

การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศในเวลาจริงจากกล้องมัลติสเปกตรัมสำหรับการเกษตร A Real-Time Image Processing from Multispectral Camera for Agriculture

เรืออากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์
Flight Lieutenant Assistant Professor Pramote Suksirisak

อาจารย์กองการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
171/1 ถ.พหลโยธิน แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

Lecturer, Mechanical Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force
Academy 171/1 Phahonyothin Rd. Klongthanon, Saimai, Bangkok 10220

Corresponding Author: pramote_suk@rtaf.mi.th

(Received: February 18, 2019, Revised: April 17, 2019, Accepted: April 22, 2019)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบอากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรแม่นยำ มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมและมีโปรแกรมวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetable Index, NDVI) ในเวลาจริงและกำหนดตำแหน่งพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ด้วยโปรแกรมระบุพิกัด โดยนำสัญญาณภาพที่ส่งจากอากาศยานไร้คนขับมายังภาคพื้นและประมวลผลภาพในขณะที่อากาศยานยังคงบินทำภารกิจและทำการระบุพิกัดตำแหน่งของพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ แล้วนำมาใส่ค่าตำแหน่งในโปรแกรมวางแผนการบินเพื่อทำการบินไปยังตำแหน่งนั้นและทำการฉีดพ่นปุ๋ยชนิดน้ำต่อไป จากการบินทดสอบบริเวณสวนมะนาวเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ โดยได้ทำการระบุพิกัดจุด 3 ตำแหน่งโดยโปรแกรมประมวลผลดัชนีพรรณพืช NDVI ในเวลาจริง และทำการป้อนพิกัดตำแหน่งเพื่อให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งแล้วลงจอด พบว่าอากาศยานไร้คนขับสามารถลดระดับความสูงจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ความสูง 100 เมตร บินไปยังจุดที่กำหนดด้วยความเร็ว 6 เมตรต่อวินาที มีค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง ± 1 เมตรต่อวินาที ค่าความผิดพลาดในการบินไปยังตำแหน่งที่กำหนดมีค่าระหว่าง 0 – 6 เมตร ค่าความสูงของอากาศยานมีค่าผิดพลาดระหว่างทำการบิน 0 - 2 เมตร สำหรับการลดความผิดพลาดที่เกิดจากการบินนั้น สามารถลดได้โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นในการพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ : มัลติสเปกตรัม ภาพถ่ายทางอากาศ ประมวลผลภาพ

Abstract : This research is part of the unmanned aerial vehicle for precision agriculture. The objective is to develop an unmanned aerial system that is equipped with a multispectral imaging camera and develop software to analyze the Normalized Difference Vegetable Index (NDVI) in real time and locate the location of the stress plant. The NDVI calculated using live stream video input from the flying UAV and located the plant stress coordinate. The coordinates are input into the flight planning software for control the UAV to that coordinates for further fertilizer spraying. The flight test location are 2 rai of the lime field and can be located the 3 interested coordinates from geolocation real-time NDVI software. The flight test results show that the UAV reduced altitude for home position, 100 meters, and continue flying to the 3 coordinates using speed 6 m/s with the speed error ± 1 m/s. The flight position error between 0-6 meters and the altitude error between 0-2 meters and can be reduced by using the high performance sensor for further development.

Keywords : Multispectral, Aerial Photography, Image Processing

1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับโดยทั่วไปจะติดตั้งกล้องถ่ายภาพนิ่งและกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว เพื่อปฏิบัติการถ่ายภาพทางอากาศ และนำภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวที่ได้มาใช้ในกิจการต่าง ๆ ได้หลากหลาย แต่เนื่องจากขีดความสามารถของกล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ใช้สำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยทั่วไปนั้นจะถูกจำกัดเพียงช่วงคลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ (Visible Light) จึงได้เพียงภาพที่ประสาทตาของมนุษย์มองเห็นได้เท่านั้น ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพทางอากาศสำหรับอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ตรวจจับช่วงคลื่นแสงที่นอกเหนือจากช่วงคลื่นแสงที่มนุษย์มองเห็นเช่นย่านใกล้อินฟราเรด (Near Infrared, NIR) ย่านคลื่นรังสีความร้อน (Thermal) เป็นต้น ทำให้ภาพถ่ายทางอากาศแสดงผลได้มากกว่ากล้องถ่ายภาพทั่วไป ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพของระบบอากาศยานไร้คนขับได้เป็นอย่างดี

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความอุดมสมบูรณ์ของต้นมะนาว บริเวณหลังโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช โดยใช้กล้องมัลติสเปกตรัมถ่ายภาพทางอากาศในเวลาจริงและส่งผลมายังภาคพื้น และวิเคราะห์ผลจากค่าดัชนี NDVI เพื่อนำไปทำการแก้ไขบริเวณที่ต้นมะนาวไม่สมบูรณ์ต่อไป

2.2 เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งพิกัดในสวนมะนาวที่ได้จริงกับตำแหน่งที่เขียนไว้ในโปรแกรม ArduPilot

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการถ่ายภาพและการประมวลผลภาพทำให้เกิดการรวมเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลซึ่งก่อนหน้านี้ถูกจำกัดอยู่ที่ระบบถ่ายภาพด้วยดาวเทียมหรือเทคโนโลยีป้องกันประเทศ แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมที่ใช้วัด

