



การตรวจจับเครื่องหมายบนทางวิ่งแล้วแปลงเป็นพิกัดสามมิติ
สำหรับการช่วยลงจอดอัตโนมัติ โดยใช้วิทัศน์คอมพิวเตอร์

Detection of Markers on Runway and Conversion to 3D Information for
Automatic Landing Using Computer Vision

เมืองมล แสนเพ็ญ^{1*} และ มติ รุจามุญญ¹

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*E-mail: muangmol_s@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบช่วยลงจอดอัตโนมัติ ของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยใช้วิทัศน์คอมพิวเตอร์ ซึ่งคณะผู้วิจัยฯ นำเอากล้องติดเข้ากับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกยี่ด (Fixed-wing) เพื่อทำการประมาณตำแหน่งของเครื่องบินเทียบกับสนามบิน ด้วยวิธีหลักสองวิธี คือ 1) การตรวจจับขอบซ้าย-ขวาของสนามบิน ด้วยวิธี Threshold และ Hough transform 2) การตรวจจับสัญลักษณ์จุดสี่เหลี่ยม ที่วางตัวอยู่บนสนามบิน โดยใช้อัลกอริทึมเชิงเส้นสองตัว คือ Homography และ Direct Linear Transform เพื่อใช้เปรียบเทียบความถูกต้อง ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจจับเส้นขอบสี่เหลี่ยมซ้าย-ขวาของสนามบิน พบว่าสามารถหาเส้นขอบของสนามบินได้ดี และผลลัพธ์จากการตรวจจับแบบใช้สัญลักษณ์จุดสี่เหลี่ยม พบว่าอัลกอริทึม Homography ให้ผลที่ใกล้เคียงระยะที่เป็นจริงมากกว่าอัลกอริทึม Direct Linear Transform.

คำสำคัญ: วิทัศน์คอมพิวเตอร์ ระบบช่วยลงจอดอัตโนมัติ อากาศยานไร้คนขับแบบปีกยี่ด

Received: November 06, 2015

Revised: March 22, 2016

Accepted: March 24, 2016

Abstract

This research proposes the design and implementation of an automatic landing assistant system of fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) using a computer vision. The researchers are using a camera attached to the UAVs for the estimation between the position and runway which has two majors. First, the detected left - right stripes of runway use Threshold and Hough Transform. Second, the detected green dot symbol on the runway use linear algorithm which is Homography and Direct Linear Transform for accurate comparison. The result of the detection of the white left - right stripes of runway found that a detected border of the runway as well and the results of the detection using the green dot symbol found that the result of the Homography algorithm near to real value more than Direct Linear Transform algorithms.

Keywords: UAV, Hough transform, Homography, Direct Linear Transform.

1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในปัจจุบันนั้นมีการพัฒนาเป็นอย่างมาก และถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การเกษตรเพื่อพ่นยาฆ่าศัตรูพืช การถ่ายภาพทางอากาศเพื่อจัดทำแผนที่ การถ่ายทอดสดของสถานีโทรทัศน์ การติดตามผู้ต้องสงสัยหรืออาชญากรของกรมตำรวจ การเฝ้าระวังตามตะเข็บชายแดนของหน่วยงานทหารรักษาดินแดน ฯลฯ เมื่อเรานำเอาอุปกรณ์ที่ต้องการตามวัตถุประสงค์ของแต่ละงานนั้น ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับสามารถทำให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของแต่ละงานนั้นๆได้

ปัญหาที่เกิดขึ้นของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกยึด คือ เมื่อนำเครื่องขึ้นปฏิบัติการกิจเสร็จสิ้นแล้ว การที่จะสามารถนำอากาศยานไร้คนขับลงจอดได้อย่างปลอดภัย ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการบังคับ

ความสำคัญของงานวิจัยนี้ คือ ออกแบบระบบช่วยลงจอดอัตโนมัติ ของอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้การตรวจจับเครื่องหมายบนทางวิ่งแล้วแปลงเป็นพิกัดสามมิติด้วยวิทัศน์คอมพิวเตอร์ โดยที่ไม่

อาศัยอุปกรณ์นำทางหรืออุปกรณ์ที่สามารถระบุตำแหน่งชนิดใด ๆ และคณะผู้วิจัยฯ ได้ทำการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังได้เสนอไว้ในเอกสารอ้างอิง

วัตถุประสงค์ของผู้วิจัยฯ เพื่อที่จะออกแบบพื้นฐานของระบบช่วยลงจอดอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนขับแบบปีกยึดด้วยวิทัศน์คอมพิวเตอร์ โดยการตรวจจับตำแหน่งของเครื่องหมายบนทางวิ่งของสนามบิน แล้วคำนวณพิกัดระหว่างเครื่องบินกับสนามบิน ที่สามารถระบุตำแหน่งและยังมีประโยชน์สำหรับการช่วยลงจอดอัตโนมัติได้ในอนาคต

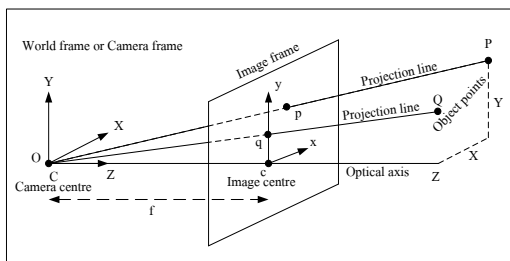
และเป้าหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะสามารถนำเอาผลของการวิจัยฯ นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแท้จริง ซึ่งคณะผู้วิจัยฯ ได้รับคำแนะนำและทุนสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) กระทรวงกลาโหม ได้รับอนุมัติงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2558 ระยะเวลาทำการวิจัย 12 เดือน เริ่มทำการวิจัยเมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558

2. วิธีดำเนินการวิจัย

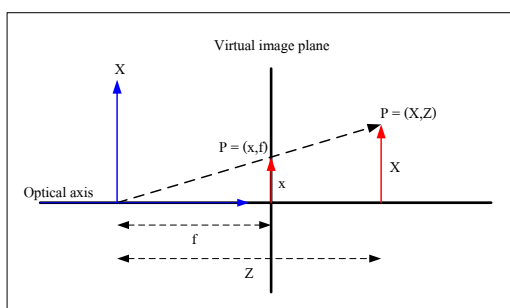
บทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างกล้องและวัตถุ กล่าวคือ Projection และ Camera model, การ Threshold, การตรวจจับเส้นด้วย Hough transform, การประมาณตำแหน่งและทิศทางระหว่างกล้องและสัญลักษณ์บนระนาบ (Planar pose estimation) แบบเชิงเส้น (หรือเรียกว่า Perspective-n-Point: planar+linear case เพราะ Pose estimation เป็นคำที่ค่อนข้างกว้าง)

