

การประมาณค่าความสูงสำหรับการลงจอดอัตโนมัติของอากาศยาน 4 ใบพัด โดยใช้ระบบการเห็นภาพ

An Altitude Estimation Technique for Autonomous Landing of a Quadrotor Using a Vision System

ร.ท. จีระศักดิ์ หมวดโพธิ์กลาง¹, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

* ติดต่อ: โทรศัพท์ 0 2218 6585, โทรสาร 0 2218 6583

Email : jeerasak.m@student.chula.ac.th, viboon.s@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการประมาณค่าความสูง เพื่อใช้สำหรับการลงจอดอัตโนมัติของอากาศยานแบบใบพัด ที่สามารถขึ้นลงได้ในแนวดิ่ง เช่น อากาศยานแบบ 4 ใบพัด (Quadrotor) ในงานวิจัยนี้จะแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบแผ่นเป้าหมาย (Landing Pad Target) ที่ใช้สำหรับการลงจอดอัตโนมัติของอากาศยาน ที่สามารถขึ้นลงในแนวดิ่ง การออกแบบแผ่นเป้าหมาย จะต้องคำนึงถึงลำดับขั้นตอนในการลงจอดของอากาศยาน ลำดับขั้นตอนการลงจอด จะถูกนำมาปรับเป็นลำดับขั้นตอนการจับภาพแผ่นเป้าหมาย เพื่อนำภาพที่ได้มาทำการประมาณค่าตำแหน่งของอากาศยานที่ระดับความสูงที่ประมาณได้ ที่ระดับต่างๆ กัน ดังนั้นแผ่นเป้าหมาย ต้องประกอบด้วยข้อมูลที่ทำให้เราสามารถปรับการประมาณค่าความสูงได้ ในขณะที่ทำการลงจอดอัตโนมัติ ผลของการออกแบบแผ่นเป้าหมาย จะแสดงในรูปแบบการเปรียบเทียบตำแหน่งความสูงที่เกิดขึ้นจริง กับตำแหน่งความสูงที่ได้จากการประมาณค่า โดยใช้เทคนิคที่นำเสนอ

คำหลัก: Quadrotor, Autonomous landing, Vision, Estimation

Abstract

This research work is to purpose a technique for estimating of altitude for autonomous landing of a rotorcraft which can be landed in vertical direction such as Quadrotor. The detail about the design of a Landing Pad Target used for Autonomous landing is explained. The autonomous landing procedure will be map to the landing pad detection and altitude estimation algorithm. The landing pad will consist of graphic information needed for altitude estimation during the autonomous landing. The experimental results will show the effective of the design of the landing pad.

1. บทนำ

ลำดับขั้นตอนที่ยากที่สุดสำหรับอากาศยานไร้คนบิน (UAV) คือการนำอากาศยานลงจอดด้วยความปลอดภัย หากผู้ที่ทำการบังคับอากาศยาน ไม่มีความชำนาญในการบังคับอากาศยานในการลงจอด อาจ

ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวอากาศยานได้ จากสาเหตุข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยสนใจในการศึกษาหาความเป็นไปได้ ของการลงจอดอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนบินหลายใบพัด (Multi-rotor UAV) เนื่องจากระบบอากาศยานไร้คนบินหลายใบพัด (Multi-rotor UAV

CST-2003

System) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านพลเรือน และทางด้านทหาร อาทิเช่น การเข้าไปในพื้นที่ ๆ เสี่ยงอันตราย เข้าไปในพื้นที่ ๆ เข้าถึงได้ยาก ซึ่งงานจำพวกนี้ต้องอาศัยอุปกรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี

อากาศยานไร้คนบิน (UAV) จึงเข้ามามีบทบาทอย่างมากในงานที่ใดกล่าวมาในข้างต้น โดยอากาศยานที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอากาศยาน 4 ใบพัด (Quadrotor) มีขนาดเล็ก สามารถบรรทุกอุปกรณ์ได้น้อย มีความคล่องตัวสูง ใช้เวลาในการเตรียมการก่อนบินน้อย และเมื่อนำมาเทียบกับเฮลิคอปเตอร์ จะเห็นว่าอากาศยาน 4 ใบพัด (Quadrotor) นั้นมีราคาถูกกว่า การบำรุงรักษาน้อยกว่า มีเสถียรภาพในการบินที่ดีกว่า และที่สำคัญมีความปลอดภัยต่อมนุษย์สูงกว่า เนื่องจากใบพัดมีขนาดเล็ก และเบา