การสะท้อนของแสงได้หลายช่วงคลื่นเพื่อใช้สำหรับติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับและนำไปใช้ในภาคพลเรือนเพื่อทำการสำรวจโดยเฉพาะด้านเกษตรกรรม [1],[2],[3] ทำให้เกิดการพัฒนาการทำการเกษตรที่เรียกว่าการเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) ซึ่งนอกจากด้านการเกษตรแล้วยังมีการนำภาพถ่ายจากกล้องมัลติสเปกตรัมไปใช้งานด้านการสำรวจตรวจสอบความเสียหายของผิวทางวิ่งของอากาศยาน [4] หรือด้านการแพทย์ในการเป็นเครื่องมือเพื่อช่วยในการวินิจฉัยทางการแพทย์ [5] เป็นต้น

ในการทำการเกษตรแบบแม่นยำนั้นจะเป็นการถ่ายภาพแล้ววิเคราะห์ดัชนีพรรณพืช โดยค่าดัชนีพรรณพืชมีการนำเสนอในครั้งแรกโดย Pearson [6] จากการนำภาพถ่ายทางอากาศมาคำนวณอัตราส่วนระหว่างค่าการสะท้อนคลื่นย่านสีแดงหารด้วยค่าการสะท้อนคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด หลังจากนั้น Rouse และคณะ [7] ได้สร้างสมการค่าดัชนีพรรณพืชในลักษณะการกระจายแบบปกติ (Normalize Difference Vegetable Index, NDVI) โดยคำนวณจากภาพถ่ายดาวเทียม ERTS-1 ซึ่งมีการนำค่าดัชนีดังกล่าวมาใช้อย่างแพร่หลาย ต่อมาในช่วงที่มีการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับ ได้มีการนำมาใช้ทางด้านการเกษตรในการวิเคราะห์ดัชนี NDVI โดย Jose A. J. Berni และคณะ [8] ใช้อากาศยานไร้คนขับแบบเฮลิคอปเตอร์ติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบรังสีความร้อนและกล้องมัลติสเปกตรัม ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร เพื่อถ่ายภาพและนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ความสมบูรณ์โดยวิเคราะห์จากดัชนี NDVI แต่การถ่ายภาพและนำมาวิเคราะห์นั้นต้องใช้เวลาซึ่งบางเหตุการณ์อาจไม่ทันต่อสถานการณ์เช่นในกรณีที่ต้องการควบคุมการระบาดของแมลงศัตรูพืชดังนั้นจึงมีการพัฒนาระบบวิเคราะห์ดัชนี NDVI ในเวลาจริงโดย Bin Zhao และคณะ [9] ได้พัฒนาการวัดค่า NDVI แบบใกล้เวลาจริง โดยใช้กล้องแพนโครมาติก (Panchromatic) กับกล้องภาพสี ติดตั้งกับหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อ พัฒนาโปรแกรมเพื่อการ

กำจัดสัญญาณรบกวนเช่นเงาและดินที่เป็นภาพหลังซึ่งสามารถนำมาใช้ด้านการตรวจสอบการเจริญเติบโตของพืช โดยวัดค่าดัชนี NDVI ของพืชใบสีเขียวเปรียบเทียบกับดัชนีของใบสีเหลือง และ Sara และคณะ [10] ทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางอากาศแบบไฮเปอร์สเปกตรัมที่ติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึง โดยใช้การประมวลผลภาพแบบในเวลาจริง เพื่อนำไปใช้ในการตรวจลาดตระเวนและค้นหาเป้าหมาย อย่างไรก็ตามยังไม่มีมีการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับที่วิเคราะห์ค่าดัชนี NDVI ในเวลาจริงและติดตั้งระบบฉีดพ่นกับโครงสร้างเดียวกันที่สามารถบินไปยังตำแหน่งที่มีค่าดัชนี NDVI ต่ำซึ่งเกิดจากการเจริญเติบโตที่ไม่สมบูรณ์เพื่อทำการฉีดพ่นยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำได้ทันที

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 กล้องถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม

การทำการเกษตรแม่นยำในปัจจุบันมีขั้นตอนทั่วไปคือการนำอากาศยานไร้คนขับติดตั้งกล้องมัลติสเปกตรัมเพื่อทำการถ่ายภาพการสะท้อนของคลื่นแสงในย่านต่างๆ เมื่อเสร็จสิ้นภารกิจการบิน ก็จะนำภาพที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำของกล้อง มาทำการวิเคราะห์และทำเป็นแผนที่การเกษตรแม่นยำ เพื่อวางแผนบริหารจัดการและพิจารณาหาตำแหน่งที่พืชเจริญเติบโตไม่สมบูรณ์เพื่อที่จะทำการให้ปุ๋ยหรือพ่นยา หลังจากนั้นก็จะนำอากาศยานไร้คนขับสำหรับพ่นยาหรือให้ปุ๋ยขึ้นทำการบินเพื่อไปฉีดพ่นพ่นในตำแหน่งที่ได้ทำการวางแผนไว้

จากขั้นตอนดังกล่าวจะเห็นว่าจะต้องทำการบินถ่ายภาพจากกล้องมัลติสเปกตรัมให้เสร็จสิ้นก่อน แล้วจึงนำภาพมาวิเคราะห์หลังจากทำการบิน เพื่อหาค่าดัชนี NDVI โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างเป็นแผนที่การเกษตรแม่นยำก่อน แล้วจึงทำการบินเพื่อพ่นยาหรือให้ปุ๋ย ดังนั้นหากพบว่าพื้นที่เพาะปลูกประสบปัญหาจากแมลงศัตรูพืชหรือโรคพืช การที่จะต้องมาทำการวิเคราะห์ภาพหลังจากการบิน และจะต้องวางแผนในการบินอีกครั้ง

