00'])
        cy = int(M['m01'] /M['m00'])
        centers.append([cx,cy])
        cv2.circle(img, (cx, cy), 7, (255, 255, 255), -1)
        print("center is at...",cx,cy)
    if len(centers)==2:
        D = np.linalg.norm(cx-cy)
        print(D)
if evt==1:
    cv2.circle(img,pnt,5,(0,0,255),-1)
    font=cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        myStr=str(pnt)
        cv2.putText(img,myStr,pnt,font,1,(255,0,0),2)
    cv2.moveWindow('Color Tracking',400,0)
    cv2.imshow("Color Tracking",img)
    cv2.setMouseCallback('Color Tracking',click)
    if cv2.waitKey(10) & 0xFF == ord('q'):
        cap.release()
        cv2.destroyAllWindows()
        break
```

ชุดคำสั่งบนบอร์ด Arduino Uno R3

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F,16,2);
#include <Servo.h>
Servo myservo;
#define EN 8
#define X_DIR 5
#define Y_DIR 6
#define X_STP 2
#define Y_STP 3
long Max_Xstp = 20000;
long Max_Ystp = 20000;
long newX, newY, oldX, oldY;
void splite(String input);
bool checkRange();
bool checkDirection(long o, long n);
long calPos(long o, long n);
void step(boolean dir, byte dirPin, byte stepperPin, long steps)
{
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
		digitalWrite(dirPin, dir);
		delay(50);
		for (long i = 0; i < steps; i++) {
			digitalWrite(stepperPin, HIGH);
			delayMicroseconds(600);
			digitalWrite(stepperPin, LOW);
			delayMicroseconds(600);
			}
}
void setup() {
		lcd.init();
		lcd.backlight();
		pinMode(X_DIR, OUTPUT); pinMode(X_STP, OUTPUT);
		pinMode(Y_DIR, OUTPUT); pinMode(Y_STP, OUTPUT);
		pinMode(Z_DIR, OUTPUT); pinMode(Z_STP, OUTPUT);
		pinMode(EN, OUTPUT);
		Serial.begin(115200);
		 oldX = 0;
		oldY = 0;
		Serial.println("System Ready!!");
		}
void loop() {
		while (Serial.available() > 0) {
			String cmd = Serial.readString();
			cmd.trim();
			splite(cmd);
			Serial.println(newX);
			Serial.println(newY);
			lcd.setCursor(2,0);
			lcd.print("Step_X =");
			lcd.print(newX);
```

```
				lcd.setCursor(2,1);
				lcd.print("Step_Y =");
				lcd.print(newY);
				delay(1000);
				lcd.clear();
if (cmd != NULL && cmd != "") {
		if (checkRange()){
				lcd.setCursor(2,0);
				lcd.print("move to pos");
				Serial.println("move to pos");
				step(checkDirection(oldX,newX), X_DIR, X_STP,calPos(oldX,newX));
				Serial.println(checkDirection(oldX,newX));
				oldX = newX;
				step(checkDirection(oldY,newY), Y_DIR, Y_STP,calPos(oldY,newY));
				Serial.println(checkDirection(oldY,newY));
				oldY = newY;
				myservo.attach(9);
				myservo.write(0);
				delay(500);
				myservo.write(90);
				delay(500);
				myservo.write(0);
				delay(500);
				myservo.write(90);
				delay(500);
				  myservo.write(0);
				  delay(500);
				  myservo.detach();
				  delay(2000);
				  lcd.setCursor(2,1);
				  lcd.print("move to Home");
```

```
                    Serial.println("move to Home");
                    delay(1000);
                    newX = 0;
                    newY = 0;
                    step(false, X_DIR, X_STP,calPos(oldX,newX));
                    Serial.println(checkDirection(oldX,newX));
                    step(false, Y_DIR, Y_STP,calPos(oldY,newY));
                    Serial.println(checkDirection(oldY,newY));
                    lcd.clear();
                    lcd.setCursor(6,0);
                    lcd.print("Finish!");
                    lcd.setCursor(3,1);
                    lcd.print("Click again");
                    delay(1000);
                    lcd.clear();
                    oldX = 0;
                    oldY = 0;
                    Serial.flush();
                    String cmd = Serial.readString();
                    cmd = "";
    }else{
                    Serial.println("Position out of range");
                    Serial.flush();
                        }
                }
        }
}
bool checkRange(){
        bool res;
        if ( newX > Max_Xstp || newY > Max_Ystp) {
                res = false;
```

```
        }else {
                res = true;
        }
        return res;
}
        long calPos(long o, long n) {
        return abs(o-n);
}
bool checkDirection(long o, long n) {
        bool res;
if ( o < n ) {
        res = true;
}else{
        res = false;
  }
        return res;
}
void splite(String input) {
        for (long i = 0; i < input.length(); i++) {
        if (input.substring(i, i+1) == ",") {
                newY = input.substring(0,i).toInt();//newX = input.substring(0,i).toInt();
                newX = input.substring(i+1).toInt();//newY = input.substring(i+1).toInt();
    break;
                }
        }
}
```

ชุดคำสั่งบนบอร์ด Raspberry Pi 3B+

```
from picamera.array import PiRGBArray
from picamera import PiCamera
import picamera.array
from time import sleep
import RPi.GPIO as gpio
import datetime
import numpy
import cv2
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
in1 = 16
in2 = 26
sw1 = 17
sw2 = 23
gpio.setwarnings(False)
gpio.setmode(gpio.BCM)
gpio.setup(in1, gpio.OUT)
gpio.setup(in2, gpio.OUT)
gpio.output(in1, False)
gpio.output(in2, False)
gpio.setup(sw1, gpio.IN, pull_up_down=gpio.PUD_UP)
gpio.setup(sw2, gpio.IN, pull_up_down=gpio.PUD_UP)
camera= PiCamera()
camera.resolution = (640, 480)
for x in range(0,38)
        camera.zoom=(x/100.,x/100.,0.38,0.38)
def calculate():
            cam = cv2.VideoCapture(1)
            ret, image = cam.read()
            rawCapture = PiRGBArray(camera, size=(640, 480))
```

```
camera.capture(rawCapture, format="bgr")
color_image = rawCapture.array
blue_channel = color_image[:,:,0]/256.0
green_channel = color_image[:,:,1]/256.0