การออกแบบอากาศยานไร้คนบิน ให้สามารถบินได้อัตโนมัติ ตามภารกิจที่ได้รับมอบหมาย ไม่ว่าจะเป็นการนำอากาศยานขึ้น การบินเดินทาง และการลงจอด โดยปราศจากการควบคุมจากมนุษย์นั้น ได้ทำกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน AscTec Pelican จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีระบบควบคุมในการรักษาเสถียรภาพที่ดี แต่ยังมีขาดระบบการลงจอดอัตโนมัติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำ AscTec Pelican มาวิจัยในส่วนของระบบเห็นภาพ (vision system) มาทำงานร่วมกับ Landing Pad Target เพื่อใช้ในการลงจอดอัตโนมัติของ AscTec Pelican ต่อไป

1.1 อากาศยาน 4 ใบพัด (The Quadrotor “AscTec Pelican”)

AscTec Pelican เป็นอากาศยาน 4 ใบพัด ที่ประกอบด้วย Brushless DC Motor จำนวน 4 ตัว ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) หลากหลายประเภท ประกอบไปด้วย accelerometer, gyros, magnetic field sensor, pressure sensor และGPS module โดยทำงานที่ความเร็ว 1 kHz โดยทำการ

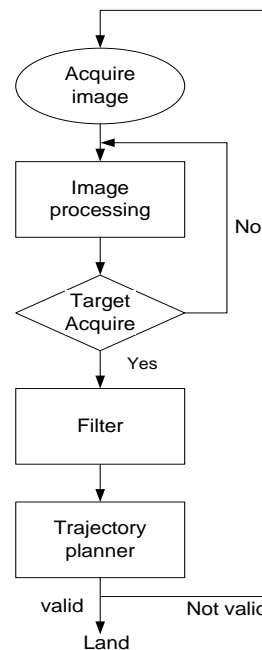
รับ - ส่งข้อมูลผ่าน IEEE 802.15.4 radio module (XBeePro) AscTec Pelican มีระบบควบคุมเสถียรภาพของอากาศยาน แต่ยังไม่มียังไม่มีระบบการนำอากาศยานขึ้นบิน และลงจอดได้อัตโนมัติ AscTec Pelican สามารถบรรทุกอุปกรณ์ได้สูงสุด 650 g และบินได้นานประมาณ 20 – 25 นาที

2. แผ่นเป้าหมาย (Landing Pad Target)

การออกแบบแผ่นเป้าหมาย จะต้องคำนึงถึงถึงลำดับขั้นตอนในการลงจอดของอากาศยาน ลำดับขั้นตอนการลงจอด จะถูกนำมาปรับเป็นลำดับขั้นตอนการจับภาพแผ่นเป้าหมายเพื่อนำภาพที่ได้ มาทำการประมาณค่าตำแหน่งของอากาศยาน ที่ระดับความสูงที่ประมาณได้ที่ระดับต่างๆ กัน ดังนั้นแผ่นเป้าหมายต้องประกอบด้วยข้อมูล ที่ทำให้เราสามารถปรับการประมาณค่าความสูงได้ ในขณะที่ทำการลงจอดอัตโนมัติ

2.1 ลำดับขั้นตอนการลงจอดของอากาศยาน 4 ใบพัด โดยใช้ระบบการเห็นภาพ

ลำดับขั้นตอนการลงจอดของอากาศยาน 4 ใบพัด โดยใช้ระบบการเห็นภาพนั้น แสดงในรูปที่ 1 [3]



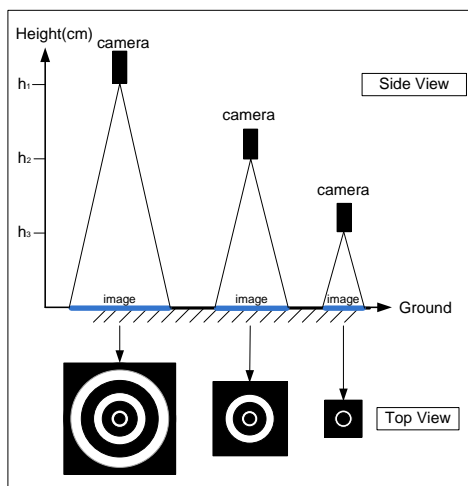
รูปที่ 1 แสดงลำดับขั้นตอนการลงจอดของอากาศยาน 4 ใบพัด โดยใช้ระบบการเห็นภาพ