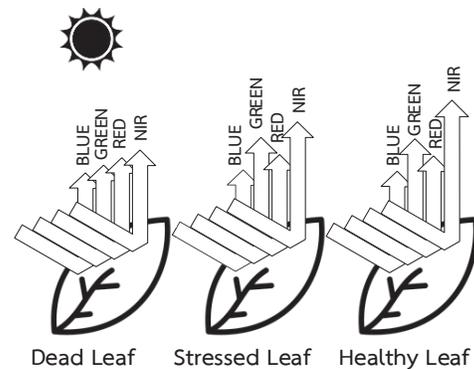
เพื่อไปพ่นยาซึ่งต้องใช้ระยะเวลานั้น อาจส่งผลเสียต่อพืชในแปลง ดังนั้นหากมีระบบอากาศยานไร้คนขับที่วิเคราะห์ค่าดัชนีพรรณพืชได้ในเวลาจริง รวมถึงสามารถฉีดพ่นยาได้ในเครื่องเดียวกัน จะทำให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการแพร่ของแมลงศัตรูพืชหรือโรคพืชได้ทันเวลาก่อนที่จะมีการลุกลามพื้นที่มากขึ้น อีกทั้งเป็นการลดระยะเวลาการทำงานและค่าใช้จ่ายในการบินลดลงจากวิธีการเดิม

อากาศยานไร้คนขับทางการเกษตรในปัจจุบันนั้นแบ่งเป็นสองชนิด คือ อากาศยานไร้คนขับสำหรับสำรวจเพื่อทำแผนที่การเกษตรแม่นยำ เป็นอากาศยานไร้คนขับที่ใช้เทคนิคการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) โดยจะทำการติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมสำหรับถ่ายภาพการสะท้อนของคลื่นแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ เช่น ย่านที่ตาสามารถมองเห็นเช่น สีแดง (Red) ที่มีความยาวของคลื่นแสงประมาณ 700 นาโนเมตร ย่านสีเขียว (Green) ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร ย่านสีน้ำเงิน (Blue) ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร รวมถึงช่วงความยาวคลื่นที่ตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นเช่น ย่านอินฟราเรดใกล้ ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร เป็นต้น โดยทั่วไปนั้นกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมจะติดตั้งในดาวเทียมสำรวจทรัพยากร เช่นดาวเทียม Landsat 7 เป็นต้น แต่ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมที่มีขนาดเล็กสามารถนำไปติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับได้ ในการประมวลผลนั้นจะใช้ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมาทำการกระทำทางคณิตศาสตร์ เช่น ค่าดัชนีพรรณพืชที่ใช้สำหรับการติดตามการเจริญเติบโตของพืชเป็นการนำภาพถ่ายในย่านความยาวคลื่นสีแดงและย่านอินฟราเรดใกล้มาคำนวณตามสมการของ Rouse

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

และแสดงผลในรูปของความแตกต่างของสี ทำให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์หาตำแหน่งของพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ได้ง่าย เพื่อทำการให้ปุ๋ยหรือยาฆ่าแมลงในตำแหน่งดังกล่าวต่อไป

หลักการของค่าดัชนีพรรณพืช NDVI คือการใช้คุณสมบัติการสะท้อนของคลื่นแสงที่ไม่เท่ากันของคลื่นแสงย่านต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยพืชที่มีความสมบูรณ์จะดูดซับคลื่นแสงในย่านสีแดง เขียว และน้ำเงินได้ดี และจะสะท้อนคลื่นย่านอินฟราเรดใกล้ออกมามาก ในขณะที่พืชที่เป็นโรคจะสะท้อนคลื่นแสงในแต่ละย่านเท่าๆกัน หรือใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงนำคุณสมบัตินี้ไปสร้างเป็นสมการและใช้วิเคราะห์ความสมบูรณ์ของพืชได้

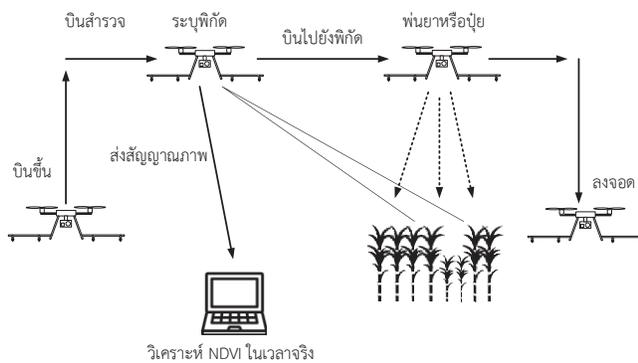


ภาพที่ 1 การสะท้อนของคลื่นแสงเมื่อตกกระทบพืช

4.2 อากาศยานไร้คนขับประมวลผลภาพในเวลาจริง

อากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรแม่นยำดังภาพที่ 2 มีโครงสร้างเป็นอากาศยานแบบหลายใบพัดติดตั้งมอเตอร์และใบพัดจำนวน 4 ใบ ติดตั้งกล้องมัลติสเปกตรัมที่สามารถถ่ายภาพแสงย่านความถี่สีแดง สีเขียว และอินฟราเรดใกล้ ดังแสดงในภาพที่ 3 บนโครงสร้างแบบกิมเบลที่สามารถบังคับทิศทางให้สามารถหมุนซ้ายขวา หรือขึ้นลงได้ และสามารถรักษาแนวเล็ง (Line of Sight) โดยมีระบบควบคุมการรักษาเสถียรภาพด้วยไจโรสโคป (Gyro-Stabilization) มีอุปกรณ์สำหรับ

