

การเพิ่มความแม่นยำของโปรแกรมระบุตำแหน่งเป้าหมายบนภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับ ขนาดเล็กแบบ 4 ใบพัด ด้วยเลเซอร์วัดระยะ

Precision Enhancement of The Geo-location Programming from Small Quad-Rotor UAV Using Laser Range Finder

จิรัชดี หมวดโพธิ์กลาง¹ สุภกานต์ แก้วเหลี่ยม²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม

กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

¹jeerasak_m@rtaf.mi.th, ²supakan@rtaf.mi.th

Received : 11 May 2020

Revised : 12 June 2020

Accepted : 3 July 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของเป้าหมายภาคพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ ด้วยเลเซอร์วัดระยะ โดยการนำข้อมูลตำแหน่งพิกเซลของภาพเป้าหมาย (Pixel Location) ตำแหน่งพิกัดของอากาศยานไร้คนขับ (GPS Location) ความสูงของอากาศยาน (Altitude) ทำทางการบิน (Attitude) มุมของกล้องที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับ และระยะจากกล้องถึงเป้าหมายที่สนใจ มาทำการประมาณค่าตำแหน่งพิกัดของเป้าหมายภาคพื้นดิน แล้วทำการทดสอบความถูกต้องของสมการด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นจึงทำการพัฒนาโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายด้วยภาษา C++ และทำการทดสอบระบุพิกัดเป้าหมายจริงกับอากาศยานไร้คนขับแบบ 4 ใบพัด ผลการทดสอบแสดงถึงความแม่นยำในการระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับซึ่งมีความผิดพลาดน้อยกว่า 10 เมตร

คำสำคัญ : อากาศยานไร้คนขับ, การระบุพิกัดเป้าหมายทางภูมิศาสตร์

Abstract

This paper presents a method for increase accuracy of the GPS location of a ground-based object imaged by a quadrotor UAV. Using the pixel location of the target in the image, with measurements of quadrotor position and attitude, and camera pose angles, the target is localized in world coordinates. The main contribution of this paper is to present techniques for reducing the localization error. The localization method has been implemented and tested on a quadrotor UAV and experimental results are presented demonstrating the localization of a target within 10 meters of its known GPS location.

Keywords: Geo-location, UAV, Localization.

1. บทนำ

จากวิสัยทัศน์กองทัพอากาศที่ต้องการเป็น “กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค” (One of the Best Air

Forces in Asian) สอดคล้องตามแนวทางยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ.2561 - 2580) ปัจจุบันอยู่ระหว่างการเสริมสร้างขีดความสามารถของกองทัพอากาศ เพื่อพัฒนาสู่การปฏิบัติการ

ที่ใช้เครือข่ายเป็นศูนย์กลาง ตลอดจนการเสริมสร้างขีดความสามารถในมิติอื่น ๆ ให้สอดคล้องกับสภาวะการณ์ที่เปลี่ยนแปลง โดยได้กำหนดประเด็นยุทธศาสตร์เสริมสร้างสมรรถนะความพร้อมในการป้องกันประเทศเป็นประเด็นหลักของกองทัพอากาศ ในการสนับสนุนให้บรรลุนิยัตินของกองทัพอากาศอย่างเป็นรูปธรรม โดยกำหนดจุดประสงค์เน้นด้านการเสริมสร้างนภาพภาพ การดำเนินการด้านวิจัยและพัฒนาขีดความสามารถระบบการตรวจจับทั้งระบบโดยให้ความสำคัญกับการดำรงความพร้อมของอุปกรณ์ลาดตระเวนทางอากาศ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในนโยบายที่สนับสนุนให้บรรลุนิยัตินของ กองทัพอากาศ โดยเน้นให้มีการดำเนินงานตามแผนอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการพัฒนาและพึ่งพาตนเองอย่างยั่งยืน ในปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับ มีความเหมาะสมอย่างมากกับการกิจลาดตระเวนในการปฏิบัติการทางทหาร ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เนื่องจาก มีความแม่นยำ มีขนาดกระทัดรัด น้ำหนักเบา ส่งผลต่อการใช้งานได้ง่ายและสะดวก สามารถรับ-ส่งข้อมูลข่าวสารในรูปแบบของภาพและตำแหน่งได้ทันทีในขณะเดียวกัน ระบบมีราคาไม่แพง เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ประหยัดงบประมาณในการผลิต และในการซ่อมบำรุง อีกทั้งลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานได้อย่างมาก

ปัจจุบันการนำอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ติดอุปกรณ์การภาพ มาใช้ในการกิจบินลาดตระเวนทางอากาศในพื้นที่ต่าง ๆ เมื่อตรวจพบเป้าหมายที่ต้องการ ก็ต้องนำอากาศยานบินเข้าไปใกล้เป้าหมาย เพื่อทำการบอกพิกัดเป้าหมายนั้น การนำอากาศยานบินเข้าไปใกล้เป้าหมายนั้นอาจทำให้เป้าหมายรู้ตัว และทำให้ภารกิจล้มเหลวได้