CST-2003

2.2. การออกแบบแผ่นเป้าหมาย (Landing Pad Target Design)

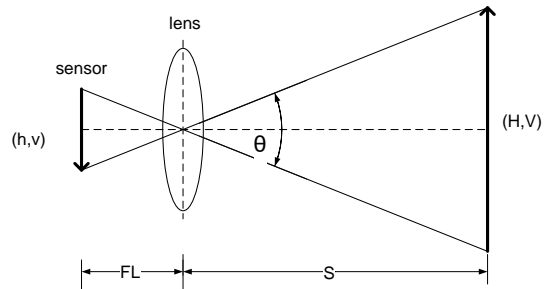
แผ่นเป้าหมาย (Landing Pad Target) นั้นมีส่วนสำคัญ ในระบบลงจอดอัตโนมัติสำหรับอากาศยาน 4 ใบพัด (Autonomous Landing System For a Quadrotor) โดยใช้ระบบการเห็นภาพ (Vision System) หลังจากทำการจับแผ่นเป้าหมาย โปรแกรมจะทำการประมาณค่าความสูงของอากาศยาน แล้วนำค่าความสูงที่ได้จากการประมาณค่า มาใช้ในการควบคุมการลงจอดของอากาศยาน 4 ใบพัด

แนวคิดในการออกแบบแผ่นเป้าหมายนั้น นักวิจัยเน้นการออกแบบอย่างเรียบง่าย และเหมาะสมกับงานที่ใช้ สามารถทำงานได้ดีในช่วงที่ความสูงต่าง ๆ และสามารถทำงานได้ในกรณีที่กล้องไม่สามารถมองเห็นแผ่นเป้าหมายได้ชัดเจน ยกตัวอย่างเช่น อากาศยานไถลออกไปด้านข้างของแผ่นเป้าหมาย เป็นต้น ในการออกแบบแผ่นเป้าหมายจะต้องคำนึงถึงลำดับขั้นตอนการลงจอดของอากาศยาน โดยขั้นตอนการลงจอดของอากาศยาน 4 ใบพัดในงานวิจัยนี้จะเริ่มจาก อากาศยานตั้งล้อยู่เหนือแผ่นเป้าหมาย ที่ความสูงเริ่มต้น กล้องจะสามารถมองเห็นวงแหวนทุกวงในแผ่นเป้าหมาย เมื่ออากาศยานเริ่มเคลื่อนที่ลงมาเรื่อยๆ จำนวนวงแหวนที่ถูกจับภาพ ก็จะลดจำนวนลงมาเรื่อยๆ ตามลำดับ จนกระทั่งอากาศยานลงจอดได้อย่างสมบูรณ์ โดยลักษณะการมองเห็นภาพของกล้อง แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการมองเห็นแผ่นเป้าหมายของกล้องที่ความสูงต่างๆ

จากรูปที่ 2 ขนาดของวงแหวนสามารถออกแบบได้จากการคำนวณ จากสมการการเห็นภาพ (Field Of View "FOV") [6] ดังแสดงในสมการที่ 1 และสมการที่ 2



รูปที่ 3 แสดงมุมมองของกล้องที่เกิดขึ้นทางด้านข้างจากรูปที่ 3 สามารถสร้างสมการได้ดังสมการที่ 1 และสมการที่ 2

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{h}{2FL} \quad (1)$$

$$H = \frac{h}{FL} \times S \quad (2)$$

โดยที่ h = ขนาดของภาพเสมือนในแนวนอน
 v = ขนาดของภาพเสมือนในแนวตั้ง
 H = ขนาดของภาพจริงในแนวนอน
 V = ขนาดของภาพจริงในแนวตั้ง
 FL = ความยาวโฟกัส
 S = ระยะของภาพ
 θ = มุมมองของกล้อง