รับส่งสัญญาณภาพที่สามารถถ่ายทอดสัญญาณภาพมายังสถานีภาคพื้นได้ในเวลาจริง โดยแสดงผลสัญญาณภาพออกทางจอภาพหรือคอมพิวเตอร์ได้ มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถประมวลผลภาพที่ได้ในขณะที่ทำการบิน โดยโปรแกรมสามารถคำนวณและแสดงผลค่าดัชนีพรรณพืช NDVI และค่าดัชนีพรรณพืชอื่นๆ ได้ในเวลาเดียวกันในขณะที่ทำการบิน ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับพ่นยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำ โดยประกอบด้วยถังเก็บน้ำยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำต่อท่อมายังปั๊มและหัวฉีดพ่นตามลำดับ สำหรับกรณีที่ตรวจพบว่าค่าดัชนีพรรณพืชแสดงตำแหน่งการเจริญเติบโตที่ไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากมีศัตรูพืช หรือสภาพแวดล้อมอื่นๆ ทำให้สามารถสั่งการให้พ่นยาหรือปุ๋ยได้ทันทีในขณะที่ทำการบินในเที่ยวบินเดียวกัน ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการนำภาพถ่ายที่ได้มาวิเคราะห์และวางแผนทำการฉีดพ่นยาหรือปุ๋ยในเที่ยวบินอื่นในวันถัดไป



ภาพที่ 2 อากาศยานไร้คนขับประมวลผลภาพในเวลาจริง

กระบวนการของระบบอากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรแม่นยำในเวลาจริง มีการทำงานคือ เริ่มต้นทำการบิน ในขณะที่เดียวกันก็มีการส่งสัญญาณภาพมายังสถานีภาคพื้น โดยมีการคำนวณค่าดัชนีพรรณพืช เช่น ค่าดัชนี NDVI ในเวลาจริง โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภาคพื้น เมื่อผู้ใช้ตรวจพบพิกัดที่แสดงให้เห็นว่ามีการเจริญเติบโตของพืชไม่สมบูรณ์ก็จะทำการบังคับอากาศยานไร้คนขับไปยังตำแหน่งนั้นๆ และสั่งการให้หัวฉีดทำการพ่นยาหรือปุ๋ยชนิดน้ำไปยังตำแหน่งของพืชดังกล่าว



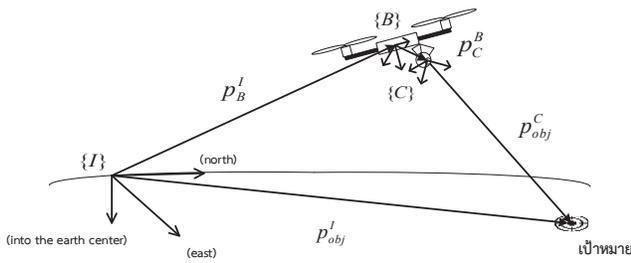
ภาพที่ 3 กล้องมัลติสเปกตรัม

ตารางที่ 1 คุณลักษณะกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัม

รายการ	คุณลักษณะ
Image Resolution	12 MegaPixel
Image Format	RAW+JPG, JPG
Sensor	Sony Exmor R IMX117
Video Resolution	2160p24, 1440p30, 1080p60, 720p60
Lens Optics	87° HFOV (19mm) f/2.8 Aperture
Ground Sample Distance	5.5 cm/px (2.17in/px) at 120 m AGL
Weight	76g (With Battery),
Dimensions	59 x 41.5 x 36mm
Power Draw	5.2V 0.4A

4.3 การระบุพิกัดจากกล้องติดตั้งบนอากาศยาน

ในการถ่ายภาพทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับนั้น การควบคุมการหมุนของกล้องที่ติดตั้งอยู่กับอากาศยานจำเป็นต้องศึกษาถึงระบบพิกัดอ้างอิงต่างๆ [11],[12],[13] เพื่อที่จะนำค่ามาใช้ในการคำนวณหาพิกัดของเป้าหมายได้ โดยเริ่มจากการเขียนแผนภาพของระบบพิกัดต่าง ๆ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ระบบพิกัดของการถ่ายภาพทางอากาศ

ภาพที่ 4 แสดงระบบพิกัดของอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องที่ชี้ไปยังเป้าหมาย กำหนดให้ $\{I\}$ เป็นพิกัดอ้างอิงเฉื่อย $\{B\}$ เป็นระบบพิกัดฉากของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นเมทริกซ์การแปลงพิกัดโครงสร้าง อากาศยานไร้คนขับเทียบพิกัดอ้างอิงเฉื่อย $\{I\}$ เท่ากับ T_B^I และ $\{C\}$ เป็นระบบพิกัดฉากของกล้องและกิมเบล ที่ติดตั้งอยู่กับโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ โดยที่แกนของโครงสร้างกล้องและกิมเบลโดยมีเมทริกซ์การแปลงพิกัดคือ T_C^B

กำหนดให้ $p_{obj}^C = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ คือ ตำแหน่งของเป้าหมายเทียบกับระบบพิกัดฉาก $\{C\}$ ดังนั้นตำแหน่งของเป้าหมายเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิงเฉื่อย $\{I\}$ คำนวณได้จากสมการ

$$p_{obj}^I = T_B^I T_C^B p_{obj}^C \quad (2)$$

เมื่อตำแหน่งของโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับคือ

$$p_B^I = [x_B \ y_B \ z_B]^T \quad (3)$$

และแกนของพิกัดโครงสร้างอากาศยาน $\{B\}$ หมุนเป็นมุมเทียบพิกัดอ้างอิงเฉื่อย $\{I\}$ จากอ้างอิง [11] ดังนั้นเมทริกซ์การแปลงคำนวณได้จากสมการ