2.1 Projection และ Camera model

วัตถุในโลกสามารถถูกอธิบายความสัมพันธ์กับโมเดลของกล้องได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเราจะทำการสัมพันธ์ จุด P และจุด Q ในโลกจริง ไปสู่ระนาบในมุมมองของกล้อง ซึ่งจุด O คือจุดโฟกัส f คือ ระยะโฟกัส และ Z คือ ระยะห่างของวัตถุเทียบกับกล้อง

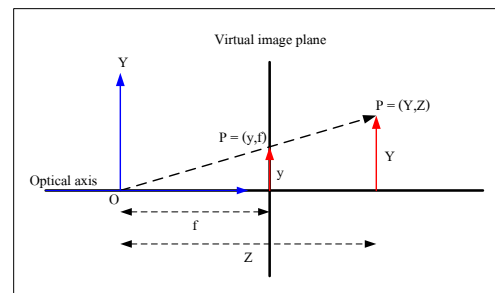


รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 3 มิติกับโมเดลของกล้อง



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 3 มิติกับโมเดลของกล้องเมื่อพิจารณาจากแกน

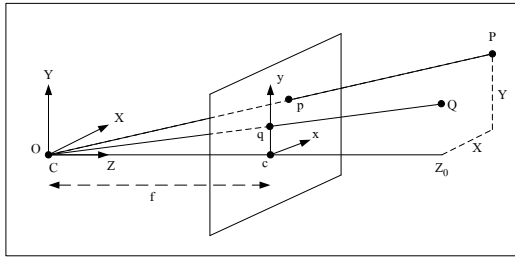
เมื่อเราพิจารณาความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 2 มิติ กับโมเดลของกล้องเมื่อพิจารณาจากแกน X ดังแสดงในรูปที่ 2 จะได้ว่า $\frac{x}{f} = \frac{X}{Z}$ และจะได้ว่า $x = f \frac{X}{Z}$



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 3 มิติกับโมเดลของกล้องเมื่อพิจารณาจากแกน Y

เมื่อเราพิจารณาความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 3 มิติ กับโมเดลของกล้องเมื่อพิจารณาจากแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 3 จะได้ว่า $\frac{y}{f} = \frac{Y}{Z}$ และจะได้ว่า $y = f \frac{Y}{Z}$

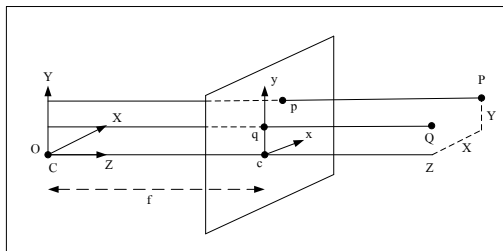
เราจะได้ความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 3 มิติ กับโมเดลของกล้องเมื่อพิจารณาจากแกน X และแกน Y คือ $x = f \frac{X}{Z}$ และ $y = f \frac{Y}{Z}$ และจะสังเกตได้ว่าค่า Z จากสมการนั้นเป็นตัวหารจากพิกัด (X, Y) ไปยังพิกัด (x, y) จึงเป็นการสัมพันธ์แบบไม่ใช่สมการแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุในโลก 3 มิติ กับโมเดลของกล้อง เมื่อ $Z = Z_0$

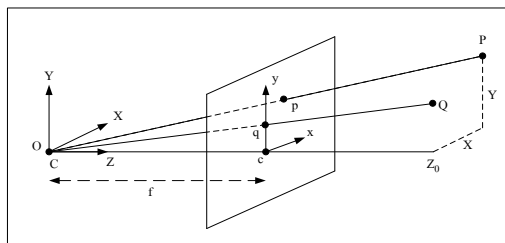
นอกจากนี้ยังมี Projection แบบอื่นอีก เช่น จากรูปที่ 4 เป็นการสมมุติว่าจุดของวัตถุในโลก 3 มิติ อยู่บนระนาบเดียวกัน และจุดทุกจุดนั้นอยู่ห่างจากระนาบภาพเป็นระยะเท่ากัน นั่นก็คือ Z จะเท่ากับ Z_0 จึงได้ว่า $X \approx f \frac{X}{Z_0}$ และ

$$Y \approx f \frac{Y}{Z_0}$$



รูปที่ 5 แสดง Orthographic projection

เมื่อ Projection lines ขนาดกับแกน Optical axis ดังรูปที่ 5 จะได้ $x = X$ และ $y = Y$



รูปที่ 6 แสดง Scaled orthographic projection

จากรูปที่ 6 เป็นการสมมุติว่าจุดของวัตถุในโลก 3 มิติ อยู่บนระนาบเดียวกัน และจุดทุกจุดนั้นอยู่ห่างจากระนาบภาพเป็นระยะเท่ากัน คือ

$Z = Z_0$ จึงได้ว่า $x = sX$, $y = sY$ และ

$$s = \frac{f}{Z_0}$$

2.1.1 พารามิเตอร์ภายในของกล้อง

(Intrinsic parameters)

$$\text{จากสมการ } X = f \frac{X}{Z_0} \text{ และ } Y = f \frac{Y}{Z_0}$$

เมื่อจุดพิกเซลของเซนเซอร์กล้องไม่ได้เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่สมมาตร จะได้ว่า

$$X = kf \frac{X}{Z} \text{ และ } Y = lf \frac{Y}{Z} \quad (1)$$

เมื่อ

X, y = Coordinates (pixel)

k, l = Scale parameters (pixel/m)

f = Focal length (m or mm)

ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$f_x = kf \text{ และ } f_y = lf$$

