

ระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆแบบเวลาจริงโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Real-Time Cloud Height and Motion Analysis System using Stereo Images



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆแบบเวลาจริงโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ
โดย	นายชยากร ประเสริฐเสรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรียะ พุ่มรินทร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัมย์)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชยากร ประเสริฐเสรี : ระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆแบบเวลาจริง  
โดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ . ( Real-Time Cloud Height and Motion Analysis  
System using Stereo Images ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วันเฉลิม โปรา

กล้องถ่ายภาพทั่วฟ้า คืออุปกรณ์ใช้สังเกตการณ์สภาพอากาศที่ติดตั้งบริเวณภาคพื้นดิน  
หนึ่ง โดยให้มุมมองการถ่ายภาพตั้งฉากกับพื้นโลก ข้อมูลจากอุปกรณ์ดังกล่าวนำไปใช้ในการ  
ประเมินปริมาณเมฆที่ปกคลุมบริเวณเหนือกล้อง และบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของกลุ่มเมฆได้ แต่  
ไม่สามารถบอกข้อมูลความสูงและความเร็วของเมฆซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์และถูกนำไปใช้  
งานในหลายแขนง เช่น การบิน การพยากรณ์อากาศและการพยากรณ์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น  
วิทยานิพนธ์นี้เสนอการพัฒนาระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆแบบเวลาจริงโดยใช้  
ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ เพื่อใช้ประมาณความสูงฐานเมฆรวมถึงความเร็วของกลุ่มเมฆที่เคลื่อนที่  
เหนือรัศมีของระบบถ่ายภาพ โดยใช้กล้อง Canon EOS M100 สองตัว ที่ถูกควบคุมการถ่ายภาพ  
ให้พร้อมกันและส่งภาพถ่ายขึ้นคลาวด์ด้วยบอร์ดคอมพิวเตอร์ Raspberry Pi ในการวิเคราะห์ข้อมูล  
ได้ใช้หลักการวิเคราะห์สามเหลี่ยมระยะทางในการประมาณความสูงเมฆ และได้พัฒนากระบวนการ  
ปรับเทียบระบบถ่ายภาพขึ้นใหม่ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ความสูงฐานเมฆมีความแม่นยำขึ้น การ  
ทดสอบวัดระยะทำโดยการวัดระยะทางกับอาคารที่ทราบระยะโดยใช้ Google map พบว่ามีความ  
ผิดพลาดน้อยกว่า 6% สำหรับเป้าหมายที่ระยะน้อยกว่า 200 เมตรและประมาณ 8% สำหรับ  
เป้าหมายที่ระยะ 1,200 เมตร และการทดลองวัดความเร็วรถยนต์พบว่าอัลกอริทึมที่ใช้มีความ  
สอดคล้องกับการวัดความเร็วเมฆโดยผิดพลาดที่น้อยกว่า 10%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6170358021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Whole Sky Imagers, Stereo vision, Cloud Based Height

Chayakorn Prasertseree : Real-Time Cloud Height and Motion Analysis System using Stereo Images . Advisor: Assoc. Prof. WANCHALERM PORA, Ph.D.

Whole sky imagers are ground-based weather instruments that are installed such that their optical axis is perpendicular to the earth. Their images may be used to estimate the amount and directions of cloud above the camera. However, they cannot yield cloud base height and cloud speed which are useful in many applications such as weather forecast, solar forecast, and aviation. This thesis presents a real-time cloud height and motion analysis system using stereo images. Two WSI cameras are developed. Each is composed of a Canon EOS M100 camera controlled by a Raspberry Pi computer board so that both camera capture images at the same time. Triangulation is employed to calculate the cloud base height. A novel camera rectification is proposed to improved estimation accuracy. A validation process is performed by comparing estimated distances of known buildings with those obtained from Google Maps. When the building distances are about 200m and 1.2km, the discrepancy is about 6% and 8% respectively. The proposed cloud speed algorithm is validated by estimation of known car speeds. The errors are within  $\pm 10\%$ .

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาชี้แนะและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัณย์ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรีย หุมรินทร์ อาจารย์ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ Embedded System and IC Design Research Laboratory หรือ ESID Lab ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนพี่น้องในห้องปฏิบัติการ ที่สนับสนุนและช่วยเหลือให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนร่วมดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล จนทำให้วิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

กราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการศึกษาวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาพระคุณบิดามารดาและบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน และให้ความรู้มาโดยตลอดทำให้การศึกษาวิจัยเล่มนี้สำเร็จลงได้

ชยากร ประเสริฐเสรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 เมฆ.....	4
2.2 อุปกรณ์ตรวจจับเมฆ .....	11
2.2.1 เรดาร์ตรวจจับเมฆ.....	11
2.2.2 เครื่องวัดความสูงฐานเมฆ .....	12
2.2.3 เครื่องวิทยุหึ่งอากาศ (Radiosondes).....	14
2.3 ระบบสเตอริโอวิชั่น .....	17
2.4 การสร้างรูปสามเหลี่ยมเพื่อหาระยะ (Triangulation).....	19
2.5 การจำแนกภาพเมฆและท้องฟ้า .....	20
2.5.1 Simple Intensity Threshold Analysis.....	20

2.5.2 R/B Threshold Technique .....	21
2.5.3 IHS Threshold Technique .....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
2.7 OpenCV (Open source Computer Vision).....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	25
3.1 ระบบถ่ายภาพและระบบควบคุมการถ่ายภาพ .....	25
3.2 การจำแนกก้อนเมฆบนภาพถ่าย.....	26
3.3 การหาลักษณะเด่นบนภาพ .....	27
3.3.1 Scale-space Extrema Detection .....	27
3.3.2 Keypoint Localization.....	29
3.3.3 Orientation Assignment .....	29
3.3.4 Keypoint descriptor .....	30
3.4 การปรับเทียบระบบถ่ายภาพ .....	31
3.4.1 Image Matching .....	32
3.4.2 Epipolar Line .....	33
3.5 การประมาณระยะทางจากภาพถ่าย.....	35
3.6 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากภาพถ่าย .....	38
3.7 การประดิษฐ์อุปกรณ์.....	42
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง .....	44
4.1 การทดลองประมาณระยะทางด้วยระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ.....	44
4.2.1 การทดลองประมาณความสูงฐานเมฆด้วยระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ .....	44
4.2.2 การทดลองประมาณระยะทางจากภาพกับวัตถุที่ทราบระยะ .....	54
4.3 การทดลองวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุจากภาพถ่าย .....	56
4.3.1 การทดลองวิเคราะห์ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่เมฆ .....	56



4.3.2 การทดลองวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ทราบความเร็วการเคลื่อนที่.....	60
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	62
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	63
บรรณานุกรม.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	68



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การจำแนกความสูงของเมฆตามแถบขั้วโลกที่แตกต่างกัน [3].....	4
ตารางที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต.....	23
ตารางที่ 3 คำนิยามตัวแปรในสามเหลี่ยมระยะทางดังแสดงในรูปที่ 32 .....	35
ตารางที่ 4 คำนิยามตัวแปรที่ใช้คำนวณความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุจากภาพถ่าย .....	38
ตารางที่ 5 ผลการทดลองการคำนวณระยะทางจากภาพถ่ายในรูปที่ 47.....	55
ตารางที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบต่อจำนวนจุดภาพที่เปลี่ยนแปลงเมื่อความละเอียดของภาพ ในแนวนอนเท่ากับ 2,400 pixels และระยะระหว่างกล้องคือ 1-4 เมตร .....	56
ตารางที่ 7 ทดลองคำนวณความเร็วเฉลี่ยเมฆจากภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน 20 วินาที / Baseline 10m .....	57
ตารางที่ 8 ทดลองคำนวณความเร็วเฉลี่ยเมฆจากภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน 20 วินาที / Baseline 20m .....	58
ตารางที่ 9 ทดลองคำนวณความเร็วเฉลี่ยเมฆจากภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน 20 วินาที / Baseline 20m .....	59
ตารางที่ 10 การทดลองคำนวณความเร็วการเคลื่อนที่รถยนต์จากภาพถ่าย .....	61

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 เมฆ 10 ประเภทแบ่งตามความสูงและรูปร่าง [3] .....	5
รูปที่ 2 เมฆชั้นต่ำ (ภาพโดย: PiccoloNamek, Jarmo Koistinen, Simon, Simo Räsänen).....	8
รูปที่ 3 เมฆชั้นกลาง (ภาพโดย: Bidgee, ART RANGNO).....	9
รูปที่ 4 เมฆชั้นสูง (ภาพโดย: SanchaiRat, Bieverwin).....	11
รูปที่ 5 (ซ้าย) เรดาร์ตรวจจับเมฆ MIRA-35 [10] และ(ขวา) Ceilometer 8200-CHS [11].....	12
รูปที่ 6 แบบจำลองเรขาคณิตของเครื่องวัดความสูงฐานเมฆ [14] .....	14
รูปที่ 7 Radiosondes system [18] .....	15
รูปที่ 8 ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องตรวจอากาศที่มีสภาพอากาศแตกต่างกันทั้ง 4 ภาพ (A) เมฆ Altostratus (B) เมฆ Nimbostratus ฐานเมฆสีเทาเข้ม (C) Cirrostratus (D) Altocumulus ที่ปรากฏเป็นปุยเมฆ [3].....	16
รูปที่ 9 กล้องตรวจอากาศรุ่น OMEA 3x/6x [22].....	17
รูปที่ 10 Stereo Vision [23].....	18
รูปที่ 11 ระบบสเตอริโอวิชั่นที่มีแนวการมองของกล้องทั้งสองขนานกัน [24] .....	18
รูปที่ 12 องศาที่เกิดขึ้นภายในระบบสเตอริโอวิชั่น [25].....	19
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของระยะทางจากกล้องถึงวัตถุกับ Disparity [26].....	20
รูปที่ 14 ขั้นตอนการจำแนกภาพเมฆกับท้องฟ้าโดยใช้ R/B threshold technique [26] .....	21
รูปที่ 15 แผนภูมิการทำงานของระบบถ่ายภาพ .....	25
รูปที่ 16 เคนสีในรูปแบบ HSV.....	26
รูปที่ 17 ภายถ่ายเมฆและการกระจายสีในย่าน HSV.....	26
รูปที่ 18 ภายถ่ายเมฆที่ถูกสกัดด้วยย่าน HSV .....	27
รูปที่ 19 กระบวนการ Gaussian pyramid และ Difference of Gaussian เพื่อหา local extrema [38].....	28

รูปที่ 20 กระบวนการหา local extrema จาก 8 pixels และ 18 pixels บนสเกลเดียวกันและสเกลรอบข้างตามลำดับ [39].....	28
รูปที่ 21 ตัวอย่างลักษณะเด่น Keypoint [41] .....	29
รูปที่ 22 ตัวอย่างความแรงของภาพประกอบด้วย Gradient Magnitudes และ Gradient Orientations (Direction) [41].....	30
รูปที่ 23 กราฟ Histogram แสดงผลรวมของ Gradient Magnitudes ที่จำแนกตาม Directions [41].....	30
รูปที่ 24 บล็อกขนาด 16x16 pixels ที่แปลงเป็นบล็อกย่อยขนาด 4x4 รอบลักษณะเด่นที่เก็บค่า Gradient Magnitude ทั้ง 8 ทิศทาง [41].....	31
รูปที่ 25 ภาพถ่ายที่ขนานกันจากระบบถ่ายภาพแบบ Stereo.....	31
รูปที่ 26 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Image Matching.....	32
รูปที่ 27 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Image Matching เมื่อระบบถ่ายภาพขนานกัน .....	32
รูปที่ 28 ระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอที่เมืองการมองวัตถุที่ต่างกัน [42] .....	33
รูปที่ 29 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Epipolar Line .....	33
รูปที่ 30 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Epipolar Line เมื่อระบบถ่ายภาพขนานกัน.....	34
รูปที่ 31 กระบวนการเปรียบเทียบระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ.....	34
รูปที่ 32 มุมภายในและระยะที่เกิดขึ้นจากระบบ Stereo Vision [25] .....	35
รูปที่ 33 (บน) ภาพต้นฉบับพร้อมค่าความสูงที่คำนวณได้ และ (ล่าง) ภาพต้นฉบับพร้อมค่าความสูงที่แสดงด้วยจุดสี .....	37
รูปที่ 34 การจับคู่ลักษณะเด่นด้วย SIFT เมื่อภาพทั้งสองถูกถ่ายด้วยกล้องตัวเดียวกันที่มีระยะเวลาในการถ่ายห่างกัน 20 วินาที.....	39
รูปที่ 35 ภาพผลลัพธ์สุดท้าย (บน) ภาพต้นฉบับที่แสดงพร้อมความสูง (ล่าง) ภาพต้นฉบับที่แสดงพร้อมความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่.....	40
รูปที่ 36 กระบวนการวิเคราะห์ความสูงและความเร็วการเคลื่อนที่ของเมฆด้วยภาพถ่าย .....	41
รูปที่ 37 อุปกรณ์ภายในระบบถ่ายภาพ (บน) และฝาปิดด้านบนพร้อมโมมิส (ล่าง) .....	42

รูปที่ 38 ส่วนขอบกลุ่มเมฆคิวมูลัสขนาดใหญ่ ประมาณความสูงอยู่ในช่วง 400-700 เมตร / Baseline 10m.....	45
รูปที่ 39 เมฆคิวมูลัสด้านซ้ายประมาณความสูงอยู่ในช่วง 1,000-1,500 เมตร และกลุ่มเมฆเซอร์คิวมูลัสทางด้านขวาที่มีลักษณะไม่ชัดเจน / Baseline 10m.....	46
รูปที่ 40 ฐานเมฆขนาดใหญ่ประมาณความสูงอยู่ในช่วง 300-700 เมตร / Baseline 10m.....	47
รูปที่ 41 กลุ่มเมฆที่มีลักษณะเบาบางประมาณความสูงอยู่ในช่วง 400-600 เมตร / Baseline 10m.....	48
รูปที่ 42 เมฆคิวมูลัสประมาณความสูงที่ 400-500 เมตร / Baseline 20m .....	49
รูปที่ 43 เมฆคิวมูลัสประมาณความสูงที่ 600-800 เมตร / Baseline 20m .....	50
รูปที่ 44 เมฆคิวมูลัสหลายก้อนประมาณความสูงที่ 600-800 เมตร / Baseline 20m.....	51
รูปที่ 45 เมฆคิวมูลัสและเศษเมฆประมาณความสูงที่ 500 เมตร และอัลโตคิวมูลัสประมาณความสูงที่ 1,250-1,700 เมตร / Baseline 20m.....	52
รูปที่ 46 เศษเมฆที่ไม่มีรูปร่าง ไม่สามารถตรวจวัดได้.....	53
รูปที่ 47 ภาพถ่ายอาคารพร้อมตำแหน่งที่สนใจ .....	54
รูปที่ 48 (ซ้าย)ภาพถ่ายต้นฉบับ, (ขวา)ภาพที่ต้องการ .....	60
รูปที่ 49 แผนผังการคำนวณระยะทางและความเร็วการเคลื่อนที่ของรถยนต์.....	61

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งซึ่งในปัจจุบันทั่วโลกได้ให้ความสำคัญและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะเป็นพลังงานสะอาดที่สามารถผลิตขึ้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตพลังงานไฟฟ้ารูปแบบนี้ อาศัยแสงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมากระทบแผงกำเนิดพลังงานที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) จำนวนหนึ่ง ซึ่งขณะที่มีแดดจัดจะมีความเข้มพลังงานประมาณ  $18-20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  [1] แต่ถ้าแผงกำเนิดพลังงานถูกบดบังด้วยเงาของเมฆ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลงมาก วิธีแก้ปัญหานี้ทำได้ด้วยการจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งอื่นมาทดแทนในขณะที่แผงกำเนิดพลังงานถูกบดบัง ซึ่งกระบวนการจ่ายพลังงานทดแทนนั้น จะต้องใช้เวลาในการเตรียมการชั่วคราวหนึ่งตามแต่ชนิดของแหล่งพลังงาน ซึ่งอาจเป็นไปได้ตั้งแต่หลักวินาที ถึงเป็นชั่วโมงดังนั้นจึงเป็นการดีอย่างยิ่งหากเราทราบเวลาล่วงหน้าที่กลุ่มเมฆจะลอยมาบดบังแผงกำเนิดพลังงาน เพื่อเตรียมการเดินเครื่องแหล่งจ่ายพลังงานอื่นที่จะมาทดแทนทันเวลา แต่ก็ไม่ควรเดินเครื่องรอนานเกินความจำเป็น

โดยปกติแล้วการปรากฏและการสลายตัวของเมฆมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนตายตัวทำให้ยากที่จะพยากรณ์ให้แม่นยำได้ในหลักชั่วโมง หรือนานกว่านั้น แต่การพยากรณ์ในระยะสั้นในหลักนาทีนั้น อาจจะทำได้ดี เนื่องจากกลุ่มเมฆไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทิศทาง และความเร็วได้ทันทีทันใด ดังนั้นการทำนายคุณลักษณะของเมฆในระยะสั้นจึงถูกพัฒนาขึ้น [2] อุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับเมฆมีอยู่หลายประเภท เช่นเครื่องวัดความสูงฐานเมฆที่ใช้หลักการการสะท้อนของแสงเลเซอร์จากวัตถุที่ต้องการวัด เพื่อใช้ในการวัดระยะทาง เรดาร์ตรวจสอบสภาพอากาศซึ่งสามารถหากกลุ่มเมฆในความสูงต่ำ และปานกลางได้ กล้องถ่ายภาพท้องฟ้าสามารถถ่ายภาพเมฆในระยะประมาณ 5-10 กิโลเมตรได้ อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาค่อนข้างสูง หลายแสนถึงหลายล้านบาท เป็นไปได้ยากที่ โซลาร์ฟาร์มขนาดเล็กจะจัดหาอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งาน อีกทั้งอุปกรณ์ดังกล่าวยังไม่สามารถวิเคราะห์หาทิศทางการเคลื่อนที่ของเมฆได้อย่างอัตโนมัติ

ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจวัดคุณลักษณะเมฆด้วยภาพถ่ายจึงถูกพัฒนาขึ้น โดยมีส่วนประกอบหลักคือกล้องถ่ายภาพ ซึ่งในอดีตได้มีการพัฒนากล้องตรวจอากาศสำหรับถ่ายภาพท้องฟ้ามาแล้ว แต่กล้องในอดีตนั้นมีราคาที่สูงเช่นกันเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดอื่น การพัฒนากล้องตรวจอากาศให้มีราคาที่ถูกลงและมีคุณสมบัติที่สูงขึ้นจึงถูกวิจัยขึ้นมา โดยกล้องที่ใช้ในการวิจัยนั้นเป็นกล้องดิจิทัลขนาดกลางสมัยใหม่ที่มีราคาที่ไม่สูงแต่มีคุณสมบัติในการถ่ายภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกล้องในอดีต เช่น มีความละเอียดของภาพถ่ายมากขึ้นและมีความสามารถในการปรับแต่งแสงสีในภาพให้เกิดความ

ชัดในรายละเอียดที่ดีขึ้น ซึ่งนำไปสู่การแยกแยะความแตกต่างระหว่างกลุ่มเมฆกับท้องฟ้าได้ชัดเจนขึ้น ในส่วนของการตรวจวัดความสูงและความเร็วเมฆนั้นสามารถทำได้โดยใช้หลักประมวลผลภาพที่มีผู้วิจัยได้คิดค้นหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งวัตถุกับภาพที่เกิดขึ้นได้จากการถ่ายภาพวัตถุสองครั้งในมุมมองที่แตกต่างกันเล็กน้อย หลักการนี้นำไปสู่การวัดระยะทางอย่างง่ายของวัตถุที่ต้องการ

วิทยานิพนธ์นี้คือการพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลสังเกตการณ์เมฆจำนวน 2 ชุด เพื่อใช้ตรวจวัดความสูงของฐานเมฆรวมถึงความเร็วของกลุ่มเมฆที่กำลังเคลื่อนที่เหนือรัศมีของเลนส์กล้องโดยผลลัพธ์ต้องมีความแม่นยำหรือใกล้เคียงกับการวัดด้วยเครื่องวัดความสูงฐานเมฆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพท้องฟ้าโดยใช้กล้องดิจิทัลไร้กระจก (Mirrorless Camera) จำนวน 2 ชุด

- โฟกัสภาพที่ระยะตั้งแต่ 500 เมตรถึง 5 กิโลเมตร
- ติดตั้งนอกอาคาร
  - อุณหภูมิภายนอกไม่เกิน 50 องศา
  - ทนต่อแดดและฝน (IPX4)
- ถูกควบคุมให้ถ่ายภาพเหลื่อมกันไม่เกิน 100ms
- ส่งภาพมายังเซิร์ฟเวอร์โดยใช้ Wi-Fi

1.3.2 สร้างโมเดลการวิเคราะห์ความสูงฐานเมฆและความเร็วในการเคลื่อนที่จากภาพที่ถ่ายโดยใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

- เมฆที่อยู่บนภาพต้องเห็นขอบเมฆชัดเจน
- อยู่ในช่วงเวลา 7.00น. ถึง 17.00น.
- สภาพอากาศมีแสงมากถึงปานกลาง
- ฐานเมฆมีสีขาวหรือดำ

1.3.3 ความถูกต้องในการประมาณความสูงที่ได้จากโมเดลในหัวข้อ 1.3.2 เทียบกับเครื่องวัดความสูงฐานเมฆต้องมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20%

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวัดความสูงเมฆด้วยการถ่ายภาพ
- 2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาเพื่อใช้วิเคราะห์ความสูงและความเร็วของเมฆโดยใช้กล้อง 2 ชุด
- 3) สร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพเมฆด้วยกล้องดิจิทัลไร้กระจกจำนวน 2 ชุด ติดตั้งบนภาคพื้น โดยที่อุปกรณ์ต้องมีความทนทานต่อสภาพอากาศภายนอกได้เป็นระยะเวลานาน และมีคุณสมบัติตามหัวข้อที่ 1.3
- 4) พัฒนาวิธีการเพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม
- 5) ทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองกับอุปกรณ์วัดความสูงฐานเมฆ
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 7) จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

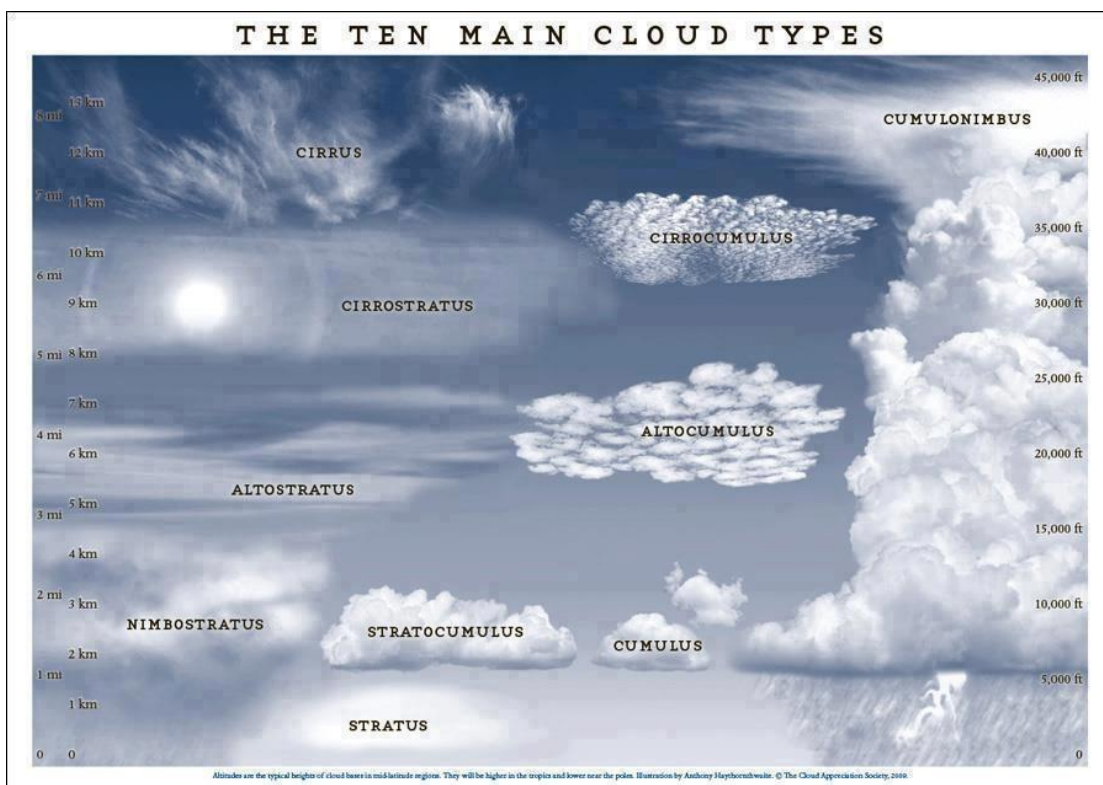
การพัฒนากระบบสังเกตการณ์ท้องฟ้าจากภาพถ่ายเพื่อใช้ในการคำนวณหาความสูงและความเร็วของเมฆมีขั้นตอนและวิธีการที่ซับซ้อนทั้งทางด้านของส่วนประกอบที่ใช้ในการสร้างฮาร์ดแวร์ (hardware) และซอฟต์แวร์ (software) เนื่องจากการที่ได้มาซึ่งภาพที่ถูกจำแนกกระหว่างเมฆและท้องฟ้าได้อย่างชัดเจนจำเป็นต้องใช้หลักการประมวลผลภาพที่ซับซ้อน อีกทั้งเพื่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ถูกต้องต่อการคำนวณ ต้องอาศัยความแม่นยำในการติดตั้งอุปกรณ์ ในหัวข้อนี้กล่าวถึงทฤษฎีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบวิเคราะห์และหลักการประมวลผลภาพที่ใช้