nir_channel = color_image[:,:,2]/256.0
print("BlueChannel of Picam is ",blue_channel)
print("GreenChannel of Picam is ",green_channel)
print("NirChannel of Picam is ",nir_channel)
bc,gc,rc = cv2.split(image)
bc = image[:,:,0]/256.0
gc = image[:,:,1]/256.0
rc = image[:,:,2]/256.0
print("Red of Webcam is ",bc)
print("Red of Webcam is ",gc)
print("Red of Webcam is ",rc)
Tndvi = (nir_channel - rc)/(nir_channel + rc)
Tndvi = (Tndvi+1)/2
ao_X = range(150,441)
bo_Y = range(125,398)
lst_o =[]
for xo in ao_X:
    for yo in bo_Y:
        Tndvi_num = Tndvi[xo, yo]
        lst_o.append(Tndvi_num)
Tndvi_Value = sum(lst_o)/78880
print("NdviValue of Tndvi Image is ",Tndvi_Value)
bndvi = (nir_channel - blue_channel)/(nir_channel + blue_channel)
bndvi = (bndvi+1)/2
a_X = range(250,341)
b_Y = range(225,298)
lst=[]
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
for x in a_X:
    for y in b_Y:
        ndvi_num = bndvi[x, y]
        lst.append(ndvi_num)
Nb_Value = sum(lst)/6480
print(Nb_Value)
print("NdviValue of bndvi Image is ",Nb_Value)
bndvi = cv2.convertScaleAbs(bndvi*255)
Tndvi = cv2.convertScaleAbs(Tndvi*255)
bndvi = cv2.applyColorMap(bndvi, cv2.COLORMAP_JET)
Tndvi = cv2.applyColorMap(Tndvi, cv2.COLORMAP_JET)
d = datetime.datetime.now()
datestr = d.strftime("%Y%m%d%H%M%S")
cv2.imwrite('/home/pi/ndviImage/'+ datestr +'bndvi.jpg',bndvi)
cv2.imwrite('/home/pi/ndviImage/'+ datestr +'Tndvi.jpg',Tndvi)
TndviC = cv2.rectangle(Tndvi,(150,125),(441,398),(255,255,255),3)
cv2.imwrite('/home/pi/ndviImage/'+ datestr +'TndviC.jpg',TndviC)
cv2.imshow("TNDVI", TndviC)
cv2.imwrite('/home/pi/ndviImage/'+ datestr +'image.jpg',image)
cv2.imwrite('/home/pi/ndviImage/'+ datestr +'color.jpg',color_image)
sleep(0.5)
if Tndvi_Value >= 0.71:
    gpio.output(in1,True)
    print('Sprayer ON Excellent',Tndvi_Value)
    sleep(1)
    gpio.output(in1,False)
    print('Sprayer OFF',Tndvi_Value)
elif Tndvi_Value<0.71 and Tndvi_Value>=0.67:
    gpio.output(in1,True)
    print('Sprayer ON very Good',Tndvi_Value)
    sleep(1.5)
```

```
                gpio.output(in1,False)
                print('Sprayer OFF',Tndvi_Value)
            elif Tndvi_Value<0.67 and Tndvi_Value>=0.63:
                gpio.output(in1,True)
                print('Sprayer ON Good',Tndvi_Value)
                sleep(2)
                gpio.output(in1,False)
                print('Sprayer OFF',Tndvi_Value)
            elif Tndvi_Value<0.63 and Tndvi_Value>=0.6:
                gpio.output(in1,True)
                print('Sprayer ON Not Good',Tndvi_Value)
                sleep(2.5)
                gpio.output(in1,False)
                print('Sprayer OFF',Tndvi_Value)
            elif Tndvi_Value<0.6:
                gpio.output(in1,True)
                print('Sprayer ON Bad',Tndvi_Value)
                sleep(3)
                gpio.output(in1,False)
                print('Sprayer OFF Bad',Tndvi_Value)
            else:
                gpio.output(in1,False)
                print('Sprayer OFF',Tndvi_Value)
def wheelRelay():
    gpio.output(in2,True)
    print('Wheel are Rotating')
    sleep(5)
    gpio.output(in2,False)
    print('Stop Rotation')
def takePhoto():
    inputWheel = gpio.input(sw1)
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
    inputNDVI = gpio.input(sw2)
    if inputWheel == False:
        print('Wheel Button Pressed')
        sleep(.2)
        wheelRelay()
    if inputNDVI == False:
        print('NDVI Button Pressed')
        calculate()
while True:
            takePhoto()
            cv2.waitKey(0)
            cv2.destroyAllWindows()
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

แนวทางการคำนวณค่าเพื่อสั่งการกลไกซีเอ็นซีด้วยระบบประมวลผลภาพ

ค.1 แนวทางการคำนวณเพื่อสั่งการมอเตอร์ของกลไกซีเอ็นซี

1) คำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

ในการใช้งานโปรแกรมสามารถใส่รายละเอียดของอุปกรณ์ลงตารางเพื่อคำนวณได้ โดยรายละเอียดที่ต้องระบุประกอบส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1.1) ค่า Degree/step ซึ่งเป็นองศาการหมุนของ Stepping Motor ที่ระบุมากับมอเตอร์แล้ว โดยที่ระบุเพื่อคำนวณหา Step/rev ซึ่งเป็นจำนวนครั้งการหมุนเคลื่อนที่ภายในมอเตอร์ เมื่อต้องการหมุนให้ได้ 360 องศา หรือ 1 รอบการหมุนของมอเตอร์

1.2) ค่า Pulse/step ซึ่งเป็นค่าที่ตั้งไว้กับ Stepping Motor Driver เพื่อระบุ Micro Stepping ในการหมุนของมอเตอร์ โดยที่ยิ่งมีค่ามากก็จะยิ่งมีความละเอียดในการหมุนเคลื่อนที่มากขึ้น

1.3) ค่า Pitch และค่า Tread starts ของ Leadscrew ที่ใช้ เพื่อคำนวณหาค่า mm/rev ที่เป็นระยะการเคลื่อนที่ของ Leadscrew ต่อ 1 รอบการหมุน ซึ่งค่านี้จะระบุมากับ Leadscrew ที่เลือกมาใช้

ทั้งนี้ ผลลัพธ์สุดท้ายที่โปรแกรมคำนวณมาให้ คือ ค่า Step/mm เพื่อนำไปใช้ประยุกต์สำหรับคำนวณต่อสำหรับสั่งการการเคลื่อนที่ของกลไกด้วยวิธีประมวลผลภาพ

STEPPER CALCULATOR

- X, Y, Z

Metric

Required inputs

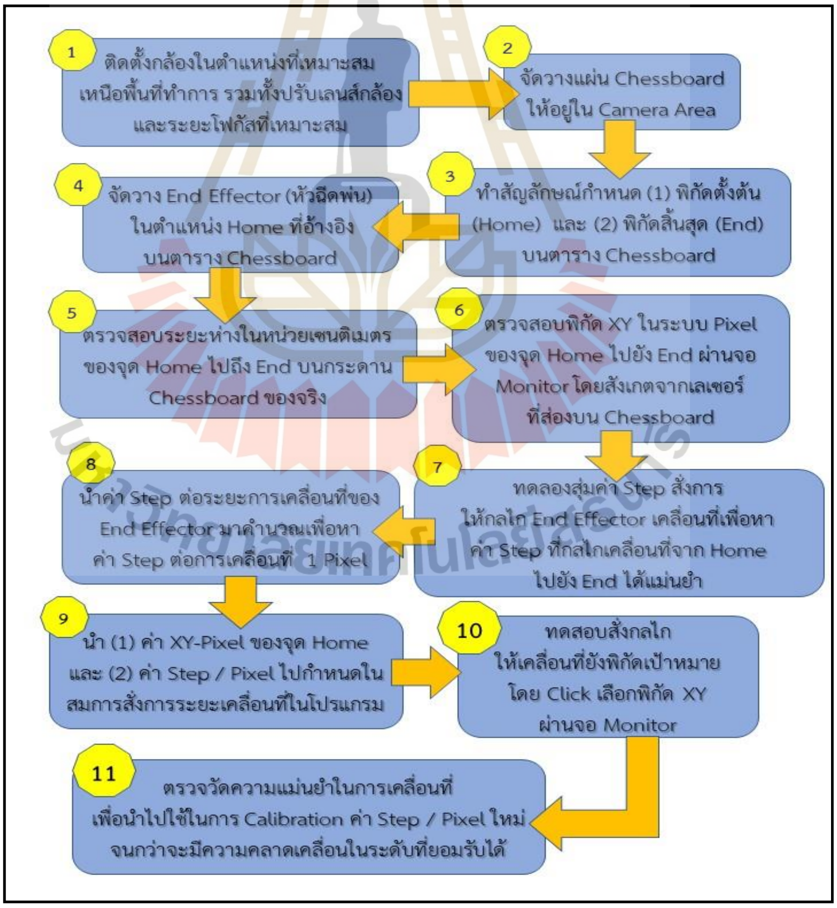
Stepper Motor	Deg/step -	1.8
	Steps/rev -	200
Micro Stepping	Pulse/step -	8
	Pulse/rev -	1600
Gear Reduction	Stepper teeth -	0
(Enter zeros for	Lead screw teeth -	0
direct drive)	Multiplier -	1
Leadscrew	Pitch (mm) -	2
	Thread starts -	7
	Lead (mm/rev) -	14
Result	***Steps per mm -**	**114.285714**
	Resolution (mm/step) -	0.00875

รูปที่ ค.1 โปรแกรมสำหรับคำนวณค่า Step per mm ของกลไกซีเอ็นซี

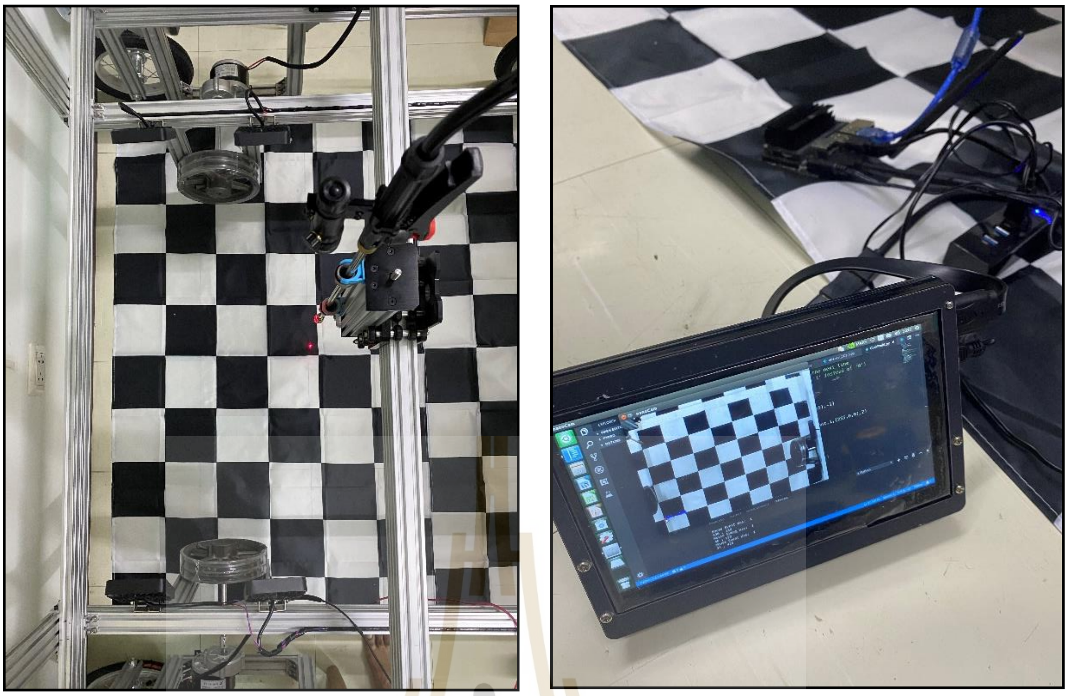
2) คำนวณโดยใช้ตารางหมากรุก (Chessboard) สำหรับเป็น Calibration Plate

แม้การคำนวณค่า Step/mm โดยใช้โปรแกรมจะได้ค่าที่ถูกต้อง แต่หาก Stepping Motor Driver ไม่ได้มาตรฐาน แม้จะตั้งค่า Micro Stepping ไว้ถูกต้องแล้ว แต่เมื่อสั่งงานให้เคลื่อนที่จริงอาจได้ระยะทางที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากปัญหา Losing Step ดังนั้น จึงต้องใช้วิธีการทดสอบ สั่งการด้วยค่า Pulse/rev ในโปรแกรมควบคุมและตรวจวัดระยะทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจริงด้วยเครื่องมือวัดที่เหมาะสม