ดังนั้น

$$X = f_x \frac{X}{Z} \text{ และ } Y = f_y \frac{Y}{Z}$$

เมื่อ Image centre หรือ Principal point (C) ไม่ได้อยู่ที่จุด Origin ดังนั้น ตำแหน่งของ Image centre หรือ Principal point (C) ใน Image plane ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง (C_x, C_y) ดังนั้น

$$X = f_x \frac{X}{Z} + C_x \text{ และ } Y = f_y \frac{Y}{Z} + C_y \quad (2)$$

เมื่อพิจารณาที่แกน Optical axis จะเห็นได้ว่า $X = Y = 0$ และ $x = C_x$, $y = C_y$ เมื่อ Image frame ไม่ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สมมาตร จึงให้ θ เป็นมุม Skew angle ระหว่าง แกน x และ y ดังนี้

$$x = f_x \frac{X}{Z} - f_x \cot \theta \frac{X}{Z} + c_x \text{ และ}$$

$$y = \frac{f_y}{\sin \theta} \frac{Y}{Z} + c_y$$

หรือ

$$\tilde{x} = \frac{1}{Z} KX \quad (3)$$

โดยที่มี *Intrinsic parameter matrix* ดังต่อไปนี้

$$K = \begin{bmatrix} f_x & -f_x \cot \theta & c_x \\ 0 & \frac{f_y}{\sin \theta} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และ Homogeneous coordinates คือ

$$\tilde{x} = [x, y, 1]^T$$

เมื่อเราให้ $\rho = Z$ เราจะได้ว่า

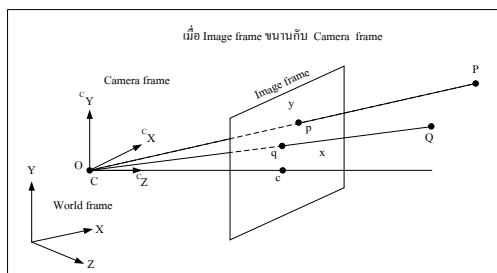
$$\rho \tilde{x} = KX \quad (4)$$

Intrinsic parameter matrix เมื่อใช้ Skew parameter, S แทนจะได้ว่า

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.1.2 พารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง

(Extrinsic parameters)



รูปที่ 7 แสดง Perspective projection

จากรูปที่ 7 เมื่อแกนของ Camera frame ไม่ได้ซ้อนทับกับ World frame เราสามารถเขียน Rigid transformation ระหว่าง Camera frame และ World frame ดังสมการที่ 6

$$X^C = R_W^C X^W + T_W^C \quad (6)$$

X^C = พิกัดจุด 3 มิติ ใน Camera frame

X^W = พิกัดจุด 3 มิติ ใน World frame

R_W^C = Rotation matrix จาก World frame ไป Camera frame

T_W^C = Translation matrix จาก World frame ไป Camera frame โดยมีลักษณะดังนี้

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

ซึ่ง Rotation matrix ต้องมีสมบัติตาม Lie's Algebra (SO(3))

$$R^T R = I$$

$$\text{ซึ่ง } R^{-1} = R^T$$

$$\text{และให้ } R = \begin{bmatrix} R_1^T \\ R_2^T \\ R_3^T \end{bmatrix}$$

$$\text{จึงได้ว่า } R_i^T R_j = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

เมื่อนำเอา Intrinsic และ Extrinsic parameters มาเขียนรวมกัน จะได้ว่า

$$\rho\tilde{x} = KX^C = K(R_W^C X^W + T_W^C)$$

หรือเขียนสมการโดยย่อได้ว่า

$$\rho\tilde{x} = K(RX + T) \quad (7)$$

2.1.3 การปรับเทียบกล้อง

ในการปรับเทียบกล้องเพื่อที่จะหา Intrinsic parameters (ดังแสดงในหัวข้อที่ 1.1.1) ซึ่งประกอบด้วย Focal length, Optical axis และ Distortion parameters ซึ่งโดยมากจะใช้วัตถุที่รู้ขนาดแน่นอน เช่นตารางหมากรุก การที่เราใช้วัตถุที่รู้ขนาดแน่นอน ย่อมจะทำให้สามารถหาระยะโฟกัสได้ รวมทั้งหาพารามิเตอร์ความบิดเบี้ยว (Distortion parameters) เนื่องจากตารางหมากรุกมีความสมมาตรในโลกจริง แต่เกิดการบิดเบี้ยวเมื่อทำการถ่ายภาพ

2.1.4 Lens Distortion

เนื่องจากเลนส์ของกล้องมีความนูน และไม่ได้ขนานไปกับเซนเซอร์รับภาพ จึงมีความบิดเบี้ยวเชิงรัศมีและความบิดเบี้ยว Tangent ทำให้ได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง จึงต้องชดเชยด้วยค่า k_1, k_2, k_3 ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การแก้ความบิดเบี้ยวเชิงรัศมี และสามารถคำนวณหาตำแหน่งพิกเซลที่ต้องการ ดังสมการที่ (8) และ ค่า p_1, p_2 เป็นสัมประสิทธิ์แก้ความบิดเบี้ยว Tangent ดังสมการที่ (9)

$$\begin{aligned} x_{corrected} &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_{corrected} &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{corrected} &= x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{corrected} &= y + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2y^2)] \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 Threshold

ในงานวิจัยนี้จะทำการแปลงภาพสีเทา Grayscale ซึ่งได้จากการแปลงภาพจากต้นฉบับให้เป็นภาพ Binary ซึ่งก็คือภาพที่มีเพียงสองค่า ซึ่งเมื่อทำการตั้งค่า Threshold ไว้ที่ค่าหนึ่งแล้ว เมื่อความเข้มแสงที่จุดภาพนั้นมีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับค่า Threshold ที่ตั้งไว้ จุดภาพนั้นจะมีค่าเป็น 0 หรือสีดำ และเมื่อความเข้มแสงที่จุดภาพนั้นมีค่าสูงกว่าค่า Threshold จุดภาพนั้นจะมีค่าเป็น 1 หรือสีขาว

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } i(x, y) > T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

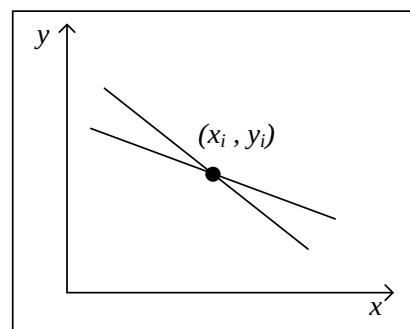
เมื่อ

$i(x, y)$ และ $g(x, y)$ เป็นข้อมูลภาพ ณ ตำแหน่ง x, y ก่อนและหลัง Threshold ตามลำดับ

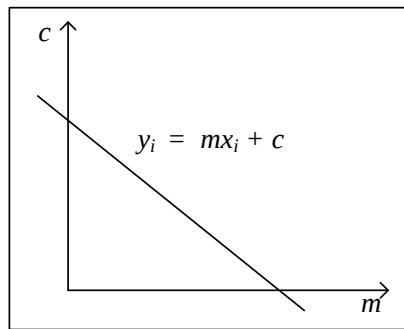
T เป็นค่า Threshold

2.3 Hough transform

วิธี Hough transform เป็นการแปลงระหว่าง Cartesian space และ Parameter space ดังแสดงในรูปที่ 8(a) จะเห็นได้ว่าทุกๆจุด (x_i, y_i) และทุกเส้นตรงที่ตัดผ่านจุด จะได้ดังสมการที่ 11