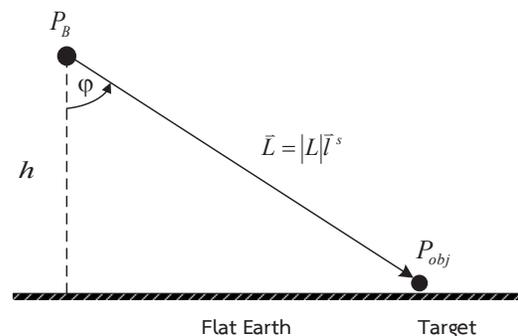
$$T_B^I = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta & x_B \\ s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi c_\theta & y_B \\ c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & c_\phi c_\theta & z_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่ $c_x = \cos x$ และ $s_x = \sin x$

การคำนวณสมการเมทริกซ์การแปลงพิกัดของกล้องและกิมเบล $\{C\}$ เกิดจากการหมุนของกิมเบลเป็นมุมกวาด (Azimuth) มีค่าเท่ากับ α และมุมก้มเงย (Pitch) เท่ากับ β เทียบกับโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ $\{B\}$ โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของกล้องและจุดศูนย์กลางมวลของอากาศยานมีขนาดเล็กมาก จึงเสมือนเป็นจุดเดียวกันได้ ดังนั้นเมทริกซ์การแปลงจึงมีค่าเท่ากับ

$$T_C^B = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & -s_\beta & -c_\alpha s_\beta & 0 \\ c_\beta s_\alpha & c_\alpha & -s_\alpha s_\beta & 0 \\ s_\beta & 0 & c_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากการคำนวณตำแหน่งพิกัดของวัตถุด้วยภาพใน 3 มิติหากมีการลดรูป [12] โดยทำการบินในแนวระดับและให้กล้องหมุนไปในทิศทางเดียวกับอากาศยานทำให้ระบบพิกัด $\{B\}$ และระบบพิกัด $\{C\}$ มีจุดกำเนิดเดียวกันและทิศทางเดียวกัน ยกเว้นปรับมุมกล้องในทิศก้มลงมายังวัตถุซึ่งทำให้แนวเล็ง (Line of Sight, LOS) และให้ตำแหน่งของวัตถุอยู่ที่กึ่งกลางภาพ โดยสมมติให้เป็นแนวระนาบ Flat Earth จะทำให้สามารถลดรูปลงเหลือ 2 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การประมาณระยะทางด้วยสมมติฐาน Flat Earth

จากภาพที่ 5 เมื่อทราบค่าความสูง h ในขณะทำการบินและมุมก้ม $\varphi = 90 - \beta$ ของโครงสร้างกิมเบลและกล้องที่ทำให้ตำแหน่งของวัตถุอยู่ที่กึ่งกลางภาพ สามารถคำนวณขนาดของระยะห่างจากอากาศยานถึงเป้าหมายได้จากสมการ

$$|L| = \frac{h}{\cos \varphi} \quad (6)$$

ตำแหน่งของวัตถุเทียบกับระบบอ้างอิงเฉื่อย $\{I\}$ จะเท่ากับ

$$p_{obj}^I = p_B^I + R_B^I \bar{L} \quad (7)$$

เมื่อ

p_{obj}^I คือ พิกัดตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการระบุเทียบกับกรอบอ้างอิงความเฉื่อย $\{I\}$

p_B^I คือ พิกัดตำแหน่งอากาศยานไร้คนขับเทียบกับกรอบอ้างอิงความเฉื่อย $\{I\}$

h คือ ความสูงของอากาศยานไร้คนขับ

φ คือ มุมระหว่างแนวเล็งของกล้องกับแนวตั้ง

5. ผลการศึกษา

5.1 การบินถ่ายภาพด้วยกล้องมัลติสเปกตรัม

การบินทดสอบระบบอากาศยานไร้คนขับใช้พื้นที่ด้านหลังของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งมีพื้นที่สำหรับปลูกสวนมะนาวเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 พื้นที่บริเวณทำการบินทดสอบ

ระบบของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการบินทดสอบนั้นเป็นการพัฒนาในช่วงเริ่มต้นเป็นการทดสอบระบบประมวลผลภาพและการระบุพิกัดจากภาพ NDVI ที่คำนวณในเวลาจริง โดยยังไม่ได้มีการติดตั้งระบบฉีดพ่นกับโครงสร้างของอากาศยานไร้คนขับ จากภาพที่ 7 แสดงถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย โครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมวางแผนการบิน Ardupilot และบันทึกผลการบิน และคอมพิวเตอร์ที่รับสัญญาณภาพและโปรแกรมประมวลผลภาพที่พัฒนาโปรแกรมด้วย MS Visual Studio 2015 ร่วมกับชุดคำสั่ง OpenCV 3.4.2 ในการคำนวณค่าดัชนีพรรณพืช NDVI และระบุพิกัดตำแหน่งพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ แล้วจึงนำพิกัดดังกล่าวมาใส่ลงในโปรแกรมควบคุมการบิน เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ได้ทำการระบุพิกัด เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการบินต่อไป