#### 2.1 เมฆ

ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, 2012 [4] กล่าวว่าตามธรรมชาติ เมฆเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะแบ่งได้ตามรูปร่างคือ เมฆก้อนและเมฆแผ่น เมฆก้อนเรียกว่า “เมฆคิวมูลัส” (Cumulus) และเมฆแผ่นเรียกว่า “เมฆสตราตัส” (Stratus) หากเมฆก้อนลอยชิดติดกัน เรานำชื่อทั้งสองมาต่อกันเรียกว่า “เมฆสตราโตคิวมูลัส” (Stratocumulus) ในกรณีที่เป็นเมฆแผ่นจะเพิ่มคำว่า “นิมโบ” หรือ “นิมบัส” ซึ่งแปลว่า “ฝน” เข้าไป โดยเรียกเมฆก้อนที่ทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองว่า “เมฆคิวมูโลนิมบัส” (Cumulonimbus) และเรียกเมฆแผ่นที่มีฝนตกปรอย ๆ ว่า “เมฆนิมโบสตราตัส” (Nimbostratus) ซึ่งเมฆที่เราเห็นบนท้องฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 10 ชนิดตามลักษณะและความสูงดังรูปที่ 1 โดยที่นักอุตุนิยมวิทยาแบ่งเมฆออกเป็น 3 ระดับ คือ เมฆชั้นต่ำ เมฆชั้นกลาง และเมฆชั้นสูงแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจำแนกความสูงของเมฆตามแถบขั้วโลกที่แตกต่างกัน [3]

Level	Polar region	Temperate region	Tropical region
High clouds	3-8 km	5-13 km	6-18 km
Middle clouds	2-4 km	2-7 km	2-8 km
Low clouds	Surface-2 km	Surface-2 km	Surface-2 km



รูปที่ 1 เมฆ 10 ประเภทแบ่งตามความสูงและรูปร่าง [3]

เมฆชั้นต่ำ อยู่สูงจากพื้นดินไม่เกิน 2 กิโลเมตร มี 5 ชนิด ได้แก่ เมฆสตราตัส เมฆคิวมูลัส เมฆสตราโตคิวมูลัส เมฆนิมโบสตราตัส และเมฆคิวมูโลนิมบัส

หมายเหตุ: นักอุตุนิยมวิทยาถือว่า เมฆคิวมูลัสและเมฆคิวมูโลนิมบัส เป็นเมฆก่อตัวในแนวตั้ง ซึ่งมีฐานเมฆอยู่ในระดับเมฆชั้นต่ำ แต่ยอดเมฆอาจอยู่ในระดับของเมฆชั้นกลางและชั้นสูง

	<p>(a) ฆตฐฐฐฐฐ (Stratus)</p>
	<p>(b) ฆตฐฐฐฐฐฐฐฐฐ (Stratocumulus)</p>



(c) ฝนโปรยปราย (Nimbostratus)



(d) ฟ้าใส (Cumulus)



(e) ศึกษาคูณิมบัส (Cumulonimbus)

รูปที่ 2 เมฆชั้นต่ำ (ภาพโดย: PiccoloNamek, Jarmo Koistinen, Simon, Simo Räsänen)

เมฆชั้นกลาง เกิดขึ้นที่ระดับสูง 2-6 กิโลเมตร ในการเรียกชื่อจะเติมคำว่า “อัลโต” ซึ่งแปลว่า “ชั้นกลาง” ไว้ข้างหน้า เช่น เมฆแผ่นในชั้นกลางถูกเรียกว่า “เมฆอัลโตสตราตัส” (Altostratus) เมฆก้อนชั้นกลางคือ “เมฆอัลโตคิวมูลัส” (Alto cumulus) ข้อสังเกตคือเมื่อเมฆชั้นกลางมีความหนาแน่นพอที่จะบดบังดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดเงา บางครั้งมองเห็นเป็นสีเทา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เมฆชั้นกลาง (ภาพโดย: Bidgee, ART RANGNO)

เมฆชั้นสูง เกิดขึ้นที่ระดับความสูงมากกว่า 6 กิโลเมตร ในการเรียกชื่อจะเติมคำว่า “เซอโร” ซึ่งแปลว่า “ชั้นสูง” ไว้ข้างหน้า เช่น เมฆแผ่นชั้นสูงเรียกว่า “เมฆเซอโรสตราตัส” (Cirrostratus) เมฆก้อนชั้นสูงเรียกว่า “เมฆเซอโรคิวมูลัส” (Circocumulus) นอกจากนั้นยังมีเมฆชั้นสูงที่มีรูปร่าง

เหมือนขนนก เรียกว่า “เมฆเซอร์รัส” (Cirrus) ข้อสังเกตคือ เนื่องจากอากาศข้างบนบางมาก เมฆชั้นสูงไม่มีความหนาแน่นมากพอที่จะบดบังดวงอาทิตย์ จึงมองเห็นเป็นสีขาวเท่านั้นดังรูปที่ 4





รูปที่ 4 เมฆชั้นสูง (ภาพโดย: SanchaiRat, Bieverwin)

## 2.2 อุปกรณ์ตรวจจับเมฆ

เมฆนั้นสามารถบ่งบอกถึงเหตุการณ์ทางธรรมชาติที่เกี่ยวกับดินฟ้าและอากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน เช่น การมาของพายุฝนหรือการบดบังวิสัยของการบินของเครื่องบิน ดังนั้นการตรวจจับเมฆและคุณลักษณะของมันจึงเป็นส่วนสำคัญ ในบทนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับเมฆได้ โดยแบ่งเป็นการตรวจจับแบบส่งถ่ายและตรวจจับพลังงาน (Active remote sensing) และแบบตรวจจับโดยไม่มีการส่งถ่ายพลังงาน

### 2.2.1 เรดาร์ตรวจจับเมฆ

เครื่องตรวจจับเมฆโดยใช้คลื่นวิทยุหรือ radar ใน R. Tapakis and A. G. Charalambides, "Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review, 2013 [3] ทำงานโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วทั้งรัศมีของเครื่องส่งสัญญาณและตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่การปล่อยสัญญาณจนถึงการตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา สามารถบ่งบอกตำแหน่งความสูงฐานและความสูงในแนวตั้งของเมฆได้ [5, 6] ซึ่งเรดาร์ส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับตรวจจับเมฆใช้คลื่นในช่วงความถี่ขนาดกลาง Medium Wave band เรียกว่า MilliMeter Wave Radars (MMWRs) โดยการปล่อยคลื่นขนาดความถี่ 35 GHz (Ka band) หรือ 94 GHz (W band) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสำหรับตรวจจับเมฆหรือความสูงเมฆ และยังสามารถตรวจจับละอองหิมะและละอองฝนได้และมีความสามารถตรวจจับที่ความสูงถึง 20



km อย่างไรก็ตามเรดาร์นี้สามารถตรวจจับอนุภาคเล็ก ๆ ในชั้นบรรยากาศได้ ซึ่งทำให้การตรวจจับมีผลคลาดเคลื่อนในสภาพอากาศแบบครึ้มฟ้าครึ้มฝน [7, 8] ตัวอย่างอุปกรณ์ชนิด MMWRs ระดับ ka band เช่น MIRA-35 model ดังรูปที่ 5 (ซ้าย) ที่สามารถวัดสัญญาณสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกไปในย่าน 35.5 GHz (8 mm) band โดยความสามารถในการวัดความสูงของอุปกรณ์นี้อยู่ที่ 0.25-14 km ที่ความละเอียด 30 m [6, 9]



รูปที่ 5 (ซ้าย) เรดาร์ตรวจจับเมฆ MIRA-35 [10] และ(ขวา) Ceilometer 8200-CHS [11]

### 2.2.2 เครื่องวัดความสูงฐานเมฆ

เครื่องวัดความสูงฐานเมฆใน (สหัชชา พิงาม, “การศึกษาความสูงของฐานเมฆและปริมาณเมฆที่สถานีวัดแห่งหนึ่งในเขตร้อนชื้นในภาคเหนือของประเทศไทย” (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาสาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2560), หน้า37 [12] ใช้ Light Detection And Ranging (LIDAR) เป็นตัวกำเนิดแสงชนิดเลเซอร์ซึ่งมีสีเดียว (ตรงกันข้ามกับแหล่งกำเนิดแสงแบบอื่น ๆ ที่ปล่อยแสงหลายความยาวคลื่น) ข้อดีของเลเซอร์คือสามารถส่งผ่านได้ในระยะไกลและมีการหักเห่น้อยมาก ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ เลเซอร์จาก LIDAR จะถูกยิงออกไปเป็นพัลส์สั้นๆ และ LIDAR บางชนิดสามารถส่งเลเซอร์ที่มีความถี่พัลส์ได้สูงถึง 300,000 pulse/s

หลักการของเครื่องวัดความสูงฐานเมฆนั้นจะใช้พัลส์เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงมากตัดผ่านท้องฟ้า เมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดการกระเจิงแสงในหลายทิศทางรวมถึงทิศทางสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ตรวจวัดเรียกสำ (Back-scattered) โดยมีอุปกรณ์รับสัญญาณ (Receiver unit) ทำหน้าที่รับสัญญาณที่สะท้อนจากเมฆที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดช่วงเวลา (Time interval meter) ทำหน้าที่จับเวลาที่วัดตั้งแต่เริ่มปล่อยแสงเลเซอร์พัลส์จนถึงเวลาที่ตรวจรับแสงสะท้อนกลับมา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้คำนวณระยะทาง  $R$  ระหว่างเมฆและเครื่องวัดความสูงฐานเมฆได้จากสมการ (1) [12]

$$R = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

เมื่อ	$R$	คือ	ระยะทางระหว่างเครื่องวัดความสูงฐานเมฆและก้อนเมฆ [13]
	$c$	คือ	อัตราเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8$ [m/s]
	$t$	คือ	เวลาที่ใช้ในการรับและส่งสัญญาณ [13]

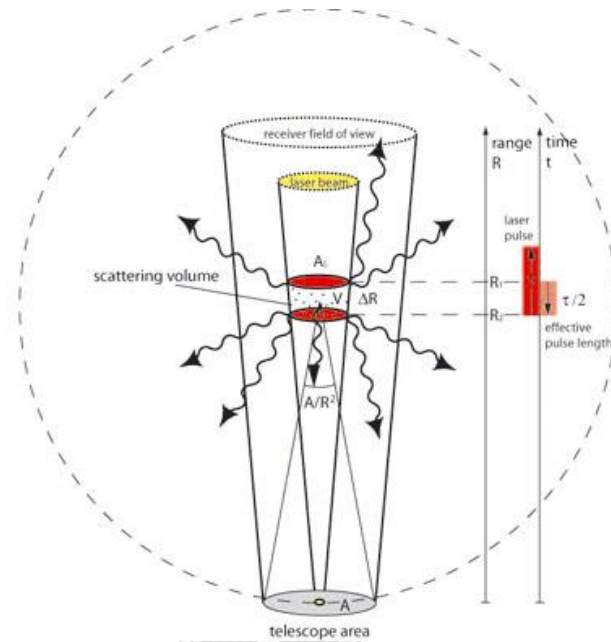
นำระยะทาง  $R$  แทนค่าลงในสมการ LIDAR equation ในสมการที่ (2) เพื่อหาค่า Volume backscatter coefficient  $\beta(r)$

$$P(r) = K_s \beta(r) \frac{O(r)}{R^2} e^{-2 \int_0^r \alpha(x) dx} \quad (2)$$

เมื่อ	$P(r)$	คือ	กำลังของสัญญาณเลดาร์ที่รับได้ที่ระยะ $r$ [W]
	$K_s$	คือ	ค่าคงที่ของระบบหาได้จากสมการที่ (3)
	$\beta(r)$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงเชิงปริมาตรที่ระยะ $r$ [ $\text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]
	$O(r)$	คือ	Overlap function
	$r$	คือ	พิสัย [13]
	$e^{-2 \int_0^r \alpha(x) dx}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่เกิดจากการที่สัญญาณเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุเกิดการกระเจิงสะท้อนกลับมาที่ระยะ $r$
	$\alpha(r)$	คือ	สัมประสิทธิ์การลดทอน [ $\text{m}^{-1}$ ]
	$K_s$	คือ	พารามิเตอร์ของระบบเครื่องวัดความสูงฐานเมฆที่บ่งบอกถึงการกระเจิงแสงกลับมาของเลเซอร์ที่หาได้จากสมการที่ (3) และที่ตำแหน่งความสูงที่ให้ค่า $\beta(r)$ สูงสุดพิจารณาเป็นฐานของเมฆ

$$K_s = P_0 \frac{c\tau}{2} A_0 \eta \quad (3)$$

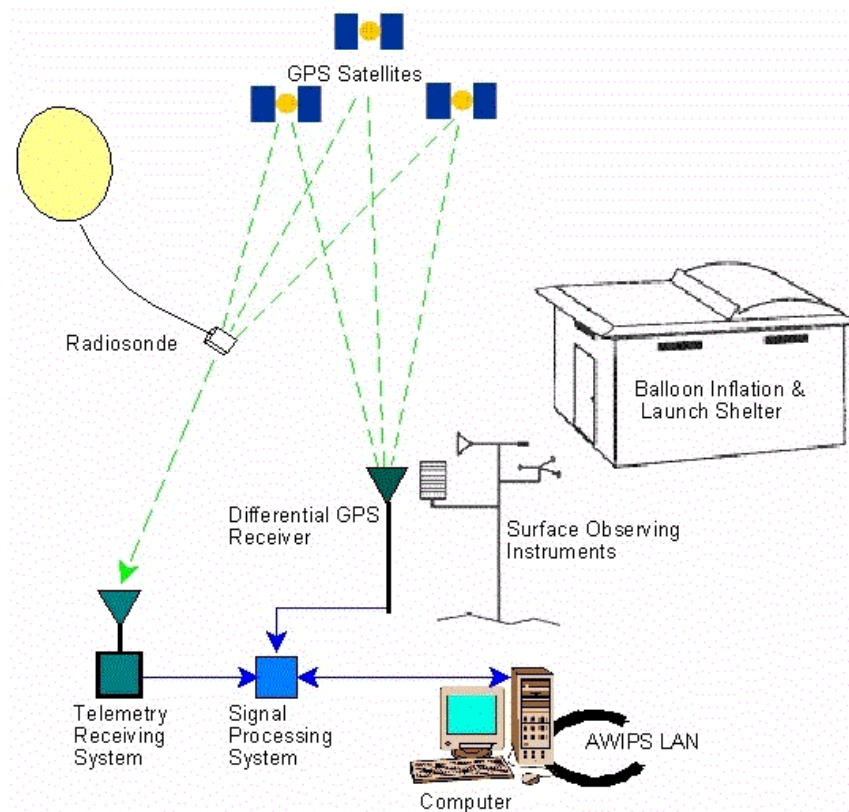
เมื่อ	$P_0$	คือ	กำลังของเลเซอร์ตอนเริ่มต้น [W]
	$\tau$	คือ	Laser pulse duration [13]
	$A_0$	คือ	พื้นที่รับแสง [ $m^2$ ]
	$\eta$	คือ	ประสิทธิภาพรวมของเครื่องมือ



รูปที่ 6 แบบจำลองเรขาคณิตของเครื่องวัดความสูงฐานเมฆ [14]

### 2.2.3 เครื่องวิทยุหึ่งอากาศ (Radiosondes)

เครื่องวิทยุหึ่งอากาศรูปที่ 7 [3] คือบอลลูนตรวจจับสภาพอากาศที่ติดตั้งเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ เซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น และตรวจวัดความกดอากาศ เป็นต้น บรรจุอยู่ในภาชนะที่ผูกติดกับบอลลูนซึ่งภายในบรรจุก๊าซไฮโดรเจนและฮีเลียมที่ใช้ในการปรับระดับความสูงได้กว่า 30 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 5 เมตรต่อวินาที บอลลูนสามารถตรวจวัดความสูงเมฆ ความหนาและส่วนสูงเมฆได้ ข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือสามารถตรวจจับเมฆหลายชั้นได้ [15-17] แต่กำหนดระดับที่จะวัดนาน ๆ ไม่ได้ มีราคาแพงมาก เนื่องจากใช้แล้วทิ้ง

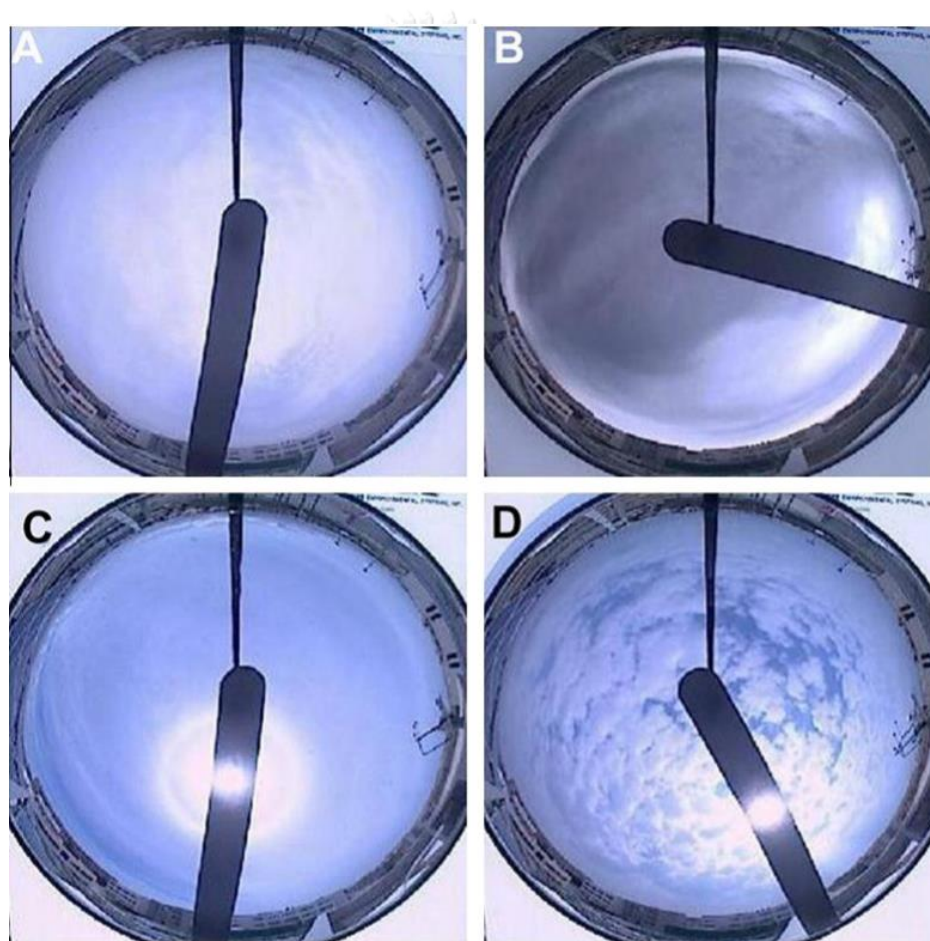


รูปที่ 7 Radiosondes system [18]

#### 2.2.4 กล้องตรวจอากาศ Ground based camera และ All sky camera

กล้องตรวจอากาศ [3] ถูกติดตั้งอยู่ที่ภาคพื้นโดยมีมุมมองการถ่ายภาพตั้งฉากกับพื้นโลกดังรูปที่ 8 ใช้สำหรับสังเกตท้องฟ้าและประเมินการปกคลุมของเมฆ กล้องตรวจอากาศโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนหลักสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือกล้องถ่ายภาพและภาชนะป้องกันที่ถูกออกแบบให้ทนต่อสภาพอากาศภายนอก ส่วนที่สองคือส่วนควบคุมการถ่ายภาพ [19] ส่วนสำคัญหลักของอุปกรณ์จับภาพคือเซนเซอร์รับภาพที่มีอยู่ 2 ชนิดชนิดแรกคือเซนเซอร์แบบ Charge-Coupled Device (CCD) มีลักษณะเป็นอุปกรณ์อนาล็อกประกอบไปด้วยหลอดโฟโตไดโอดทำด้วยซิลิคอน เมื่อแสงตกกระทบบนเซนเซอร์ จะแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ละหนึ่งจุดภาพ จากนั้นกระแสไฟในตัวกล้องจะแปลงแรงดันไฟฟ้านี้ไปเป็นข้อมูลดิจิทัลอีกทีหนึ่ง ชนิดที่สองคือเซนเซอร์แบบ Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) เป็นเซนเซอร์ที่ทำมาจากการสารกึ่งตัวนำที่เพิ่มแผงวงจรข้างเซนเซอร์ภาพที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานแสงเป็นแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้านั้นเป็นข้อมูลดิจิทัลได้ทันที

โดยมากการติดตั้งกล้องตรวจอากาศประกอบด้วยเลนส์ที่มีมุมกว้างมากและให้ภาพผิดไปจากภาพจริง (Fisheye Lens) เพื่อเพิ่มมุมมองการถ่ายภาพและโดมกระจกใสทรงครึ่งวงกลมสำหรับป้องกันเลนส์จากการเกะก้างของน้ำฝนหรือเพิ่มเติมอุปกรณ์ซ่อนรัศมีดวงอาทิตย์ (Solar Tracking Occultor) สำหรับป้องกันแสงจ้าที่เกิดจากดวงอาทิตย์ [20] และในบางรุ่นที่เพิ่มเติมในส่วนของอัลกอริทึมที่ใช้จำแนกภาพถ่ายโดยใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห โดยส่วนมากจะเป็น Color Ratio Threshold สามารถจำแนกภาพท้องฟ้าและเมฆจากภาพ [21] โดยใช้ข้อมูลสีในการเทียบข้อเสียของกล้องตรวจอากาศคือ ระบบอาจตรวจจับผิดพลาดเมื่อเมฆมีลักษณะเบาบาง และมีข้อจำกัดในการแยกแยะได้เฉพาะเมฆบางชนิดที่เห็นขอบได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 8 ตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องตรวจอากาศที่มีสภาพอากาศแตกต่างกันทั้ง 4 ภาพ (A) เมฆ Altostratus (B) เมฆ Nimbostratus ฐานเมฆสีเทาเข้ม (C) Cirrostratus (D) Altocumulus ที่ปรากฏเป็นปุยเมฆ [3]

กล้องตรวจอากาศอีกชนิดคือ Whole Sky Imager (WSI) ในรูปที่ 9 เป็นอุปกรณ์ชนิดเดียวกันกับ Ground-Based Camera ที่เพิ่มเติมความสามารถในการถ่ายภาพได้ทั้ง Visible

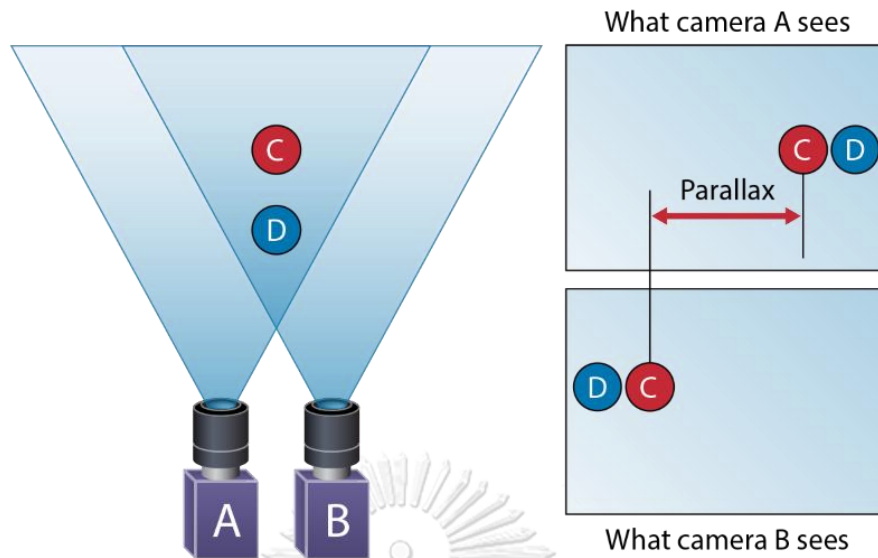
Image ในเวลากลางวันและ Near IR image ในกลางคืน อีกทั้งเซนเซอร์รับแสงที่ถูกออกแบบมาอย่างดีเพื่อใช้ในการลดสัญญาณรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 9 กล้องตรวจอากาศรุ่น OMEA 3x/6x [22]