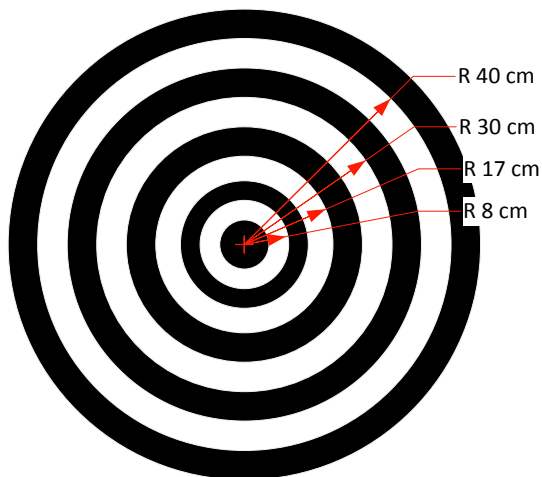
กล้องที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้คือกล้อง web camera Logitech C920 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกล้อง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกล้อง

พารามิเตอร์	ขนาดของตัวตรวจจู้ของกล้อง
h	4.8 mm
v	3.6 mm
d	6 mm

CST-2003

การคำนวณจากสมการที่ 1 จะได้ค่า $FL = 3.7 \text{ mm}$ ค่า FL ที่หามาได้ ถูกนำมาใช้ในการออกแบบขนาดของวงแหวนบนแผ่นเป้าหมาย ในช่วงความสูงต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับความสูง 50 cm ผลการคำนวณจากสมการที่ (2) จะได้ค่า $H = 64 \text{ cm}$ รัศมีของวงกลมจะมีค่าเท่ากับ $\frac{H}{2}$ ดังนั้นรัศมีของวงแหวนจะมีค่าเท่ากับ 32 cm และใช้งานที่ช่วงความสูง 50 cm ขึ้นไปเป็นต้น ในการทดลองนี้นักวิจัยได้ออกแบบแผ่นเป้าหมาย ที่ประกอบไปด้วยวงแหวนสีขาวจำนวน 4 วงบนพื้นหลังสีดำ โดยเริ่มจากรัศมีวงนอกสุดมีค่าเท่ากับ 40 cm โดยมีอัตราส่วนระหว่างรัศมีภายในต่อรัศมีภายนอกเป็น 85%, 75%, 65% และ 50% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 โดยจำนวน และขนาดของวงแหวนนั้น สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยขึ้นอยู่กับช่วงความสูงที่ใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการเพิ่มช่วงความสูงในการใช้งาน เราก็ทำการเพิ่มจำนวนวงแหวนให้มากขึ้น และขนาดให้ใหญ่ขึ้น โดยค่าอัตราส่วนจะถูกนำมาใช้ในการระบุหมายเลขให้กับวงแหวนแต่ละวง เพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมคำนวณหาระยะความสูงต่อไป



รูปที่ 4 แผ่นเป้าหมาย (Landing Pad Target)

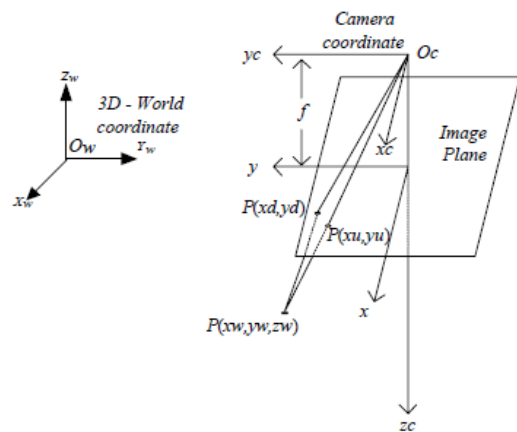


รูปที่ 5 อากาศยาน 4 ใบพัด และแผ่นเป้าหมายที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3. การตรวจจับแผ่นเป้าหมาย (Landing Pad Target Detection)

3.1 แบบจำลองของกล้อง (Camera Model) [4]

แบบจำลองของกล้อง (Camera Model) เป็นการจำลองถึงลักษณะการเกิดภาพ บนระนาบของภาพ จากวัตถุใน 3 มิติ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะทำให้ได้สมการ ที่แสดงความเชื่อมโยงระหว่างการแปลงในระบบพิกัดต่างๆ เริ่มจากการแปลงพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดโลก 3 มิติ (3D world coordinate system) ไปสู่ระบบพิกัดในคอมพิวเตอร์ (computer image coordinate system or pixel coordinate)