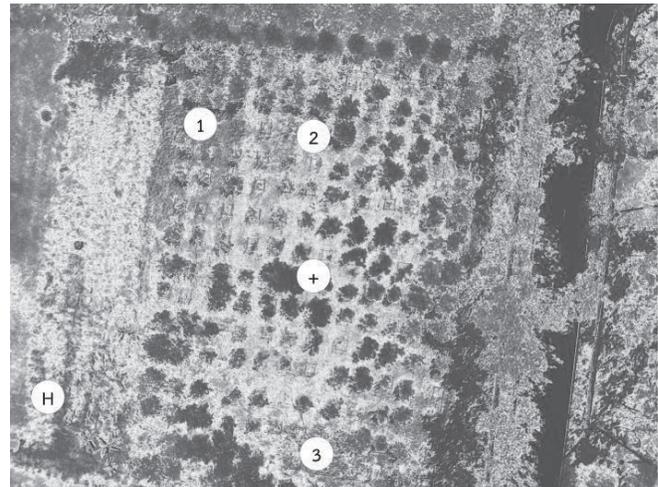
ภาพที่ 7 อุปกรณ์สำหรับการบินทดสอบ

การทำการบินทดสอบนั้นเริ่มจากนำอากาศยานไร้คนขับบินไปยังตำแหน่งที่กำหนดในที่นี้ได้กำหนดตำแหน่งกึ่งกลางแปลงของสวนมะนาวที่ความสูง 100 เมตรและทำการวิเคราะห์ประมวลผลภาพดัชนี NDVI จากสัญญาณภาพที่ส่งมาจากอากาศยานไร้คนขับโดยคอมพิวเตอร์ภาคพื้น ผลการคำนวณค่า NDVI อยู่ในช่วง -0.06 – 0.58 ซึ่งกำหนดให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลเป็นระดับสี 5 ระดับเพื่อเป็นการบอกลักษณะของพื้นที่ในแปลงรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแสดงผลดัชนี NDVI เป็นสี 5 ระดับบอกลักษณะภายในสวนมะนาว

ค่าดัชนี NDVI	สี	ลักษณะพื้นที่
-0.060 – 0.068	แดง	ถนนคอนกรีต
0.069 – 0.197	ส้ม	พื้นดิน
0.198 – 0.326	เหลือง	พื้นดินมีหญ้าปกคลุม
0.327 – 0.455	เขียวอ่อน	ต้นมะนาวไม่สมบูรณ์
0.456 – 0.580	เขียวเข้ม	ต้นมะนาวสมบูรณ์

จากภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าดัชนี NDVI ซึ่งแสดงด้วยระดับสีดังแสดงในภาพที่ 8 และเลือกพิจารณาตำแหน่งพิกัดของต้นมะนาวที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ ซึ่งจากเกณฑ์ที่กำหนดจากค่าดัชนี NDVI < 0.455 แสดงตำแหน่งของต้นมะนาวที่ไม่สมบูรณ์ทั้งหมด 60 ต้น จากต้นมะนาวทั้งหมด 180 ต้น คิดเป็นต้นมะนาวที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์เป็นร้อยละ 33.33 และในการทดลองนี้ได้ระบุกลุ่มของตำแหน่งต้นมะนาวที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์เป็นพิกัดจำนวน 3 ตำแหน่ง โดยผู้ใช้ได้เลือกระบุพิกัดจากโปรแกรมประมวลผล เพื่อนำไปกำหนดเส้นทางบินของอากาศยานไร้คนขับในการที่จะบินไปตามเส้นทางการบินและทำการพ่นยาหรือให้ปุ๋ยได้ต่อไป ในการทดสอบเบื้องต้นนี้ได้ทำการระบุพิกัดเพียง 3 ตำแหน่งดังตารางที่ 3



ภาพที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่า NDVI

ตารางที่ 3 ตำแหน่งเส้นทางสำหรับอากาศยานไร้คนขับทำการบิน

รายการ	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูง (ม)
จุดเริ่มต้น (+)	13.916876°	100.629881°	100
ตำแหน่ง 1	13.916794°	100.630259°	6
ตำแหน่ง 2	13.916700°	100.630208°	6
ตำแหน่ง 3	13.917001°	100.629532°	6
จุดลงจอด (H)	13.917322°	100.629679°	0

อย่างไรก็ตามการระบุพิกัดตำแหน่งของกลุ่มต้นมะนาวที่ไม่สมบูรณ์นั้นอาจจะมากกว่า 3 ตำแหน่งก็ได้ เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวเป็นเส้นทางการบินพ่นยาหรือให้ปุ๋ยของอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าต้องการให้อากาศยานไร้คนขับพ่นยาได้ครอบคลุมพื้นที่มากน้อยเท่าใด แต่หากมีการระบุพิกัดหลายจุดจะทำให้สิ้นเปลืองปริมาณน้ำยาหรือปุ๋ยมากเกินไปจนความจำเป็น ดังนั้นการระบุตำแหน่งเส้นทางการบินสำหรับพ่นยาจึงขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้งานเป็นหลัก

5.2 การกำหนดเส้นทางบิน

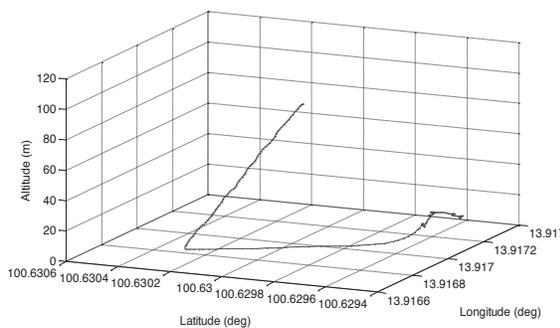
เมื่อได้ตำแหน่งที่ต้องการทั้ง 3 จุดแล้ว ก็จะทำตารางแผนการบินจากตำแหน่งดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ หรือสามารถ