ปี 2561 นักเรียนนายเรืออากาศนฤพล ทศนพิมล และนักเรียนนายเรืออากาศปริญญวัฒน์ มั่งคั่ง ได้ทำการวิจัยและพัฒนาโปรแกรมระบุตำแหน่งเป้าหมายบนภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กด้วยการภาพ [1] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของการระบุพิกัดเป้าหมายอยู่ที่มากกว่า 15 เมตร ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง และอุปกรณ์การภาพแบบเดิมขาดเสถียรภาพ ทำให้ยังไม่เหมาะต่อการนำมาใช้ในการปฏิบัติการทางทหาร

บทความนี้นำเสนอวิธีการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของเป้าหมายภาคพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ ด้วยเลเซอร์วัดระยะ ซึ่งความเข้าใจในทฤษฎีการระบุพิกัดเป้าหมายทางภูมิศาสตร์ (Geolocation) นั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบุพิกัดเป้าหมายทางภูมิศาสตร์บนพื้นดิน และผลการทดสอบแสดงถึงความแม่นยำในการระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เมตร ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวสามารถระบุพิกัดเป้าหมายที่สนใจได้ โดยไม่ต้องนำอากาศยานบินเข้าไปใกล้บริเวณเป้าหมายมากเกินไป ทำให้เป้าหมายไม่รู้ตัว และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในงานลาดตระเวนทางอากาศอีกทางหนึ่ง

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการระบุตำแหน่งเป้าหมายบนภูมิประเทศ โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 10 เมตร

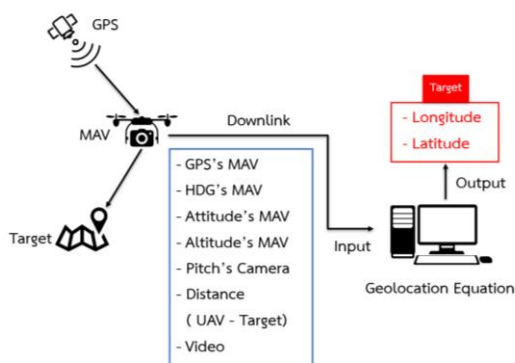
2.2 เพื่อพัฒนาค้นแบบโปรแกรมระบุตำแหน่งเป้าหมายบนภูมิประเทศที่สามารถนำไปปฏิบัติ การกิจทางทหารได้จริงในอนาคต

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับงานวิจัย ได้แก่ ทฤษฎีเฟรมพิกัด (Coordinate Frames) [2] ซึ่งกล่าวถึงวิธีการแปลงเฟรมบนพื้นโลกเป็นเฟรมอากาศยาน (Transformation From the Inertial to the Vehicle Frame) วิธีการแปลงเฟรมอากาศยานเป็นเฟรมลำตัว (Transformation from the Vehicle to the Body Frame) วิธีการแปลงเฟรมลำตัวเป็นเฟรมอุปกรณ์การภาพ (Transformation from the Body to the Gimbal Frame) วิธีการแปลงเฟรมอุปกรณ์การภาพเป็นเฟรมตัวกล้อง (Transformation from the Gimbal to the Camera Frame) และทฤษฎีการระบุพิกัดเป้าหมาย (Geolocation) ซึ่งกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจเทียบกับเฟรมอ้างอิงบนพื้นโลก เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับต่อไป

3.1 หลักการทำงานของโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับ

การระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ สามารถทำได้โดยการนำภาพเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจ ข้อมูลท่าทางการบิน (Roll, Pitch, Yaw) ข้อมูลความสูง (Altitude) และข้อมูลตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (Latitude, Longitude) ของอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งภาพของเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจถูกส่งสัญญาณภาพแบบเวลาจริง (Real Time) ผ่านอุปกรณ์ส่งภาพ (Video Downlink) ที่ความถี่ 5.8 GHz และข้อมูลด้านการบินของอากาศยานไร้คนขับถูกส่งจากอากาศยานไร้คนขับมายังคอมพิวเตอร์ภาคพื้นผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial RS232) ด้วย RFD 900 ที่ความถี่ 900 MHz แล้วนำภาพเป้าหมายบนพื้นดิน และข้อมูลด้านการบินของอากาศยานไร้คนขับ มาทำการประมาณค่าหาตำแหน่งพิกัดของเป้าหมายภาคพื้นดินที่สนใจ ด้วยสมการระบุพิกัดเป้าหมายภาคพื้นดินผ่านโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายภาคพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1

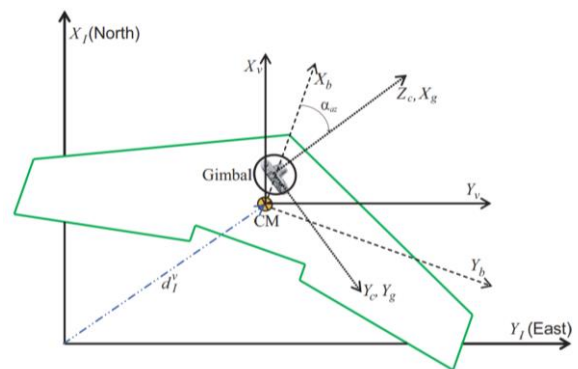


รูปที่ 1 การทำงานของโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับ

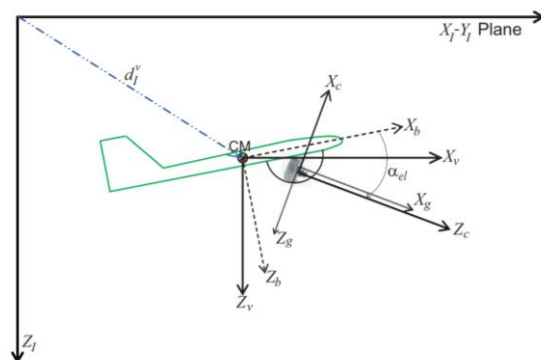
3.2 เฟรมพิกัด (Coordinate Frames)

เฟรมพิกัดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แก่ เฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลก เฟรมอากาศยาน เฟรมลำตัว เฟรมอุปกรณ์การภาพ และเฟรมตัวกล้อง ซึ่งรูปที่ 2 และ 3 แสดงแผนผังของเฟรมพิกัดที่แตกต่างกัน โดยเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกแทนด้วยสัญลักษณ์ (X_I, Y_I, Z_I) เป็นเฟรมที่ตายตัว

โดยมี X_I ชี้ไปทางทิศเหนือ Y_I ชี้ไปทางตะวันออก และ Z_I ชี้ไปที่ศูนย์กลางของโลก เฟรมของอากาศยานแทนด้วยสัญลักษณ์ (X_v, Y_v, Z_v) ซึ่งสามารถเขียนรูปสมการเหมือนกันกับเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกแต่จุดกำเนิดจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของอากาศยาน เฟรมของลำตัวแทนด้วยสัญลักษณ์ (X_b, Y_b, Z_b) มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวล โดย X_b ชี้ไปข้างหน้า Y_b ชี้ไปทางขวาและ Z_b ชี้ลงข้างล่าง ดังที่แสดงในรูปที่ 2 และ 3 เฟรมของอุปกรณ์การภาพแทนด้วยสัญลักษณ์ (X_g, Y_g, Z_g) ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางการหมุนของอุปกรณ์การภาพโดย X_g ชี้ไปตามแกนออปติคัล Z_g ชี้ลงในระนาบแนวภาพและจุด Y_g อยู่ในระนาบภาพ เฟรมของลำตัวกล้องแทนด้วยสัญลักษณ์ (X_c, Y_c, Z_c) มีจุดกำเนิดที่ศูนย์กลางออฟติคัลของกล้องโดย X_c ชี้ขึ้นในภาพ Y_c ชี้ไปทางขวาในระนาบของภาพ และ Z_c ชี้ไปตามแกนออปติคัลของ X_g ดังแสดง ในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 มุมมองด้านข้างของกรอบพิกัด [3]



รูปที่ 3 มุมมองตามยาวของกรอบพิกัด [3]

เฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกและเฟรมอากาศยานจะขนานกับพื้นโลก ส่วนเฟรมลำตัวตัวนั้นจะสอดคล้องกับเฟรมอุปกรณ์การภาพ และเฟรมอุปกรณ์การภาพจะสอดคล้องกับเฟรมลำตัวของกล้อง โดยสัญลักษณ์ v^i แสดงถึงเวกเตอร์ v ที่สะท้อนกลับไปยังเฟรม i ซึ่งเมทริกซ์การหมุน (Rotation matrix) และเวกเตอร์การแปลงเฟรม (Translation vector) จากเฟรม i ไปเฟรม j สามารถเขียนอยู่ในรูปของ R_i^j และ d_i^j ตามลำดับ เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (Homogeneous Transformation Matrix) จากเฟรม i ถึงเฟรม j แสดงดังสมการที่ (1) และเมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ที่ใช้ในบทความนี้แสดงดังตารางที่ 1

$$T_i^j = \begin{bmatrix} R_i^j & -d_i^j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ตารางที่ 1 เมทริกซ์การแปลงแบบเอกพันธ์

Transformation	Description
T_I^v	Inertial to MAV Vehicle frame
T_v^b	MAV Vehicle to MAV Body frame
T_b^g	MAV Body to Gimbal frame
T_g^c	Gimbal to Camera frame

โดยที่: MAV (Miniature Air Vehicle) คือ อากาศยานขนาดเล็ก

3.3 การแปลงจากเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกเป็นเฟรมของอากาศยาน

การเปลี่ยนจากเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกเป็นเฟรมอากาศยานสามารถเขียนอยู่ในรูปของ T_I^v ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2) โดยที่ X_{MAV} และ Y_{MAV} เป็นค่าตำแหน่งของอากาศยาน ซึ่งสามารถวัดได้จาก GPS sensor และ h_{MAV} แสดงถึงระดับความสูงของอากาศยาน ซึ่งสามารถวัดได้จากเซ็นเซอร์ความดันบรรยากาศ (Barometric Pressure Sensor)

$$T_I^v = \begin{bmatrix} i & -d_i^v \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{โดยที่: } d_i^v = \begin{bmatrix} x_{MAV} \\ y_{MAV} \\ -h_{MAV} \end{bmatrix}$$

3.4 การแปลงจากเฟรมอากาศยานไปยังเฟรมลำตัว

การเปลี่ยนจากเฟรมอากาศยานเป็นเฟรมลำตัวนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของ T_v^b ซึ่งประกอบด้วยการหมุนของลำตัวอากาศยานซึ่งใช้การวัดมุมแบบออยเลอร์ (Euler Angles) โดยที่ ϕ, θ และ ψ คือมุมการหมุนของอากาศยาน Roll, Pitch และ Yaw ตามลำดับ มีหน่วยเป็นเรเดียน การแปลงจากเฟรมอากาศยานเป็นเฟรมลำตัวสามารถแสดงดังสมการที่ (3)

$$T_v^b = \begin{bmatrix} R_v^b & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{โดยที่: } R_v^b = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\theta s_\psi & -s_\theta \\ s_\phi s_\theta c_\psi - c_\phi s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi c_\theta \\ c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi & c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix}$$