รูปที่ 6 แสดงลักษณะของแบบจำลองกล้อง[4]

จากรูปที่ 6 ระบบพิกัดโลกสามมิติ (3-D World Coordinate System) และระบบพิกัดกล้อง (Camera Coordinate System) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของทั้งสองระบบได้คือ

CST-2003

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (3)$$

โดยที่ R เป็น 3×3 Rotation matrix

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (4)$$

และ T เป็น Translation vector

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

จากนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของระบบพิกัดกล้อง (Camera Coordinate System) กับระบบพิกัดภาพ (Image Plane Coordinate System) โดยพิจารณาว่ากล้องเป็นแบบ Pinhole Camera Model คือ

$$x_u = f \frac{x}{z} \quad (6)$$

$$y_u = f \frac{y}{z} \quad (7)$$

3.2 ขั้นตอนการตรวจจับแผ่นเป้าหมาย (Target Detection Algorithm) [1], [2]

ลำดับขั้นตอนของการตรวจจับแผ่นเป้าหมายแสดงในรูปที่ 7 โดยในงานวิจัยนี้ ทำการเขียนโปรแกรมโดยภาษา C/C++ บนพื้นฐานของ OpenCV [5] มาช่วยในการตรวจจับแผ่นเป้าหมาย ความละเอียดของภาพอยู่ที่ 640×480 หลังจากที่ทำกรจับภาพเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนแรกของการประมวลผลภาพ (image processing) คือการแปลงภาพให้เป็นภาพระดับสีเทา (Gray scale image) ขั้นตอนต่อมาทำการแปลงภาพจาก Gray scale image เป็นภาพไบนารี (Binary image) โดยนำเทคนิคของ Threshold เข้ามาช่วยในการแปลงภาพ

ให้เป็น Binary image ขั้นตอนต่อมา ทำการกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออก เพื่อความแม่นยำสำหรับการตรวจจับแผ่นเป้าหมาย เมื่อได้ภาพแผ่นเป้าหมายตามที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อมาทำการ คำนวณหาค่าจุดศูนย์กลางของวงแหวน หาร์มึภายใน และรัศมีภายนอกของวงแหวน ขั้นตอนต่อมาทำการกำหนดหมายเลขให้กับวงแหวนแต่ละวง โดยใช้อัตราส่วนของรัศมีภายนอกต่อรัศมีภายใน (C_r) ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$C_r = \frac{r_{out}}{r_{in}} \quad (8)$$

โดยที่ r_{out} = ขนาดรัศมีภายนอกของวงแหวน

r_{in} = ขนาดรัศมีภายในของวงแหวน

สาเหตุที่ต้องระบุตัวเลข ให้กับวงแหวนแต่ละวงนั้นก็เพื่อนำค่ารัศมีจริงของวงแหวนที่ถูกจับภาพ มาใช้ในการคำนวณหาระยะระหว่างกล้องกับแผ่นเป้าหมาย เนื่องจากเรารู้ค่าพารามิเตอร์ของกล้อง รู้ขนาดของวงแหวนจากภาพ และรู้ขนาดวงแหวนจากแผ่นเป้าหมาย ดังนั้นเราจึงสามารถประมาณค่าความสูงของอากาศยานเหนือแผ่นเป้าหมาย ได้จากสมการที่ (9) โดยสมมุติว่าอากาศยานบินขนานกับแผ่นเป้าหมาย