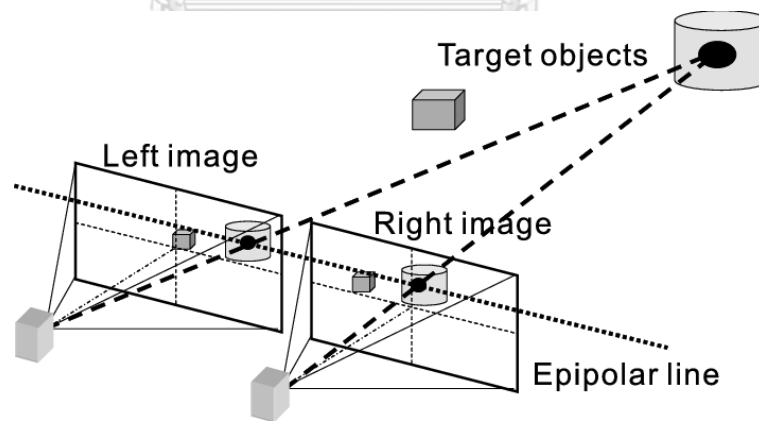
### 2.3 ระบบสเตอริโอวิชั่น

ระบบสเตอริโอวิชั่นคือกระบวนการใช้ภาพถ่ายสองมิติมากกว่าหนึ่งภาพในการสร้างภาพสามมิติ ใช้สำหรับจำลองรูปทรงเสมือนจริงของวัตถุโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และแสดงผล ระบบสเตอริโอวิชั่นนั้นเกิดขึ้นโดยใช้กล้องถ่ายภาพหนึ่งชุดถ่ายภาพจากมุมที่ต่างกันออกไปในกรณีที่วัตถุที่สนใจไม่เคลื่อนไหว หรือใช้กล้องถ่ายภาพมากกว่าหนึ่งตัวถ่ายภาพวัตถุที่ไม่เคลื่อนไหวหรือเคลื่อนไหว กรณีที่วัตถุเคลื่อนไหวระบบถ่ายภาพต้องถ่ายพร้อมกันโดยเพื่อให้เกิดองศาของภาพแตกต่างกันจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยรูปที่ 10 แสดงกรณีที่ใช้กล้องถ่ายภาพสองตัวในการสร้างระบบสเตอริโอวิชั่น



รูปที่ 10 Stereo Vision [23]

ระบบสเตอริโอวิชั่นอย่างง่ายสามารถทำได้โดยการใช้กล้องสองตัวติดตั้งให้มีระยะห่างระหว่างกล้องอย่างเหมาะสม ตั้งค่าความละเอียดภาพถ่ายให้มีขนาดเท่ากันบนทั้งสองกล้อง อีกทั้งการจัดเรียงของกล้องทั้งสองจำเป็นต้องอยู่ในแนวการมองที่ขนานกันดังรูปที่ 11 การทำเช่นนี้ทำให้เกิดความแตกต่างของภาพเพียงแกนเดียว เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์



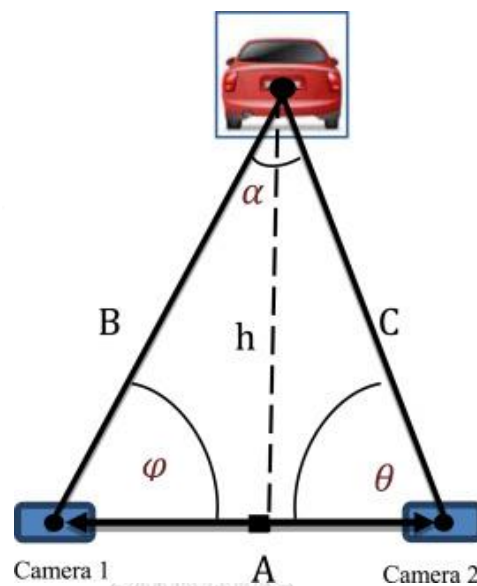
รูปที่ 11 ระบบสเตอริโอวิชั่นที่มีแนวการมองของกล้องทั้งสองขนานกัน [24]

จากภาพข้างต้นวัตถุทรงกระบอกและทรงจตุรัสถูกฉายลงบนภาพ Left image และ Right image ตามลำดับ เนื่องจากแนวการมองของกล้องทั้งสองนั้นขนานกันทำให้ภาพทั้งสองมีความสัมพันธ์กันเกิดเป็น Epipolar line ดังรูปเมื่อนำภาพทั้งสองมาซ้อนกันสามารถหาระยะที่แตกต่างของตำแหน่งวัตถุจากภาพทั้งสองในหน่วย Pixel ได้เราเรียกความต่างนั้นว่า Disparity

เมื่อทำการหา Disparity ทั้งภาพจะเรียกว่า Disparity map ซึ่งสามารถนำไปคำนวณระยะความลึก (Depth) ต่อไป

## 2.4 การสร้างรูปสามเหลี่ยมเพื่อหาระยะ (Triangulation)

Disparity จากขั้นตอนที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณระยะทางของวัตถุ ที่ใช้หลักการสร้างรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 องศาที่เกิดขึ้นภายในระบบสเตอริโอวิชั่น [25]

สมมติให้องศาการมองของกล้องทั้งสองขนานกัน ระยะห่างระหว่างกล้องคือ  $A$ ,  $h$  คือระยะวัตถุถึงกึ่งกลางของระยะ  $A$ ,  $B$  และ  $C$  คือระยะทางระหว่างวัตถุถึง  $Camera 1$  และ  $Camera 2$  ตามลำดับ, มุม  $\alpha, \varphi, \theta$  คือมุมภายในที่เกิดขึ้นในสามเหลี่ยม  $ABC$  ตัวแปรทั้งหมดนำมาสร้างความสัมพันธ์อย่างง่ายดังสมการ (4)-(6) [25]

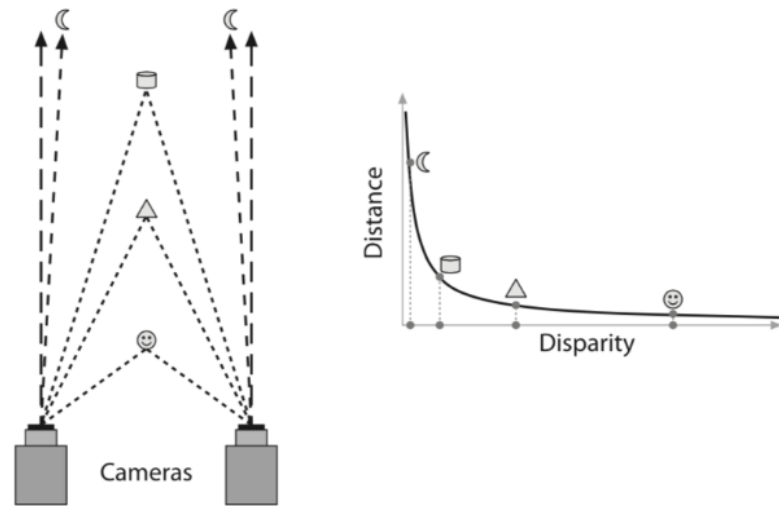
$$\sin \varphi = \frac{h}{B} \quad (4)$$

$$\sin \theta = \frac{h}{C} \quad (5)$$

$$h = B \sin \varphi = C \sin \theta \quad (6)$$



ระยะของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อการเกิดภาพบน *Camera 1* และ *Camera 2* และส่งผลต่อมุมมองภายในของสามเหลี่ยม โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 13 เมื่อวัตถุอยู่ใกล้ Disparity มีค่ามาก มุมของวัตถุต่อระบบถ่ายภาพมีค่ามาก วัตถุที่อยู่ไกลออกไป Disparity ลดลงตามลำดับจนถึงศูนย์ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง มุมของวัตถุลดลงเข้าใกล้ศูนย์เช่นกัน



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของระยะทางจากกล้องถึงวัตถุกับ Disparity [26]

## 2.5 การจำแนกภาพเมฆและท้องฟ้า

ขั้นตอนหลังจากที่ได้ภาพถ่ายมาแล้วคือการจำแนกภาพเมฆและท้องฟ้าให้เด่นชัด ซึ่งสามารถใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเบื้องต้น [13] ดังนี้

### 2.5.1 Simple Intensity Threshold Analysis

คือการจำแนกวัตถุอย่างง่ายโดยการแปลงภาพให้อยู่ในสัดส่วนสีเทา จากนั้นวัดความเข้มของทุกจุดบนภาพและจำแนกวัตถุตามสัดส่วนค่าสีเทาที่วัด เทคนิคนี้สามารถใช้จำแนกเมฆจากท้องฟ้าได้แต่ให้ความแม่นยำค่อนข้างต่ำ ระดับความเข้มของสีเทาที่ใช้ในการจำแนกแบ่งออกเป็น 5 ระดับดังนี้

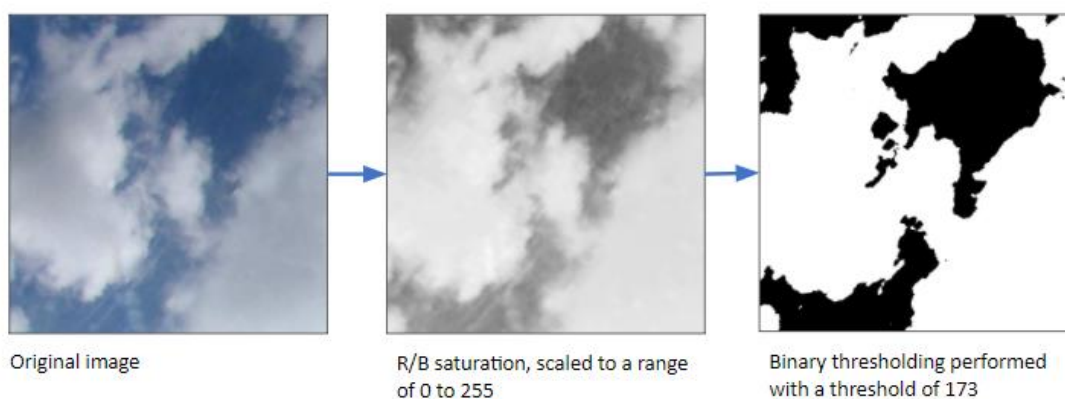
- 0 หมายถึงจุดภาพที่อยู่นอกพื้นที่ภาพ
- 1-99 หมายถึงจุดภาพของท้องฟ้า
- 100-139 หมายถึงเมฆก้อนบาง
- 140-200 หมายถึงเมฆทึบแสง
- 201-255 หมายถึงไม่ถูกจำแนก

### 2.5.2 R/B Threshold Technique

การจำแนกภาพวัตถุโดยอิงจากอัตราส่วนสีแดงและน้ำเงินที่มีสัดส่วนที่แตกต่างกัน จากภาพ เนื่องจากในความเป็นจริงชั้นบรรยากาศที่ไม่มีเมฆ ปรากฏเป็นสีฟ้าสะท้อนมายังตาเรา มาจากความสว่างของสเปกตรัมสีฟ้า ที่เกิดจากการกระเจิงของอนุภาคก๊าซที่ลอยอยู่บนชั้นบรรยากาศ แต่สำหรับส่วนประกอบของเมฆนั้นประกอบด้วยน้ำและน้ำแข็งที่กระเจิงต่อแสงสีฟ้าและแสงสีแดงในปริมาณที่เท่ากันจึงปรากฏออกเป็นสีขาวไปจนถึงเทาเข้มสะท้อนมายังตาเรา ดังนั้นในส่วนของท้องฟ้า จะกำเนิดแสงสีแดงต่ำกว่าบริเวณที่มีเมฆปรากฏ อย่างไรก็ตามกรณีเมฆชั้นสูงที่มาจากความหนาแน่นของชั้นเมฆต่ำจะไม่สามารถจำแนกเมฆกับท้องฟ้าได้อย่างชัดเจน

### 2.5.3 IHS Threshold Technique

IHS threshold technique คือเทคนิคที่แปลงภาพสี RGB มาอยู่ในย่าน IHS ที่ประกอบด้วยความเข้มชั้นแสง (Intensity), ความเข้มชั้นสี (Hue), และความอิ่มตัวสี (Saturation) ในการแยกแยะภาพระหว่างเมฆและท้องฟ้าดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ขั้นตอนการจำแนกภาพเมฆกับท้องฟ้าโดยใช้ R/B threshold technique [26]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยทางการสังเกตสภาพอากาศได้ถูกตีพิมพ์ออกมาต่อเนื่องรวมถึงการนำหลักประมวลผลภาพที่มีความซับซ้อนเข้ามามีส่วนร่วมในงานวิจัย ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับและวัดความสูงของเมฆ

Feister และคณะในปี 2010 [6] ทำการเปรียบเทียบวิธีการวัดความสูงโดยใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งจากภาคพื้นได้แก่ Nubiscope, WSI, Ceilometer และ Radar ผลการเปรียบเทียบอุปกรณ์เมื่อนำมาใช้วัดความสูงฐานเมฆปรากฏว่า Nubiscope คืออุปกรณ์ที่อาศัยการตรวจจับการสะท้อน

ของแสงอินฟราเรดที่ส่งออกไป เทียบกับ Ceilometer คืออุปกรณ์ที่อาศัยการตรวจจับการสะท้อนของเลเซอร์นั้นให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

Janeiro และคณะในปี 2010, 2012 [27, 28] พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความสูงฐานเมฆโดยใช้กล้องดิจิทัลจำนวนสองชุดติดตั้งที่ภาคพื้น โดยให้ห้องของเลนส์กล้องตั้งฉากกับพื้นโลกและตั้งเวลาให้ถ่ายภาพพร้อมกัน จากนั้นหาตำแหน่งที่สอดคล้องจากทั้งสองภาพด้วยวิธี Cross Correlation และนำความแตกต่างนั้นมาคำนวณหาความสูงฐานเมฆ พบว่าประสิทธิภาพในการวัดความสูงในเมฆชั้นต่ำนั้นให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าเมฆชั้นสูงเมื่อเทียบกับ Ceilometer เนื่องจากการติดตั้งที่คลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยส่งผลต่อผลลัพธ์ในการคำนวณ

Florian และคณะในปี 2017 [29] พัฒนาอัลกอริทึมในการสร้างแบบจำลองสามมิติของเมฆจากกล้องสองชุดติดตั้งบนพื้นดินจับภาพที่ความละเอียดสูงและใช้หลักการ Delaunay Triangulation ในการสร้างโครงข่ายสามมิติอย่างง่าย พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเรดาร์ตรวจวัดอากาศจากสถานีบันทึกข้อมูลดินฟ้าอากาศที่เมืองซางจีประเทศสิงคโปร์นั้นให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันสำหรับเมฆชั้นต่ำเนื่องจากเกิดโครงข่ายสามมิติที่ชัดเจน

ZHUO และคณะในปี 2014 [30] พัฒนาอัลกอริทึมในการจำแนกประเภทของเมฆจากภาพถ่ายโดยใช้หลักการ Census Transform และ Automatic Block Assignment method ในการสกัดเมฆออกจากภาพและใช้ Feature vector ร่วมกับ Support Vector Machine ในขั้นตอนจำแนกชนิดของเมฆ พบว่าในขั้นตอนการสกัดภาพเมฆด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าสนใจรวมถึงขั้นตอนการจำแนกชนิดของเมฆให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ K-NN และ ANN แต่มีคุณภาพลดลงเมื่อเกิดสภาพอากาศที่ลึกลับวิสัยทัศน์ของระบบถ่ายภาพ เช่น ฝน, หิมะและหมอก

Florian และคณะในปี 2015 [31] เสนอการวัดความสูงฐานเมฆด้วยกล้องถ่ายภาพสองชุดและใช้หลักการ Disparity หาระยะจุดภาพที่แตกต่างกันในสองภาพ จากนั้นสร้างโมเดลสามมิติจาก Disparity พบว่าปัญหาหลักที่เกิดขึ้น เกิดจากการปรับเทียบและการจัดเรียงของกล้องทั้งสองที่ต้องมีความแม่นยำและยอมให้เกิดความผิดพลาดอย่างน้อยที่สุด

ตารางที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ผู้เขียนและปีที่เผยแพร่	Fernando M. Janeiro และคณะ, 2012 [27]	Florian M. Savoy และคณะ, 2017 [29]	Florian M. Savoy และคณะ, 2015 [31]
รูปแบบของงานวิจัย	วิเคราะห์ความสูง,ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของเมฆโดยใช้กล้องดิจิทัล 2 ชุด ติดตั้งที่ภาคพื้น	แบบจำลอง 3 มิติ เพื่อวิเคราะห์ความสูงและปริมาณของเมฆที่ปกคลุมโดยใช้กล้องดิจิทัล 2 ชุด	วิเคราะห์ความสูงเมฆโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล 2 ชุด
การออกแบบ	กล้องดิจิทัล CANON EOS 1000D Resolution 3888 x 2592 Horizontal angle of view: 64.5° Vertical angle of view: 45.5° เชื่อมต่อกันระหว่างกล้องด้วย NI USB-6009 ควบคุมและประมวลผลโดย Laptop Baseline: 28.9 m	Own WSI from DSLR camera 18-Mpixel with fish-eye lens ตั้งค่าการถ่ายภาพให้เกิด HDR ควบคุมและประมวลผลโดย Server Baseline: 100 m	Own WSI from DSLR camera 18-Mpixel with fish-eye lens ควบคุมและประมวลผลโดย Server Baseline: 400 m
หลักการประมวลผลที่ใช้	Stereo correspondence: Normalized cross correlation Principle: Triangulation	Un-distortion: ray-tracing approach Feature Point Matching: SIFT with Brute Force Matching and Lowe's ratio test Principle: Delaunay Triangulation	Un-distortion: ray-tracing approach Disparity map: Three-dimensional scene flow algorithm proposed by Cech Principle: Generate 3D point cloud
การยืนยันผล	เปรียบเทียบผลการทดลองกับ LIDAR โดยแบ่งเป็นเมฆชั้นต่ำ 1,500 m และเมฆชั้นสูง 6,000 m พบว่าการวัดความสูงนั้น ความแม่นยำในการวัดน้อยลงเมื่อฐานเมฆอยู่สูง เนื่องจากจำนวน pixel ที่น้อย อีกทั้งยากต่อการจำแนกด้วยตาเปล่า	เปรียบเทียบผลการทดลองกับ Radar ตรวจวัดอากาศจากสถานีบันทึกข้อมูลดินฟ้าอากาศที่เมืองซางงี ประเทศสิงคโปร์นั้นให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันสำหรับเมฆชั้นต่ำ เนื่องจากเกิดโครงข่ายสามมิติที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามโมเดลนี้สามารถสร้างโครงข่ายได้เพียงฐานเมฆเท่านั้น เนื่องจากการถ่ายภาพของกล้องที่ติดตั้งอยู่บริเวณภาคพื้น	โมเดลสามารถสร้าง 3D Point-cloud ได้ จาก การ Matching ภาพทั้งสอง เมื่อเทียบกับภาพเมฆที่ถ่ายได้ที่มีความสูงฐานที่ 500 m แล้วมีความถูกต้องแม่นยำสูง

## 2.7 OpenCV (Open source Computer Vision)

OpenCV [32] คือชุดข้อมูลที่รวบรวมเครื่องมือสำหรับการเขียนโปรแกรม (Library of Programming Functions) ที่ส่วนใหญ่จะสนับสนุนงานทางด้าน การแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ (Real-Time Computer Vision) เดิมทีแล้วถูกพัฒนาโดย Intel แต่ภายหลังได้รับการสนับสนุนโดย Willow Garage และ Itseez (ซึ่งต่อมาถูกเข้าซื้อโดย Intel) OpenCV เป็นชุดข้อมูลแบบข้ามแพลตฟอร์ม (Cross-Platform) และใช้งานได้ฟรีภายใต้ลิขสิทธิ์ของ BSD แบบเปิด (Open-Source BSD License) OpenCV ยังสนับสนุนโครงสร้างการเรียนรู้เชิงลึก หรือ Deep Learning Frameworks ได้แก่ TensorFlow, Torch/PyTorch และ Caffe ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน OpenCV มีดังนี้

- ชุดเครื่องมือคุณลักษณะ 2 มิติและ 3 มิติ (2D and 3D feature toolkits)
- การประมาณระยะในขณะเคลื่อนที่ (Ego motion Estimation)
- ระบบรู้จำใบหน้า (Facial recognition system)
- การจดจำท่าทาง (Gesture recognition)
- ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ Human-Computer interaction (HCI)

OpenCV ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา C++ รองรับภาษา Python, Java และ MATLAB/OCTAVE — API สำหรับข้อมูลทางการใช้งานข้ามภาษาเหล่านี้สามารถพบได้ในเอกสารออนไลน์ ซึ่งมีการรวมไว้หลากหลายภาษา เช่น C#, Perl, Ch, Haskell และ Ruby ซึ่งได้รับการพัฒนาเพื่อส่งเสริมการนำมาใช้งานรองรับการใช้งานที่หลากหลาย

สำหรับการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้พัฒนาได้พัฒนาเครื่องมือรองรับการทำงานทางด้าน การจำลองโมเดล 3 มิติขึ้น (3D Reconstruction) ที่มีขั้นตอนประกอบด้วย Camera Calibration, Pose Estimation, Epipolar Geometry และ Depth Map from Stereo Image

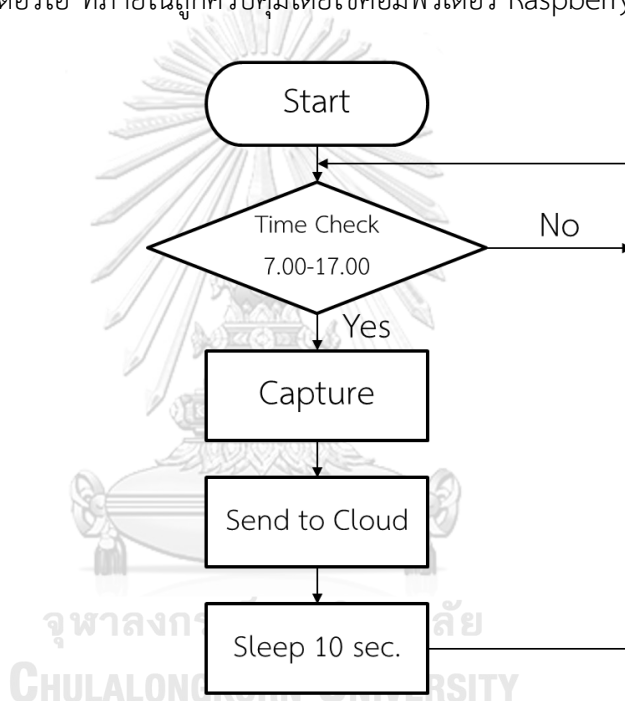
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้อธิบายวิธีดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น หลักการทำงานของระบบถ่ายภาพและระบบควบคุมการถ่ายภาพ อัลกอริทึมที่ใช้ในการวิเคราะห์ และการประดิษฐ์อุปกรณ์

#### 3.1 ระบบถ่ายภาพและระบบควบคุมการถ่ายภาพ

ระบบถ่ายภาพนั้นถูกออกแบบให้ใช้กล้องดิจิทัลไร้กระจก (Mirrorless) รุ่น Canon EOS M100 จำนวน 2 ชุดถูกเสริมด้วยฟิลเตอร์กรองแสงสะท้อน Circular Polarized Filter ทำหน้าที่เป็นระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ ที่ภายในถูกควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ Raspberry pi 4 (B+)

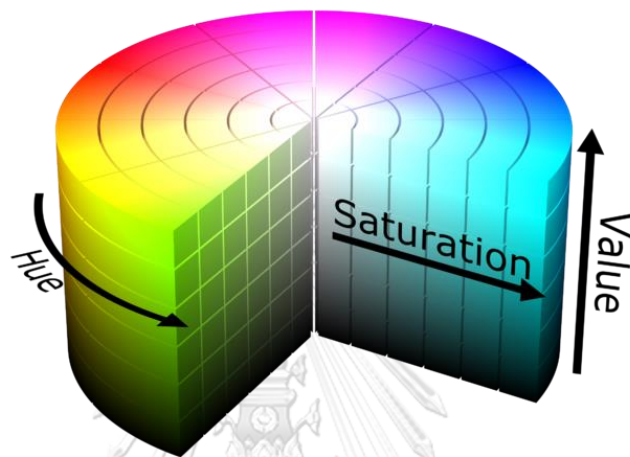


รูปที่ 15 แผนภูมิการทำงานของระบบถ่ายภาพ

รูปที่ 15 แสดงโครงสร้างการส่งข้อมูลรูปภาพ เริ่มจากระบบทำการตรวจสอบเวลาว่าอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนดหรือไม่ (7.00น.-17.00น.) จากนั้นทำการถ่ายภาพโดยใช้การเทียบเวลาที่ตั้งไว้กับเวลาอ้างอิงบน Network Time Protocol (NTP) ที่ทำหน้าที่เป็นนาฬิกาหลัก ด้วยวิธีนี้กล้องทั้งสองชุดสามารถถ่ายภาพได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งสามารถยอมให้เกิดการหน่วงของเวลาจากกล้องทั้งสองได้ไม่เกิน 100ms เพื่อความแม่นยำในการประมวลผล จากนั้นทำการบันทึกภาพลงหน่วยความจำของ Raspberry pi และส่งภาพไปยัง Cloud Storage ผ่านอินเทอร์เน็ตโดยใช้ Wi-Fi