โดยที่: $c = \cos$ และ $s = \sin$

3.4 การเปลี่ยนแปลงจากเฟรมลำตัวไปยังเฟรมอุปกรณ์การภาพ

การแปลงจากเฟรมลำตัวเป็นเฟรมอุปกรณ์การภาพนั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของ T_b^g ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของอากาศยาน เทียบกับจุดศูนย์กลางการหมุนของอุปกรณ์การภาพ ซึ่งเวกเตอร์แสดงโดย d_b^g และ เวกเตอร์การหมุน R_b^g สามารถหาได้จากการวัดมุมแนวราบและมุมก้ม - เงย ของกล้อง โดยให้ α_{az} แทนมุมแนวราบของการหมุนรอบแกน Z_g และ α_{el} มุมก้ม-เงยของการหมุนรอบแกน Y_g การแปลงจากเฟรมลำตัวไปยังเฟรมอุปกรณ์การภาพสามารถเขียนได้ดังสมการ (4)

$$T_b^g = \begin{bmatrix} R_b^g & -d_b^g \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

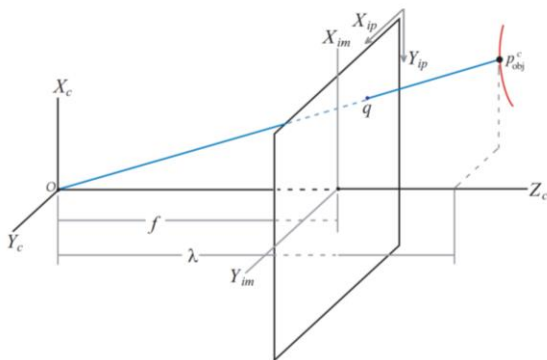
โดยที่:
$$R_b^g = \begin{bmatrix} c_{el}c_{az} & c_{el}s_{az} & s_{el} \\ -s_{el} & c_{az} & 0 \\ -s_{el}c_{az} & -s_{el}s_{az} & c_{el} \end{bmatrix}$$

3.5 การแปลงจากเฟรมอุปกรณ์การภาพเป็นเฟรมตัวกล้อง

การเปลี่ยนจากเฟรมอุปกรณ์การภาพเป็นเฟรมตัวกล้องนั้น สามารถเขียนอยู่ในรูปของ T_g^c ซึ่งขึ้นอยู่กับเวกเตอร์ d_g^c ซึ่งอธิบายตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการหมุนของอุปกรณ์การภาพเทียบกับจุดศูนย์กลางออฟติคัลของกล้อง และ T_g^c ยังขึ้นอยู่กับมุมแบบคงที่ R_g^c ซึ่งสามารถหาได้จากเฟรมพิกัดของกล้องกับเฟรมอุปกรณ์การภาพ ซึ่งสามารถเทียบสมการได้ว่า $X_c = -Z_g$ และ $Z_g = X_g$ การแปลงจากเฟรมอุปกรณ์การภาพเป็นเฟรมตัวกล้องสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$T_g^c = \begin{bmatrix} R_g^c & -d_g^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่:
$$R_g^c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 4 เฟรมพิกัดที่สัมพันธ์ของกล้อง

จากรูปที่ 4 แสดงเฟรมพิกัดที่สัมพันธ์กับกล้อง ซึ่งจุด $q = (X_{ip}, Y_{ip}, 1)^T$ คือ ภาพฉายจากจุดพิกัดเป้าหมายไปยังจุด $p_{obj}^c = (p_x, p_y, p_z, 1)^T$ บนระนาบภาพในหน่วยพิกเซล โดย p_{obj}^c คือตำแหน่งของวัตถุที่สัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางของกล้อง จากเอกสารวิจัยของ Trucco and Verri (2002)[7]

แสดงวิธีในการแปลงหน่วยจากพิกเซลเป็นเมตรของกล้อง ซึ่งสามารถทำการแปลงได้โดยสมการที่ (6)

$$x_{im} = (-y_{ip} + o_y)S_y \quad (6)$$

โดยที่: $y_{im} = (x_{ip} - o_x)S_x$

จากสมการที่ (6) ตำแหน่งของ (X_{ip}, Y_{ip}) มีหน่วยเป็นพิกเซล และตำแหน่งของ (X_{im}, Y_{im}) มีหน่วยเป็นเมตร ค่าพารามิเตอร์ o_x และ o_y คือค่าชดเชยของ X และ Y ไปยังจุดกึ่งกลางของภาพโดยเทียบจากมุมบนซ้ายของภาพ ซึ่งมีหน่วยเป็นพิกเซล และ S_x และ S_y แสดงถึงปัจจัยการแปลงจากพิกเซลเป็นเมตร ด้วยทฤษฎีสองเหลี่ยมคล้ายดังสมการที่ (7)

$$\frac{x_{im}}{f} = \frac{p_x}{p_z} \quad (7)$$

โดยที่: $\frac{y_{im}}{f} = \frac{p_y}{p_z}$

จากสมการที่ 6 และกำหนดให้ $\lambda = P_z$ จะได้

$$\Lambda q = \begin{bmatrix} 0 & f_x & o_x & 0 \\ -f_y & 0 & o_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} p_{obj}^c \quad (8)$$