รูปที่ 8 (a) แสดงเส้นที่ผ่านจุดใน Cartesian space

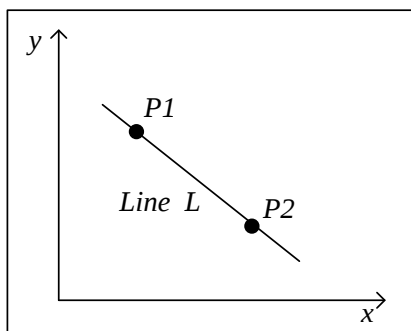


รูปที่ 8 (b) แสดงเส้นตรงใน Parameter space

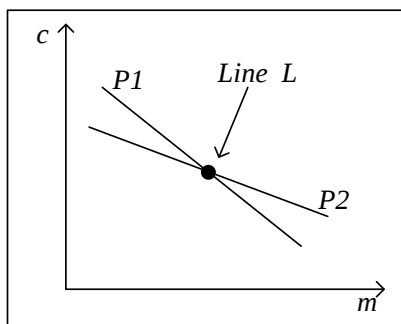
$$y_i = mx_i + c \quad (11)$$

และเส้นตรงใน Parameter space ในรูปที่ 8(b) จะได้สมการที่ 12

$$c = y_i - mx_i \quad (12)$$



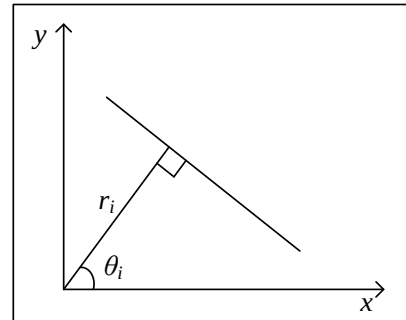
รูปที่ 9 (a) แสดงจุด P1, P2 ใน Cartesian space

รูปที่ 9 (b) แสดงจุด P_1, P_2 ใน (m, c)

เมื่อเราพิจารณาจุด P_1, P_2 ที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 9(a) ใน Cartesian space และเมื่อพิจารณา (m, c) space ดังรูปที่ 9(b) นั้น

หมายความว่า เป็นการตัดกันระหว่างเส้นสองเส้นที่จุดเดียว นี่คือพื้นฐานของ Hough transform

พื้นฐานอีกอย่างหนึ่งคือ เส้นตรงใน Cartesian space ยังสามารถแทนได้ด้วยรัศมีและมุม (r_i, θ_i) ดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 แสดงการแทนเส้นในพิกัด (x, y) ด้วย (r_i, θ_i)

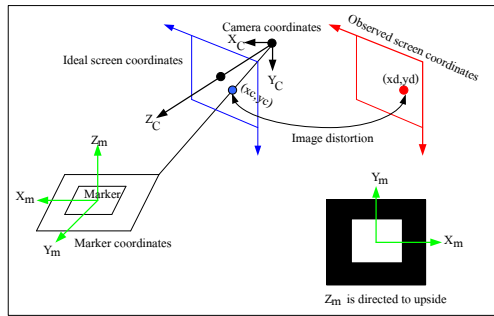
จากรูปที่ 10 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 13

$$x \cos \theta + y \sin \theta = r \quad (13)$$

2.4 Planar pose Estimation

Pose estimation เป็นการคำนวณค่าตำแหน่งเชิง 3 มิติ ของกลุ่มจุด (ในที่นี้คือสัญลักษณ์จุดสี่เหลี่ยมบนสนามบิน) เทียบกับกล้อง และแสดงในรูปของเมทริกซ์ขนาด 4×4 ที่สัมพันธ์กันระหว่าง Camera coordinate frame และ World coordinate frame (Marker coordinate frame)

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Camera coordinate frame และ Marker coordinate frame

จากรูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างจุด (X_C, Y_C, Z_C) บน Camera coordinate frame กับจุดที่ตรงกันใน Ideal screen coordinate frame เป็นไปตาม Perspective projection ดังระบุไว้ก่อนหน้า

ในบทความฉบับนี้คณะผู้วิจัยฯ จะทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึมเชิงเส้นสองตัว คือ Homography และ Direct Linear Transform เพื่อใช้ในการหาและเปรียบเทียบพิกัดระยะห่างระหว่างเครื่องบินกับเครื่องหมายบนสนามบิน ว่าอัลกอริทึมใดให้ค่าที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับระยะที่เป็นจริงได้มากกว่ากัน

2.4.1 Homography

Homography คือการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลกจริง และ Image plane โดยที่ภาพจากวัตถุบนโลกจริงโปรเจกต์ผ่านเลนส์ตกกระทบบนเซนเซอร์รับภาพ ทำให้ปรากฏภาพจากวัตถุบนโลกจริงบนระนาบของภาพ สามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ (15)

$$q = sHQ \quad (15)$$

ซึ่งเมทริกซ์ H สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (16)

$$q = sMWQ \quad (16)$$

โดยที่ $q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$, $Q = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$,

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

เมื่อ $W = [RT]$, $s = \text{Scale factor}$

$q = \text{Image point}$

$Q = \text{Object point}$

$M = \text{Intrinsic matrix}$

$W = \text{Extrinsic Matrix}$

Rotation matrix, (R) และ Translation vector, (T) หรือ Extrinsic matrix ที่ระบุไว้ก่อนหน้า โดยที่เวกเตอร์ T คือระยะห่างระหว่างแกนของกล้อง และแกนของวัตถุที่เราสนใจ (สนามบิน) และ R คือเมทริกซ์ที่ใช้ในการบิดแกนของวัตถุที่สนใจไปทับกับแกนของกล้อง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (17)

$$R = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi) \quad (17)$$

โดยที่ $R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ 0 & \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\text{โดยที่ } H = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}$$

เนื่องจากใช้กระดานหมากรุกเป็นวัตถุในการทดสอบ จะพบว่าค่า $Z=0$ เสมอ ซึ่งสามารถแทนค่าของ Object point ในสมการที่ (16) ซึ่งเป็นผลให้ได้สมการที่ (18) และ (19) ต่อมาตามลำดับ

การคำนวณหาเมทริกซ์ H ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Singular Value Decomposition method (SVD) ซึ่งเมทริกซ์ H ประกอบด้วย 9 ตัวแปร ดังแสดงในสมการที่ (20)

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 \\ X_2 & Y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_2 \\ X_3 & Y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_3 \\ X_4 & Y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_4 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -y_2 \\ 0 & 0 & 0 & X_3 & Y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -y_3 \\ 0 & 0 & 0 & X_4 & Y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -y_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_3 & Y_3 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_4 & Y_4 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