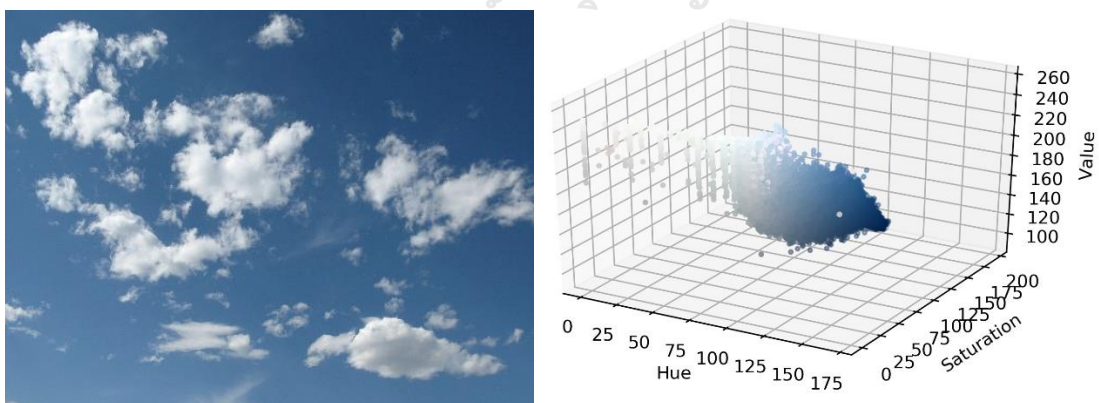
### 3.2 การจำแนกก้อนเมฆบนภาพถ่าย

การจำแนกเมฆจากภาพ เป็นขั้นตอนแรกที่ทำเพื่อป้องกันอัลกอริทึมในขั้นตอนการประมวลผลภาพ เกิดความสับสนระหว่างก้อนเมฆและท้องฟ้า โดยการใช้ระบบสี HSV (Hue Saturation Value) [33] ในการจำแนก โดย Hue คือค่าสี Saturation คือความบริสุทธิ์ของสีและ Value คือความสว่างของสีดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 เคนสีในรูปแบบ HSV

จากการทดลองเพื่อห่า่าน HSV ของภาพเมฆพบว่าช่วง HSV ของภาพตัวอย่างอยู่ในช่วง [H: 0-120, S: 0-200, V: 100-255] ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ภายถ่ายเมฆและการกระจายสีในย่าน HSV

จากนั้นทำการสกัดเฉพาะย่านสีที่กำหนดไว้บนภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีเฉพาะกลุ่มหรือก้อนเมฆดังรูปที่ 18 เพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผลภาพในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 18 ภาพถ่ายเมฆที่ถูกสกัดด้วยย่าน HSV

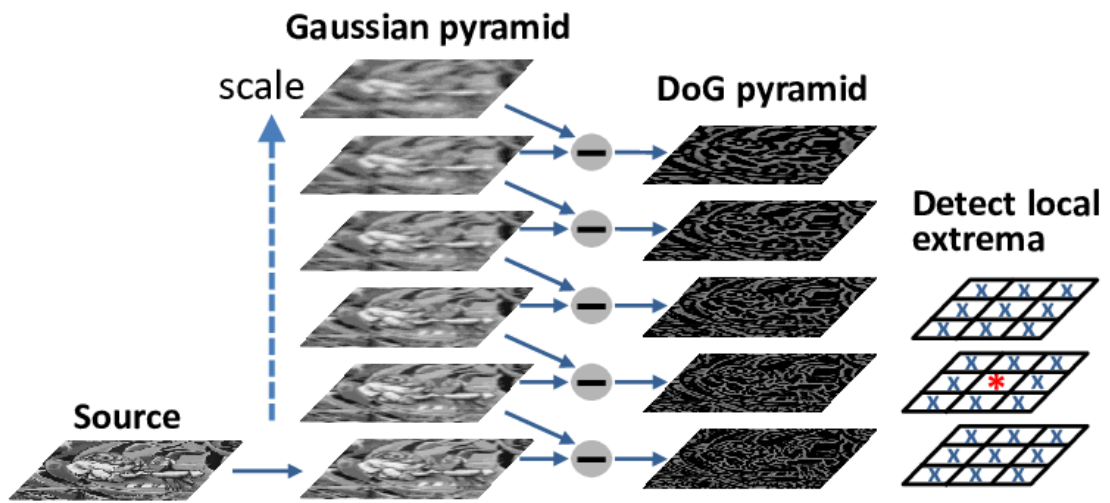
### 3.3 การหาลักษณะเด่นบนภาพ

ขั้นตอนการหาลักษณะเด่นบนภาพถูกใช้ในทุกระดับขั้นตอนประมวลผลภาพในงานวิจัยนี้ วิธีการที่เลือกใช้นั้นอาศัยหลักการ Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) [34-37] ที่ถูกค้นพบโดย David Lowe ในปี 2004 ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ

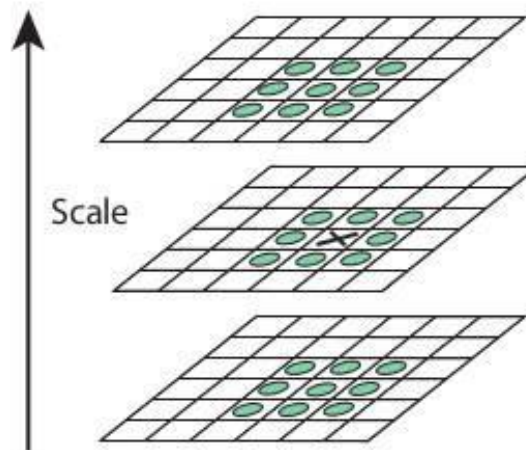
#### 3.3.1 Scale-space Extrema Detection

คือการหาลักษณะเด่นภาพเบื้องต้น ทำโดยการสร้างชุดภาพที่ประกอบด้วย ภาพย่อขนาดทั้งหมด 5 ลำดับ ซึ่งแต่ละลำดับเก็บภาพที่ถูกทำให้ไม่ชัดทั้งหมด 5 ระดับจากกระบวนการ Gaussian Blur โดยเรียกชุดภาพที่เกิดขึ้นว่า Gaussian Pyramid ซึ่งใน Gaussian Pyramid มีการเรียงภาพด้วยขนาดภาพและค่าความไม่ชัด จากนั้นทำการหาความแตกต่างของภาพที่เรียงลำดับใน Gaussian Pyramid นี้ด้วย Difference of Gaussian ให้ผลลัพธ์เป็นขอบภาพในแต่ละลำดับดังรูปที่ 19 จากนั้นทำการเลือกลักษณะเด่นสุดในบริเวณหรือ Maximum Local extrema และ Minimum Local extrema โดยการเปรียบเทียบจุดภาพที่สนใจกับจุดภาพข้างเคียงทั้งหมด 26 จุดภาพโดยแบ่งเป็นจุดภาพโดยรอบ ณ ลำดับเดียวกัน 8 จุด และจุดภาพโดยรอบ ณ ลำดับก่อนหน้า 9 จุด และลำดับถัดไปอีก 9 จุดในรูปที่ 20





รูปที่ 19 กระบวนการ Gaussian pyramid และ Difference of Gaussian เพื่อหา local extrema [38]



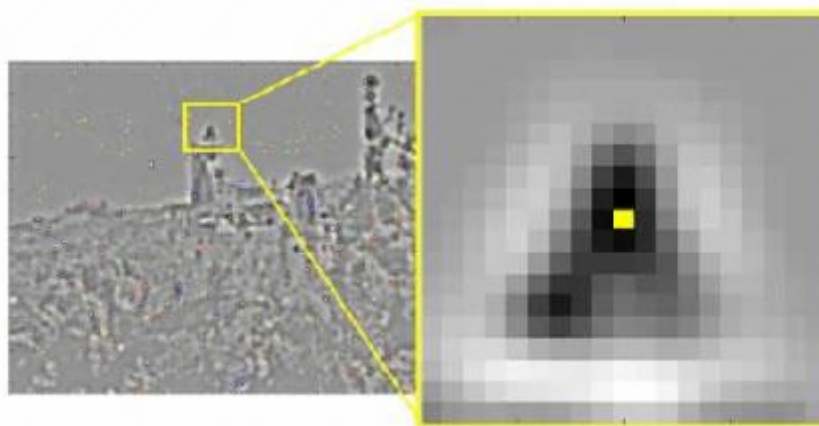
รูปที่ 20 กระบวนการหา local extrema จาก 8 pixels และ 18 pixels บนสเกลเดียวกันและสเกลรอบข้างตามลำดับ [39]

### 3.3.2 Keypoint Localization

หรือการจำกัดลักษณะเด่น ขั้นตอนที่แล้วได้สร้างลักษณะเด่นไว้เป็นจำนวนมากที่ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณขอบวัตถุบนภาพ การจำกัดจำนวนลักษณะเด่นนั้นทำโดยวิธีการเดียวกันกับ Harris Corner Detector [40] ที่ใช้ในการลบลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นบริเวณขอบวัตถุ และทำการจำกัดลักษณะเด่นอีกครั้งด้วยการหาอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) เพื่อเลือกตำแหน่งที่เกิดเส้นทับซ้อนกันมากที่สุด นำตำแหน่งที่ได้นั้นมาเทียบค่าความเข้มแสง (Intensity) โดยถ้ามีค่าความเข้มแสงนั้นน้อยกว่าระดับอ้างอิง ลักษณะเด่นนั้นจะถูกคัดออก

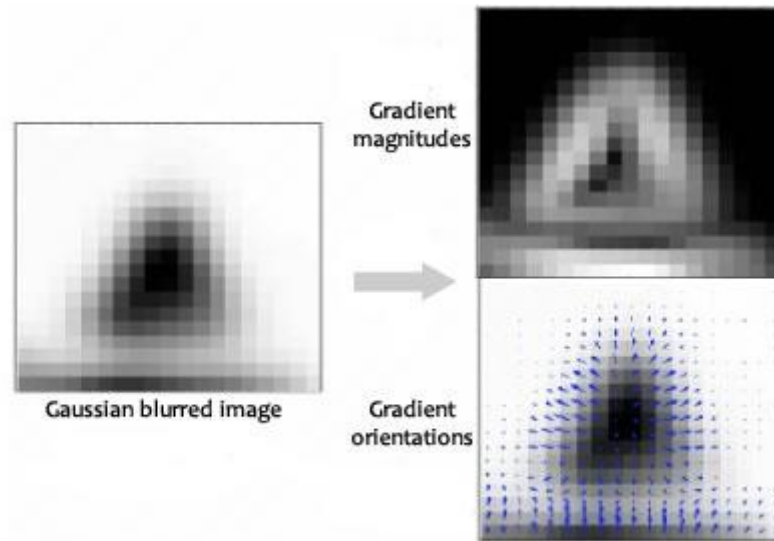
### 3.3.3 Orientation Assignment

คือการกำหนดลักษณะเด่น ขั้นตอนที่ผ่านมาทำให้ได้ลักษณะเด่นที่ต้องการโดยมีตัวอย่างดังรูปที่ 21 แต่ลักษณะเด่นนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานกับภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนหมุนได้ ดังนั้นเพื่อให้ลักษณะเด่นนั้นเป็นอิสระต่อการหมุนจึงต้องกำหนดลักษณะเด่น ซึ่งทำโดยหาตัววัดความแรงของภาพที่ประกอบด้วยขนาด (Gradient magnitude) และทิศทาง (Gradient Direction) ที่เกิดขึ้นบริเวณลักษณะเด่นนั้นดังรูปที่ 21 นำผลรวมของขนาดและทิศทางที่คำนวณได้มาจำแนกลงบนกราฟแสดงค่าที่ครอบคลุมทิศทางทั้งหมด 360 องศา ที่แสดงในรูปที่ 23 พบว่าเกิดผลรวมขนาดที่สูงสุดในบางทิศทางเท่านั้น ทำการเลือกทิศทางที่มีผลรวมขนาดสูงสุดเป็นลักษณะเด่น และทิศทางที่มีขนาดผลรวมมากกว่า 80% จากจุดสูงสุดนั้นเป็นอีกหนึ่งลักษณะเด่น ณ ตำแหน่งเดียวกันโดยมีทิศทางต่างกัน

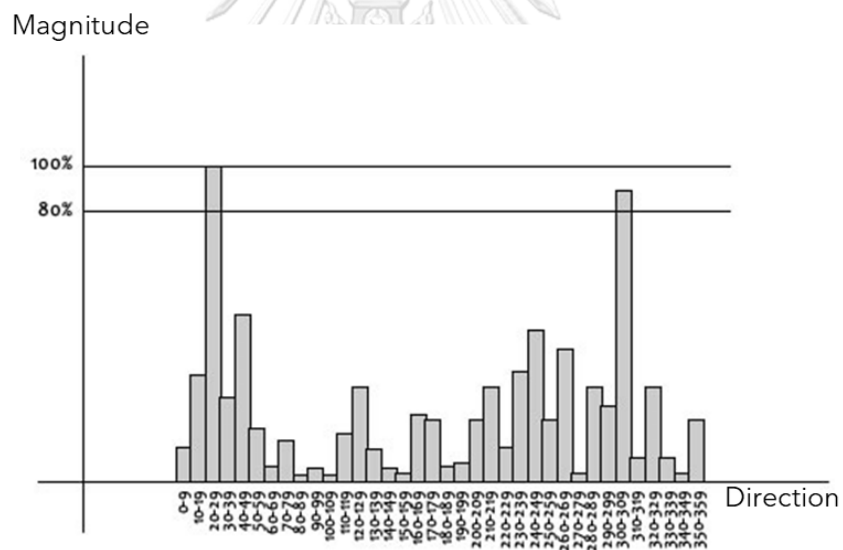


A keypoint

รูปที่ 21 ตัวอย่างลักษณะเด่น Keypoint [41]



รูปที่ 22 ตัววัดความแรงของภาพประกอบด้วย Gradient Magnitudes และ Gradient Orientations (Direction) [41]

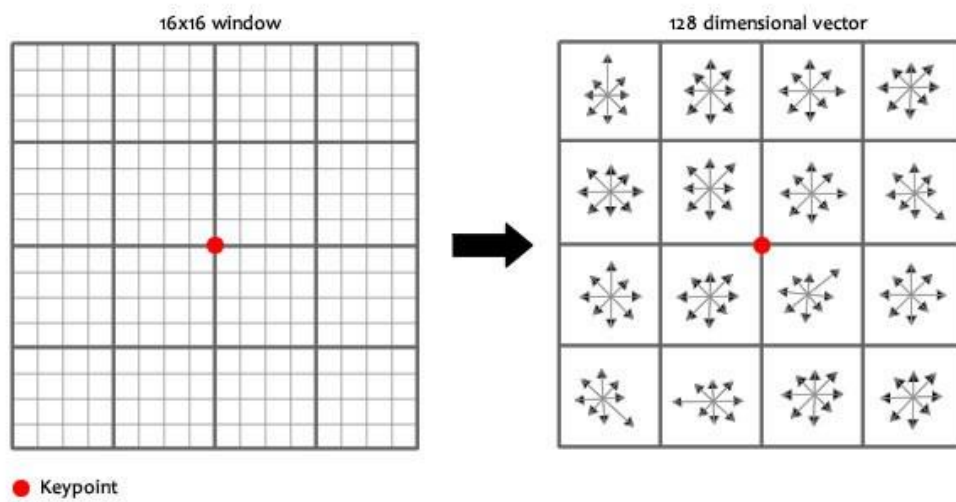


รูปที่ 23 กราฟ Histogram แสดงผลรวมของ Gradient Magnitudes ที่จำแนกตาม Directions [41]

### 3.3.4 Keypoint descriptor

การบันทึกลักษณะเด่น ในการใช้งานจริงนั้นภาพปลายทางที่ต้องการเทียบลักษณะเด่นอาจมีมุมมองและแสงที่เกิดในภาพที่แตกต่างไปจากภาพต้นทาง ดังนั้นเพื่อให้ลักษณะเด่นที่ได้มานั้นมีความยืดหยุ่นในการใช้งานจริง จึงต้องสร้างตัวระบุลักษณะเด่น ทำโดยการสร้างบล็อกขนาด

16x16 pixels รอบลักษณะเด่นนั้น ในบล็อกขนาด 16x16 pixels แปลงเป็นบล็อกย่อยขนาด 4x4 pixels ในแต่ละบล็อกย่อยได้เก็บค่า Gradient ทั้ง 8 ทิศทางไว้รวมเป็นบล็อกขนาด 4x4x8 ที่บันทึกขนาดและทิศทางของ pixel รอบ ๆ ลักษณะเด่นนั้น ๆ



รูปที่ 24 บล็อกขนาด 16x16 pixels ที่แปลงเป็นบล็อกย่อยขนาด 4x4 รอบลักษณะเด่นที่เก็บค่า Gradient Magnitude ทั้ง 8 ทิศทาง [41]

### 3.4 การเปรียบเทียบระบบถ่ายภาพ

การประมาณความสูงให้เกิดความแม่นยำขึ้นอยู่กับ การติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพ โดยการติดตั้งนั้นจำเป็นต้องให้ภาพที่ถูกถ่ายออกมาจากกล้องทั้งสองเกิดองศาการถ่ายภาพที่อยู่บนระนาบเดียวกันหรือทำให้วัตถุที่ปรากฏบนกรอบภาพทั้งสองขนานกันดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 ภาพถ่ายที่ขนานกันจากระบบถ่ายภาพแบบ Stereo

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการปรับเทียบระบบถ่ายภาพโดยใช้หลักการประมวลผลภาพดังนี้

#### 3.4.1 Image Matching

คือการจับคู่ลักษณะเด่นระหว่างภาพสองภาพที่ใช้หลักการ SIFT ที่อธิบายในหัวข้อที่

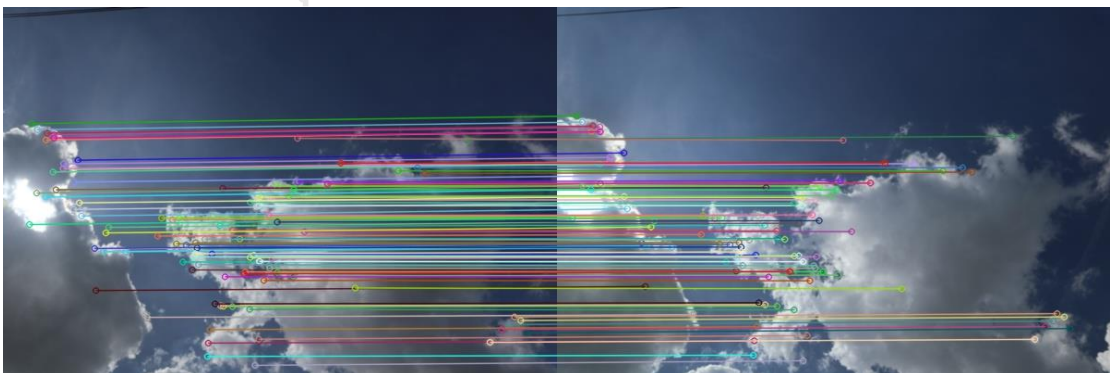
3.3 ในการเลือกลักษณะเด่น โดยการนำภาพเมฆที่ถูกตั้งเวลาให้ถ่ายพร้อมกันมาประมวลผลโดยการจับคู่ ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Image Matching

ผลลัพธ์ที่ได้คือภาพจากระบบถ่ายภาพที่ถูกจับคู่ลักษณะเด่น โดยการลากเส้นเชื่อมระหว่างภาพ สำหรับรูปที่ 26 เส้นที่ลากเชื่อมระหว่างภาพนั้นมีลักษณะไม่ขนานกับเฟรมของภาพในแนวนอน ซึ่งหมายถึงระบบถ่ายภาพที่ติดตั้งนั้นไม่ได้ขนานกันจริง แก้ไขโดยการปรับองศาการก้มเงยของระบบถ่ายภาพ โดยเมื่อปรับเทียบอย่างดีแล้วผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังรูปที่ 27 ที่มีเส้นเชื่อมระหว่างภาพขนานกับเฟรมของภาพในแนวระนาบ

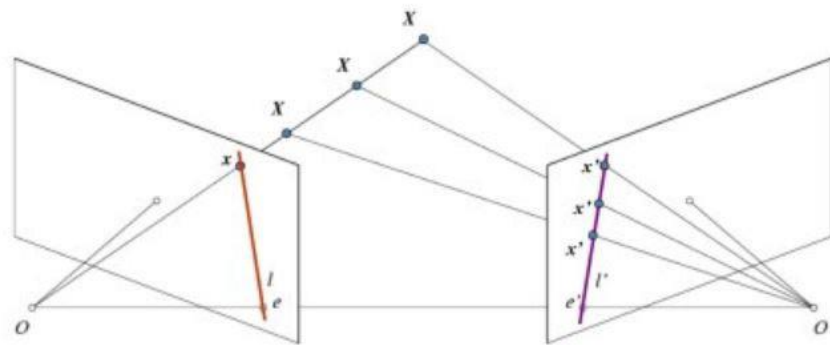
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 27 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Image Matching เมื่อระบบถ่ายภาพขนานกัน

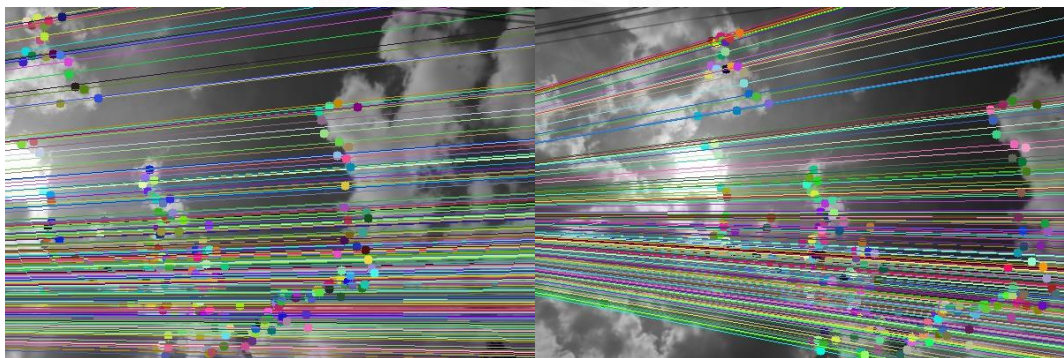
### 3.4.2 Epipolar Line

เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่ใช้ในการยืนยันว่าระบบภาพนั้นขนานกันอย่างสมบูรณ์และพร้อมใช้งาน ซึ่งวิธีการลากเส้น Epipolar Line นี้ถูกนำมาใช้คู่กับวิธี Image Matching หลักการของ Epipolar คือการจำลองมุมมองทางสามมิติที่เกิดจากระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอที่มีองศาถ่ายภาพที่แตกต่างกันระหว่างกล้องทั้งสองดังในแบบจำลองรูปที่ 28



รูปที่ 28 ระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอที่มีองศาการมองวัตถุที่ต่างกัน [42]

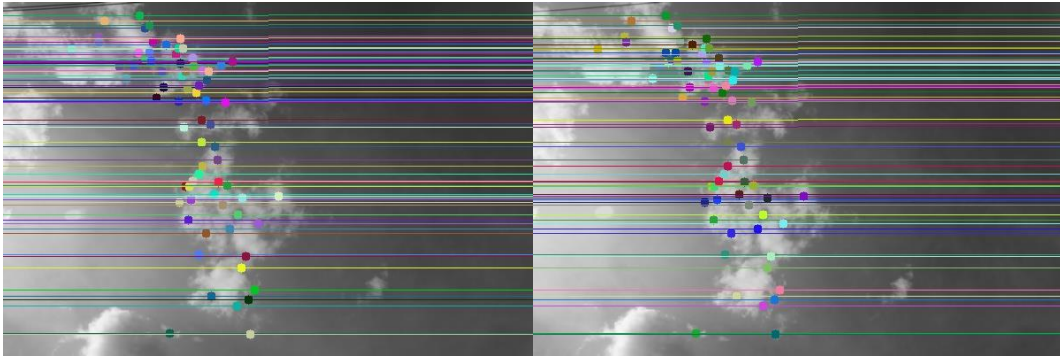
จากภาพข้างต้นเมื่อกล้อง  $O$  และ  $O'$  โฟกัสที่วัตถุ  $X$  ทั้ง 3 ตำแหน่งดังภาพ ภาพที่เกิดจากกล้อง  $O$  นั้นปรากฏวัตถุ  $X$  เพียงตำแหน่งเดียว แต่ภาพที่เกิดจากกล้อง  $O'$  นั้นปรากฏวัตถุ  $X$  ทั้ง 3 ตำแหน่งเนื่องจากมีมุมมองที่ต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ประโยชน์จากความสัมพันธ์ข้างต้นมาใช้ในการปรับเทียบระบบถ่ายภาพเมฆดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 ภาพผลลัพธ์จากระบวนการ Epipolar Line