โดยที่: $f_x = \frac{f}{S_x}, f_y = \frac{f}{S_y}$ และ $\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda I & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาพิกัดเป้าหมายที่สนใจซึ่งก็คือ p_{obj}^I ซึ่งพิกัดดังกล่าวเป็นตำแหน่งของวัตถุบนพื้นดินเทียบกับเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกโดยใช้การแปลงแบบเอกพันธ์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (9)

$$\Lambda q = C p_{obj}^c = C T_g^c T_b^g T_v^b T_I^b p_{obj}^I \quad (9)$$

$$\text{โดยที่: } C = \begin{bmatrix} 0 & f_x & o_x & 0 \\ -f_y & 0 & 0_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (9) สามารถหา p_{obj}^I ได้ดังสมการที่ (10)

$$p_{obj}^I = [CT_g^c T_b^g T_v^b T_I^v]^{-1} \Lambda q \quad (10)$$

ดังนั้นจะสามารถหา p_{obj}^I ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า λ ซึ่ง λ คือ ระยะทางตามแกนออปติคัลของกล้องไปยังวัตถุที่สนใจบนพื้นดิน (Ma et al., 2003)[5] บทความนี้นำเสนอเทคนิคในการประมาณค่าของ λ บนสมมติฐานว่าโลกแบน (flat earth) โดยกำหนดให้ P_{cc} เป็นตำแหน่งของศูนย์กลางของกล้อง และ $P_{cc}^I = (0, 0, 0, 1)^T$ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปเฟรมของกล้อง โดยสามารถแปลงจากเฟรมของกล้องเป็นเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกได้ดังสมการที่ (11)

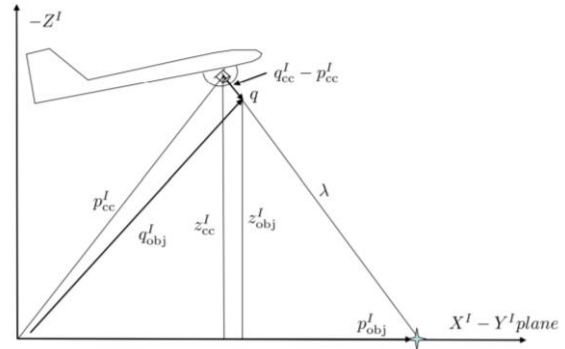
$$p_{cc}^I = \begin{pmatrix} x_{cc}^I \\ y_{cc}^I \\ z_{cc}^I \\ 1 \end{pmatrix} = [T_g^c T_b^g T_v^b T_I^v]^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งของ $q = [x_{ip}, y_{ip}, 1]^T$ โดยที่ q_{obj}^I สามารถหาแปลงเป็นเฟรมพิกัดอ้างอิงบนพื้นโลกได้ดังสมการที่ (12)

$$q_{obj}^I = \begin{pmatrix} x_{obj}^I \\ y_{obj}^I \\ z_{obj}^I \\ 1 \end{pmatrix} = [CT_g^c T_b^g T_v^b T_I^v]^{-1} q \quad (12)$$

จากรูปที่ 5 แบบจำลองแบบพื้นราบของโลก (flat earth model) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบในแนวแกน Z ของ q_{obj}^I และ P_{cc}^I ซึ่งแสดงดังสมการที่ (13)

$$0 = z_{cc}^I + \lambda(z_{obj}^I - z_{cc}^I) \quad (13)$$



รูปที่ 5 ระยะทางไปยังเป้าหมาย λ

จากสมการที่ (13) สามารถหาระยะจากจุดศูนย์กลางของกล้องไปยังเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจได้จากสมการที่ (14)

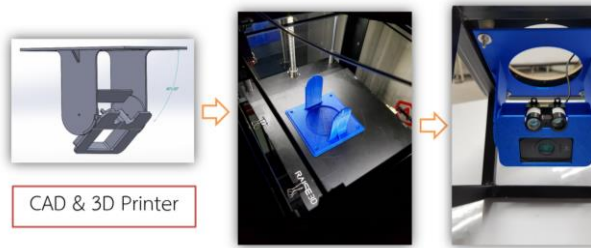
$$\lambda = \frac{z_{cc}^I}{z_{cc}^I - z_{obj}^I} \quad (14)$$

ดังนั้นพิกัดเป้าหมายบนพื้นโลกที่สนใจ สามารถหาได้จากสมการที่ (15)

$$p_{obj}^I = p_{cc}^I + \lambda(q_{obj}^I - p_{cc}^I) \quad (15)$$

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ทำการออกแบบ สร้าง และติดตั้งอุปกรณ์การภาพและเลเซอร์วัดระยะแบบ LIDAR บนอากาศยานไร้คนขับแบบ 4 ใบพัด โดยเริ่มจากการออกแบบอุปกรณ์การภาพในโปรแกรม Solid Works โดยได้ออกแบบให้เหมาะสมกับการติดตั้งเลเซอร์วัดระยะ และกล้องเพื่อกล้องและเลเซอร์วัดระยะมองจุดพิกัดเป้าหมายในมุมมองเดียวกัน หลังจากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์การภาพ โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการขึ้นรูปอุปกรณ์การภาพโดยใช้เทคโนโลยี Additive Manufacturing ในรูปแบบของ Fused Deposition Manufacturing (FDM) หรือการขึ้นรูปแบบสามมิติผ่านเครื่อง 3D Printer โดยมีความละเอียดในการสร้างชิ้นงานสูงในระดับ $15\text{m}\mu$ หรือประมาณ 0.0015 mm ซึ่งวัสดุที่ใช้คือ PLA และทำการประกอบอุปกรณ์การภาพ และติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะบนอากาศยานไร้คนขับแบบ 4 ใบพัด ดังแสดงดังรูปที่ 6 และ 7