ควบคุมการเคลื่อนที่โดยระบบการเห็นภาพ [13] ได้เช่นเดียวกัน แต่การทดลองเบื้องต้นในการทดลองนี้ใช้โปรแกรม ArduPilot ดังแสดงในภาพที่ 9 และทำการสั่งการให้บินไปยังตำแหน่งต่างๆ โดยการบินแบบอัตโนมัติ โปรแกรม ArduPilot นี้จะทำการบันทึกข้อมูลการบินต่างๆ ซึ่งจะนำมาใช้วิเคราะห์ผลการบินได้ต่อไป



ภาพที่ 9 โปรแกรมวางแผนการบิน

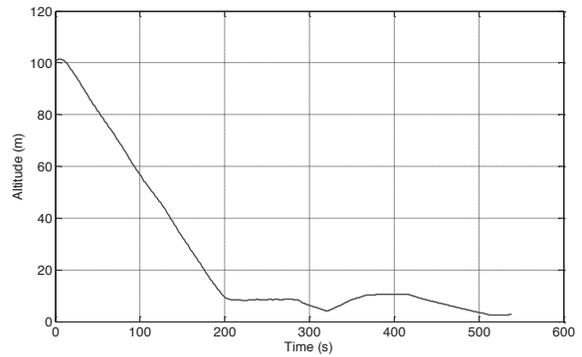
การวิเคราะห์ผลการบินนั้นในเบื้องต้นจะทำการหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการบินว่าผิดพลาดไปจากจุดที่กำหนดอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์จากภาพที่ 10-12 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 10 ผลการบินตามเส้นทางทดสอบ

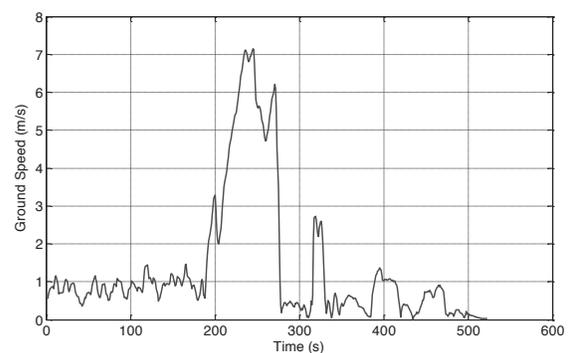
จากภาพที่ 10 แสดงตำแหน่งพิกัดของอากาศยานไร้คนขับเริ่มเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่ความสูง 100 เมตร ลดระดับลงมายังตำแหน่งที่ 1 และเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ตามลำดับ จากผลการบินสามารถ

คำนวณค่าความผิดพลาดของตำแหน่งต่าง ๆ ในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0 เมตร ตำแหน่งที่ 2 มีค่าความผิดพลาดเป็นระยะ 1 เมตร และตำแหน่งที่ 3 มีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเท่ากับ 6 เมตร



ภาพที่ 11 ค่าความสูงในขณะทำการบินทดสอบ

ภาพที่ 11 แสดงค่าความสูงของอากาศยานไร้คนขับโดยที่ตำแหน่งเริ่มต้นนั้นมีความสูงเท่ากับ 100 เมตร เมื่ออากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด จะทำการลดระดับความสูงลงมายังความสูงที่ต้องการเท่ากับ 6 เมตร จากการทดสอบการบินมีค่าความผิดพลาดของความสูงอยู่ในช่วง ± 2 เมตร โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับในช่วงลดระดับความสูงลงมามีค่าเท่ากับ 0.75 เมตรต่อวินาที และในช่วงที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ นั้นได้กำหนดในโปรแกรมควบคุมการบินเท่ากับ 6 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่ามีค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง ± 1 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 12 ความเร็วในการบินทดสอบ

6. สรุปและอภิปรายผล

อากาศยานไร้คนขับสำหรับการทำการเกษตรแบบแม่นยำที่ต้องติดตั้งกล้องถ่ายภาพแบบมัลติสเปกตรัมนั้นเป็นการวิเคราะห์ผลโดยการประมวลผลภาพโดยใช้ดัชนีพรรณพืช NDVI แล้วจึงนำมาให้เกษตรกรหรือผู้ใช้งานได้นำมาวางแผนบริหารจัดการแปลง ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการประมวลผล งานวิจัยนี้ได้สร้างอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องและประดิษฐ์โปรแกรมการประมวลผลหาค่าดัชนีพรรณพืช NDVI ในเวลาจริง เพื่อต้องการลดเวลาและขั้นตอนในส่วนที่ต้องมาการนำไปวิเคราะห์ โดยนำสัญญาณภาพที่ถ่ายทอดจากอากาศยานไร้คนขับลงมายังภาคพื้นและประมวลผลภาพในขณะที่อากาศยานยังคงบินทำการกิจอยู่ เมื่อพบเห็นตำแหน่งของพืชที่เจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ คำนวณหาจุดพิกัดของตำแหน่งนั้น แล้วนำมาใส่ค่าตำแหน่งในโปรแกรมวางแผนการบิน และทำการบินไปยังตำแหน่งนั้น เพื่อทำการฉีดพ่นปุ๋ยชนิดน้ำต่อไป จากการบินทดสอบบริเวณสวนมะนาวเนื้อที่ประมาณ 2 ไร่ พบว่ามีตำแหน่งที่จะต้องพิจารณา 3 ตำแหน่งซึ่งได้ทำการระบุพิกัดโดยโปรแกรมประมวลผลดัชนีพรรณพืช NDVI ในเวลาจริง หลังจากที่ทำการป้อนพิกัดตำแหน่งและให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งทั้ง 3 แล้วลงจอดพบว่าอากาศยานไร้คนขับสามารถบินไปยังจุดที่กำหนดด้วยความเร็ว 6 เมตรต่อวินาที มีค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่อยู่ที่ในช่วง ± 1 เมตรต่อวินาที ค่าความผิดพลาดในการบินไปยังตำแหน่งที่กำหนดอยู่ระหว่าง 0 – 6 เมตร ค่าความสูงของอากาศยานมีค่าผิดพลาดระหว่างทำการบิน 0 - 2 เมตร จากการบินทดสอบเห็นได้ว่ายังมีค่าผิดพลาดในการบินอยู่บ้างซึ่งสามารถลดค่าผิดพลาดลงได้โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มเติม และเมื่อสามารถค่าผิดพลาดลดลง จะเป็นการติดตั้งระบบฉีดพ่นให้กับอากาศยานไร้คนขับและทดสอบการบินต่อไป