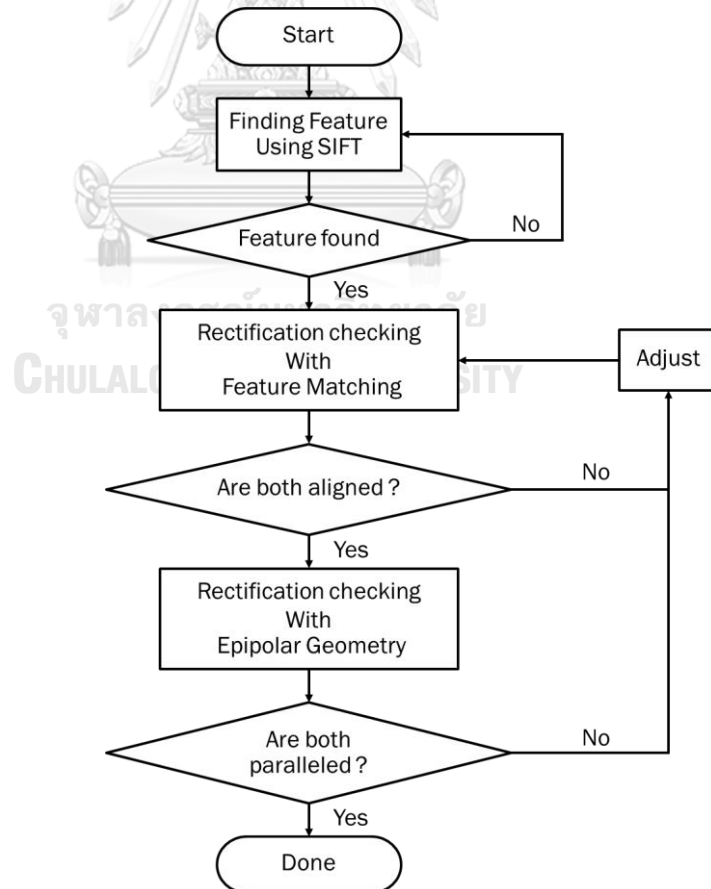
ภาพผลลัพธ์ในรูปที่ 29 แสดงถึงระบบถ่ายภาพที่ติดตั้งนั้นไม่ขนานกันทำให้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองภาพนั้น เกิดเส้นขนานในองศาที่แตกต่างกัน และเมื่อทำการ

ปรับเทียบให้ขนานกันแล้วผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นเป็นดังรูปที่ 30 ที่แสดงว่าระบบถ่ายภาพนั้นขนานกันและพร้อมใช้งาน



รูปที่ 30 ภาพผลลัพธ์จากกระบวนการ Epipolar Line เมื่อระบบถ่ายภาพขนานกัน

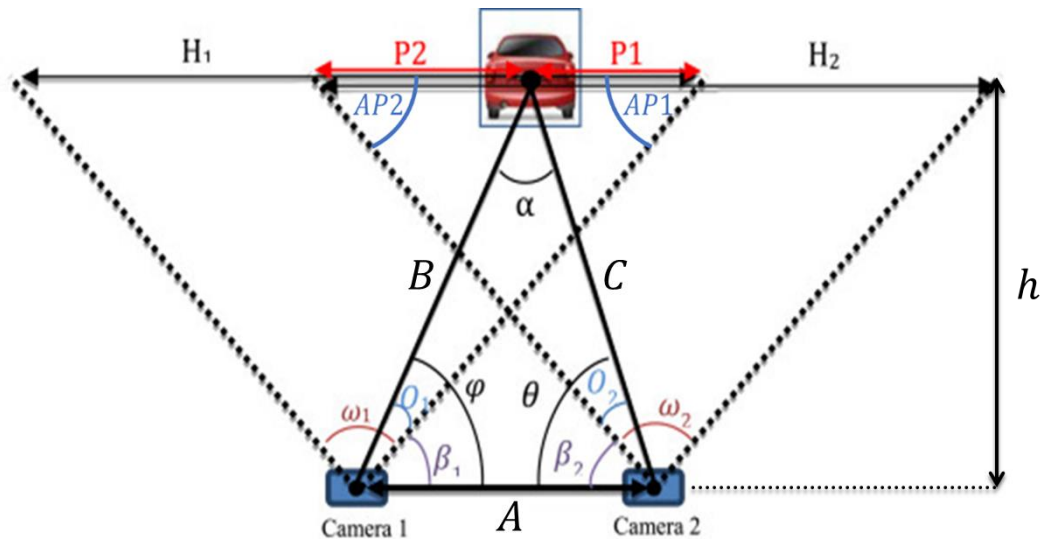
ขั้นตอนการปรับเทียบระบบถ่ายภาพที่เสนอนั้นสามารถนำมาเขียนลำดับการทำงานดังแผนภูมิแสดงขั้นตอนรูปที่ 31 ซึ่งวิธีการที่ได้มาซึ่งลักษณะเด่นบนภาพของทั้งสองนั้นคือ SIFT ที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 31 กระบวนการปรับเทียบระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ

### 3.5 การประมาณระยะทางจากภาพถ่าย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอขึ้น เพื่อรองรับการประมวลผลภาพจากระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ ที่ใช้ในการประมาณระยะทางจากกล้องถึงวัตถุที่สนใจ โดยในงานวิจัยนี้คือการประมาณความสูงฐานเมฆ ซึ่งวิธีการคำนวณความสูงที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยคือการคำนวณสามเหลี่ยมระยะทาง (Triangulation) ในรูปที่ 32 โดยมีคำนิยามแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 32 มุมภายในและระยะที่เกิดขึ้นจากระบบ Stereo Vision [25]

ตารางที่ 3 คำนิยามตัวแปรในสามเหลี่ยมระยะทางดังแสดงในรูปที่ 32

ตัวแปร	คำนิยาม	หน่วย
$h$	ระยะทางระหว่างวัตถุถึงระนาบที่วางกล้องในแกนภาพ (Optical Axis)	$m$
$A$	ระยะทางระหว่าง Camera1 และ Camera2 (Baseline)	$m$
$B$	ระยะทางระหว่าง Camera1 และวัตถุ	$m$
$C$	ระยะทางระหว่าง Camera2 และวัตถุ	$m$
$\alpha$	มุมภายในที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งวัตถุที่สนใจ	$rad$
$\varphi$	มุมภายในที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง Camera1	$rad$
$\theta$	มุมภายในที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง Camera2	$rad$
$\omega_i$	องศาการมองในแนวนอนของกล้อง Camera $i$ (คงที่)	$rad$
$H_i$	ความละเอียดภาพในแนวนอนของกล้อง Camera $i$	$pixels$
$V_i$	ความละเอียดภาพในแนวตั้งของกล้อง Camera $i$	$pixels$
$P_1$	ระยะระหว่างศูนย์กลางวัตถุกับ $H_1$	$pixels$



$P_2$	ระยะระหว่างศูนย์กลางวัตถุกับ $H_2$	<i>pixels</i>
$\beta_1$	มุมอ้างอิงเมื่อระบบถ่ายภาพขนานกัน คำนวณได้จาก $(180 - \omega_1)/2$	<i>rad</i>
$\beta_2$	มุมอ้างอิงเมื่อระบบถ่ายภาพขนานกัน คำนวณได้จาก $(180 - \omega_2)/2$	<i>rad</i>
$O_1$	มุมกระทำระหว่าง $\omega_1$ กับ $\beta_1$	<i>rad</i>
$O_2$	มุมกระทำระหว่าง $\omega_2$ กับ $\beta_2$	<i>rad</i>

จากรูปที่ 32 ตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)-(9) ที่สามารถนำมาคำนวณระยะทางได้จากสมการที่ (10)

$$\varphi = O_1 + \beta_1 = P_1 \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1 \quad (7)$$

$$\theta = O_2 + \beta_2 = P_2 \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 \quad (8)$$

$$\alpha = 180^\circ - (\varphi + \theta) = 180^\circ - \left( \left( P_1 \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1 \right) + \left( P_2 \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 \right) \right) \quad (9)$$

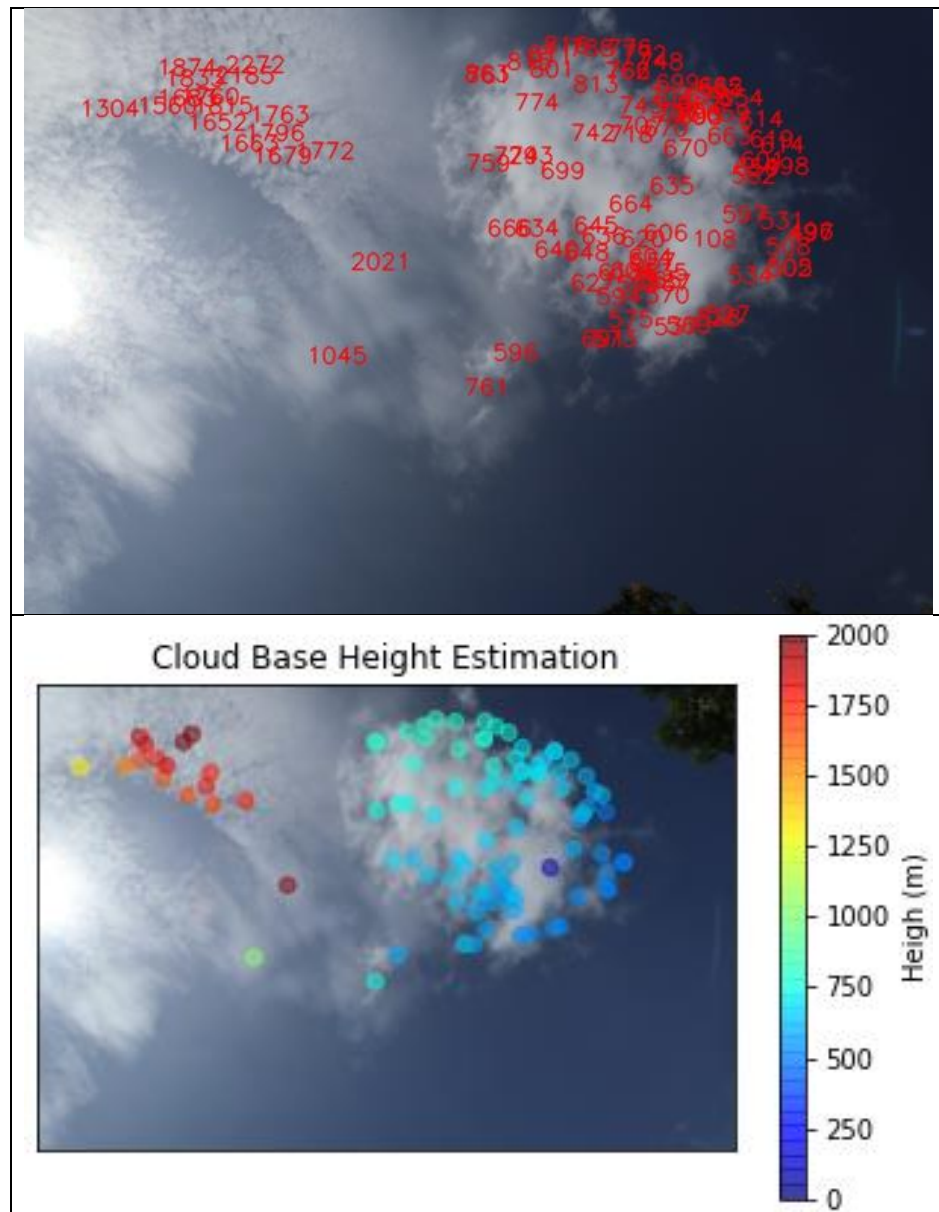
$$h = \frac{A \sin(\theta) \sin(\varphi)}{\sin(\alpha)} = \frac{A \sin\left(P_2 \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2\right) \sin\left(P_1 \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1\right)}{\sin\left(180^\circ - \left(P_2 \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 + P_1 \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1\right)\right)} \quad (10)$$

โดยปกติแล้วระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอใช้นั้นใช้กล้องถ่ายภาพชนิดเดียวกัน และตั้งค่าให้เกิดตัวแปรภายในกล้องถ่ายภาพที่เหมือนกัน ทำให้ตัวแปร  $\omega = \omega_1 = \omega_2$  ซึ่งทำให้  $H = H_1 = H_2$  และ  $\beta = \beta_1 = \beta_2$  ทำให้สมการที่ (10) ลดรูปเหลือ

$$h = \frac{A \sin\left(P_2 \frac{\omega}{H} + \beta\right) \sin\left(P_1 \frac{\omega}{H} + \beta\right)}{\sin\left(\pi - (P_1 + P_2) \frac{\omega}{H} + 2\beta\right)} \quad (11)$$

จากสมการ (11) ทำให้สามารถคำนวณระยะทางของวัตถุที่สนใจได้ในหนึ่งตำแหน่งเมื่อทราบ  $P_1$  และ  $P_2$  จากภาพถ่ายเนื่องจาก  $\omega, H$  และ  $\beta$  เป็นค่าคงที่ แต่ในกรณีที่ว่าวัตถุนั้นมีรูปร่างไม่แน่นอน เช่น กลุ่มเมฆ ที่ยังไม่ทราบว่าจุดเดียวกันที่ปรากฏบนภาพทั้งสองอยู่ที่ใด จึงจำเป็นต้องหา

ลักษณะเด่นของเมฆที่ถ่ายมาได้ก่อนนำไปประมวลผล โดยหลักการที่ใช้หาลักษณะเด่นบนภาพทั้งสองคือ SIFT เช่นกัน และเมื่อคำนวณความสูงในแต่ละตำแหน่งบนภาพแล้วนำมาวาดลงบนภาพต้นฉบับได้ดังรูปที่ 33 (บน) และเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตจึงนำมาสร้างจุดสีแสดงความสูงได้ดังรูปที่ 33 (ล่าง)



รูปที่ 33 (บน) ภาพต้นฉบับพร้อมค่าความสูงที่คำนวณได้ และ (ล่าง) ภาพต้นฉบับพร้อมค่าความสูงที่แสดงด้วยจุดสี

### 3.6 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากภาพถ่าย

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นแบ่งออกเป็น การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ และทิศทางการเคลื่อนที่จากภาพถ่าย ซึ่งสามารถดำเนินการโดยใช้ระบบถ่ายภาพจำนวนหนึ่งชุด จับภาพวัตถุที่เคลื่อนที่สองครั้งในเวลาที่แตกต่างกัน โดยที่องศาของกล้องถ่ายภาพในการจับภาพทั้งสอง ต้องไม่เปลี่ยนแปลง การคำนวณนั้นจำเป็นต้องทราบระยะทางเพื่อใช้ในการคำนวณที่ได้มาจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4 เพื่อใช้ประกอบการคำนวณความเร็ว โดยมีนิยามตัวแปรแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คำนิยามตัวแปรที่ใช้คำนวณความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุจากภาพถ่าย

ตัวแปร	ค่านิยาม	หน่วย
$h$	ระยะทางระหว่างระบบถ่ายภาพกับวัตถุ	$m$
$H$	ความละเอียดภาพในแนวนอนของกล้อง	$pixels$
$V$	ความละเอียดภาพในแนวตั้งของกล้อง	$pixels$
$d_{p,H}$	Distance in pixel: ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ในหนึ่งหน่วยเวลา	$pixels$
$m_{p,H}$	Meter per pixel: ระยะทางในหน่วยเมตรต่อหนึ่งจุดภาพ	$m/pixel$
$d_{m,H}$	Distance in meter: ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ในหนึ่งหน่วยเวลา	$m$
$v_H$	ความเร็วการเคลื่อนที่ในแนวแกนนอน	$m/s$
$v_V$	ความเร็วการเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้ง	$m/s$
$t$	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุ	$s$

ตัวแปรข้างต้นมีความสัมพันธ์ถูกใช้ในสมการที่ (12)-(18) เริ่มจากการแปลงระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ในหน่วย  $pixel$  เป็นหน่วย  $m$  (เมตร) ในสมการที่ (12)-(15)

$$m_{p,H} = \frac{h}{H} \quad (12)$$

$$m_{p,V} = \frac{h}{V} \quad (13)$$

$$d_{m,H} = m_{p,H} \times d_{p,H} \quad (14)$$

$$d_{m,V} = m_{p,V} \times d_{p,V} \quad (15)$$

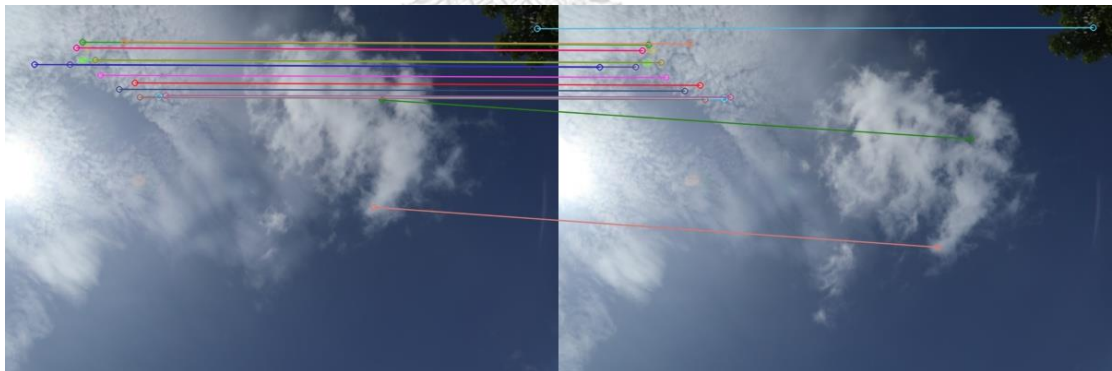
นำระยะทางที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นมาคำนวณความเร็วในสมการที่ (16)-(18)

$$v_H = \frac{d_m (\text{Horizontal})}{t} \quad (16)$$

$$v_V = \frac{d_m (\text{Vertical})}{t} \quad (17)$$

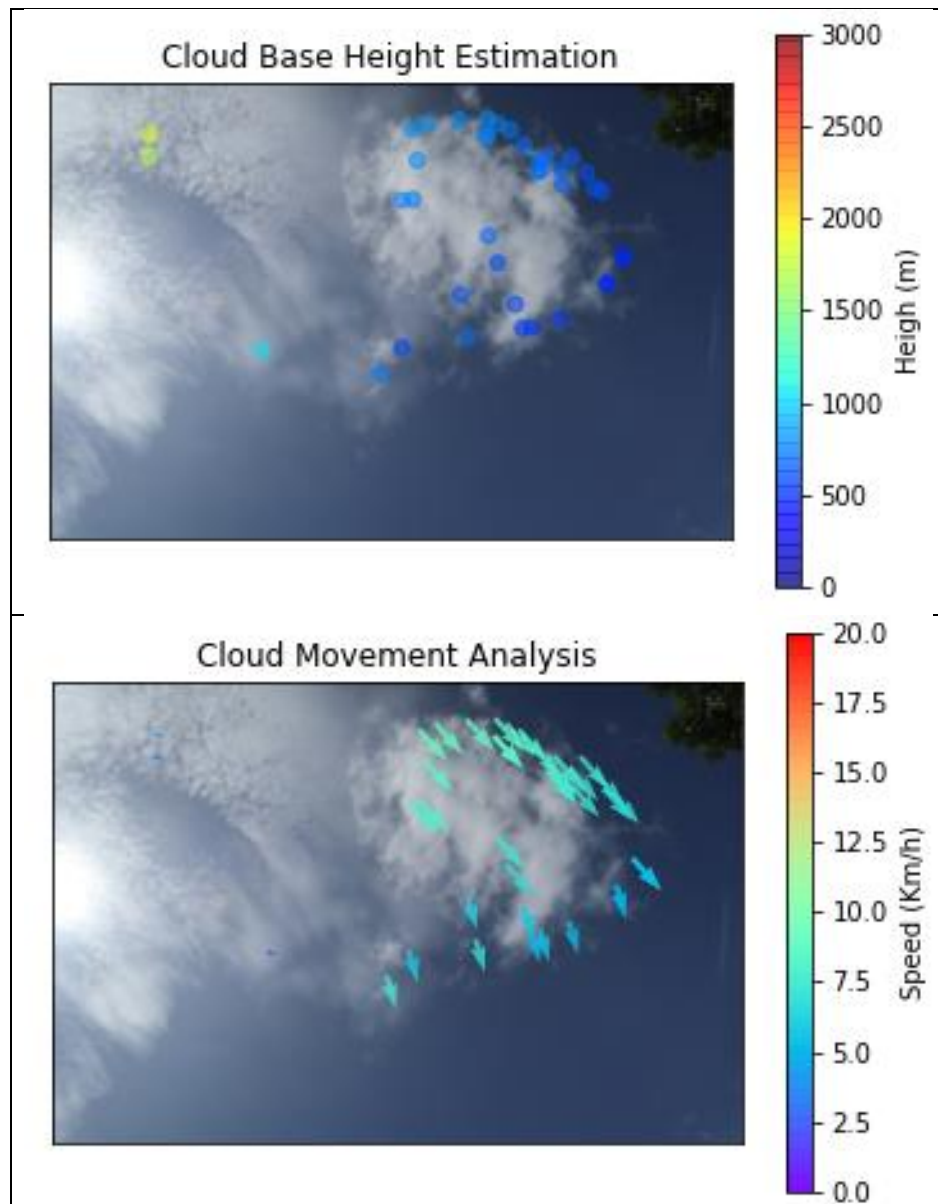
$$v_{\text{total}} = \sqrt{v_H^2 + v_V^2} \quad (18)$$

สมการ (12)-(18) มีสมมติฐานว่า  $h$  ของเมฆนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการเคลื่อนที่ผ่านเลนส์ถ่ายภาพ เนื่องจากเมฆเคลื่อนที่ในแนวระนาบขนานกับพื้นโลก ซึ่งโดยธรรมชาติเมฆจะเคลื่อนที่เปลี่ยนระดับความสูงช้ามากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่เมฆด้วยภาพถ่ายนั้น เริ่มจากนำภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้องตัวเดียวกัน ที่ถูกตั้งเวลาให้ถ่ายภาพอย่างเป็นลำดับตามที่ได้ตั้งเวลาไว้ มาผ่านกระบวนการหาลักษณะเด่นด้วย SIFT ดังรูปที่ 34 เพื่อทำการคำนวณหาระยะทางที่เมฆเคลื่อนที่ได้ในหน่วย pixel



รูปที่ 34 การจับคู่ลักษณะเด่นด้วย SIFT เมื่อภาพทั้งสองถูกถ่ายด้วยกล้องตัวเดียวกันที่มีระยะเวลาในการถ่ายห่างกัน 20 วินาที

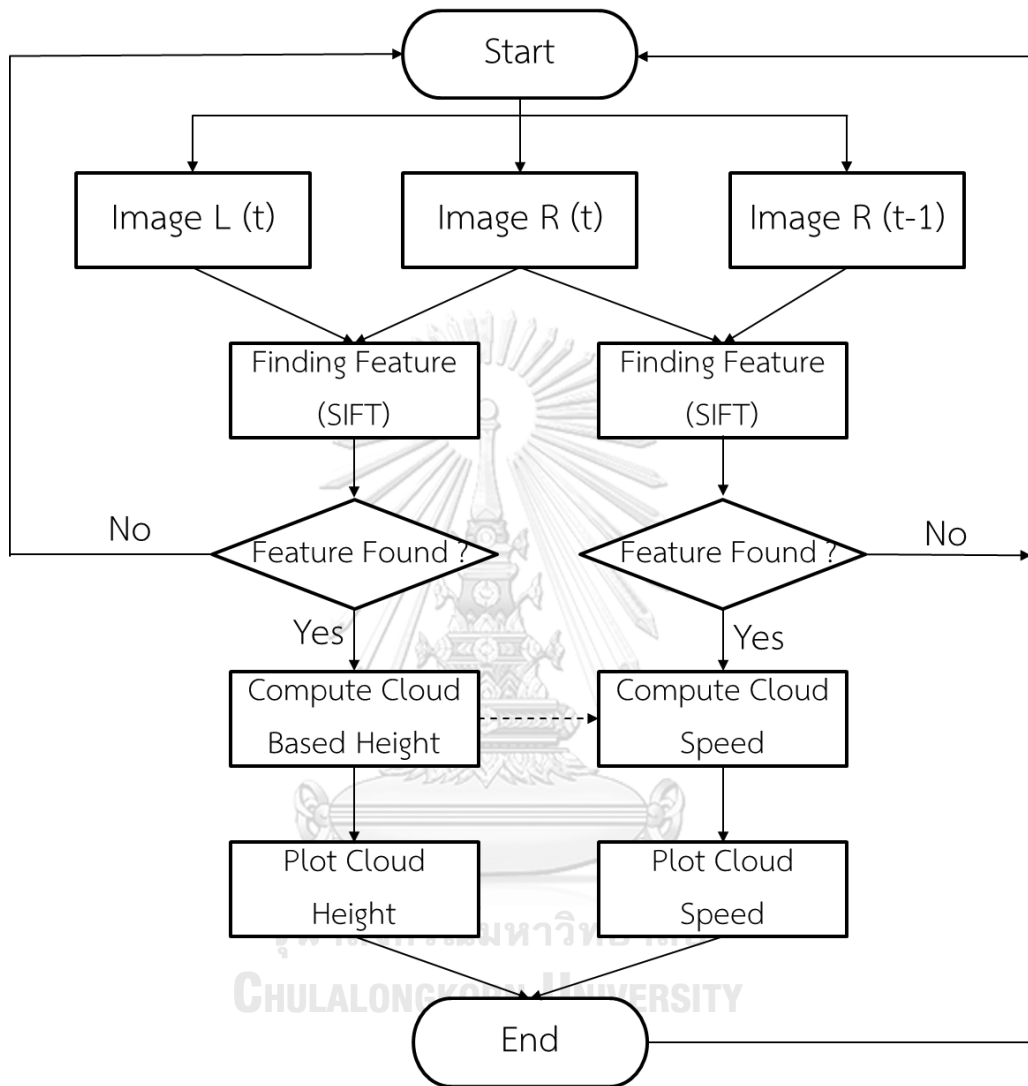
จากนั้นทำการคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลุ่มเมฆที่สนใจโดยใช้ค่าความสูง  $h$  ที่ได้มาจากการคำนวณจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4 ที่มีผลลัพธ์ดังรูปที่ 35 (บน) ซึ่งนำมาคำนวณและแสดงผลเป็นความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 35 (ล่าง)