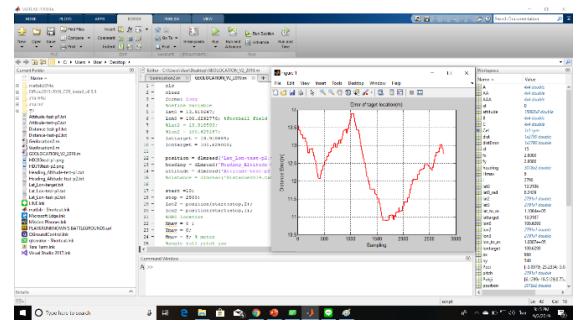


รูปที่ 6 แสดงการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การภาพ

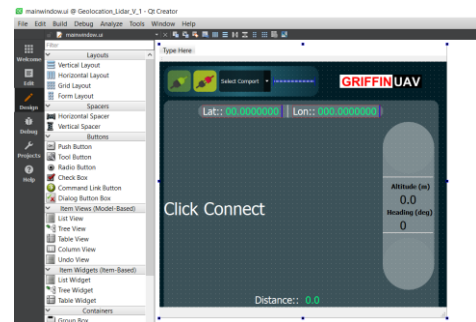


รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การภาพบนอากาศยานไร้คนขับแบบ 4 ใบพัด

4.2 ทำการพัฒนาโปรแกรมระบุเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจจากอากาศยานไร้คนขับ โดยเริ่มจากการทดสอบความถูกต้องของสมการด้วยการจำลองผ่านโปรแกรม Matlab ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยทำการบินเพื่อเก็บค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการประมาณค่าตำแหน่งพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจและนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณผ่านสมการที่ (15) แล้วนำค่าที่คำนวณได้มาทำการเปรียบเทียบกับตำแหน่งของพิกัดเป้าหมายจริงใน Google Map เพื่อดูค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่า และตรวจสอบความถูกต้องของสมการก่อนนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการพัฒนาโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ บนพื้นฐานของภาษา C++ เมื่อได้สมการการระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินที่สนใจที่ถูกต้องแล้ว จึงทำการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้แสดงค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณรวมถึงข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการแสดง ในรูปของ Graphical User Interface (GUI) ซึ่งพัฒนาบนพื้นฐานภาษา C++ ด้วยโปรแกรม Qt Creator ดังแสดงตามรูปที่ 9



รูปที่ 8 แสดงการทดสอบความถูกต้องของสมการระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับด้วย MATLAB



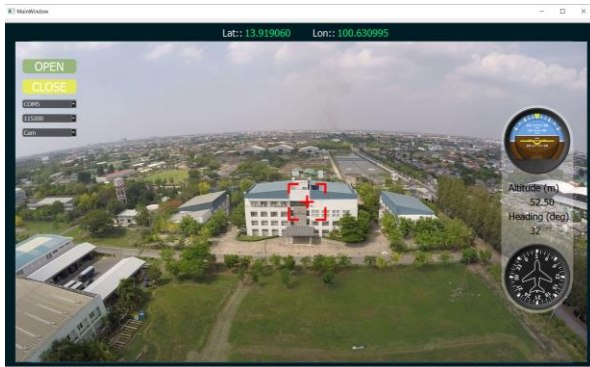
รูปที่ 9 แสดงการพัฒนา Graphical User Interface (GUI) บนพื้นฐานภาษา C++ ด้วยโปรแกรม Qt Creator

4.3 ทำการพัฒนาโปรแกรมสำหรับอ่านค่าจากเลเซอร์วัดระยะแบบ LIDAR [5] และทำการทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์วัดระยะ โดยทำการสอบเทียบกับดัลบีเมตรและเครื่องวัดระยะแบบ LOMVUM ซึ่งเซนเซอร์วัดระยะแบบ LIDAR มีระยะการใช้งานอยู่ที่ 60 เมตร และมีความแม่นยำอยู่ที่ ± 1 เซนติเมตร

4.4 ทำการทดสอบโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ โดยการทำการบินทดสอบจริงดังแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 4.4.1 ทำการทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าตำแหน่งของอากาศยานที่ได้จาก GPS Sensor
- 4.4.2 ทำการบินทดสอบที่ความสูงจากพื้นดิน 30 เมตร และทดสอบที่มุมก้มของอุปกรณ์การภาพที่มุมก้ม 30 และ 45 องศา เพื่อหาค่าความแม่นยำในการระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินโดยใช้เป้าหมายชนิดเดียวกัน
- 4.4.3 ทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุพิกัดตำแหน่งเป้าหมายบนพื้นดินที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