ในการวิจัยครั้งนี้ พบว่า วงจรขับมอเตอร์ รุ่น TB6600 ที่มีราคาถูก ซึ่งผลิตจากประเทศจีนไม่ได้มาตรฐาน จึงจำเป็นต้องตรวจวัดระยะเคลื่อนที่จริง เพื่อนำไปเป็นค่ามาตรฐานสำหรับ สั่งการการหมุนของมอเตอร์ต่อไป โดยใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ ประกอบด้วย แผ่นตารางหมากรุก (Chessboard) สติกเกอร์วงกลมสำหรับกำหนดจุดอ้างอิงเพื่อสามารถมองเห็นผ่านจอภาพ เลเซอร์ติดลำกล้อง และตลับเมตรหรือไม้เมตร โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 ขั้นตอนการใช้ Chessboard เพื่อหาค่าสั่งการกลไกซีเอ็นซีต่อระยะทาง



รูปที่ ค. 3 การใช้เลเซอร์นำวิถีอ้างอิงพิกัดบนแผ่น Chessboard เพื่อตรวจสอบค่าระยทางการเคลื่อนที่

รูปที่ ค. 4 การกำหนดพิกัดอ้างอิงบน Chessboard เพื่อคำนวณค่าพิกเซลต่อเซนติเมตร และตรวจวัดความคลาดเคลื่อนโดยเบื้องต้นเพื่อการปรับเปลี่ยนค่าให้เที่ยงตรงเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ ค.3 และ ค.4 จะเป็นการประยุกต์ใช้ Chessboard ที่มี Grid Structure เพื่อทำหน้าที่เป็น Calibration Plate เพื่อทดสอบหาค่าคงที่สำหรับระบุในสมการคำนวณหาค่าการสั่งการมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนกลไกฉีดพ่น โดยค่าคงที่ที่ต้องมีการคำนวณเพื่อระบุในโปรแกรม ประกอบด้วย

(1) ค่า Pulse/pixel ของกลไกฉีดพ่น (2) ค่า Pulse/rev สูงสุดที่สั่งการเคลื่อนที่ของกลไกฉีดพ่นต่อพื้นที่ทำการ (3) ค่าพิกัดตั้งต้น (Home) ของกลไกฉีดพ่น

การทดสอบเริ่มจากใช้กระดาน Chessboard ที่กำหนดพิกัดอ้างอิง (Reference Point) ด้วยสติกเกอร์วงกลมสี สำหรับใช้ตรวจวัดระยะห่างในหน่วย Pixel ของ Camera frame ที่จอแสดงผล และทดสอบอัตราการหมุนของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ ที่ไปขับ Leadscrew เพื่อเป็นเกลียวพากลไกฉีดพ่นปุ๋ยทางใบให้เคลื่อนที่แบบ Point to Point ของแกน X และแกน Y ในหน่วยเซนติเมตร และนำไปคำนวณให้ได้ค่า Pulse ที่จะสั่งมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ต่อหนึ่งพิกเซล (Pulse/pixel)

ทั้งนี้ ระยะการเคลื่อนที่รวมจากจุด 2 จุด จากตำแหน่งตั้งต้น (Home) ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย (Target) บนแกน X และแกน Y ในระดับพิกเซล แบบ 2 มิติ ที่สามารถตรวจสอบพิกัด (x, y) ในระบบ Pixel บน Camera frame ที่จอแสดงผล สามารถหาได้จากสมการการหาระยะแบบแมนฮัตตัน ดังนี้

$$\mathrm{D}(u,v) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

เมื่อ x_1, y_1 คือ พิกัดพิกเซลตั้งต้น (จุด Home ซึ่งเป็นตำแหน่งตั้งต้นของกลไกฉีดพ่นปุ๋ย)

x_2, y_2 คือ พิกัดพิกเซลเป้าหมาย (จุด Target ที่เป็นต้นพืชที่ต้องการฉีดพ่นปุ๋ย โดยที่ผู้ใช้เลือกพิกัดผ่านจอแสดงผล)

เมื่อได้ระยะทางในแนวนอน (x) และแนวตั้ง (y) ระดับ Pixels ที่เป็น Camera Units ของวัตถุแล้ว สามารถทำการตรวจวัดระยะด้วยเครื่องมือวัด อาทิ ตลับเมตร ไม้บรรทัด บนแผ่นตารางหมากรุกที่ใช้ทำหน้าที่เป็น Calibration Plate ได้โดยตรง ซึ่งจะทำให้ทราบระยะทาง ในแนวนอน (x) และแนวตั้ง (y) ในระดับ Centimeters ที่เป็น World Units ของวัตถุจริง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าระยะเซนติเมตรต่อพิกเซล (Centemeters/Pixels) ได้ (Angela, 2017) จากนั้น จึงนำมาคำนวณร่วมกับค่าสั่งการเคลื่อนที่ของ Stepping Motor ของกลไกคาร์ทีเซียน ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

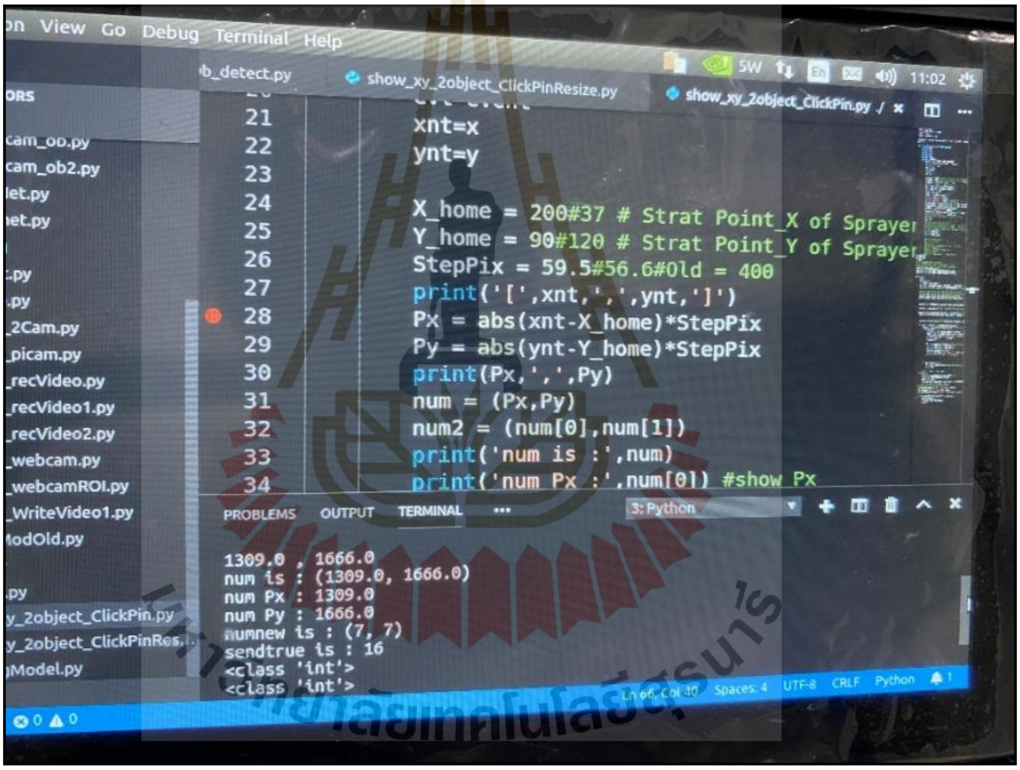
$$W(u,v) = \left\{ (|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|\ ) \times \frac{WU}{CU} \right\} \times St$$

เมื่อ WU คือ ระยะทางในหน่วย ซม. ที่ตรวจวัดจริง World Units ในแนวนอน (x) หรือแนวตั้ง (y) จาก Calibration Plate

CU คือ จำนวนจุดพิกเซลของ Camera Units ในแนวนอน (x) หรือแนวตั้ง (y) จาก Camera frame ที่แสดงผลจากกล้อง

St คือ ค่า Pulse/rev ที่สั่งหมุน Stepping Motor ให้ Lead-Screw เคลื่อนที่ 1 ซม. ในแนวนอน (x) หรือแนวตั้ง (y)

ทั้งนี้ ในการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้กลไกคาร์ทีเซียนเคลื่อนที่จะทำการเขียนโปรแกรมโดยประยุกต์สมการข้างต้นมาคำนวณแยกกันเป็นสองสมการระหว่างแกน X และ Y ในโปรแกรมตัวอย่างดังรูปที่ ค.5



รูปที่ ค.5 ชุดคำสั่งในโปรแกรมสำหรับเปลี่ยนค่าพิกัด XY ระบบ Pixel บนบอร์ด Nvidia Jetson Nano เป็นค่า Step/Pulse เพื่อส่งไปให้บอร์ด Arduino สั่งให้กลไกซีเอ็นซีเคลื่อนที่

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่า Pulse/pixel เพื่อสั่งการ Stepping Motor ในกลไกคาร์ทีเซียน

1) กำหนดจุด Home และจุด Target บนกระดาน Chessboard และติดสัญลักษณ์อ้างอิง

เพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบจะกำหนดเป้าหมายการเคลื่อนที่ 4 ช่องตาราง ซึ่งวัดความยาวได้เท่ากับ 60 เซนติเมตร โดยที่แต่ละช่องตารางมีความยาวช่องละ 15 เซนติเมตร

2) จัดวาง End Effector ที่พิกัด Home ที่กำหนดและตรวจสอบพิกัดพิกเซลของจุด Home จากหน้าจอแสดงผล

กำหนดพิกัด Home ที่ (37, 120) และพิกัด Target ที่ (340, 120)

ดังนั้น เมื่อตรวจสอบระยะห่างของพิกัดทั้งสองในแนวแกน x

คำนวณได้จาก 340 – 37 = 303 Pixel

และ หาค่าพิกเซลต่อเซนติเมตร จาก $\frac{303}{60}$ Pixel/cm

เท่ากับ 5.05 Pixel/cm

และ หาค่าเซนติเมตรต่อพิกเซล จาก $\frac{1}{5.05}$ cm/pixel

เท่ากับ 0.2 cm/pixel หรือ 2 mm/pixel

3) ทดสอบสั่งการด้วยค่า Pulse/rev ในโปรแกรมเพื่อหาค่าที่กลไกซีเอ็นซีเคลื่อนที่จากจุด Home ไปยัง Target ได้แม่นยำที่สุด

จากการการทดสอบโดยตั้งค่า Stepping Motor Driver ที่ 8 Microstep 1,600 Pulse/rev และเมื่อทดสอบสุ่มค่าเพื่อสั่งการเคลื่อนที่กลไก พบว่า ค่า 17,000 Pulse เป็นค่าที่มีการเคลื่อนที่ จากจุด Home ไปยัง Target ได้เที่ยงตรงที่สุด

เมื่อ คำนวณหาค่า Pulse ต่อเซนติเมตรสำหรับสั่งการกลไกเคลื่อนที่

$\frac{17,000}{60}$ Pulse/cm เท่ากับ 283 Pulse/cm

ดังนั้น ค่า Pulse ต่อการเคลื่อนที่ 1 พิกเซล

คำนวณได้จาก $\frac{283\frac{\text{Pulse}}{\text{cm}}\times 0.2\frac{\text{cm}}{\text{pixel}}}{1\text{ cm}}$ เท่ากับ 56.6 Pulse/pixel

4) นำค่า Pulse/pixel ที่คำนวณได้และค่าพิกัด Home ที่กำหนดไปบรรจุในโค้กโปรแกรม สมการที่เขียนในโปรแกรมจึงสามารถแยกคำนวณเพื่อสั่งการขับเคลื่อนลไกแกน x และแกน y ได้ ในสมการดังนี้