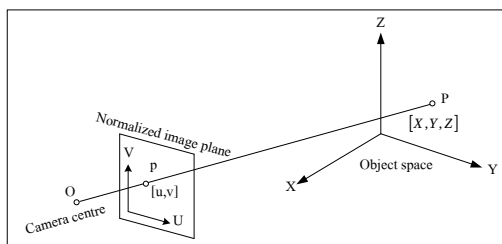
(20)

เมื่อได้ค่า H แล้วจึงนำมาหาค่า W และสามารถหาค่า R/T ได้ในที่สุด

2.4.2 Direct Linear Transform

Direct Linear Transform เป็นขั้นตอนวิธีการประมาณการตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของกล้องเทียบกับกลุ่มจุดที่ไม่จำเป็นต้องเป็นระนาบ (ต่างจากกรณี Homography)

จุดสมการจะคล้ายคลึงกับ Homography แต่เนื่องจากกลุ่มจุดไม่จำเป็นต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน วิธีการหาจึงแตกต่างกัน กล่าวคือ หากเรา กลับ M ในสมการที่ (16) ไปคูณด้านซ้ายของสมการ โดยไม่สนใจ s จะทำให้ได้สิ่งที่เรียกว่า Normalized image plane (u, v) ซึ่งเสมือนเป็นภาพที่อยู่หน้า Camera centre ไปหนึ่งหน่วย (เช่น หน่วยเมตร) ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Projection image และ Object

$$p = WP \quad (21)$$

$$u = \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + 1}, \quad v = \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + 1} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x - u(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z) &= 0 \\ r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y - v(r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z) &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

นำสมการที่ 23 มาเขียนให้อยู่ในรูปคล้ายกับ Homography เพื่อหาค่า R และ T (แต่ Homography ได้ H ซึ่งต้องนำมาหา R/T ที่หลัง) โดยต้องใช้ 6 จุด เป็นอย่างน้อย หลังจากได้ผลเฉลยต้องมีการตรวจสอบค่า Determinant ของ R รวมทั้งบังคับ R ให้เป็นไปตาม Lie's Algebra (SO(3)) รวมถึงปรับอัตราส่วนของ T ด้วย เนื่องจากผลเฉลยเป็นเพียง Up to a scale factor

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1Z_1 & 1 & 0 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & -v_1X_1 & -v_1Y_1 & -v_1Z_1 & 0 & 1 & -v_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_6 & Y_6 & Z_6 & 0 & 0 & 0 & -u_6X_6 & -u_6Y_6 & -u_6Z_6 & 1 & 0 & -u_6 \\ 0 & 0 & 0 & X_6 & Y_6 & Z_6 & -v_6X_6 & -v_6Y_6 & -v_6Z_6 & 0 & 1 & -v_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = 0 \quad (24)$$

2.5 การออกแบบระบบการตรวจจับเครื่องหมายบนทางวิ่งแล้วแปลงเป็นพิกัดสามมิติสำหรับการช่วยลงจอดอัตโนมัติ โดยใช้วิธีศรคอมพิวเตอร์

บทนี้จะกล่าวถึง ระบบและขั้นตอนที่ทางผู้วิจัยเสนอ แบ่งเป็นระบบที่ตรวจจับเครื่องหมายแบบขอบ และแบบจุดซึ่งจะนำความรู้จากบทก่อนหน้ามาประยุกต์

2.5.1 การรับภาพสนามบินจาก UAV ที่ร่อนลงจอดจริง

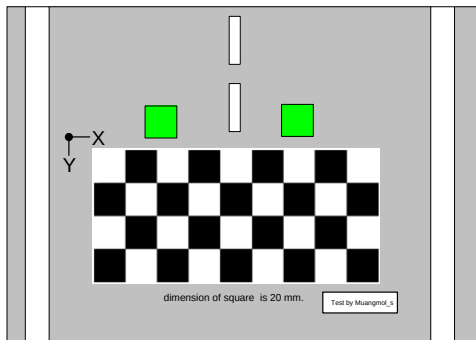
งานวิจัยนี้ ใช้ภาพเคลื่อนไหวของสนามบินแบบต่อเนื่อง ขณะที่เครื่องบินกำลังลงจอดจากหลายแหล่งทั้งสนามบินขนาดใหญ่จาก YOUTUBE และได้เลือกใช้ภาพเคลื่อนไหวในการทดสอบจาก

<https://www.youtube.com/watch?v=SHbylwclrw0>.

และได้ทำการทดสอบกับสนามบินจำลองที่ทางคณะวิจัยสร้างขึ้น



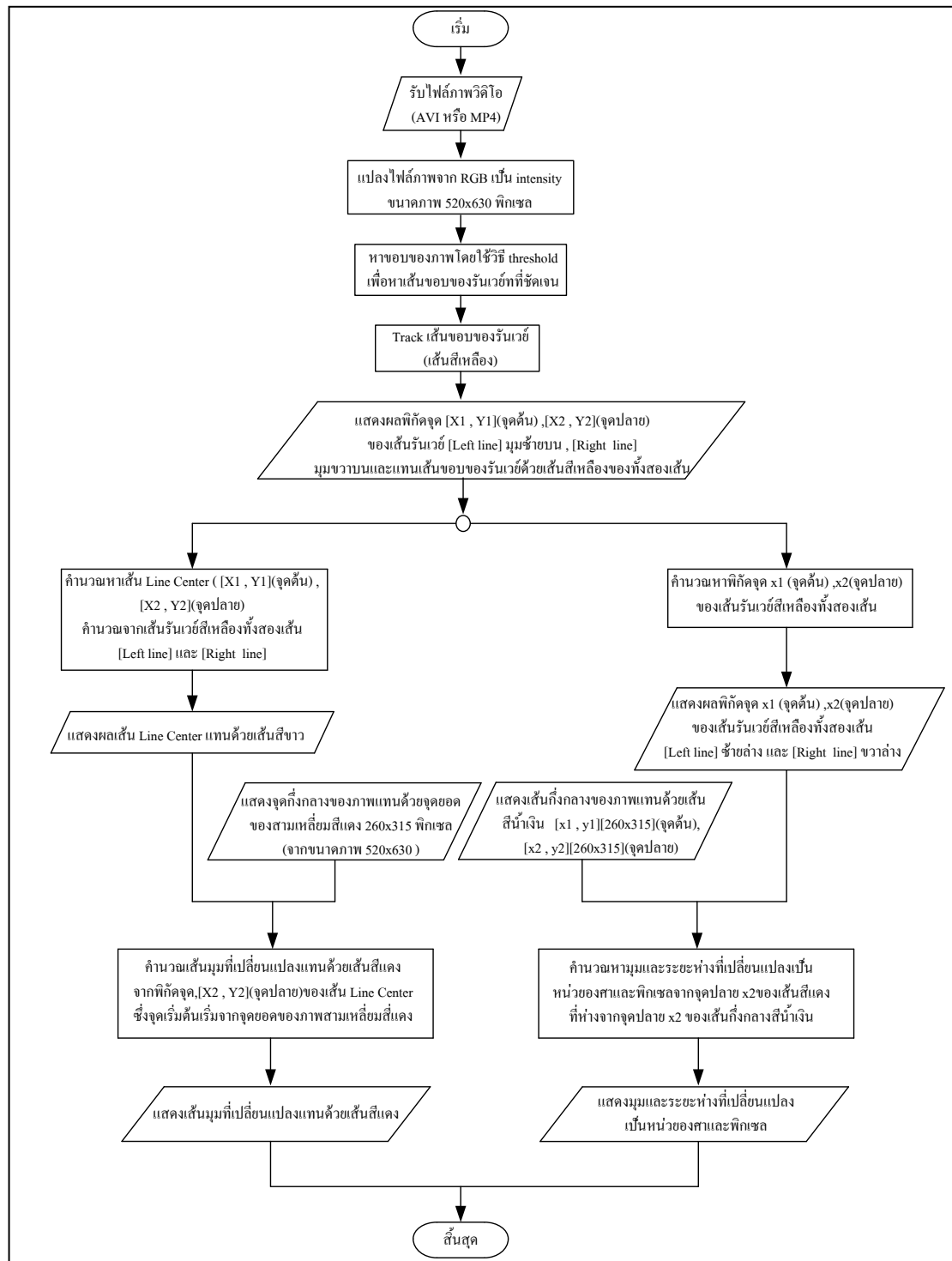
รูปที่ 13 แสดงภาพสนามบินขณะที่เครื่องบิน
กำลังลงจอด