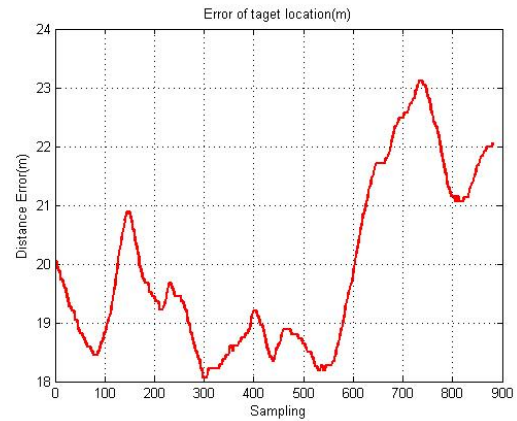
4.4.4 ทำการปรับปรุงโปรแกรม เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนในการระบุพิกัดตำแหน่งเป้าหมายต่ำกว่า 10 เมตร สำหรับการนำไปใช้งานจริงต่อไป



รูปที่ 10 การบินทดสอบโปรแกรมระบุตำแหน่งเป้าหมายบนพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ

5. ผลการทดลอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการบินทดสอบและปรับปรุงโปรแกรมระบุตำแหน่งพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับจำนวน 15 ครั้ง โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์สรุปผลหลังจากนั้นทำการแก้ไขข้อผิดพลาดข้อบกพร่องที่ส่งผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งนั้นมีวัตถุประสงค์ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งเพื่อให้ได้ผลการทดสอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยการบินทดสอบครั้งที่ 1-5 เป็นการบินทดสอบโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายภาคพื้นดินที่ได้พัฒนาขึ้นแบบยังไม่ติดตั้งเลเซอร์วัดระยะซึ่งจากผลการบินทดสอบโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 20 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 และจากงานวิจัยและพัฒนาโปรแกรมระบุตำแหน่งเป้าหมายบนภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กด้วยการภาพ [1] ซึ่งได้พัฒนาโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายภาคพื้นดินแบบไม่ได้ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะ และได้ทำการบินทดสอบจริงพบว่า ผลการการบินทดสอบโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุพิกัดเป้าหมายมากกว่า 15 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับการบินทดสอบครั้งที่ 1-5



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนจากการบินทดสอบแบบไม่ได้ติดตั้งเลเซอร์วัดระยะ

$$p_{obj}^I = p_{cc}^I + \lambda(q_{obj}^I - p_{cc}^I)$$

GPS location of MAV

Estimating range to target

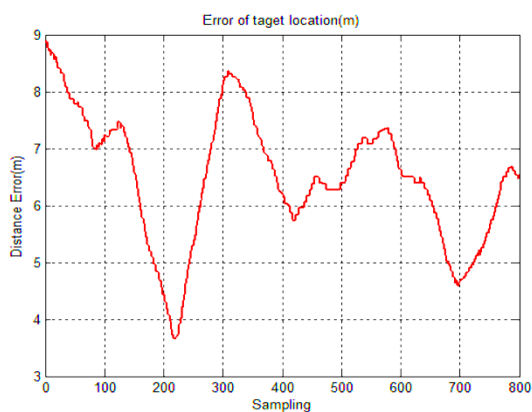
รูปที่ 12 ปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งพิกัดเป้าหมายบนพื้นดิน

จากรูปที่ 12 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งพิกัดเป้าหมายบนพื้นดิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินนั้น เกิดขึ้นจาก 2 ส่วนด้วยกันคือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก GPS Sensor และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าของระยะระหว่างกล้องถึงเป้าหมาย ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีสาเหตุมาจากความไม่แม่นยำของเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดท่าทางการบิน และเซนเซอร์วัดความสูง ดังนั้นการทดลองครั้งที่ 6-8 เป็นการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS Sensor ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งความแม่นยำของการวัดค่าตำแหน่งนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมที่ GPS สามารถรับได้ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งของ GPS แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งของ GPS Sensor เทียบกับจำนวนดาวเทียมที่ GPS Sensor สามารถรับได้

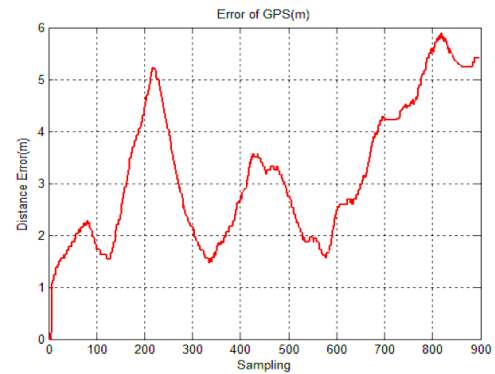
จำนวนดาวเทียมของ GPS (ดวง)	ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
10	7
12	5
13	4
14	4
15	3

การบินทดสอบครั้งที่ 9 - 15 เป็นการทำการบินทดสอบโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดิน แบบติดตั้งเลเซอร์วัดระยะ โดยให้อากาศยานบินอยู่กับที่ (Hovering) ที่ความสูง 30 เมตร แล้วหันกล้องไปยังเป้าหมายภาคพื้นดิน และทดสอบที่มุมก้มของกล้องที่ 30 และ 45 องศา ซึ่งผลการบินทดสอบแสดงในรูปที่ 13 - 16