$$X_{\text{step}} = \left|X_{\text{target}} - X_{\text{home}}\right| \times Step_{\text{pulse/pixel}}$$

$$Y_{\text{step}} = \left|Y_{\text{target}} - Y_{\text{home}}\right| \times Step_{\text{pulse/pixel}}$$

โดยที่ X_{step} และ Y_{step} คือ ค่า Pulse ของระยะห่างพิกัด (x, y) ตั้งต้นและเป้าหมายสำหรับสั่งการมอเตอร์ขับกลไกซีเอ็นซี และ X_{target} และ Y_{target} คือ พิกัด (x, y) เป้าหมายที่ในเคลื่อนที่ และ X_{home} และ Y_{home} คือ พิกัด (x, y) ของจุดตั้งต้นของกลไก และ $Step_{pulse/pixel}$ คือค่า Pulse/pixel ในการแปลงระยะห่างในหน่วยพิกเซลเป็นค่าสำหรับสั่งการมอเตอร์ ขับกลไกซีเอ็นซี

5) ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเพื่อปรับค่า X_{step} และ Y_{step}ให้อยู่ในจุดที่ยอมรับได้

ความคลาดเคลื่อนในการทดสอบเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การบิดเบี้ยว ของภาพที่แสดงผลอันเนื่องมาจากลักษณะของเลนส์กล้อง ระยะติดตั้งกล้องที่ต่างกันมีผลให้ ต้องทดสอบและคำนวณใหม่ ความละเอียดในการตั้งค่าการแสดงผลของกล้องที่ใช้ในงานประมวลผลภาพ เป็นต้น การทดสอบและคำนวณค่าออกมาจึงไม่ได้เป็นตัวชี้วัดความแม่นยำ โดยสมบูรณ์ในการใช้เทคนิคประมวลผลภาพเพื่อหาพิกัดวัตถุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างศึกษา

Nuttapoom Sudkaew., Suradet Tantrairatn., (2021). **FOLIAR FERTILIZER ROBOT FOR RAISE BED GREENHOUSE USINGNDVI IMAGE PROCESSING**. The 25th International Computer Science and Engineering Conference 2021 (ICSEC2021). 18th – 20th November, 2021 at Phayao, Thailand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Foliar Fertilizer Robot for Raised Bed Greenhouse Using NDVI Image Processing System

Nuttapoom Sudkaew, Suradet Tantrairatn
School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District
Nakhon Ratchasima, Thailand
Email: [1]nuttapoom.s@opm.go.th, [2]suradetj@sut.ac.th

***Abstract*— This research aims to construct and test a foliar fertilizer robot that determines the volume of fertilizer spraying based on the Vegetation Index (VI). The robot, which was designed to move in a cartesian mechanism, was tested with Green Oak lettuce plants on a raised bed, size of 1 x 6 x 0.25 m (W x L x H) in the greenhouse, size of 10 x 20 x 5 m (W x L x H). The average VI values of fertilized and watered Green Oak lettuces in low and high light intensity were 0.577 and 0.564, respectively. As the result, the lettuces without fertilizer and water for 3 days have decreased to 0.544 and 0.546, respectively. The camera set up in the distance of 45 cm was the most appropriate distance because the VI values were relatively stable. The height of the nozzle at 40 cm shown the appropriate volume of fertilizer solution at 4.8 – 9.2 ml/plant and the optimum spraying time based on plant health level was determined at 0.1, 0.7, 1.4, and 2.0 seconds because spray volume was consistent with the academic principle. The linear regression model from spraying at 20 cm high nozzle shown the highest accuracy at 97.62% and the lowest error with MSE and MAE at 0.0326 and 0.1503, respectively. Fertilizer wastage compared to spraying with the robot and a person with a backpack sprayer and greenhouse fertigation system was 0.27, 0.41, and 1.67**

***Keywords*—Foliar Fertilizer, Greenhouse, Raised Bed, NDVI, Plant Health.**

I. Introduction

Foliar fertilization is a useful technique for growing plants. Foliar fertilization provides better nutrients to plants than other methods. This will greatly increase both the yield and quality of the crops. [1] Fertilization through the irrigation system of the greenhouse, Fertigation, is considered as the efficiency of saving fertilizer and labor. [2] However, some of the foliar sprays were scattered outside the target, spray drift, such as being blown away by the wind and some evaporate dry before reaching the leaf surface. [3] While foliar fertilizers are priced higher per unit weight than soil fertilizers, they should be used in the correct way for cost-effective results. Spray onto the target surface using a suitable nozzle and pressure will help to get the maximum efficiency of foliar spraying, because of spraying on the target, the fertilizer is evenly distributed in the right amount and reducing the loss of fertilizer from being blown out of the direction. [4] The development of the smart spray system must evaluate the spraying of fertilizers based on the data measured from the target coordinates and applying various techniques such as machine vision, spectral reflectance, remote sensing, etc. [5]

The most important concept that was discussed during this time was smart agriculture and another concept. These concepts are linked to precision agriculture with an agricultural management concept that clearly distinguishes it from traditional agriculture. [6] In particular, it is challenging to develop autonomous robots properly in agricultural fields. [7] This research, therefore, develops a mobile spraying robot with a linear motion mechanism like a Cartesian Robot to perform a specific foliar spraying function. The robot has been applied with the machine vision system to process images for object detection and identifying the plant position in the pixel coordinates system. After that, the position of plants, which was chosen through the monitor screen with keyboard & mouse, convert to the local coordinates system to command the machine to move to the plants that require to spray fertilizer. Furthermore, this robot can record images from the NoIR camera to calculate Vegetation Index (VI) to determine the amount of foliar fertilizer. Moreover, this index is suitable for plant health with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) method.