จากกรณีศึกษาการวิเคราะห์ดัชนี NDVI ของสวนมะนาวจากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าผู้วิจัยได้กำหนดระดับ

ของค่าดัชนี NDVI เป็นระดับและแสดงผลเป็นสี 5 สี โดยได้กำหนดว่าต้นมะนาวที่เจริญไม่สมบูรณ์นั้นคือตำแหน่งที่มีค่าดัชนี NDVI < 0.455 เนื่องจากต้นมะนาวนั้นมีลักษณะเป็นพุ่มและมีใบค่อนข้างหนา จึงได้กำหนดค่าดัชนี NDVI ของต้นที่สมบูรณ์นั้นมีค่ามากกว่า 0.445 หากมีการนำไปใช้กับพืชชนิดอื่น จะต้องมีการปรับค่าดัชนี NDVI ให้สอดคล้องกับลักษณะของพืชที่จะไปวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามค่าดัชนี NDVI โดยทั่วไปที่เหมาะสมนั้นผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรจะใช้ค่าดัชนี NDVI เริ่มตั้งแต่ 0.2 – 0.3 เป็นต้นไปถือว่าเป็นพืชมีการเจริญเติบโตปกติซึ่งอาจแทนด้วยสีเขียวอ่อน เพื่อให้บ่งชี้ว่ามีพืชใบเขียวอยู่ในบริเวณนั้น และทำการไล่ระดับสีเป็นสีเขียวเข้มเพื่อแสดงถึงความสมบูรณ์ ในทางตรงข้ามค่า NDVI = 0 ควรแสดงด้วยสีเหลืองและสีจะเข้มจนเป็นสีแดงเมื่อค่า NDVI = -1 เป็นต้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ ดร. ประสาทพร วงษ์คำข้าง เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนชุดทดสอบการบินและกล้องมัลติสเปกตรัม และการให้ข้อมูลต่างๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญทำให้บทความฉบับนี้สมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- (1) S. Nebiker, A. Annen, M. Scherrer, D. Oesch, 2008. A Light-Weight Multispectral Sensor for Micro UAV-Opportunities for very High Resolution Airborne Remote Sensing, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37, p. 1193-2000.
- (2) D.B. Martin et al., 2010. UAV-based environmental monitoring using multi-spectral imaging, Proc. SPIE 7668, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications, Vol. 7, p. 766811.
- (3) Y. A. Pederi and H. S. Cheporniuk, 2015, "Unmanned aerial vehicles and new technological methods of monitoring and crop protection in precision agriculture," in 2015 IEEE International Conference Actual Problems

- of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), p. 298–301.
- (4) Yifan Pan, Xianfeng Zhang, Guido Cervone, Liping Yang., 2018. Detection of Asphalt Pavement Potholes and Cracks Based on the Unmanned Aerial Vehicle Multispectral Imagery, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 11(10), p. 3701-12.
- (5) Tuan Vo-Dinh¹, Brian Cullum, Paul Kasili., 2003. Development of a multi-spectral imaging system for medical applications, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36(14).
- (6) R.L. Pearson, Miller L.D., 1972, Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, *Proceedings of the eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 1357–1381.
- (7) J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, p. 309-317.
- (8) J. A. J. Berni, P. J. Zarco-Tejada, L. Surez, E. Fer-eres, 2009. Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47(3), p. 722-738.
- (9) Beard & McLain, 2012. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*, Princeton University Press, New Jersey
- (10) D. Blake Barber, D" Joshua Redding, Timothy W.Mclain, Randal W.Beard and Clark N.Taylor., 2006. Vision-based target geo-location using a fixed-wing miniature air vehicle, *Journal of intelligent and robotic systems*, Vol. 47(4), p. 361-382.
- (11) Vladimir N.Dobrokhodov, Isaac I.Kaminer, Kevin D.Jones., 2008. Vision-Based Tracking and Motion Estimation for Moving Targets Using Small UAVs, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, Vol. 31(4), p. 907-917.
- (12) M. Jeerasak, 2017. Vision-based target geo-location using a multirotor vehicle, *The 8th TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Vol. 107, p. 238-243.
- (13) จีระศักดิ์ หมวดไพฑูริกลาง, 2559. การควบคุมตำแหน่งอากาศยาน 4 ใบพัดโดยใช้ระบบการเห็นภาพ. วารสารนายเรืออากาศวิชาการ, ปีที่ 12, ฉบับที่ 12 หน้า 17-21.