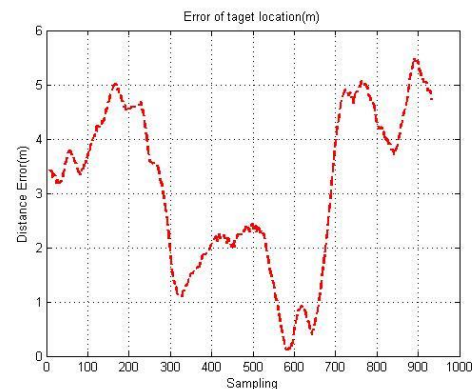
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่มุมก้ม 30 องศา

ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS ขณะทำการบินทดสอบที่มุมก้ม 30 องศา ดังแสดงดังรูปที่ 14



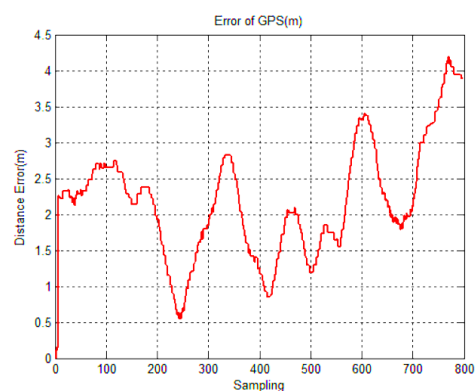
รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS ขณะทำการบินทดสอบที่มุมก้ม 30 องศา

ผลการบินทดสอบหาค่าคลาดเคลื่อนที่มุมก้ม 45 องศา ดังแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่มุมก้ม 45 องศา

ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS ขณะทำการบินทดสอบที่มุมก้ม 45 องศา ดังแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS

ขณะทำการบินทดสอบที่มุมก้ม 45 องศา

จากผลการบินทดสอบ โปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดินแบบคิดเลขอร์วัตรระยะที่มุมก้มต่าง ๆ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ดังนี้

ที่ระดับมุมก้ม 30 องศา มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6.1 เมตร และขณะทำการบินทดสอบ มีค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS ขณะทดสอบเฉลี่ย 3.3 เมตร

ที่ระดับมุมก้ม 45 องศา มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4 เมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS ขณะทดสอบเฉลี่ย 2.3 เมตร

ซึ่งผลจากการบินทดสอบทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการระบุตำแหน่งของโปรแกรมระบุพิกัดเป้าหมายบนพื้นดิน คือ

1. ค่าความแม่นยำจากเซนเซอร์วัตรระยะ
2. ค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ได้จาก GPS Sensor
3. ลักษณะพิกัดเป้าหมายซึ่งมีผลต่อการสะท้อนกลับของคลื่นจากเซนเซอร์วัตรระยะ เป็นต้น

6. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงวิธีการเพิ่มความแม่นยำในการระบุพิกัดเป้าหมายจากอากาศยานไร้คนขับแบบ 4 ใบพัด โดยการนำเลเซอร์วัตรระยะติดตั้งเพิ่มเติม จากเดิมใช้การประมาณค่าผ่านสมการ Geolocation [3] ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากการระบุพิกัดเป้าหมายมากกว่า 15 เมตร เพื่อทำการลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว นักวิจัยจึงนำเลเซอร์วัตรระยะมาทำการติดตั้ง พัฒนาโปรแกรมเพิ่มเติมจากเดิม และทำการบินทดสอบจริง ซึ่งจากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าที่ระดับมุมก้ม 30 และ 45 องศา มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4 – 7 เมตร เป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนจากความแม่นยำของค่า GPS ในขณะทำการทดสอบ ซึ่งในระหว่างการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของ GPS เฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 - 6 เมตร และจากผลการทดสอบครั้งนี้ ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือ ค่าความแม่นยำจากตัวเซนเซอร์วัตรระยะ, ค่าแม่นยำเซนเซอร์ระบุตำแหน่ง GPS และลักษณะพิกัดเป้าหมายซึ่งมีผลต่อการสะท้อนกลับของคลื่น

จากเซนเซอร์วัตรระยะ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพล ทศนพิมล และ ปรัชญาวัต มั่งคั่ง. (2561). การพัฒนาโปรแกรมระบุตำแหน่งเป้าหมายบนภูมิประเทศจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กด้วยระบบการภาพ. โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช.
- [2] Beard and McLain. (2012). **Small Unmanned Aircraft**. Princeton: Princeton University Press.
- [3] D, Blake Barber. (2006). Vision-based Target Geo-location using a Fixed-wing Miniature Air Vehicle. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 47(4): 361-382.
- [4] Wikipedia. (2019). Latitude. Retrieved on July 20, 2019, from <http://en.wikipedia.org/wiki/Latitude>.
- [5] Ma, Y., Soatto, S., Kosecka, J., and Sastry, S. S. (2003). **An Invitation to 3-D Vision from Images to Geometric Models**. New York: Springer Verlag.
- [6] Sparkfun Electronics. (2019). LIDAR – Lite v3 Hookup Guide. Retrieved on July 20, 2019, from <http://Learn.sparkfun.com/tutorials/lidar-lite-v3-hookup-guide/all>.
- [7] Trucco, E. and Verri, A. (2002). **Introductory Techniques for 3-D Computer Vision**. Prentice-Hall. New Jersey: Prentice Hall.