II. Material and Methods

A. Structure and components of mobile foliar fertilizer robot

The robot structure in the Cartesian Robot Mechanism section uses the finished mechanism of the WorkBee CNC to scale up to 1.2 m X 1.5 m (W x L), which are X-axis and Y-axis, respectively for suitability to work on the field. The mechanism used to move to the plants is equipped with a hollow cone sprayer that connected to a hose to convey liquid fertilizer from 20 liters storage tank and 9 bar water pump. The CNC mechanism is housed on a 1.5 m x 1.4 m x 1.7 m (W x L x H) moving structure, which is equipped with 4 rubber wheels to support the entire weight structure and a set of 4 wheels for Placed on the edge of the raised bed with 2 wheels to help support and 2 wheels are connected to the DC gear motor 24 V for moving to spray fertilizer to other vegetables. The top structure has a 170 Watt monocrystalline solar panel, installed as a roof for generating electricity and charge to four 12 V batteries. Industrial HD camera and web camera are mounted under the solar panel. In front of the robot is a set of 4 LED lights and a dimmer to adjust the brightness that is suitable for the camera image detection and the back of the robot is equipped with a Control Box containing the control devices. All components are shown in Fig. 1. The robot operation starts by selecting the plant coordinates displayed on the monitor connected to the Nvidia Jetson Nano board using Keyboard&Mouse. The plant coordinates are sent to the Arduino Uno R3 board to instruct the CNC Mechanism to move to the plant. Once the plant coordinates are reached, the Raspberry Pi board is commanded to record images with the NoIR camera and RGB camera for NDVI values calculation and command the pump to automatically spray the foliar fertilizer based on the plant health estimated from the NDVI value. Once foliar spraying is complete, the CNC Mechanism will return to the starting point to wait for the plant coordinates again. Users can command the robot to move forward or backward on raised bed by pressing a button on the Motor speed controller board.

978-1-6654-1197-4/21/$31.00 ©2021 IEEE

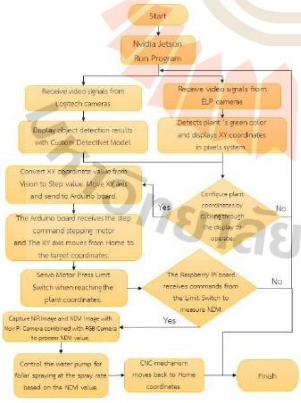
(a) Robot operation on raised bed in greenhouse

(b) Components of a foliar fertilizer robot

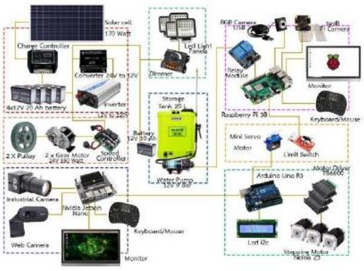
Fig. 1. Components of a foliar fertilizer robot capable of image processing for vegetation index.

B. *Microcontroller board*

Three types of microcontroller boards used in this study: (1) Nvidia Jetson Nano board that connects a 7-inch monitor, ELP industrial HD Camera, and Logitech web camera for plant object detection and control the movement of the mechanism to the specified plant coordinates. (2) Arduino Uno R3 board for getting XY-Coordinates values from Nvidia Jetson Nano board that communicate in serial. The value transmitted via USB cable has been calculated as the step value to control the movement of the CNC mechanism, which will command 3 stepping motors mounted on the X-axis and Y-axis through 3 control boards (TB6600) that are set to drive at 8 micro steps 1,600 Pulse/rev. (3) Raspberry Pi 3B Board equipped with 7-inch monitor, NoIR Pi Camera and RGB Camera by receiving commands through a switch from servo motor connected to Arduino Board to record images and calculate NDVI value of plants that the mechanism moves to and ordered the foliar spraying equipment to work. The control system and working procedure are shown in Fig. 2.



(a) Working process of foliar fertilizer robot



(b) Control system of foliar fertilizer robot

Fig. 2. Robot control system and working process

C. *Testing of instruments for measuring vegetation index (VI) on lettuce in greenhouses*

Sensor system processes the NDVI value when a switch is pressed by the servo motor operated by the Arduino board. The switch is pressed only when the mechanism reaches the plant coordinates. While a switch connected to the Raspberry Pi board is pressed, the RGB camera and NoIR camera with blue filter would record and import the value of near-Infrared (NIR) and red light for processing. In this research, the NDVI value was chosen because it was a favorite measurement of plant health based on how a plant reflects light at specific frequencies and related to the plant photosynthesis rate and vegetation growth. [8] Therefore, the researcher used the NDVI value to measure plant health and used to determine the appropriate rate of foliar fertilization.

D. *The test measured the NDVI value of Green Oak lettuces with different fertilizer and water treatments and in different light intensity*

The camera is mounted at a 45º angle to the plant and recorded at distance of 45 cm from the plant. The camera in this distance will not contact with the liquid fertilizer spray. The NDVI value of data acquisition is the average value of a pixel. This was determined to be measured at the center of the recorded crop image of 78,880 square pixels for normal watering and fertilizing vegetables and reducing the area to 19,800 square pixels for vegetables without water and fertilizer for 3 days, because the vegetables were smaller. The NDVI measurement area was representative of the average of the whole plant health.

The test was performed on 6 Green Oak plants that were 45-50 days old with only 3 re-recordings of each plant from the same camera angle. Measurements are performed in a real-world environment where sunlight was constantly changing due to cloud cover. The measurement was based on two light intensity levels: (1) low intensity (soft sunlight), which has a light intensity variation in the range of 4,800 – 8,600 lux and (2) high intensity (strong sunlight), which has a light intensity variation in the range of 17,000 – 36,700 lux. In the measurement, 2 types of cameras are used:

(1) NoIR camera that used a blue filter to filter only NIR (Near-Infrared) light, green light, and blue light. From this method, red light cannot pass through.[9] However, the exposure without using a filter can be explained from the Equation 1.

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ N \end{bmatrix} \quad (1)$$

From the Equation (1), R_c, G_c, and B_c are the values of RGB Channel and a, b, c, and d are the sensitivity to red, green, blue and NIR light for RGB channels of camera. R, G, B and N are the plant reflectance of red, green, blue and NIR that can pass through the camera. [10] The color of the light spectrum reflected from the plants through the NoIR Camera has both Red Green Blue and NIR because no filter blocking is used to block the light in any wavelength. The use of the blue light filter can be explained from the Equation (2):

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{ip} \\ B_{ip} \\ N_{ip} \end{bmatrix} = [i \quad j \quad k] \begin{bmatrix} G_{ip} \\ B_{ip} \\ N_{ip} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

From the Equation, when using a blue light filter, the light can pass through only the Blue, Green, and NIR (B_{ip}, G_{ip}, and N_{ip}).

(2) RGB Camera can import both red, green, and blue light, but will be used only for the red light. This can be explained from the Equation (3):

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{gp} \\ G_{gp} \\ B_{gp} \end{bmatrix} = [l \quad m \quad n] \begin{bmatrix} R_{gp} \\ G_{gp} \\ B_{gp} \end{bmatrix} \qquad (3)$$

From the Equation (3), Red, Green, and Blue color (R_{gp}, G_{gp}, and B_{gp}) are the spectrum of light can pass into the camera. Subsequently, the color light captured by both types of cameras is calculated in the NDVI Equation, which calculates the average NDVI of all values in specified area frame. The processing for calculation in the NDVI value [11] is obtained from the Equation (4):

$$NDVI = NIR - Red/\, NIR + Red \qquad (4)$$

Where, *NIR* is the near infrared wavelength; *RED* is the wavelength of the red light. The process shown in Fig. 3. By applying (4), it needs to obtain the NDVI value for each pixel. The average NDVI for frame processing can be calculated by the Equation (5):

$$NDVI_{avg} = \frac{\sum_{x=0}^{W} \sum_{y=0}^{H} NDVI(x,y)}{W \cdot H} \qquad (5)$$

It is possible to estimate the application of foliar fertilizer spraying from the average NDVI in (5). This NDVI calculation could meet the real-time requirements for instantly fertilizer spraying.

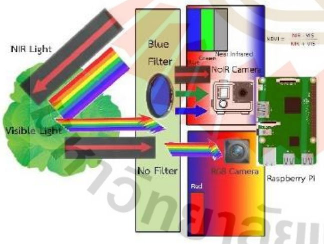


Fig. 3. NoIR and RGB Camera process of receiving light wavelength

After the NDVI value was obtained from the test on the plants, which watered and fertilized normally and without water and fertilizer for 3 days at different light intensity. The measured values were tested for the hypothesis of the difference between the mean using t-Test to determine the difference in measurements under different production factors and lighting conditions

E. The test measures the NDVI value of Green Oak lettuce from different camera distances

To determine the proper distance of the camera for NDVI measurements, NDVI measurements were carried out from 6 plants (45-50 days old) in a greenhouse by comparing the distance from the camera to the plant at 15, 25 and 45 cm (original installation). The NDVI values measured are pixel-level average determined at the center of the recorded plant image of 78,880 square pixels. Measurements are taken in the light intensity range of 15,800 – 40,170 lux, which is considered the high intensity range. Then, the mean, standard deviation (SD) and diffusion coefficient percentage (%CV.) are determined.

F. Foliar spray rate and wastage tests based on NDVI values compared with other foliar fertilization methods

The wastage of different liquid fertilization methods was compared with the following tests: *(1)* The robot spraying volume was measured in ml based on the spraying time delay at 0.1 – 2.0 seconds by increasing the delay rate in 0.1 second. Two methods of measurement consisted of (1.1.) Measure from the total volume of liquid fertilizer sprayed from the nozzle by using a container to collect liquid fertilizer and measure the volume and (1.2) measure the volume of liquid fertilizer that the leaf canopy surface can receive by spraying at three different heights from the nozzle (20, 30 and 40 cm) using a container with a diameter of 20 cm, which is like the size of the leaf bushes of green oak. In this regard, the data obtained from the experiment in 1.1 – 1.2 are used to refer to the appropriate volume of fertilizer spraying according to the academic principles and to determine the delay rate of the water pump based on the Vegetation Index. In addition, it is processed by statistical methods to find an equation to be used as a Linear Regression Model for predicting the amount of liquid fertilizer sprayed from different pump delay rate. (2) Foliar fertilization with the greenhouse water system through the PE pipe with a spray nozzle by testing the spraying volume per 1 nozzle, which will have an area of approximately 1 m^2 (9 plants) for collecting water. Measurements were made by laying a plastic canvas on the planting bed and turning on the irrigation system in the greenhouse for 5 minutes according to the normal spraying time in the morning and evening. (3) Using a person to spray foliar fertilizer with a backpack sprayer by specifying the spraying time per plant as previously practiced in 1 m^2 (9 plants) and measure the amount of water on the plastic canvas laid on the planting bed.

III. EXPERIMENT RESULTS

A. The results of the test measured the NDVI values of Green Oak lettuce with different fertilizer and water treatments in different light intensity

From Table I and the graph in Fig. 5, it was found that the mean NDVI of Green Oak lettuce measured in the greenhouse under natural light was continuously changing as shown in Fig. 4. The mean NDVI measured in low light intensity conditions was more average than measurements in high light intensity conditions. The results were consistent with the study comparing NDVI values measured from Tobacco leaves by increasing the light intensity from 740 to 88,800 lux (30 – 1,200 μmol m-2 s-1), the NDVI value decreased from 72.7% to 69.9% [12] Furthermore, when performing the Hypothesis Testing (t-test), it was found that the average NDVI value of lettuce fed with normal foliar fertilizer and water between

low and high light intensity were statistically significant difference with the P-Value less than the significant level (0.05). In contrast, the mean NDVI values of Green Oak lettuce with no fertilizer and water for 3 days at low and high light intensity was not statistically significant different with P-Value greater than the significance level (0.05). In addition, the Green Oak leaf surface is light green and greenish white unlike other vegetable leaves that are predominantly dark green in color. As result of them become lighter when strikes with high intensity light. In the same way, when the wavelength light reflects into the camera, it appears that the color level of the NDVI colormap image in that area is lower. The leaf characteristics of Green Oak lettuce cause shadowing across the entire canopy, resulting in incomplete measurement of NDVI in Green Oak lettuce.

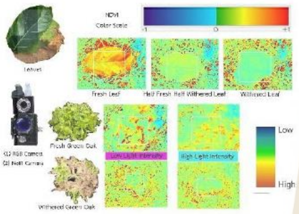


Fig. 4. NDVI measurement of green oak lettuce at different light intensity

TABLE I. THE NDVI VALUES OF GREEN OAK LETTUCES ARE MEASURED FROM RAISED BED INGREENHOUSE

Light Intensity	NDVI values range	Mean NDVI value *fw	SD	NDVI values Range	Mean NDVI value *nfw	SD
Low Light Intensity	0.541-0.603	0.577[a]	0.017	0.533-0.558	0.544[c]	0.008
High Light Intensity	0.550-0.576	0.564[b]	0.015	0.537-0.564	0.546[c]	0.007

*fw is Fertilize and water as usual and *nfw is No Fertilize and water for 3 days

Means of a, b and c in a column followed by the same character are not significantly different at 0.05 significant levels

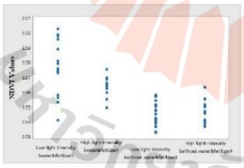


Fig. 5. NDVI value measuring Green Oak lettuces with different factors.

The NDVI was measured by regular watering and fertilizing in Green Oak lettuces as a sample of healthy plants and three days with no water and fertilizer to represent a sample of unhealthy plants. It was found that both the low and high light intensity comparisons, mean NDVI were statistically significant different because the P-Value is less than the level of significance (0.05). If Comparing the NDVI values with satellite image by measurements in Geographic Information System (GIS) found that the NDVI value of Green Oak lettuces consisted with the NDVI values of 0.2-1 in the vegetation area. However, the NDVI values measured in the experiments were of a rather narrow range. As a result, it is quite difficult to determine plant health indicators and unlike the values commonly referenced values -1 – 0 mean dead plants, values 0 – 0.33 mean unhealthy plants, values 0.33 – 0.66 mean moderately healthy plant and a value of 0.66-1 means a very healthy plant. In summary, the referenced NDVI values are general, which are different according to the type of plants and environment, consequently the specific measurement will contribute to accurate value. [13] A review of the literature found that there have been studies to measure NDVI values in many vegetables. However the research contexts are different, such as equipment, plant species, environment, etc. It is difficult to make clear comparisons with this research.