รูปที่ 35 ภาพผลลัพธ์สุดท้าย (บน) ภาพต้นฉบับที่แสดงพร้อมความสูง (ล่าง) ภาพต้นฉบับที่แสดงพร้อมความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่

และเมื่อนำระบบวิเคราะห์ความสูงและความเร็วเมฆมารวมกันจะมีโครงสร้างการทำงานเป็นดังรูปที่ 36 เริ่มจากการดึงภาพถ่ายจากคลาวด์มาเตรียมพร้อมประมวลผล ซึ่งประกอบด้วยภาพทั้งหมด 3 ภาพต่อหนึ่งผลลัพธ์ความสูงและความเร็ว ภาพชุดแรกนำไปคำนวณความสูงฐานเมฆคือภาพที่ถูกถ่าย ณ เวลาเดียวกัน (t) จากระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ ภาพชุดที่สองนำไปคำนวณความเร็วและทิศการเคลื่อนที่เมฆคือภาพที่มาจากชุดแรก 1 ภาพ และภาพที่ถูกถ่ายจากกล้องชุดเดียวกัน ณ เวลา (t-1) จากนั้นนำภาพทั้งสองชุดไปผ่านกระบวนการหาลักษณะเด่น Image Matching ด้วยอัลกอริทึม SIFT

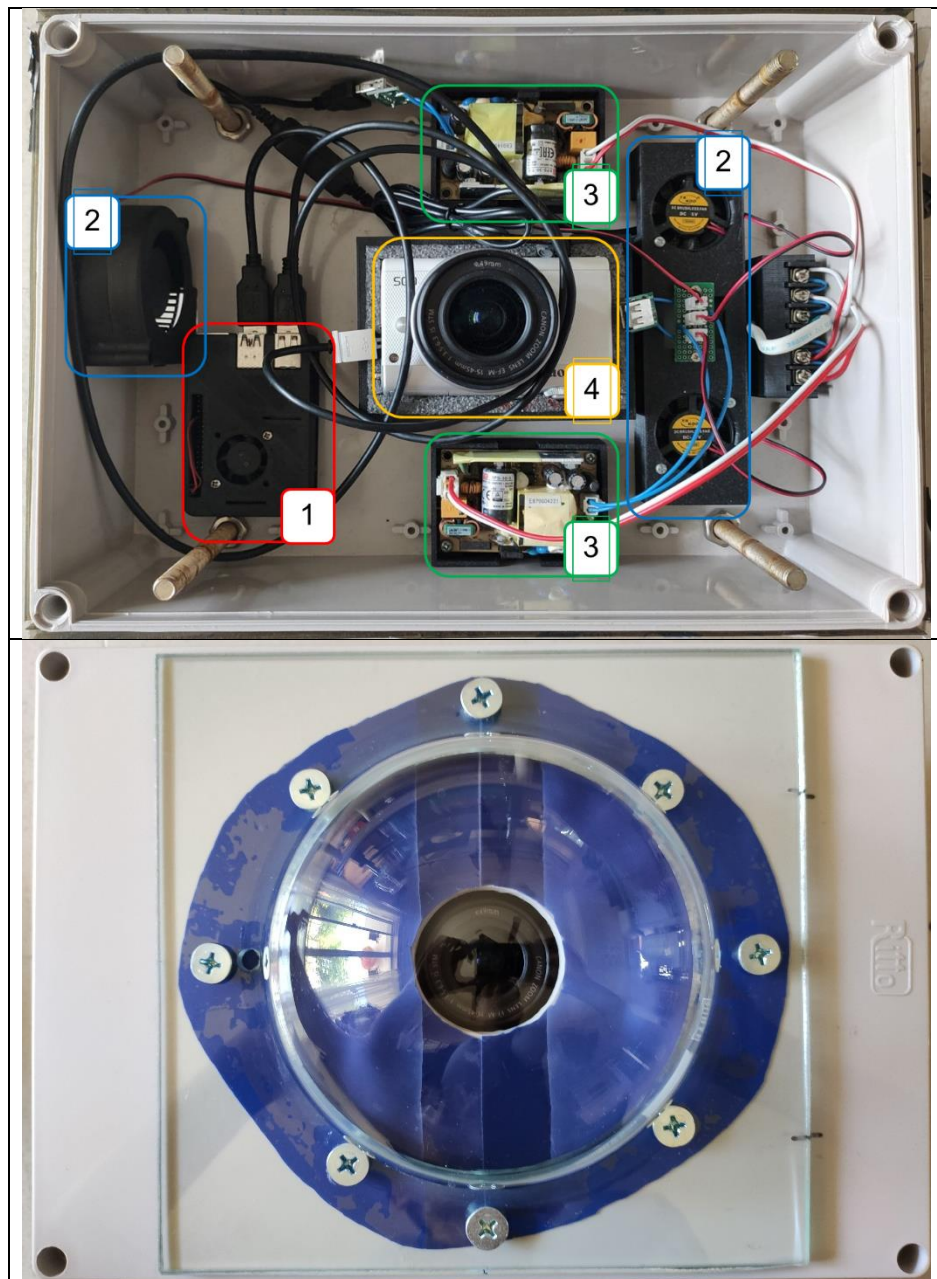
เพื่อนำไปคำนวณความสูงและความเร็วตามลำดับ ซึ่งความเร็วนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลความสูงในการคำนวณ ขั้นตอนสุดท้ายคือการแสดงผลภาพถ่ายพร้อมข้อมูลความสูงและความเร็ว



รูปที่ 36 กระบวนการวิเคราะห์ความสูงและความเร็วการเคลื่อนที่ของเมฆด้วยภาพถ่าย

### 3.7 การประดิษฐ์อุปกรณ์

ส่วนประกอบระบบถ่ายภาพนั้นคำนึงถึงสภาพอากาศและอุณหภูมิของสถานที่ในการติดตั้ง อุปกรณ์ที่มีคุณภาพสามารถยืดอายุการใช้งานของระบบถ่ายภาพได้



รูปที่ 37 อุปกรณ์ภายในระบบถ่ายภาพ (บน) และฝาปิดด้านบนพร้อมโดมใส (ล่าง)

รูปที่ 37 แสดงส่วนประกอบอุปกรณ์ที่ใช้สร้างระบบถ่ายภาพต่อหนึ่งชุด โดยในงานวิจัยนี้ ต้องจัดทำขึ้นทั้งหมดสองชุดเพื่อรองรับการถ่ายภาพระบบสเตอริโอวีชัน ระบบถ่ายภาพหนึ่งชุด ประกอบไปด้วย

1. คอมพิวเตอร์ขนาดพกพา (Raspberry Pi Model 4 b+)	1	ชุด
2. พัดลมระบายอากาศขนาด 5v	3	ชุด
3. แหล่งจ่ายพลังงานขนาด 7.5v และ 5v	1	ชุด
4. กล้องถ่ายภาพระบบดิจิทัลชนิดไร้กระจก (Canon EOS M100)	1	ชุด

กล้องถ่ายภาพที่เลือกใช้นั้นเป็นชนิดไร้กระจก (Mirrorless Camera) ทำให้ภาพที่เกิดขึ้นเกิดจากแสงกระทบยังเซนเซอร์รับภาพโดยตรงไม่ผ่านกระจกสะท้อน ลดโอกาสการบิดเบือนของภาพได้ กล้องถ่ายภาพนั้นถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ขนาดพกพา Raspberry Pi เป็นระบบควบคุมที่รวบรวมชุดคำสั่งและสั่งประมวลผล ชุดคำสั่งประกอบด้วย -ตารางเวลาการถ่ายภาพ -การจัดเก็บภาพ -การส่งภาพไปยัง Cloud storage เพื่อเตรียมประมวลผล ระบบระบายอากาศภายในใช้พัดลมระบายอากาศ 3 ชุดแบบเป่าออกและดูดเข้า ทั้งสองแบบนี้ติดตั้งโดยให้รูระบายอากาศอยู่ทางด้านล่าง อุปกรณ์ทุกชนิดเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟขนาด 7.5v และ 5v

งานวิจัยนั้นอุปกรณ์ต้องถูกติดตั้งภายนอกอาคาร ภาชนะที่เลือกใช้จะจากพลาสติกชนิด ABS มีคุณสมบัติกันการกัดกร่อนทุกสภาวะอากาศปกคลุมด้วยแผ่น Polycarbonate ป้องกันรังสี UV รวมถึงติดตั้งโดมใสป้องกันเลนส์ถ่ายภาพ



## บทที่ 4

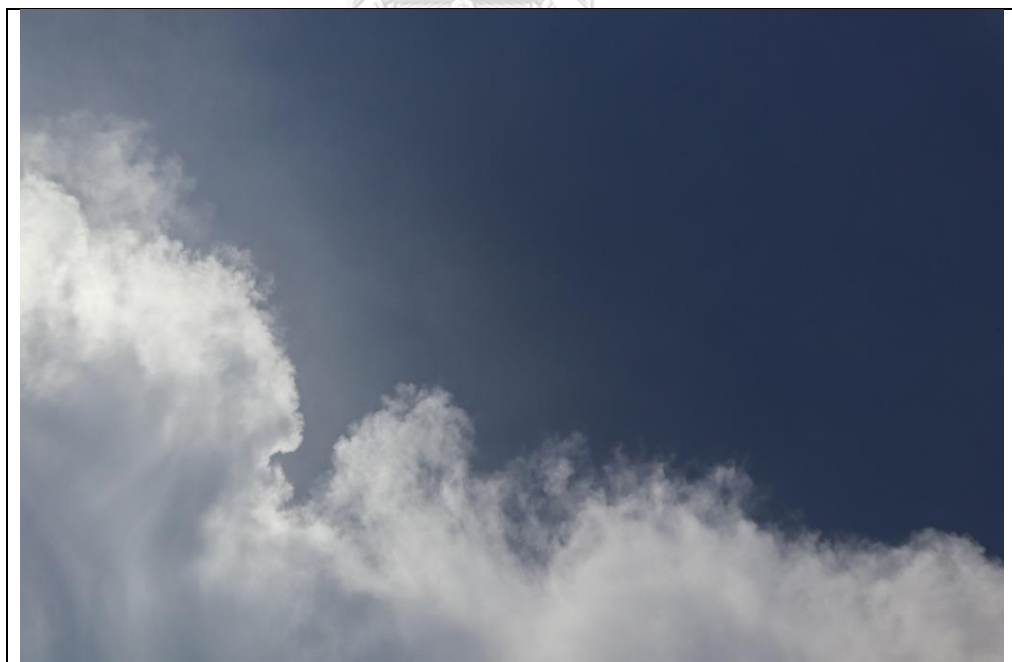
### การทดลองและผลการทดลอง

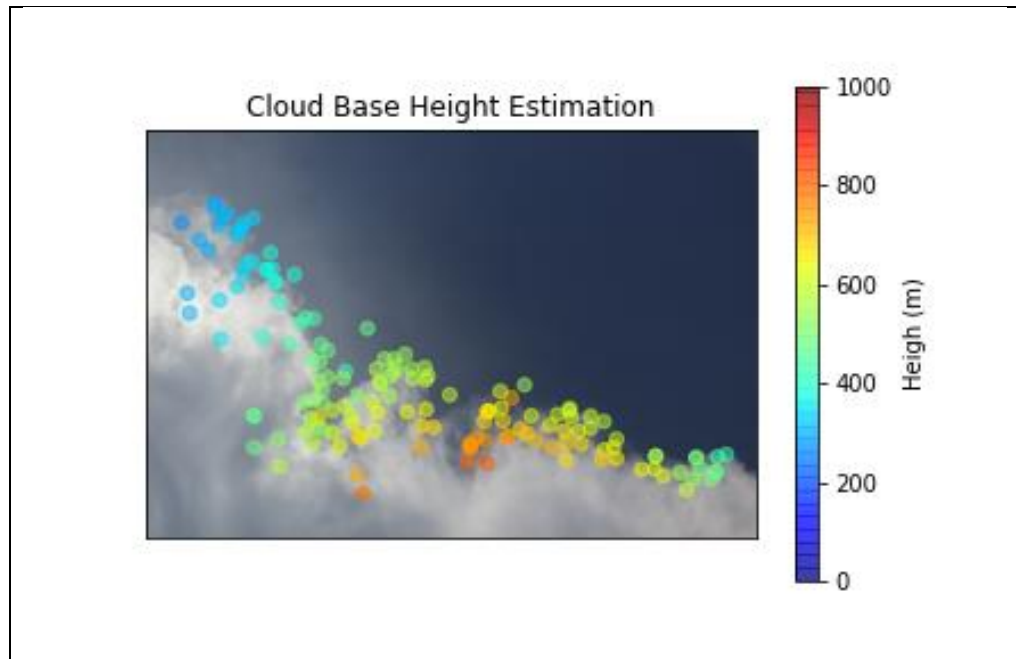
การทดลองประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือการทดลองประมาณระยะทางจากภาพถ่าย ส่วนที่สองคือการทดลองประมาณความเร็วการเคลื่อนที่จากภาพถ่าย

#### 4.1 การทดลองประมาณระยะทางด้วยระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ

ทดลองนี้ใช้หลักการวิเคราะห์ที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.5 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น การทดลองประมาณความสูงฐานเมฆจากภาพถ่าย และการยืนยันผลด้วยการทดลองประมาณระยะทางกับวัตถุที่ทราบระยะด้วย Google Map เนื่องจากการเปรียบเทียบด้วยเครื่องวัดความสูงฐานเมฆนั้นมีอุปสรรคทั้งด้านการเดินทางและขั้นตอนการอนุมัติการใช้งานอุปกรณ์

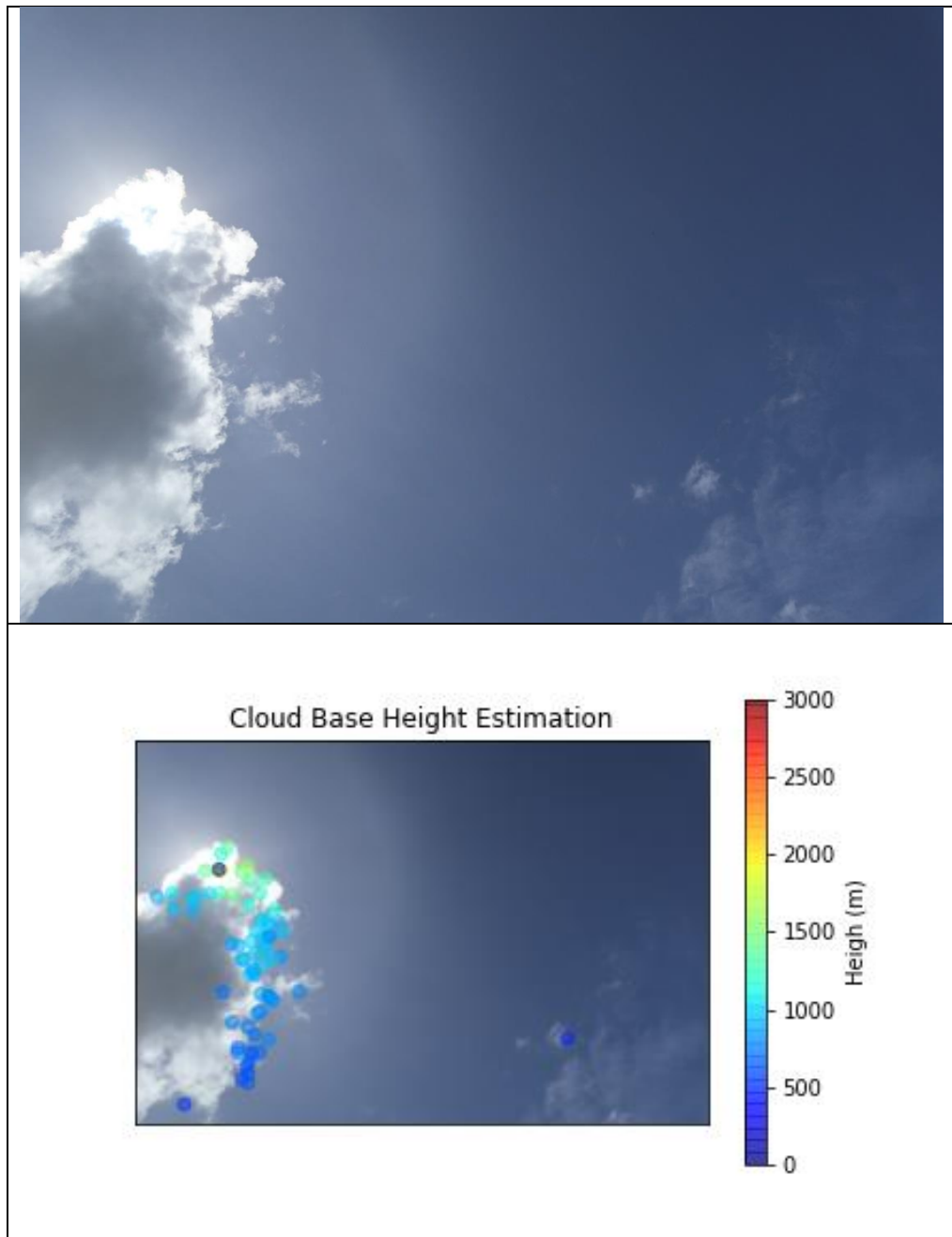
4.2.1 การทดลองประมาณความสูงฐานเมฆด้วยระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอ  
ระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอที่ติดตั้งนั้น ถูกปรับเทียบก่อนการนำไปใช้ถ่ายภาพ และมีผลการทดลองแสดงในรูปที่ 38 - รูปที่ 46





รูปที่ 38 ส่วนขอบกลุ่มเมฆคิวมูโลนิมบัสขนาดใหญ่ ประมาณความสูงอยู่ในช่วง 400-700 เมตร / Baseline 10m

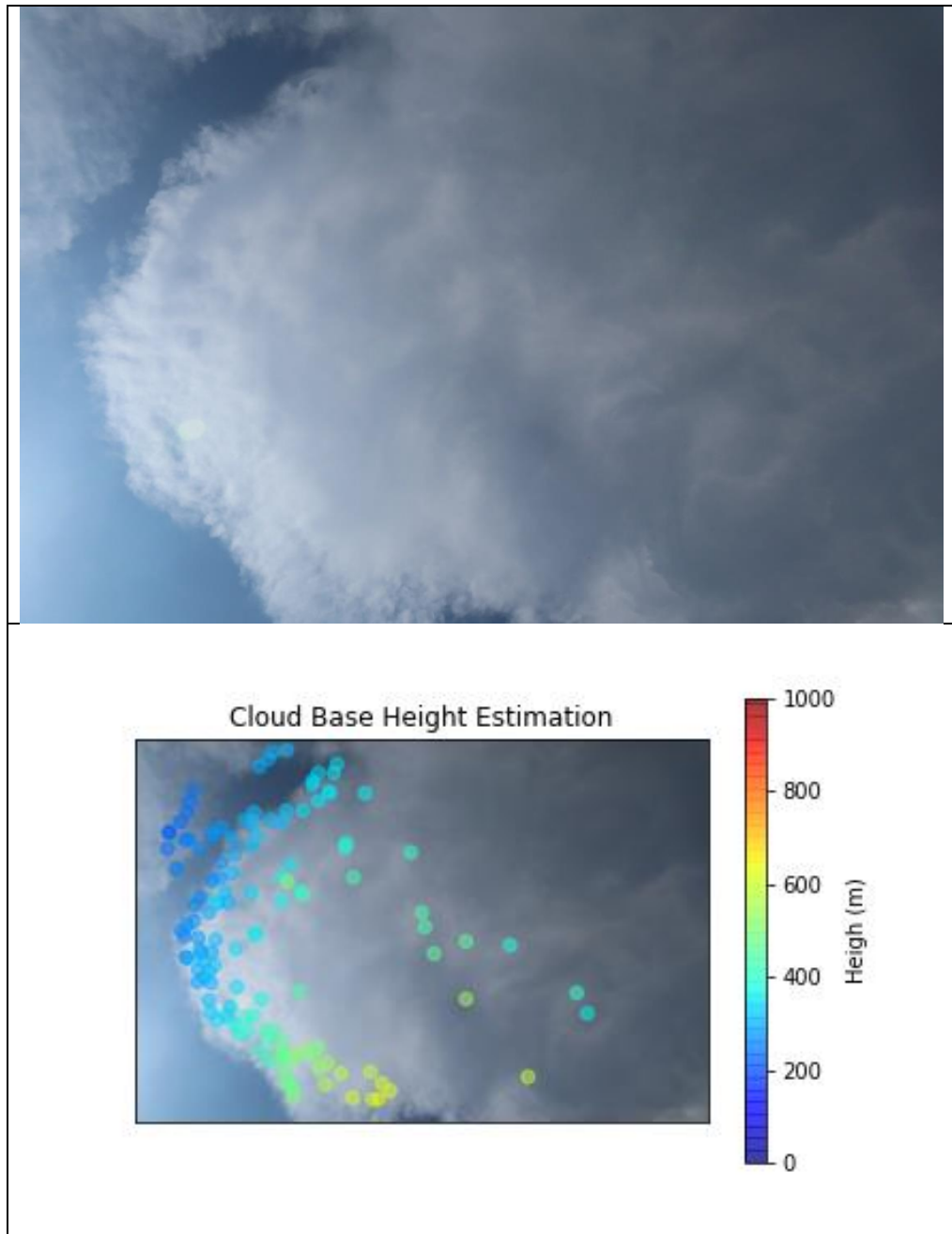
ภาพข้างต้นที่นำมาวิเคราะห์นั้นคือ ส่วนขอบเมฆของเมฆชนิดคิวมูโลนิมบัสขนาดใหญ่ เมฆชนิดนี้มีรูปทรงสูง หนา และเคลื่อนที่ช้าเมื่อเปรียบเทียบกับเมฆขนาดเล็ก โดยความหนาของเมฆชนิดนี้เมื่อวัดจากยอดถึงฐานเมฆอาจสูงถึง 10,000 เมตร อย่างไรก็ตามระบบถ่ายภาพที่ติดตั้งบริเวณภาคพื้นนั้นสังเกตได้เพียงฐานเมฆ จึงสามารถประมาณความสูงฐานเมฆได้ ซึ่งจากภาพผลลัพธ์นั้น ฐานเมฆมีความสูงต่ำกว่า 1,000 เมตร จากระบบถ่ายภาพที่มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองเป็น 10 เมตร



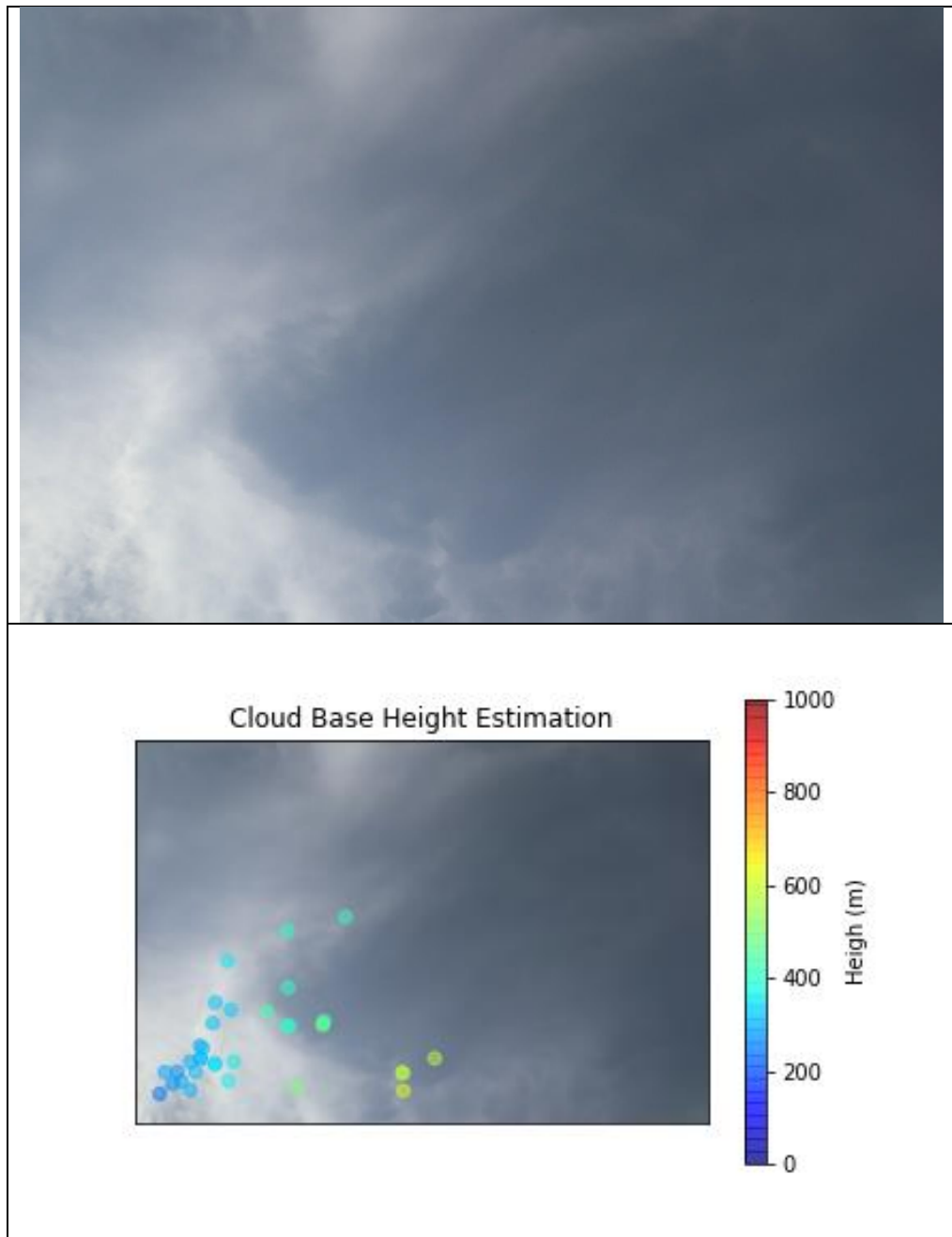
รูปที่ 39 เมฆคิวมูลัสด้านซ้ายประมาณความสูงอยู่ในช่วง 1,000-1,500 เมตร และกลุ่มเมฆเซอร์โรคิวมูลัสทางด้านขวาที่มีลักษณะไม่ชัดเจน / Baseline 10m