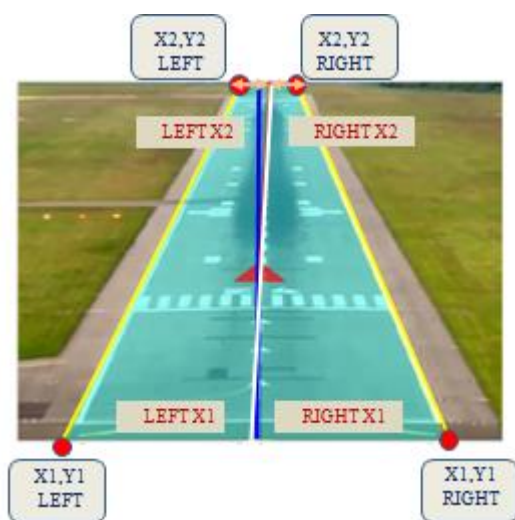
รูปที่ 14 แสดงการออกแบบสนามบิน เพื่อใช้ในการ
หาห้วงโซ่กลศาสตร์ที่อาศัยจุดที่อยู่ในสนามบิน

2.5.2 การออกแบบโปรแกรมตรวจจับ เครื่องหมายแบบขอบ

ได้ทำการออกแบบและทดสอบการทำงาน
แบ่งภาพจากหลักการข้างต้น ขกเว้นส่วน Planar
pose estimation มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงการออกแบบ โปรแกรมตรวจจับเครื่องหมายแบบขอบ

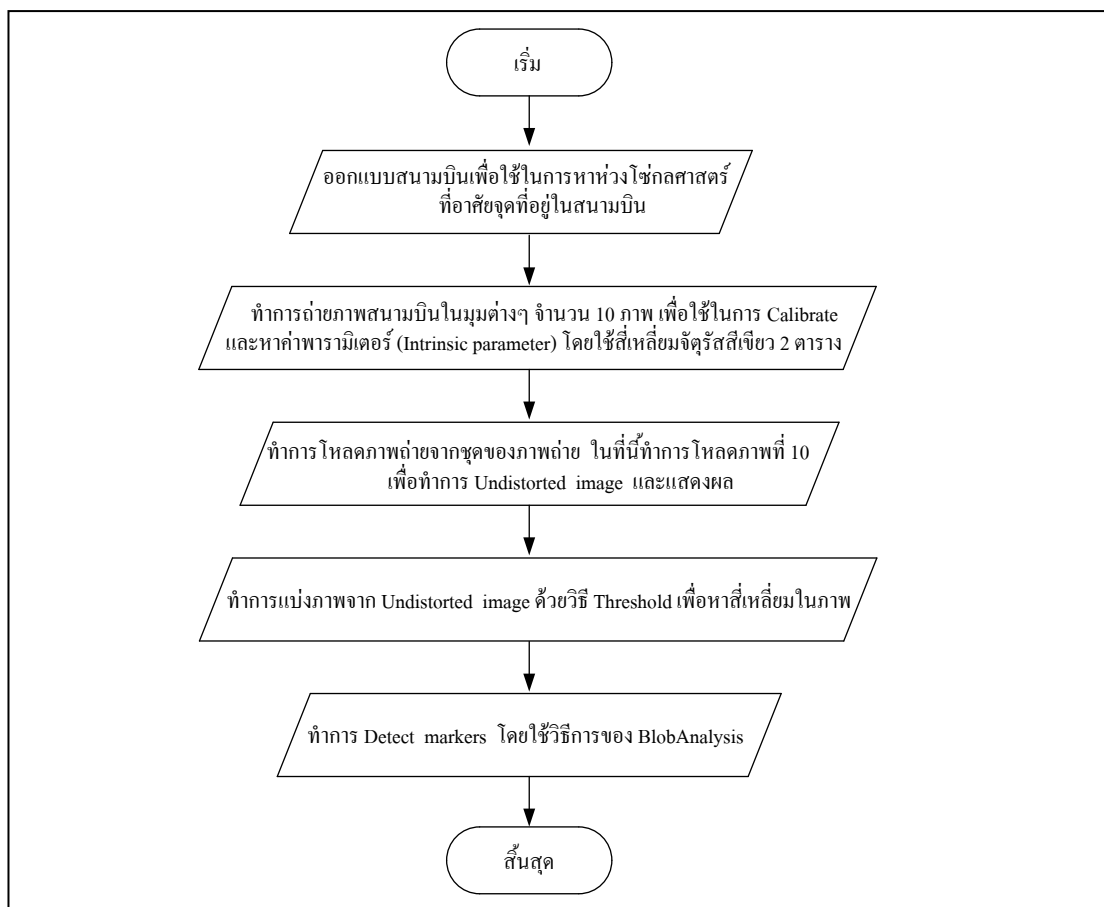


รูปที่ 16 แสดงการกำหนดจุดที่นำมาใช้พิจารณา
ในการออกแบบโปรแกรมตรวจจับเครื่องหมาย
แบบขอบ

2.5.3 การออกแบบโปรแกรมตรวจจับ

เครื่องหมายแบบจุด

ในส่วนนี้จะใช้สนามบินจำลอง ที่ประกอบด้วยตารางหมากรุก ที่มีขนาดของ 20x20 มิลลิเมตร (9x4 ตาราง) เพื่อใช้ในการคำนวณ Pose estimation ดังได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งสาเหตุที่เราใช้สนามบินจำลอง (ต่างจากส่วนก่อนหน้านี้ซึ่งคล้ายกับการตรวจจับขอบถนนของงาน Lane detection) เนื่องจาก Planar pose estimation ต้องการค่าพารามิเตอร์ (Intrinsic parameters) ของกล้อง และทั้งนี้จุดที่จะทำการหาห้วงโซ่กลศาสตร์บนสนามบินโดยใช้สี่เหลี่ยมจัตุรัสสีเขียว 2 ตารางขนาด 20x20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 17

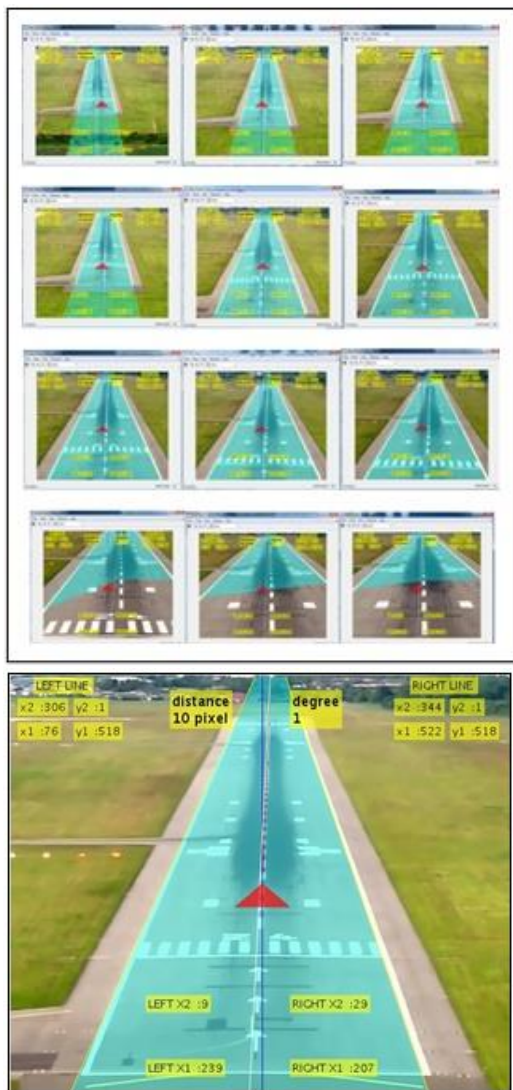


รูปที่ 17 แสดงการออกแบบการ โปรแกรมตรวจจับเครื่องหมายแบบจุด

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิจัยจากการใช้ขอบของสนามบิน

ผลการวิจัยจากการใช้ขอบ แสดงดังรูปที่ 18

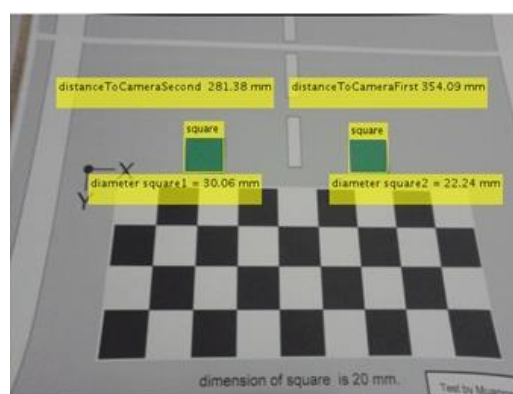


รูปที่ 18 แสดงผลลัพธ์ที่ได้การออกแบบโปรแกรม
ตรวจจับเครื่องหมายบนสนามบิน

ผลการวิจัยการตรวจจับเครื่องหมายบนสนามบินแบบขอบนั้น จากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าสามารถตรวจจับขอบของสนามบินได้ และสามารถบอกตำแหน่งของเครื่องบิน (จุดกึ่งกลางของกล้อง) ว่ามีความห่างจากเส้นกึ่งกลางของสนามบินเป็นมุม

กล้อง และก็พิกเซล ซึ่งงานวิจัยนี้ให้ผลในมุมมองของกล้องเท่านั้น และการที่จะสามารถตรวจจับขอบของสนามบินได้ดี และต่อเนื่องนั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสภาพของสนามบินจริง ที่กล้องสามารถเห็นสนามบินที่ชัดเจนและไม่มัวตู่อื่นใดที่คล้ายเป็นเส้นตรงปรากฏในมุมมองของกล้อง

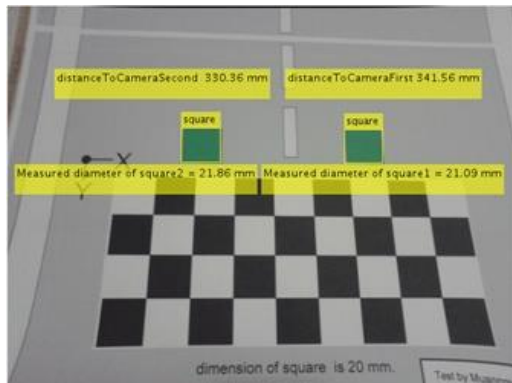
3.2 ผลการวิจัยจากการใช้จุดสี่เหลี่ยมบนสนามบิน



รูปที่ 19 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ
อัลกอริทึม Direct Linear Transform

ผลการวิจัยแบบจุดแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งผลลัพธ์จากการใช้อัลกอริทึม Direct Linear Transform คำนวณระยะห่างระหว่างเครื่องบินกับเครื่องหมายบนสนามบินเครื่องหมายที่ 1 (ด้านซ้ายมือ) ได้ระยะห่าง 281.38 มิลลิเมตร และ เครื่องหมายที่ 2 (ด้านขวามือ) ได้ระยะห่าง 354.09 มิลลิเมตร เมื่อระยะติดตั้งจริงระหว่างกล้องและเครื่องหมายที่ 1 คือ 330 มิลลิเมตร และเครื่องหมายที่ 2 คือ 340 มิลลิเมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากระยะจริง 48.62 และ 14.09 มิลลิเมตร ตามลำดับ

คณะผู้วิจัยจึงทำการใช้อัลกอริทึม Homography เพื่อทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม Direct Linear Transform ในชุดข้อมูลภาพเดียวกันว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 20 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึม Homography

จากรูปที่ 20 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยอัลกอริทึม Homography คำนวณระยะห่างระหว่างเครื่องบินกับเครื่องหมายบนสนามบินเครื่องหมายที่ 1 (ด้านซ้ายมือ) ได้ระยะห่าง 330.36 มิลลิเมตร และเครื่องหมายที่ 2 (ด้านขวามือ) ได้ระยะห่าง 341.56 มิลลิเมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากระยะจริง 0.36 และ 1.56 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบช่วยลงจอดอัตโนมัติของอากาศยานปีกบินไร้คนขับ (UAV) โดยใช้วิธีทัศนคอมพิวเตอร์สองวิธีหลักคือแบบใช้เส้นขอบของสนามบิน และแบบใช้สัญลักษณ์จุดสีเขียว สำหรับแบบใช้ขอบของสนามบิน จะตรวจจับเส้นขอบสีขาวซ้าย-ขวาของสนามบิน แล้วใช้อัลกอริทึม Hough transform จากนั้นจึงแปรผลเชิงกลศาสตร์ด้วยการประมวลผลภาพ สำหรับแบบใช้จุด จะตรวจจับสัญลักษณ์จุดสีเขียว แล้วใช้อัลกอริทึม Planar pose estimation ได้แก่ Homography และ Direct Linear Transform เพื่อใช้เปรียบเทียบความถูกต้อง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจจับเส้นขอบสีขาวซ้าย-ขวาของสนามบิน บ่งชี้ว่าสามารถหาเส้น

ขอบของสนามบินได้ดี ในสภาพที่กล้องนั้นสามารถจับภาพเส้นขอบสีขาวได้อย่างชัดเจน เป็นผลให้สามารถบอกพิกัดระยะห่างระหว่างเครื่องบินกับเส้นกึ่งกลางของสนามบิน (ซึ่งจะให้ผลลัพธ์สองค่าคือหน่วยพิกเซลและองศา) และเป็นการบอกให้ระบบควบคุมอัตโนมัติของเครื่องบินทราบได้ว่า ณ ขณะปัจจุบันนี้ เครื่องบินวางตัวอย่างไรกับสนามบินและควรจะปรับตัวเองอย่างไร เพื่อการลงจอดอย่างเหมาะสม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจจับ แบบใช้สัญลักษณ์จุดสีเขียว พบว่าอัลกอริทึม Homography ให้ผลที่ใกล้เคียงระยะที่เป็นจริงมากกว่าอัลกอริทึม Direct Linear Transform เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในการตรวจจับเครื่องหมายจุดสีเขียวบนสนามบินของเครื่องหมายที่ 1 และ 2 เหตุผลที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะอัลกอริทึม Homography ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลกจริง และ Image plane โดยตรง ส่วนอัลกอริทึม Direct Linear Transform นั้นเป็นขั้นตอนวิธีการประมาณการตำแหน่งและทิศทาง การวางตัวของกล้องเทียบกับกลุ่มจุดที่ไม่จำเป็นต้องเป็นระนาบ ซึ่งวัตถุที่เราทดสอบคือจุดสีเขียวที่วางตัวอยู่บนระนาบเดียวกัน

คณะผู้วิจัยได้นำผลของการวิจัยนี้มาเสนอต่อสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) กระทรวงกลาโหม ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนทุนวิจัย และได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการว่าเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากเป็นความต้องการของทางสถาบันฯ ที่จะนำเอาผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการพัฒนาระบบช่วยลงจอดอัตโนมัติ ของอากาศยานปีกบินไร้คนขับ ในหน่วยงานต่อไป และทางสถาบันฯ ยังได้แนะนำให้ใช้กล้องตรวจจับความร้อนในการวิจัยในครั้งต่อไป เพื่อที่จะให้อากาศยานปีกบินไร้คนขับ

นั้น สามารถช่วยลงจอดอัตโนมัติได้ในเวลา
กลางคืนต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Byoung-Mun Min et al., "Guidance Law for Vision-Based Automatic Landing of UAV," KSAS International Journal, vol. 8, no. 1, May 2007.
- [2] Andrew Miller et al., "Landing a UAV on a Runway Using Image Registration", IEEE International Conference on , Robotic and Automation , 19-23 , May , 2008, California, USA .
- [3] P. K. Menon et al., "Robust Landing-Guidance Law for Impaired Aircraft," Journal of Guidance Control, And Dynamics, vol. 35, no. 6, 2012.
- [4] James et al., "Vision Based Algorithm for Automatic Landing System of Unmanned Aerial Vehicles," International Journal of Innovation Science, Engineering & Technology, vol. 2, issue 4, 2015.
- [5] Gregory Taubel et al., "An Experimental Study of a Lane Departure Warning System Based on the Optical Flow and Hough Transform Methods," WSEAS Transaction on Systems, vol. 13, 2014.
- [6] Li Sha Sha, "The Research of the Lane Detection Algorithm Base on Vision Sensor," Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Maxwell Scientific Organization, 2013.
- [7] Mehmet Miman et al., "Lane Departure System Design using with IR Camera for Night-time Road Conditions," TEM Journal, vol. 4, 2015.
- [8] King Hann LIM et al., "Lane Vehicle Detection and Tracking," International MutiConference of Engineers and Computer Scientists, 18 – 20 , March , 2009, Hong Kong.
- [9] Nasim Arshad et al., "Lane Detection with Moving Vehicles Using Color Information," International MutiConference of Engineers and Computer Scientists, 19-21 , October , 2011, San Francisco, USA.
- [10] Thanda Aung et al., "Video Based Lane Departure Warning System using Hough Transform," International Conference on Advances in Engineering and Technology, 29-30 , March ,2014, Singapore.
- [11] Zhengyou Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations, " IEEE International Conference on Computer Vision, 20 ,September , 1999, Greece.
- [12] 9 Degrees of Freedom - Razor IMU - AHRS compatible : <http://www.sparkfun.com/products/9623>.
- [13] O. Faugeras, "Three-Dimensional Computer Vision," A Geometric Viewpoint, The MIT Press, 1993.

-
- [14] Lane departure warning system :
<http://www.mathworks.com/help/vision/examples/lane-departure-warning-system.html>.
- [15] Cockpit view of approach and landing at
edinburgh airport :
<https://www.youtube.com/watch?v=SHby1wclrw0>.
- [16] Muangmol Senpheng et al., "Automatic
landing assistant system based on stripe
lines on runway using computer vision,"
International Conference on Science and
Technology, 4-6, November, 2015, Pathum
Thani, Thailand.