B. The NDVI test results of Green Oak lettuce were measured from different camera distances

NDVI measurements of 6 Green Oak lettuce plants were measured with a camera mounted at 3 levels of distance from the plants in raise bed by using the camera mount distance adjustment as shown in Fig. 6, because the camera lens can't adjust the distance. The results will be summarized as shown in Table II and the graph in Fig. 7. The result shown that the camera setting near the lettuce plants tend to have a higher NDVI value than the camera installed at a longer distance, but they also had a high standard deviation (SD) and a high coefficient of distribution (CV). The optimal camera setting distance to measure NDVI should be 45 cm due to the small standard deviation and the distribution coefficient is the smallest. This means that the measured NDVI values are relatively stable than other distances. In addition, the installation distance of the camera at 45 cm is safe from the spray of liquid fertilizer sprayed from the nozzle.

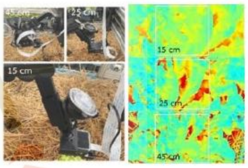


Fig. 6. NDVI measurements with camera at different distances from plant on raised bed

TABLE II. NDVI TEST RESULTS OF 6 GREEN OAK PLANTS AT DIFFERENT DISTANCES FROM THE CAMERA TO THE PLANTS.

Distance from camera to lettuce	Range	Mean	SD	CV (%)
15	0.5186 – 0.6558	0.5646	0.0462	8.1863
25	0.5384 – 0.5931	0.5695	0.0157	2.7514
45	0.5295 – 0.5725	0.5466	0.0139	2.5430

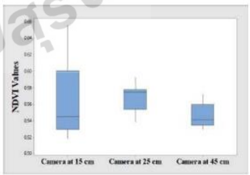
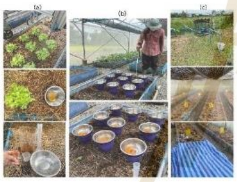


Fig. 7. NDVI test results of 6 green oak plants at different camera distances.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

C. The test results of the spraying rate and the wastage of foliar fertilizers were compared in different methods

The recommended application rate of foliar fertilizer solution is 5-30 microliters/cm^2 (0.005-0.03 ml/cm^2). [14] When calculating from Green Oak plants 45 - 50 days old, the canopy area is approximately 400 cm^2, therefore the optimum spraying rate is about 2-12 ml/plant. From the test of foliar spraying into containers by delaying the water pump operation at 0.1- 2.0 seconds according to an altitude of 20, 30, 40 cm, it was found that the volume of liquid fertilizer obtained by spraying at a height of 30 cm and 40 cm are 5.7 – 12 ml and 4.8 – 9.2 ml, respectively, which is in the range of suitable spray quantity according to the principle. On the contrary, if the spray nozzles were very distant from the tops of Green Oak lettuces, as a result, foliar fertilizers will fall out of the leaf canopy as well. There may be parts that fall to the surface or spread to other plants nearby. To minimize the wastage of foliar fertilizer, the height of the spray nozzle to the plant was chosen at 40 cm, because the difference in the liquid fertilizer volume range was 4.4 ml, which was less than the other ranges as shown in Table III and Fig.9. If the volume of liquid fertilizer obtained from the 40 cm. nozzle height was divided into 4 levels of similar proportions, it would be equal to 4.8, 6.3, 7.7 and 9.2 ml., respectively. Running the water pump at 0.1, 0.7, 1.4 and 2.0 s, respectively, the sprayed liquid fertilizer volume is close to the 4 levels liquid fertilizer volume. Therefore, the delay of the pump operation is determined in the command program for foliar fertilization according to plant health levels referring to Vegetation Index values from previous experiments as shown in Table IV.



(a) Spraying by Robot (b) Spraying by human (c) Fertigation system

Fig. 8. Measuring the wastage of foliar fertilizer from different methods of irrigation.

TABLE III. MEASURING THE VOLUME OF LIQUID FERTILIZER BY SPRAYING AT THREE DIFFERENT HEIGHTS FROM THE NOZZLE

Testing	Nozzle height (cm)	liquid fertilizer mean volume range (ml)	difference of mean volume range (ml)
Liquid fertilizer expected to obtain on leaves area	20	9.2 – 16	6.8
	30	5.7 – 12	6.3
	40	4.8 – 9.2	4.4
Total liquid fertilizer from nozzle	All height	9.7 – 69.7	60

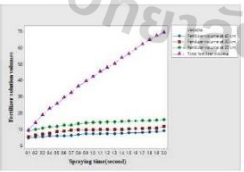


Fig. 9. Measuring the volumes of foliar fertilizer with different spraying time of water pump in foliar fertilizer robot system

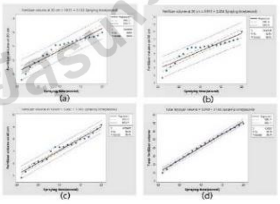
TABLE IV. THE SPRAYING PERIOD OF PUMP BASED ON THE HIGHEST AND LOWEST NDVI VALUES MEASURED

NDVI Standard Value	Pump spraying period (sec)	All average spray volume from nozzle (ml)	Average volume expected to obtain on leave area (ml)
very healthy plant (NDVI >= 0.6)	0.1	9.67	4.8
healthy plant (0.58 < NDVI < 0.6)	0.7	32.33	6.3
moderately healthy plant (0.56 < NDVI <= 0.58)	1.4	54.17	7.7
unhealthy plant (0.54 < NDVI <= 0.56)	2	69.67	9.2
very unhealthy plant (NDVI <= 0.54)	Not Spray	Not Spray	Not Spray

Generally, foliar fertilizers are produced in different formulations with different nutrients and different spray rates. The researcher then used the liquid fertilizer volume data measured from the pump delay of 0.1 -2.0 seconds to create a specific Linear Regression Model equation according to the nozzle height adjustment at 20, 30 and 40 cm as shown in Table V and the graph in Fig. 10. This equation can be used to predict the volume of foliar fertilizer that varies with the delay rate of the water pump. When using other foliar fertilizer formulas, the Linear Regression Model equation can be used to calculate the proper running time of water pump to spray the correct volume of fertilizer according to instructions of any foliar fertilizer products. To evaluate the Linear Regression model, accuracy was analyzed with R^2 score and error values were determined with Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Error (MAE). When evaluated the model, the linear regression equation from spraying volume data at 20 cm high nozzle shown the highest accuracy at 97.62% and the lowest error with MSE and MAE at 0.0326 and 0.1503, respectively.

TABLE V. THE LINEAR REGRESSION MODEL FOR PREDICTION THE VOLUME OF FOLIAR FERTILIZER IN ANY WATER PUMP RUNNING RATE

Testing	Nozzle height (cm)	Linear Regression Model	R^2 score	MSE	MAE
Liquid fertilizer expected to obtain on leaves area	20	Y=(2.0044*X)+4.9738	0.9762	0.0326	0.1503
	30	Y=(2.4523*X)+6.912	0.8409	0.3783	0.5121
	40	Y=(1.9668*X)+5.0799	0.9658	0.0455	0.1697
Total liquid fertilizer from nozzle	All height	Y=(31.0556*X)+9.9171	0.9945	1.7584	1.0461



(a) Linear Model of spraying volume at 20 cm (b) Linear Model of spraying volume at 30 cm (c) Linear Model of spraying volume at 40 cm (d) Linear Model of total spraying volume

Fig. 10. Graph of Linear Regression Model for prediction foliar fetilizer spraying volume

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

From the comparison of information with a brand of foliar fertilizer that is available in the market with a packing volume of 1,000 ml, the selling price is 450 Baht or 0.45 Baht per 1 ml and the recommended rate of use as a fertilizer solution is 20 ml per 20 liters of water. (Ratio of foliar fertilizer: water equal to 1: 1,000 parts). Calculating the cost to invest in foliar fertilizer solution with 9 plants in an area of approximately 1 m^2 comparing the 3 foliar fertilization methods, it was found that the use of foliar fertilizer spraying robots would be the least wasteful. The next one will be for people to spray with a backpack sprayer and the most wasteful is fertilizing through the irrigation system of the greenhouse, as shown in Table VI.