ภาพเมฆคิวมูลัสที่เคลื่อนที่มาบดบังดวงอาทิตย์ จึงเกิดเป็นแสงสะท้อนทรงกลมขนาดใหญ่บนภาพ เมฆชนิดนี้เกิดได้หลายขนาดขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เป็นเมฆชั้นต่ำที่มีความหนาสามารถบดบังแสงอาทิตย์ได้อย่างสมบูรณ์และเกิดเป็นเงาฉายมายังพื้นดิน ระบบประมวลผลภาพให้ผลลัพธ์ความสูงของเมฆนี้ที่ช่วง 1,000 ถึง 1,500 เมตร โดยบริเวณแสงจ้าที่เกิดขึ้นทำให้การประมาณ

ความสูงเกิดการผิดพลาด เช่นเดียวกับกลุ่มเมฆทางขวาของภาพที่มีรายละเอียดน้อยกว่า อัลกอริทึมจะสามารถตรวจจับได้

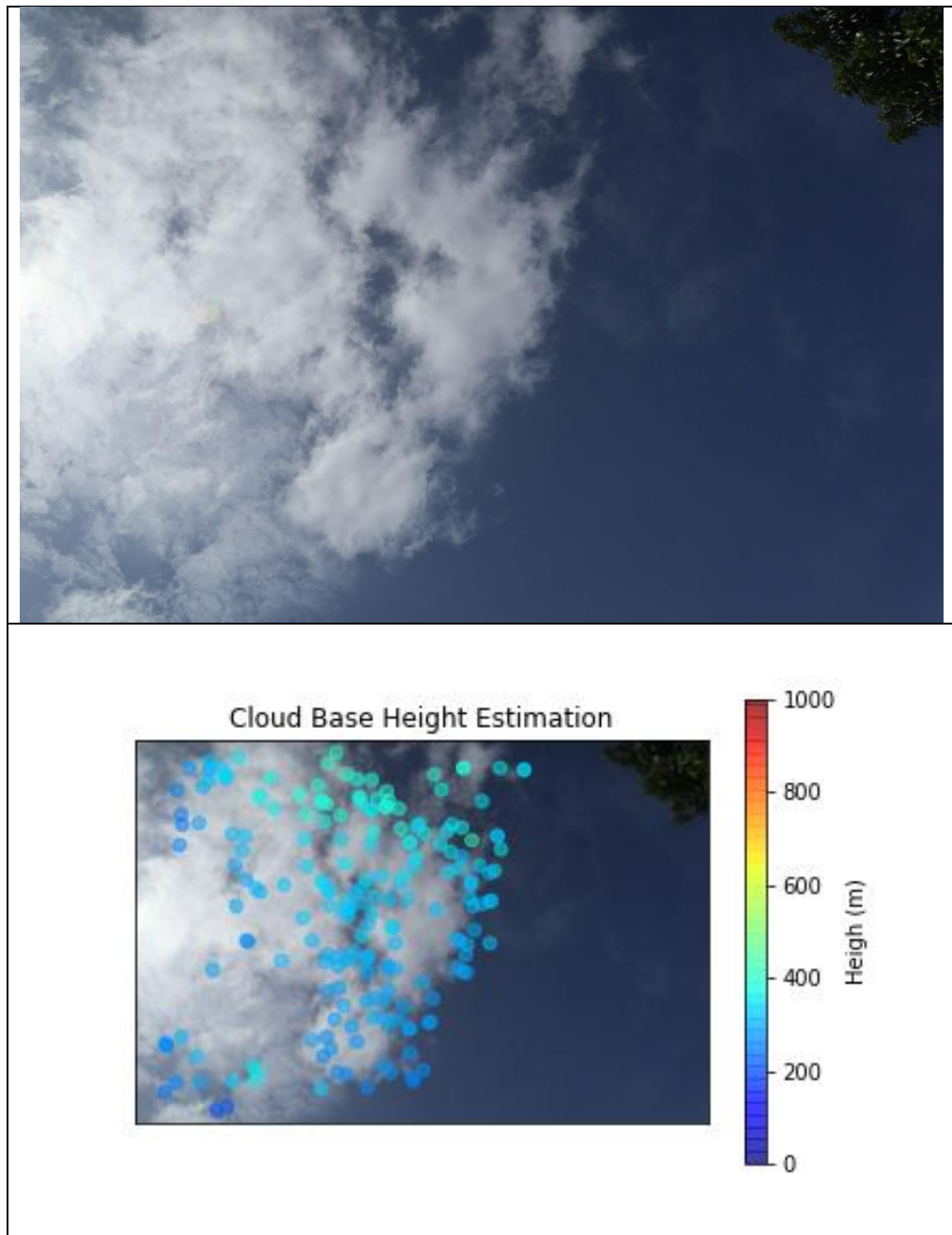


รูปที่ 40 ฐานเมฆขนาดใหญ่ประมาณความสูงอยู่ในช่วง 300-700 เมตร / Baseline 10m



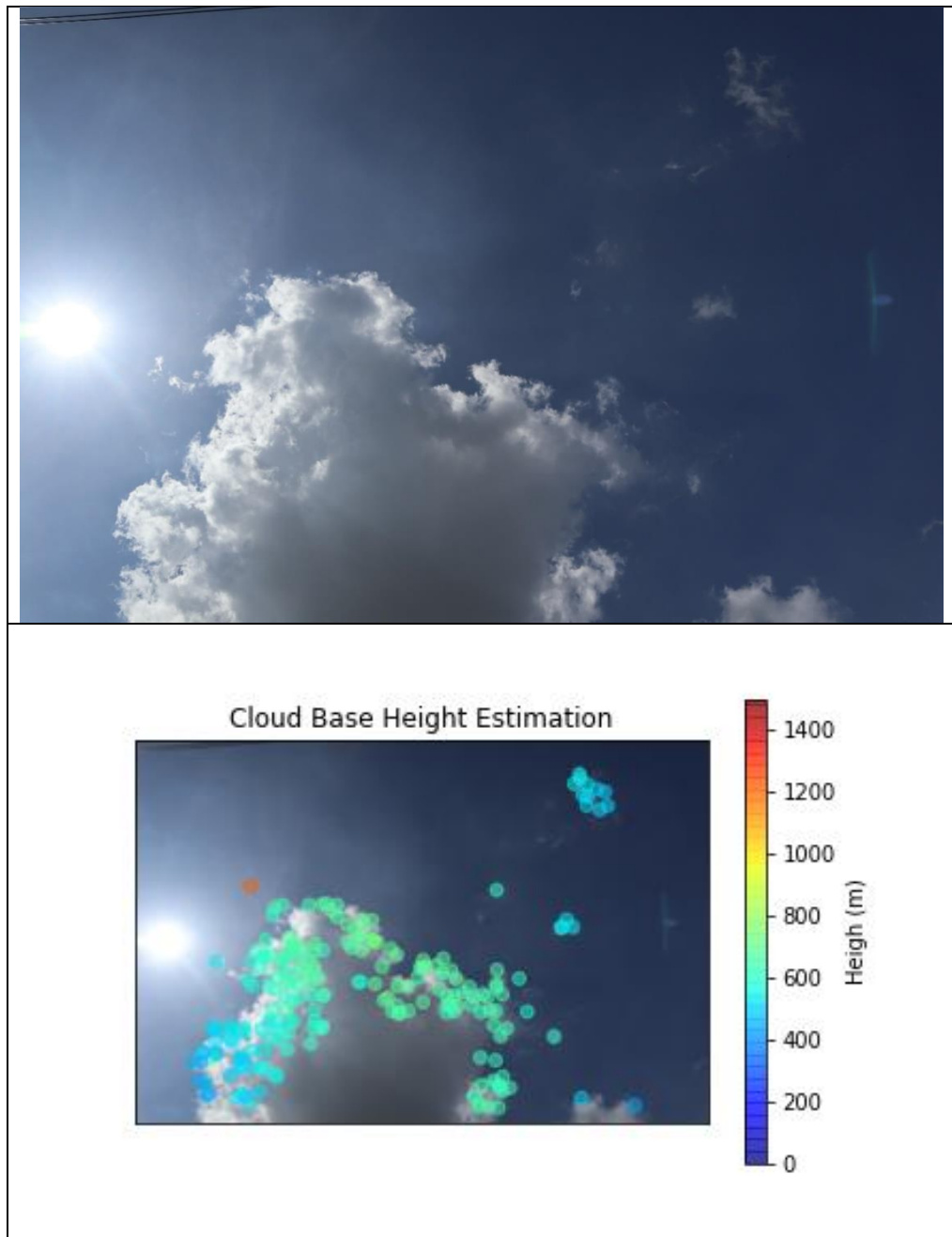
รูปที่ 41 กลุ่มเมฆที่มีลักษณะเบาบางประมาณความสูงอยู่ในช่วง 400-600 เมตร / Baseline 10m

ภาพข้างข้างต้นคือกลุ่มเมฆที่มีลักษณะเป็นเส้นบาง โดยอัลกอริทึมสามารถตรวจจับลักษณะเด่นบริเวณเมฆขาวบริเวณของล่างได้ โดยมีความสูงในช่วง 400-600 เมตร



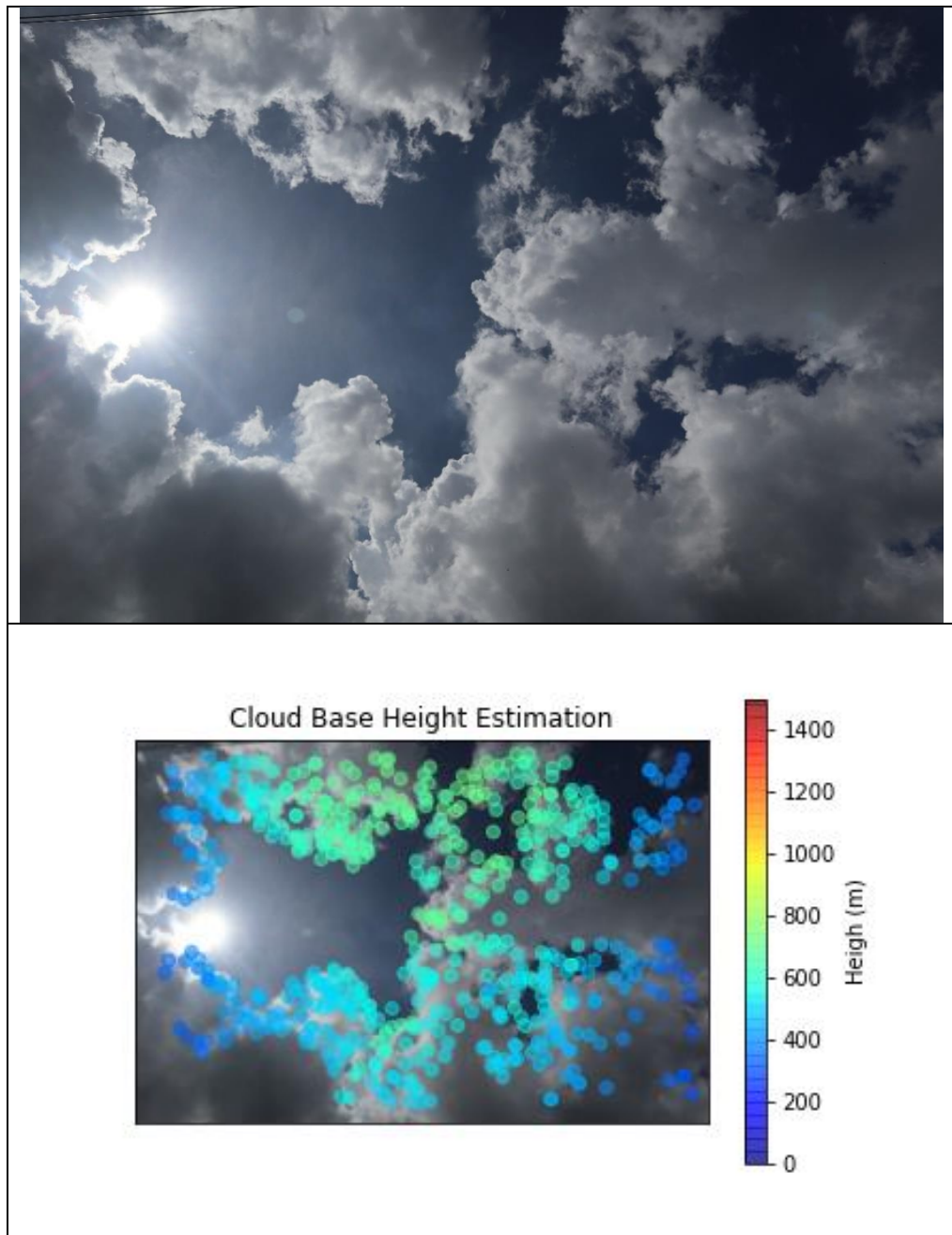
รูปที่ 42 เมฆคิวมูลัสประมาณความสูงที่ 400-500 เมตร / Baseline 20m

กลุ่มเมฆคิวมูลัสที่มีความสูงประมาณ 400 เมตร ถ่ายโดยระบบสเตอริโอที่มีระยะห่างระหว่างกล้องทั้งสองเป็น 20 เมตร



รูปที่ 43 เมฆคิวมูลัสประมาณความสูงที่ 600-800 เมตร / Baseline 20m

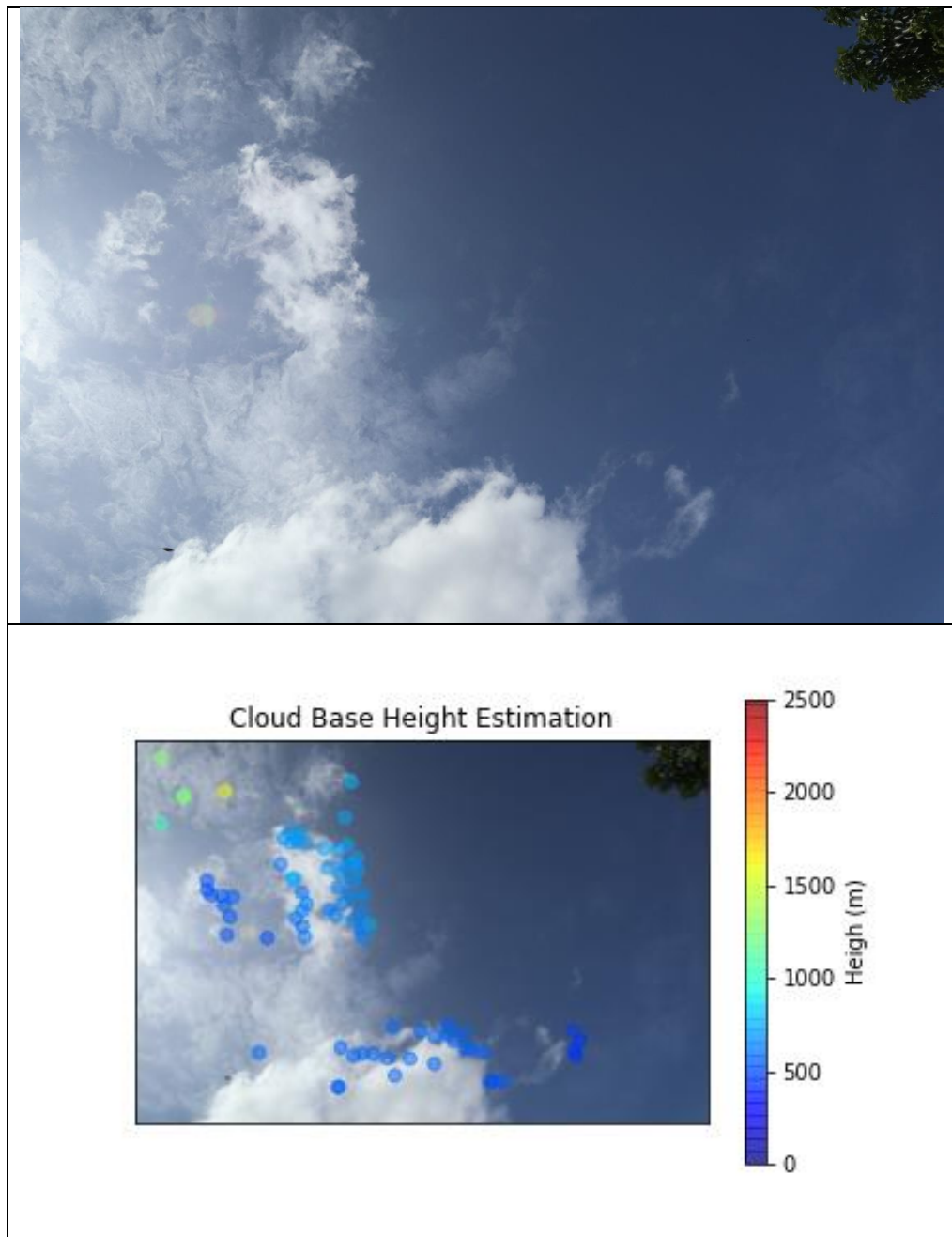
เมฆคิวมูลัสที่มีฐานสีดำ ประมาณความสูงที่ 600-800 เมตร โดยในภาพนั้นปรากฏดวงอาทิตย์ชัดเจน ทำให้เกิดแสงสะท้อนกับเลนส์ถ่ายภาพ และอัลกอริทึมได้นำไปวิเคราะห์จึงเกิดค่าที่ผิดพลาดบริเวณจุดสีแดง



รูปที่ 44 เมฆคิวมูลัสหลายก้อนประมาณความสูงที่ 600-800 เมตร / Baseline 20m

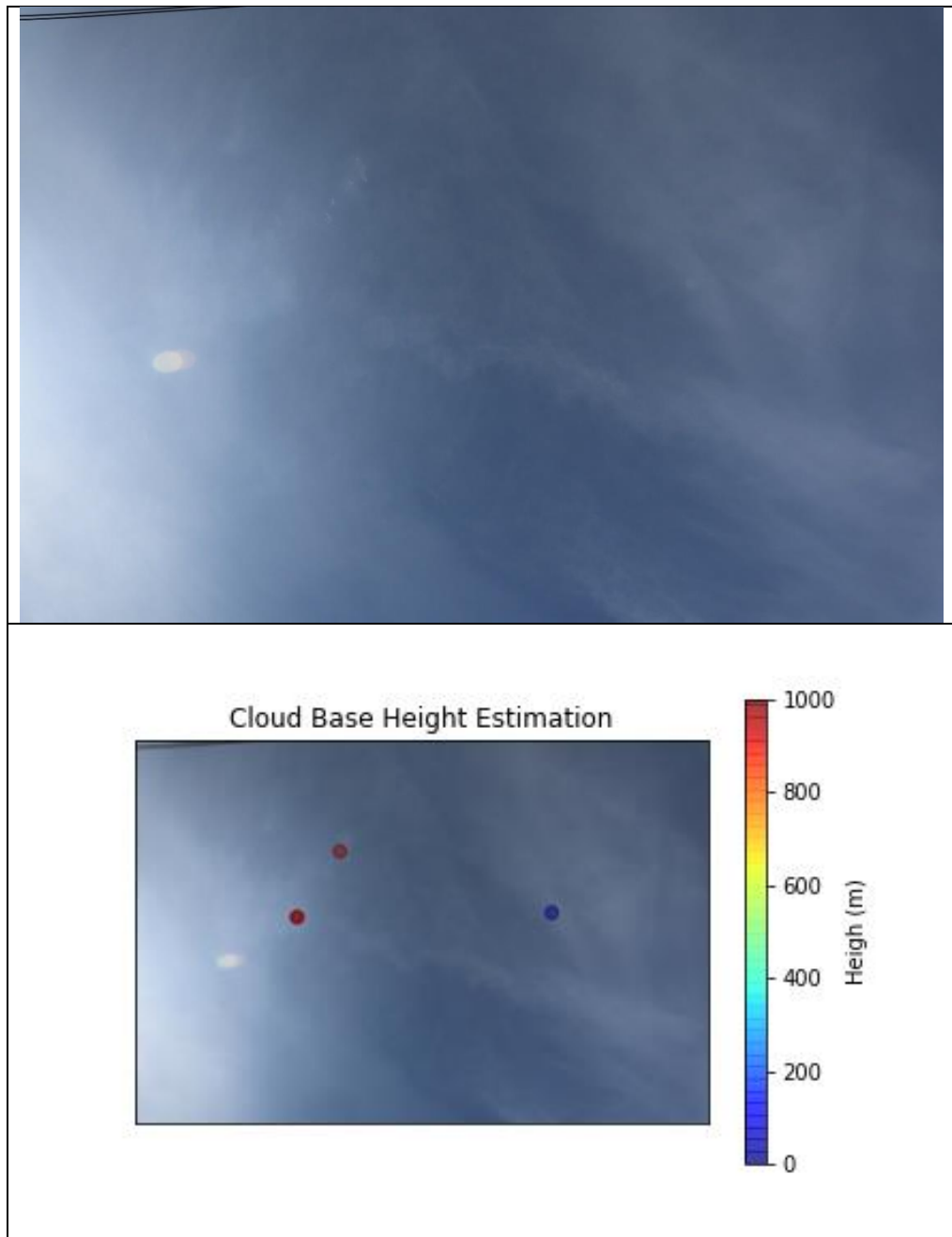
ภาพกลุ่มเมฆคิวมูลัสหลายก้อนที่ล้อมรอบดวงอาทิตย์ ประมาณความสูงที่ 600-800 เมตร





รูปที่ 45 เมฆคิวมูลัสและเศษเมฆประมาณความสูงที่ 500 เมตร และอัลโตคิวมูลัสประมาณความสูงที่ 1,250-1,700 เมตร / Baseline 20m

จากภาพข้างต้นปรากฏเมฆ 2 ชนิดที่มีความสูงแตกต่างกัน ชนิดแรกคือเมฆคิวมูลัสที่ประมาณความสูงที่ 500 เมตร อีกชนิดหนึ่งอัลโตคิวมูลัสคือเมฆก้อนที่มีความสูงอยู่ในระดับกลาง โดยประมาณความสูงได้ที่ประมาณ 1,500 เมตร



รูปที่ 46 เศษเมฆที่ไม่มีรูปร่าง ไม่สามารถตรวจวัดได้

ภาพข้างต้นคือเศษเมฆที่ไม่มีรูปร่าง ซึ่งอัลกอริทึมไม่สามารถตรวจจับเพื่อนำไปคำนวณวิเคราะห์ได้

*สรุปผลการทดลองที่ 4.2.1* จากผลการทดลองประมาณความสูงฐานเมฆนั้น ในส่วนของอัลกอริทึมตรวจจับลักษณะเด่นทำงานได้ค่อนข้างดี ซึ่งสามารถตรวจจับเศษเมฆที่ปรากฏไม่เด่นชัดได้ โดยส่วนมากแล้วตรวจจับได้บริเวณขอบฐานเมฆที่มีความแตกต่างของระดับสีที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามความสูงที่แท้จริงจากภาพถ่ายเมฆในการทดลองนั้นไม่สามารถทราบค่าได้เนื่องจากอุปกรณ์ที่มีอย่างจำกัด ดังนั้นการเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณระยะทางจากภาพถ่ายจะถูกทำโดยการประมาณระยะทางจากวัตถุที่ทราบระยะจริงในหัวข้อที่ 4.2.2

#### 4.2.2 การทดลองประมาณระยะทางจากภาพกับวัตถุที่ทราบระยะ

การทดลองดำเนินการโดยการเปรียบเทียบระยะทางที่ประมาณได้จากระบบถ่ายภาพแบบสเตอริโอกับระยะของอาคารทั้ง 4 ตำแหน่งที่ถูกวัดระยะทางด้วย Google Map ในรูปที่

47



รูปที่ 47 ภาพถ่ายอาคารพร้อมตำแหน่งที่สนใจ

ตารางที่ 5 ผลการทดลองการคำนวณระยะทางจากภาพถ่ายในรูปที่ 47

ตำแหน่ง	ระยะระหว่างกล้องถ่ายภาพ Baseline (เมตร)	ระยะคำนวณ (เมตร)	ระยะจาก Google Map (เมตร)	ค่าผิดพลาด (%)
A	1	148.7	155	4.06
	2	149.0		3.84
	3	151.0		2.58
	4	152.1		1.83
B	1	77.9	81.3	4.18
	2	76.5		5.90
	3	76.6		5.78
	4	77.3		4.92
C	1	39.2	40.1	2.24
	2	39.0		2.72
	3	39.2		2.24
	4	39.1		2.38
D	1	919.7	1,190	22.71
	2	986.6		17.09
	3	1064.8		10.51
	4	1093.0		8.14