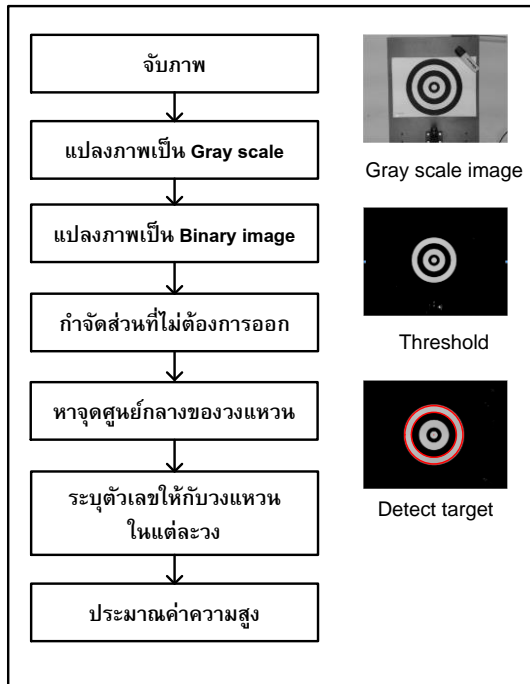
$$h_i = \frac{1}{2} \left(\frac{r_{i,out}[cm]}{r_{i,out}[pix]} + \frac{r_{i,in}[cm]}{r_{i,in}[pix]} \right) \alpha (pix) \quad (9)$$

โดยที่ h_i = ระยะความสูงที่ตำแหน่ง i ใดๆ (cm)

α = เมตริกของกล้อง (pix)

ขั้นตอนสุดท้าย ทำการทดลองแล้วทำการเปรียบเทียบระหว่าง การประมาณค่าความสูงจากโปรแกรม กับความสูงที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลอง แล้วคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

CST-2003



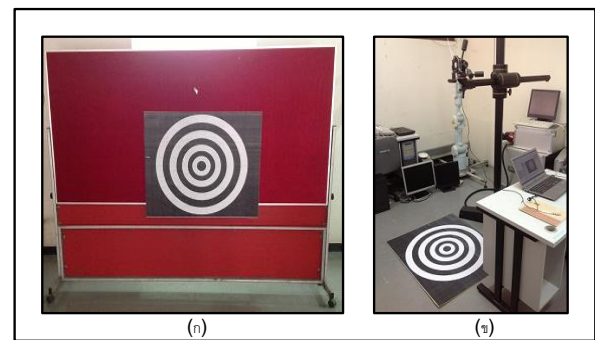
รูปที่ 7 ลำดับขั้นตอนในการจับแผ่นเป้าหมาย (Target detection algorithm)

4. การทดลองประเมินค่าความสูง โดยระบบการเห็นภาพ

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ เพื่อทำการพิสูจน์ค่าที่ได้จากการประเมินค่า โดยลำดับขั้นตอนที่กล่าวไว้ในข้างต้น โดยผลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาใช้ในการควบคุมการลงจอดอัตโนมัติต่อไป ในบทความนี้ได้ทำการทดลองใน 2 ลักษณะด้วยกันคือ 1.ทดลองประเมินค่าความสูงที่ระยะสูงสุด 3 m ในแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และ 2.ทดลองทำการประเมินค่าความสูงในแนวตั้งที่ระยะสูงสุด 2 m ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) สาเหตุที่ทำการทดลองในแนวระดับ ก็เพื่อทำการทดลองในระยะที่ไกลขึ้น เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองในแนวตั้ง ที่สามารถทำการทดลองที่ระยะสูงสุดเพียง 2 m เท่านั้น แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาทำการหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 9, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ โดยรูปที่ 9 และรูปที่ 11 แสดงการ

เปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่าความสูงเหนือแผ่นเป้าหมาย เทียบกับระยะความสูงที่เกิดขึ้นจริง รูปที่ 10 และรูปที่ 12 แสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าความสูง โดยค่าความผิดพลาดจากรูปที่ 10 และรูปที่ 12 จะเห็นว่าที่ระยะห่างจากแผ่นเป้าหมายเท่ากัน จะมีค่าความผิดพลาดต่างกัน เป็นผลมาจากปริมาณของแสงในขณะทำการทดลองไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดไม่เท่ากัน และที่ระดับความสูงต่ำกว่า 80 cm ผลจากการทดลองจะพบว่าค่าความผิดพลาดจะมีค่าเป็นลบเสมอ แต่ไม่ส่งผลต่อการลงจอดอัตโนมัติของอากาศยาน 4 ใบพัด เพราะค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยมาก และค่าความผิดพลาดมีค่าสูงสุดในการทดลองน้อยกว่า ± 1 cm



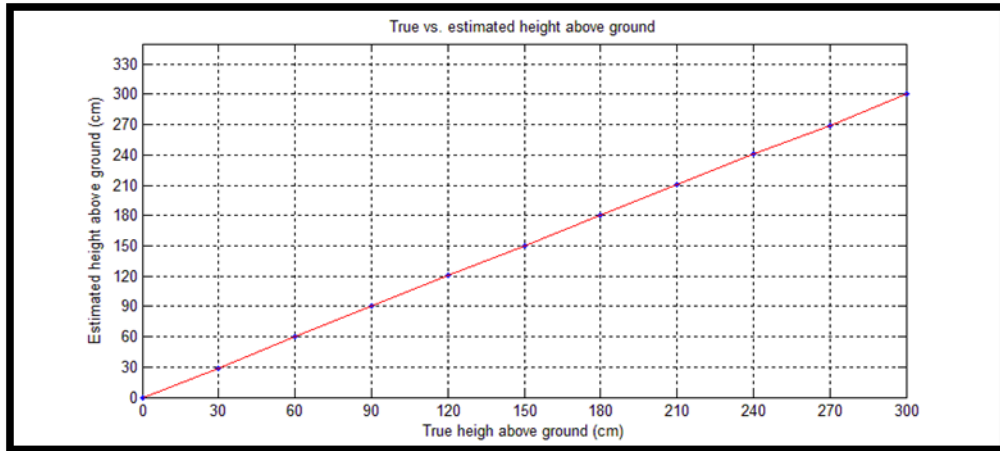
รูปที่ 8 (ก) ทดลองประเมินค่าระยะทางในแนวระดับ
(ข) ทดลองประเมินค่าความสูงในแนวตั้ง

5. สรุปผลการทดลอง

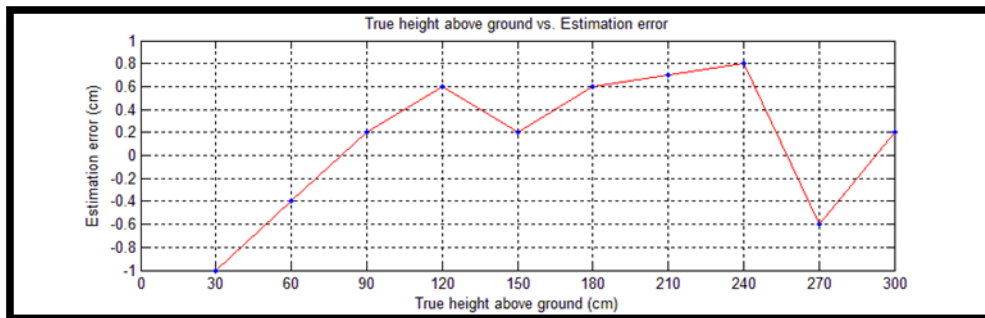
บทความนี้นำเสนอ ลำดับขั้นตอนในการออกแบบแผ่นเป้าหมาย และลำดับขั้นตอนในการตรวจจับแผ่นเป้าหมาย ที่มีความน่าเชื่อถือเพื่อนำมาใช้ในการทำการลงจอดอัตโนมัติสำหรับอากาศยาน 4 ใบพัด การประมาณค่าความสูงจะสัมพันธ์กับแผ่นเป้าหมาย เนื่องจากเรทราปค่าจริงของวงแหวนที่อยู่ในแผ่นเป้าหมาย และค่าพารามิเตอร์ของกล้องการทดลองเป็นการพิสูจน์ประสิทธิภาพ และความแม่นยำของกาตรวจจับแผ่นเป้าหมาย โดยแผ่นเป้าหมายสามารถนำไปใช้ได้จริง ในการทำการควบคุมการลงจอดอัตโนมัติของอากาศยาน 4 ใบพัด

CST-2003

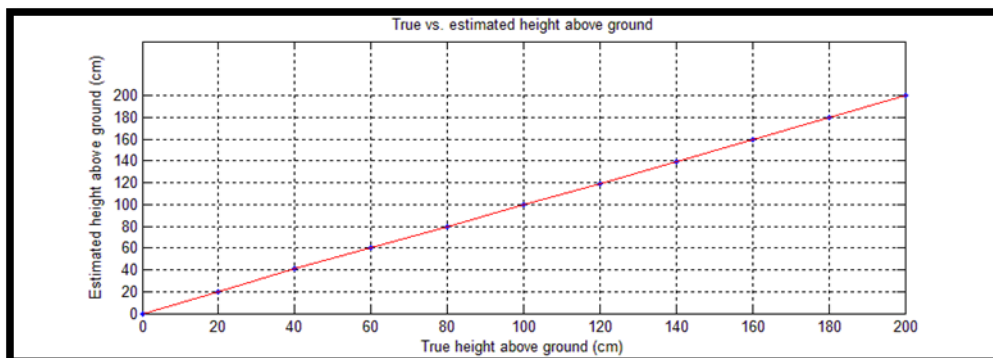
บนพื้นฐานของลำดับขั้นตอนการตรวจจับแผ่น
 เป้าหมายที่ได้นำเสนอในข้างต้น



รูปที่ 9 แสดงค่าความสูงที่ได้จากการประมาณค่าเหนือแผ่นเป้าหมาย
 เทียบกับระยะความสูงที่เกิดขึ้นจริง ที่ระยะสูงสุด 300 cm

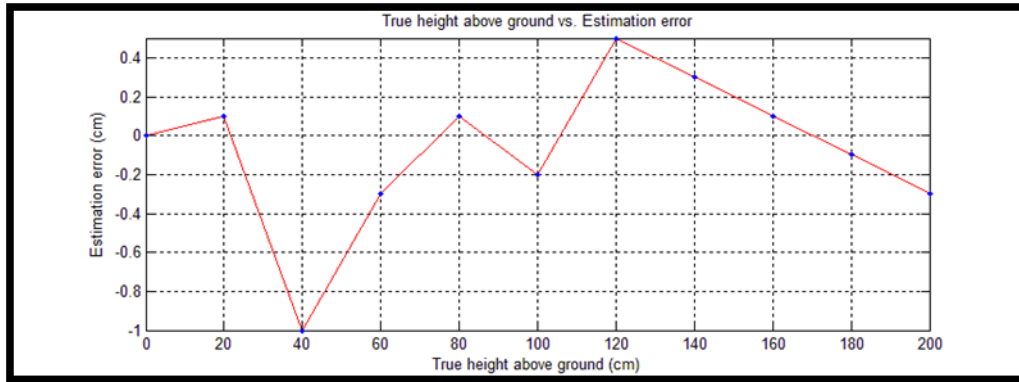


รูปที่ 10 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าความสูง ที่ระยะสูงสุด 300 cm



รูปที่ 11 แสดงค่าความสูงที่ได้จากการประมาณค่าเหนือแผ่นเป้าหมาย
 เทียบกับระยะความสูงที่เกิดขึ้นจริง ที่ระยะสูงสุด 200 cm

CST-2003



รูปที่ 12 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าความสูง ที่ระยะสูงสุด 200 cm

6. เอกสารอ้างอิง

6.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] Wei Li, Tianguang Zhang and Kolja Kuhnlenz, A Vision-Guided Autonomous Quadrotor in An Air-Ground Multi-Robot system, 2011 IEEE international conference on Robotic and automation, shanghai international conference center, May 9-13, 2011, Shanghai, China.

6.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

[2] Sven Lange, Niko Sünderhauf, and Peter Protzel, Autonomous Landing for a Multicopter UAV Using Vision, Conf. on SIMULATION, MODELING AND PROGRAMMING FOR AUTONOMOUS ROBOTS, Venice, Italy, 2008 Nov.

[3] Srikanth Saripalli and Gaurav S. Sukhatme, Landing on a Moving Target using an Autonomous Helicopter, Robotic Embedded Systems Laboratory Center for Robotic and Embedded Systems University of Southern California, Los Angeles, California, USA.

[4] เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์, วีรวัฒน์ เทพมณี และบรรพต สุวรรณาวุธ, วิธีการสอบเทียบกล้องโดยใช้โมเดลหลายระนาบ (Camera Calibration Method Using Multi Plane Model), ภาควิชาวิศวกรรมการวัด

คุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เขตลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520

6.3 หนังสือ

[5] Gary Bradski and Adrian Kaehler, (2008), Learning OpenCV, O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.

[6] Eric Fullerton, Chief Sales and Marketing Officer, (2009). Lens Calculations-Do the Math, Milestone Systems Inc, Beaverton, USA.