TABLE VI. THE RESULTS OF THE TEST FOR FINDING THE WASTAGE OF FOLIAR FERTILIZER FROM SPRAYING PER 1 M^2 BY DIFFERENT METHOD

Foliar fertilizer spraying methods	Spraying period	Volume range of liquid fertilizer spraying (ml)	Mean volume of liquid fertilizer spraying (ml)	Foliar fertilizer cost (Baht/ml)
1 spray nozzle in greenhouse Fertigation system (9 plants in area of 1 m^2)	5 minutes /Area	3,670–3,725.5	3,700	1.67 (3.7 ml. x 0.45 Baht)
man using liquid fertilizer sprayer (9 plants in area of 1 m^2)	3 seconds /plant	902 – 931.5	918	0.41 (0.9 ml x 0.45 Baht)
Foliar fertilizer robot (9 plants in area of 1 m^2)	Maximum at 2 seconds /plant	621 - 630	627	0.27 (0.6 ml x 0.45 Baht)

IV. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

The application of the cartesian mechanism for foliar fertilizer spraying differs from using 3D CNC machines that require high precision. It was concluded that the discrepancy in the movement to the plant coordinates for foliar spraying according to the 2D robotic vision principle was acceptable. Even if the spraying nozzle has deviated from the center of the plant, but it is still able to spray liquid fertilizer to the leaves of the plant satisfactorily. From the experimental test in the raised plant bed, the average discrepancy was not more than 5%. The NDVI value used to determine the foliar spray rate in this study did not cover the application of other vegetables, because only the sample group that is Green Oak lettuces was measured. However, analyzing plant data is more detailed or diverse in the same examination. Other methods of plant indices may be combined, such as SRI, SAVI, OSAVI, ARVI, GNDVI, GBNDVI, EVI, etc. In addition, the abnormal color of vegetable leaves may be processed to diagnose plant malnutrition or symptoms of plant disease. Furthermore, the object detection technique can be chosen to integrate with the plant coordinates and NDVI measurements. The robot operation will be more efficient and develop into an agricultural robot that can support agricultural activities in greenhouses to grow crops with utility.

ACKNOWLEDGMENT

The research would like to thank the Santi Wana Eco Community and the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) for supporting materials, equipment, and place to successfully complete this research.

REFERENCES

[1] D. Haytova, "A Review of Foliar Fertilization of Some Vegetables Crops," Annual Review & Research in Biology 3(4), pp. 455-465, 2013.

[2] M. Jawaharlal, and S. Ganesh, "Studies on the effect of fertigation in greenhouse chrysanthemum," Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry Sp9 (2), pp. 254-259, 2020.

[3] M. De Schampheleirea, K. Baetensb, D. Nuyttensc, and P. Spanoghea, "Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops," Crop Protection 27, pp. 577–589, 2018.

[4] Y. Osotspa, Benefits of using foliar fertilizers., pp. 89–92, Foliar application of fertilizers and accelerators, Kasetsart University, Bangkok, 2014.

[5] Y. Song, H. Sun, M. Li, and Q. Zhang, "Technology Application of Smart Spray in Agriculture: A Review," Intelligent Automation and Soft Computing 21, pp. 319–333, 2015.

[6] S. Sakornwasee, Into the smart agriculture age., pp. 25–27, The Agriculture of The Future, Agriculture Friends Marketing and Advertising, Nonthaburi, 2019.

[7] G. Adamides, G. Christou, C. Katsanos, N. Kostaras, M. Xenos, T. Hadzilacos, and Y. Edan, "A Reality-Based Interaction Interface for An Agricultural Teleoperated Robot Sprayer," Second International Conference on ROBOTICS AND ASSOCIATED HIGH-TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR AGRICULTURE AND FORESTRY, Madrid Spain, May 23, 2014.

[8] P. Santos, and J. A. Negri, "A Comparison of the Normalized Difference Vegetation Index and Rainfall for the Amazon and Northeastern Brazil," Journal of Applied Meteorology 36, pp. 958-965, 1996.

[9] "Plant Health Camera." [Online]. Avaliable: https://www.element14.com/community/community/design-challenges/pi-iot/blog/2016/05/24/smart-camera-for-measuring-plant-health/. [Accessed: 17-Sep-2020].

[10] W. Wang, Y. Duan, L. Zhang, TU. Rehman, D. Ma, and J. Jin, "Precise Estimation of NDVI with a Simple NIR Sensitive RGB Camera and Machine Learning Methods for Corn Plans" Sensors 20, pp. 3208, 2020.

[11] CJ. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation," Remote Sens Environ 8, pp.127–150, 1979.

[12] K. Suh, "Effect of a Sudden Increase in Light Intensity on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Reflected from Leaves of Tobacco," Journal of Environmental Science International 26, pp.543-547, 2017.

[13] "NDVI and Your Farm: Understand NDVI for Plant Health Insights." [Online]. Avaliable: https://www.agriculture-xprt.com/news/ndvi-and-your-farm-understanding-ndvi-for-plant-health-insights-702065/. [Accessed: 22-Aug-2020].

[14] Y. Osotspa, Foliar spraying, pp. 260–266, Foliar application of fertilizers and accelerators, Kasetsart University, Bangkok, 2014

NUTTAPOOM SUDKAEW received his Bachelor's degree in Electronics and Computer Technology in 2018 from the Phranakhon Rajabhat University, Thailand. His final project focused on adaptation of the Cartesian mechanics for rice parachute seedling tray preparation. He has been an agriculture innovation development officer at the Golden jubilee Museum of Agriculture Office (Public Organization). His research interests include agricultural robotics and image processing in plants. He is currently working on automatic control applied to smart farming.

SURADET TANTRAIRATN is a lecturer at the School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. He received his Bachelor's degree and Master's degree in Aerospace Engineering in 2005 and 2007 from the Kasetsart University and a PhD in Automatic Control and System Engineering in 2016 from University of Sheffield, UK. His research interests include Flight Dynamics Modelling, Flight Simulation, Aircraft System Identification or Estimation and Selection, Aircraft State Estimation, Flight Control, Adaptive Control, Fault Tolerance Flight Control, Aircraft Fault Detection and Isolation, Aircraft State Monitoring, Intelligent Control, and Autonomous UAS.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐภูมิ สุดแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2524 ที่อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา เริ่มการศึกษาระดับอนุบาลที่โรงเรียนเทศบาลบ้านกล้วย อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท ย้ายตามบิดามารดาไปศึกษาต่อระดับชั้นประถมศึกษาที่ปีที่ 1 – 3 ที่โรงเรียนอำนวยวิทย์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี และย้ายตามบิดามารดาไปศึกษาต่อชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 – 6 ที่โรงเรียนประภัสสรวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนชลราษฎรอำรุง จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาบริหารธุรกิจบัณฑิต (การจัดการ) คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ เมื่อ พ.ศ. 2547 ภายหลังสำเร็จการศึกษา ได้เข้าทำงานเป็นคอลัมนิสต์ที่สำนักพิมพ์เกษตรกรรมธรรมชาติ เขียนบทความด้านการเกษตรกรรมทางเลือก เทคโนโลยีเกษตร เทคโนโลยีพลังงานทางเลือก มีผลงานวารสารและหนังสือเล่มตลอด 10 ปี และได้มีโอกาสทำงานในตำแหน่งเจ้าหน้าที่พัฒนานวัตกรรมเกษตร กลุ่มเศรษฐกิจพอเพียง สำนักงานพิพิธภัณฑ์เกษตรเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ (องค์การมหาชน) เมื่อมีโอกาสได้เรียนรู้ทางด้านเทคโนโลยีอยู่เป็นนิจ จึงเป็นแรงบันดาลใจให้ศึกษาต่อระดับปริญญาตรีครั้งที่ 2 โดยสำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ เมื่อ พ.ศ. 2561 และได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเพิ่มพูนความรู้ในระดับที่สูงขึ้น

ปัจจุบันรับราชการ ตำแหน่งนักวิเคราะห์นโยบายและแผน สังกัดสำนักตรวจราชการ สำนักงานปลัดสำนักนายกรัฐมนตรี ทำเนียบรัฐบาล กรุงเทพฯ รับผิดชอบงานตรวจในเชิงนโยบายและเชิงพื้นที่ประเด็นสำคัญด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม เทคโนโลยี รวมทั้งมีงานอิสระ เป็นวิทยากรอบรมด้านการเกษตรอินทรีย์ เทคโนโลยีเกษตร และเทคโนโลยีพลังงานทดแทน กับชุมชนนิเวศน์สันติวนา ศูนย์เรียนรู้สวนผักบ้านคุณตา สำนักงานพิพิธภัณฑ์เกษตร เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ (องค์การมหาชน) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เป็นต้น