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อถ่ายภาพอาคารในการทดลองข้างต้นให้ผลการทดลองในตารางที่ 5 ที่สรุปได้ว่า ที่ระยะทางที่น้อยกว่า 200 เมตรนั้น ระยะระหว่างกล้องถ่ายภาพไม่ส่งผลให้ค่าผิดพลาดลดลงมากนัก โดยมีค่าผิดพลาดน้อยกว่า 6% แต่สำหรับระยะทางที่มากกว่า 1,000 เมตรนั้น ระยะระหว่างกล้องถ่ายภาพส่งผลอย่างมีนัยยะ โดยเมื่อเพิ่มระยะระหว่างกล้องสามารถลดค่าผิดพลาดได้มาก โดยในการทดลองนี้สามารถลดค่าผิดพลาดจาก 22% เป็น 8% ที่ระยะระหว่างกล้องเท่ากับ 4 เมตร เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองจึงทำการทดลองการคำนวณเมื่อ pixel ที่ใช้ในการคำนวณระยะทางเกิดการคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบต่อจำนวนจุดภาพที่เปลี่ยนแปลงเมื่อความละเอียดของภาพ  
ในแนวนอนเท่ากับ 2,400 pixels และระยะระหว่างกล้องคือ 1-4 เมตร

จำนวน Pixel ที่ ผิดพลาด	ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น บริเวณ ตำแหน่ง A (%)				ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น บริเวณ ตำแหน่ง B (%)				ค่าผิดพลาดที่ เกิดขึ้นบริเวณ ตำแหน่ง C (%)				ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น บริเวณ ตำแหน่ง D (%)			
	Baseline (m)															
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	11.8	7.5	5.1	3.8	9.1	8.2	7.3	6.1	3.7	3.7	2.9	2.9	49.2	35.1	25.4	20.4
2	17.8	11.0	7.5	5.7	13.6	10.5	8.9	7.2	5.7	4.7	3.6	3.4	62.2	46.7	36.1	29.7
3	23.1	14.1	9.8	7.5	17.7	12.6	10.4	8.4	7.6	5.7	4.2	3.9	69.9	54.8	44.1	37.1
4	27.7	17.1	12.0	9.2	21.4	14.7	11.8	9.5	9.4	6.6	4.9	4.4	75.0	60.7	50.3	43.1
5	31.8	19.9	14.1	10.9	24.8	16.6	13.2	10.6	11.2	7.6	5.5	4.9	78.6	65.3	55.2	48.1
6	35.5	22.4	16.1	12.5	27.9	18.5	14.6	11.7	12.8	8.5	6.2	5.4	81.3	68.9	59.3	52.2
7	38.8	24.9	18.0	14.1	30.8	20.3	15.9	12.7	14.5	9.4	6.8	5.8	83.4	71.8	62.7	55.7
8	41.8	27.1	19.8	15.6	33.4	22.0	17.1	13.7	16.0	10.3	7.4	6.3	85.1	74.2	65.5	58.8
9	44.5	29.3	21.6	17.1	35.8	23.6	18.4	14.7	17.5	11.1	8.0	6.8	86.5	76.3	68.0	61.4
10	46.9	31.3	23.3	18.5	38.1	25.2	19.6	15.7	19.0	12.0	8.6	7.2	87.6	78.0	70.1	63.8

สรุปผลการทดลองที่ 4.2.2 จากตารางข้างต้นสรุปได้ว่าค่าผิดพลาดแปรผันตามระยะของวัตถุที่สนใจ วัตถุที่อยู่ใกล้จะเกิดค่าผิดพลาดที่น้อยกว่า เนื่องจากวัตถุที่อยู่ใกล้ปรากฏภาพขนาดใหญ่กินพื้นที่หลายจุดภาพและมีรายละเอียดชัดเจน ส่วนวัตถุที่อยู่ไกลนั้นมีโอกาสผิดพลาดสูง เนื่องจากปรากฏในพื้นที่น้อย ทั้งนี้ตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงคือระยะการติดตั้งระหว่างกล้องทั้งสอง ระยะการติดตั้งที่มากขึ้นลดโอกาสการเกิดค่าผิดพลาดจากการคำนวณ




#### 4.3 การทดลองวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุจากภาพถ่าย

การวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่นั้นอาศัยการประมาณความสูงที่มีหลักการคำนวณวิเคราะห์จากหัวข้อที่ 3.5 ร่วมใช้ในการคำนวณความเร็ว โดยในการทดลองแบ่งออกเป็น การทดลองวิเคราะห์ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่เมฆ และการทดลองวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ทราบความเร็วการเคลื่อนที่เพื่อใช้ยืนยันผล




##### 4.3.1 การทดลองวิเคราะห์ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่เมฆ

ใช้หลักการคำนวณวิเคราะห์ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.6 เมื่อนำมาทดลองกับภาพถ่ายเมฆแล้วได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 7 - ตารางที่ 9



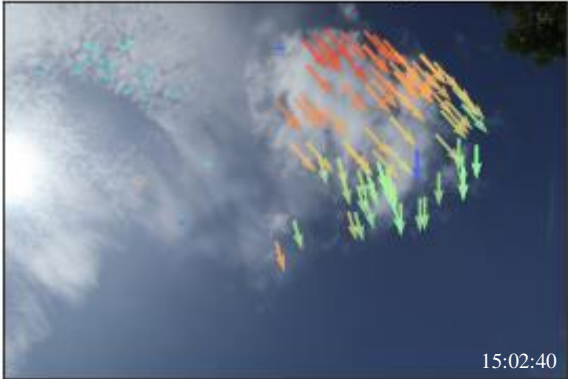
ตารางที่ 7 ทดลองคำนวณความเร็วเฉลี่ยเมฆจากภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน 20 วินาที / Baseline 10m

ภาพถ่ายเมฆพร้อมค่าความเร็วแต่ละช่วงเวลา	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
<p style="text-align: center;">Cloud Movement Analysis</p> 	1.84
<p style="text-align: center;">Cloud Movement Analysis</p> 	1.66
<p style="text-align: center;">Cloud Movement Analysis</p> 	1.77

ตารางที่ 8 ทดลองคำนวณความเร็วเฉลี่ยเมฆจากภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน 20 วินาที / Baseline 20m

ภาพถ่ายเมฆพร้อมค่าความเร็วแต่ละช่วงเวลา	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
<p style="text-align: center;">Cloud Movement Analysis</p> 	14.08
<p style="text-align: center;">Cloud Movement Analysis</p> 	12.64
<p style="text-align: center;">Cloud Movement Analysis</p> 	12.82

ตารางที่ 9 ทดลองคำนวณความเร็วเฉลี่ยเมฆจากภาพถ่ายที่เวลาต่างกัน 20 วินาที / Baseline 20m

ภาพถ่ายเมฆพร้อมค่าความเร็วแต่ละช่วงเวลา	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)
<p style="text-align: center;"><b>Cloud Movement Analysis</b></p> 	<p>16.47 (ต่ำ) 5.98 (สูง)</p>
<p style="text-align: center;"><b>Cloud Movement Analysis</b></p> 	<p>14.55 (ต่ำ) 5.14 (สูง)</p>
<p style="text-align: center;"><b>Cloud Movement Analysis</b></p> 	<p>14.13 (ต่ำ) 6.44 (สูง)</p>



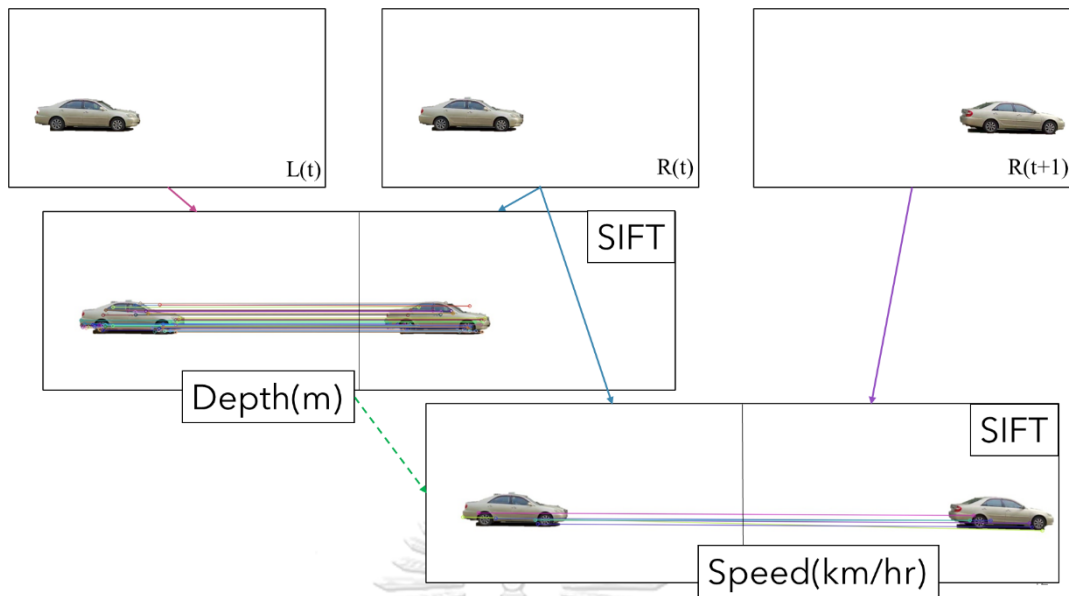
สรุปผลการทดลองที่ 4.3.1 จากการทดลองวิเคราะห์ความเร็วเมฆจากภาพถ่ายข้างต้นพบว่า การตั้งเวลาการถ่ายภาพมีผลต่อขั้นตอนการตรวจจับลักษณะเด่น โดยระยะเวลาที่มากเกินไปส่งผลให้อัลกอริทึมไม่สามารถจับคู่ลักษณะเด่นได้เนื่องจากเมฆนั้นได้เปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกันเมื่อระยะเวลาน้อยเกินไปเมฆอาจยังไม่เคลื่อนที่ส่งผลให้อัลกอริทึมไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างภาพทั้งสองได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเมฆและความเร็วการเคลื่อนที่ ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการทดลองนี้อยู่ที่ 20 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่นานที่สุดที่สามารถตรวจจับลักษณะเด่นบนภาพเพื่อใช้ในการคำนวณความเร็วเมฆได้ แต่เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์สำหรับหับการตรวจวัดความเร็วเมฆโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงทำการทดลองวิเคราะห์เปรียบเทียบกับความเร็วของวัตถุที่ทราบความเร็วในการเคลื่อนที่ในหัวข้อถัดไป

#### 4.3.2 การทดลองวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ทราบความเร็วการเคลื่อนที่

การทดลองนี้ใช้หลักการวิเคราะห์เดียวกันในหัวข้อที่ 3.6 โดยการจับภาพการเคลื่อนที่รถยนต์ ภาพถ่ายที่ได้มาจะถูกนำไปลบภาพพื้นหลังที่ไม่ต้องการเพื่อจำกัดให้อัลกอริทึมจับลักษณะเด่นที่บริเวณรถยนต์ที่ต้องการตั้งรูปที่ 48 ทำการจับคู่ลักษณะเด่น โดยภาพที่ใช้ในการคำนวณประกอบไปด้วย ภาพจากระบบสเตอริโอ 2 ภาพ และภาพสำหรับคำนวณความเร็ว 1 ภาพ โดยมีแผนผังการคำนวณตั้งรูปที่ 49 ภาพทั้ง 3 ถูกนำมาจับคู่ลักษณะเด่นด้วย SIFT เพื่อหาระยะที่แตกต่างในหน่วย pixel นำมาคำนวณหาความลึกและความเร็วของวัตถุทดลองคำนวณความเร็วได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 10



รูปที่ 48 (ซ้าย)ภาพถ่ายต้นฉบับ, (ขวา)ภาพที่ต้องการ



รูปที่ 49 แผนผังการคำนวณระยะทางและความเร็วการเคลื่อนที่ของรถยนต์

ตารางที่ 10 การทดลองคำนวณความเร็วการเคลื่อนที่รถยนต์จากภาพถ่าย

ความเร็วรถยนต์ (km/hr.)	ระยะห่างระหว่างรถยนต์กับ กล้อง (m)	ความเร็วที่คำนวณได้ (km/hr.)	คลาดเคลื่อน (%)
10	10	10.17	1.67
	15	10.24	2.34
20	10	19.82	0.90
	15	20.53	2.58
30	10	29.60	1.33
	15	30.89	2.88

สรุปผลการทดลองที่ 4.3.2 ผลการทดลองในตารางข้างต้นสรุปได้ว่า อัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณความเร็วเมฆในการทดลองที่ 4.3.1 มีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับการทดลองวัดความเร็วของรถยนต์ที่เคลื่อนที่ โดยมีการคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10%

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยเรื่อง “ระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆแบบเวลาจริงโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ” นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ และเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อยอดร่วมกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในภายภาคหน้า

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบถ่ายภาพแบบเวลาจริงโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือส่วนการประดิษฐ์ระบบถ่ายภาพที่ประกอบด้วยระบบถ่ายภาพจำนวน 2 ชุด ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดพกพา และส่วนระบบวิเคราะห์ภาพถ่าย ซึ่งประกอบด้วย การปรับเทียบระบบถ่ายภาพ การประมาณความสูง และการวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่จากภาพถ่าย กระบวนการวิเคราะห์ภาพถ่ายทั้งหมดนั้น ดำเนินการโดยใช้อัลกอริทึมหลักคือ การหาลักษณะเด่นจากภาพถ่ายด้วยวิธี Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) เป็นวิธีการที่ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทางด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ

หลักการที่ใช้ในการปรับเทียบระบบถ่ายภาพนั้นประกอบด้วย Image matching และ Epipolar Line ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบความขนานกันของระบบถ่ายภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับหลักการที่ใช้พัฒนาระบบวัดความสูงฐานเมฆนั้น ถูกทำโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะทางหรือ Triangulation ในการวิเคราะห์ระยะทางจากภาพถ่าย ส่วนหลักการที่ใช้วิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่ของเมฆนั้นใช้วิธีการถ่ายภาพสองครั้ง ณ เวลาแตกต่างกัน ในส่วนของขั้นตอนการยืนยันผลนั้น เนื่องจากอุปกรณ์เฉพาะทางนั้นมีราคาค่อนข้างสูงเกินงบการวิจัย การยืนยันผลดำเนินการโดยเปรียบเทียบกับวัตถุที่ทราบข้อมูลระยะทาง เช่น อาคาร และข้อมูลความเร็วในการเคลื่อนที่ เช่น ความเร็วการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

ผลการทดลองในส่วนของ การประมาณระยะทางนั้นพบว่า ที่เป้าหมายระยะไกลน้อยกว่า 200 เมตร นั้นให้ค่าผิดพลาดที่ 5% โดยประมาณ ส่วนเป้าหมายระยะไกลที่ 1,200 เมตร นั้นให้ค่าผิดพลาดที่ 20% โดยประมาณ ซึ่งสามารถทำให้ค่าผิดพลาดน้อยลงได้โดยการเพิ่มระยะระหว่างกล้องถ่ายภาพ เมื่อเพิ่มระยะแล้วทำการทดลองอีกครั้งพบว่าเป้าหมายระยะไกลให้ค่าผิดพลาดเหลือเพียง 8% สำหรับการทดลองวิเคราะห์ความเร็วการเคลื่อนที่นั้นพบว่า การทดลองที่จัดทำขึ้นนั้นมีผลลัพธ์ที่

สอดคล้องกันระหว่างการวิเคราะห์ความเร็วเมฆและความเร็วรถยนต์ที่เคลื่อนที่ โดยมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า 10%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาวิจัยเรื่องระบบวิเคราะห์ความสูงและการเคลื่อนที่ของเมฆแบบเวลาจริงโดยใช้ภาพถ่ายแบบสเตอริโอ มีอุปสรรคเกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยและการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

- การติดตั้งอุปกรณ์ใช้เวลาค่อนข้างนาน เนื่องจากผู้ทดลองจำเป็นต้องปรับเทียบกล้องหลายครั้ง ควรมีผู้ช่วยในการติดตั้ง
- การทดลองสำหรับงานวิจัยในหัวข้อนี้ต้องใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก โดยพื้นที่นั้นต้องปราศจากสิ่งปลูกสร้างที่บดบังวิสัยของเลนส์ถ่ายภาพ
- ระบบกล้องที่ใช้ควรเป็นเลนส์ทางยาวโฟกัสเดี่ยว (Fix Lens) เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากการปรับเปลี่ยนระยะโฟกัส กรณีที่ใช้เลนส์ทางยาวโฟกัสหลายช่วง (Zoom Lens)
- การประดิษฐ์อุปกรณ์นั้นควรออกแบบให้มีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ
- อุปกรณ์ยืนยันผลการทดลองที่มีราคาสูง ถูกติดตั้งเฉพาะบางพื้นที่ ทำให้ยากต่อการใช้งาน

งานศึกษาวิจัยที่คาดว่าสามารถพัฒนาต่อยอดงานวิจัยนี้ได้ เช่น การพยากรณ์การเคลื่อนที่ของเมฆ การทดสอบวัดความสูงฐานเมฆเปรียบเทียบกับอุปกรณ์เฉพาะทาง การพยากรณ์การผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์แบบระยะสั้น

## บรรณานุกรม

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย ปี 2560," Available: [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=47941&filename=index](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47941&filename=index)
- [2] T. Schmidt *et al.*, "Short-term solar forecasting based on sky images to enable higher PV generation in remote electricity networks," *Renew. Energy Environ. Sustain*, vol. 2, no. Sustainable energy systems for the future, p. 6, 2017.
- [3] R. Tapakis and A. G. Charalambides. (2013, Sep) Solar Energy. *Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review*. 392-430.
- [4] L. c. f. E. S. a. Astronomy, "เมฆ," ed: LESA, 2012.
- [5] S. Kato, E. E. Clothiaux, G. G. Mace, and J. C. Liljegren, "Doppler Cloud Radar Derived Drop Size Distributions in Liquid Water Stratus Clouds," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 58, p. 19, 2001.
- [6] U. Feister, T. Sattler, U. Görndorf, H. Möller, J. Shields, and J. Güldner. (2010, May) Comparison of macroscopic cloud data from ground-based measurements using VIS/NIR and IR instruments at Lindenberg, Germany. *Atmospheric Research*. 395-407.
- [7] P. Kollias, E. E. Clothiaux, M. A. Miller, B. A. Albrecht, G. L. Stephens, and T. P. Ackerman. (2007, Oct 1) Millimeter-Wavelength Radars: New Frontier in Atmospheric Cloud and Precipitation Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 10.
- [8] Z. Wang and K. Sassen, "Cloud Type and Macrophysical Property Retrieval Using Multiple Remote Sensors," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 40, no. 10, pp. 1665-1683, 2001.
- [9] B. E. Martner *et al.*, "An Overview of NOAA/ETL's Scanning Ka-band Cloud Radar," American Meteorological Society 2002.
- [10] R. Boers *et al.*, "Optimized fractional cloudiness determination from five ground-based remote sensing techniques," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, p. 115, 2010.

- [11] M. d. Hajj, H. K. Baltink, and W. Wauben, "Determination of mixing layer height from ceilometer backscatter profiles," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2006.
- [12] ส. พึ่งงาม, "การศึกษาความสูงของฐานเมฆและปริมาณเมฆที่สถานีวัดแห่งหนึ่งในเขตร้อนชื้นในภาคเหนือของประเทศไทย," มหาบัณฑิต, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, บัณฑิตวิทยาลัย, Bangkok2017.
- [13] A. G. C. R. Tapakis, "Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review," *Solar Energy*, vol. 95, pp. 392-430, 2013/09/01/ 2013.
- [14] C. Net, "Backscatter Profiles, Cloud Lidar Technology ", ed: Net, Ceilometer, 2015.
- [15] I. V. Chernykha and R. E. Eskridge, "Determination of Cloud Amount and Level from Radiosonde Soundings," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, no. 8, pp. 1362-1369, 1996.
- [16] E. T. Clarke and S. A. Korff, "The radiosonde: The stratosphere laboratory," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 232, no. 3, pp. 217-238, 1941.
- [17] J. Zhang *et al.*, "Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar," *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, no. D7, 2010.
- [18] WILDCARD, "Radiosondes (Weather balloons) and their role in forecasting," ed, 2012.
- [19] G. Pfister, J. B. Liley, B. Forgan, R. L. McKenzie, A. Thomas, and C. N. Long, "Cloud Coverage Based on All-Sky Imaging and Its Impact on Surface Solar Irradiance," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 42, no. 10, pp. 1421-1423, 2003.
- [20] C. N. Long, J. Calbó, J. M. Sabburg, and D. Pages, "Retrieving Cloud Characteristics from Ground-Based Daytime Color All-Sky Images," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 633-652, 2006.
- [21] J. Calbó and J. Sabburg, "Feature Extraction from Whole-Sky Ground-Based Images for Cloud-Type Recognition," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, no. 1, 2008.
- [22] Astronomy, "OMEA All Sky Camera," ed: Alcor Systems, 2013.

- [23] ams, "How Stereo Vision works," vol. 30, ed, pp. 328-341.
- [24] M. Hariyama, M. Kameyama, and N. Yokoyama, "Design of a Trinocular-Stereo-Vision VLSI Processor Based on Optimal Scheduling," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 4, pp. 479-486, 2008.
- [25] A. Zaarane, I. Slimani, W. A. Okaishi, A. Issam, and A. Hamdoun, "Distance measurement system for autonomous vehicles using stereo camera," in *Arrat*: Elsevier, 2020.
- [26] T. Pire, P. D. Cristóforis, M. Nitsche, and J. J. Berlles, "Stereo vision obstacle avoidance using depth and elevation maps," in *IEEE RAS Summer School on "Robot Vision and Applications". VI Latin American Summer School on Robotics*, Santiago, Chile, At Santiago, Chile, 2012.
- [27] F. M. Janeiro, F. Wagner, P. M. Ramos, F. Carretas, and K. Kandler, "Automated cloud base height and wind speed measurement using consumer digital cameras," in *XX IMEKO World Congress*, Busan, 2012.
- [28] F. M. Janeiro, P. M. Ramos, F. Carretas, and F. Wagner, "Cloud base height measurement system based on stereo vision with automatic calibration," in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Taipei, Taiwan, 2016.
- [29] F. M. Savoy, S. Dev, Y. H. Lee, and S. Winkler, "Stereoscopic cloud base reconstruction using high-resolution whole sky imagers," in *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Beijing, China, 2017.
- [30] W. Zhuo, Z.-G. Cao, and Y. Xiao, "Cloud Classification of Ground-Based Images Using Texture-Structure Features," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 79-92, 2014.
- [31] F. M. Savoy, J. C. Lemaitre, S. Dev, Y. H. Lee, and S. Winkler, "Cloud base height estimation using high-resolution whole sky imagers," in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Milano, 2015.
- [32] OpenCV, "Depth Map from Stereo Images," Available: [https://docs.opencv.org/master/dd/d53/tutorial\\_py\\_depthmap.html](https://docs.opencv.org/master/dd/d53/tutorial_py_depthmap.html)
- [33] learn., "HUE, VALUE, SATURATION," ed: Digital Art, Design, and Communication Education.

- [34] A. Mordvintsev and A. K., "Introduction to SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)," Available: [https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py\\_tutorials/py\\_feature2d/py\\_sift\\_intro/py\\_sift\\_intro.html](https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_feature2d/py_sift_intro/py_sift_intro.html)
- [35] D. Tyagi, "Introduction to SIFT( Scale Invariant Feature Transform)," Accessed on: Mar 16 Available: <https://medium.com/data-breach/introduction-to-sift-scale-invariant-feature-transform-65d7f3a72d40>
- [36] D. G. Lowe, " Object recognition from local scale-invariant features," in *Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 2*, 1999.
- [37] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision.*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [38] G. Wang, J. R. Cavallaro, and B. Rister, "Workload Analysis and Efficient OpenCL-based Implementation of SIFT Algorithm on a Smartphone," in *1st IEEE Global Conference on Signal and Information Processing · GlobalSIP 2013*, Austin, Texas, USA, 2013.
- [39] O. d. team, "Introduction to SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)," Accessed on: Nov Available: [https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py\\_tutorials/py\\_feature2d/py\\_sift\\_intro/py\\_sift\\_intro.html](https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_feature2d/py_sift_intro/py_sift_intro.html)
- [40] D. Tyagi and D. Breach, "Introduction to Harris Corner Detector," ed: Medium, 2019.
- [41] U. Sinha, "SIFT: Theory and Practice," ed: AI Shack, 2010.
- [42] O. Dev, "Epipolar Geometry," Available: [https://docs.opencv.org/3.4/da/de9/tutorial\\_py\\_epipolar\\_geometry.html](https://docs.opencv.org/3.4/da/de9/tutorial_py_epipolar_geometry.html)



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชยากร ประเสริฐเสรี
วัน เดือน ปี เกิด	19 มีนาคม 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY