การพัฒนาระบบกล้องคู่สำหรับการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

นายปกรณ์สิทธิ์ พ่วงโต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF DUAL CAMERA SYSTEM FOR TECHNICAL PHOTOGRAPHY

Mr. Pakornsit Poungto

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Imaging Technology
Department of Imaging and Printing Technology
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบกล้องคู่สำหรับการถ่ายภาพเชิงเทคนิค
โดย	นายปกรณ์สิทธิ์ พ่วงโต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา สื่อประสาร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์พรทวี พึ่งรัศมี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปกรณ์สิทธิ์ พ่วงโต : การพัฒนาระบบกล้องคู่สำหรับการถ่ายภาพเชิงเทคนิค. (DEVELOPMENT OF DUAL CAMERA SYSTEM FOR TECHNICAL PHOTOGRAPHY) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์

การถ่ายภาพเชิงเทคนิคเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชิ้นงานศิลปะแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และประเมินงานศิลปะ เช่น การตรวจสอบร่องรอยการซ่อมแซมชิ้นงาน การเลือกวิธีอนุรักษ์ให้เหมาะสมกับสภาพชิ้นงานนั้น การระบุกลุ่มของสารสีที่ใช้ในชิ้นงาน และการดูสิ่งที่ซ่อนอยู่ใต้ชั้นสีที่ตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็น การถ่ายภาพเชิงเทคนิคนี้ใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ดัดแปลงโดยถอดฟิลเตอร์ที่ให้แสงขาวผ่านออก ทำให้กล้องถ่ายภาพสามารถเก็บข้อมูลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 360 - 1,000 นาโนเมตร วิธีการถ่ายภาพสำหรับเทคนิคนี้ใช้แหล่งแสงและฟิลเตอร์สามชนิดที่แตกต่างกันจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนแหล่งแสงและฟิลเตอร์ในขั้นตอนการถ่ายภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบถ่ายภาพสำหรับการถ่ายภาพเชิงเทคนิค เพื่อลดเวลาที่ใช้และลดความยุ่งยากในขั้นตอนการถ่ายภาพ ด้วยการสร้างระบบกล้องคู่ ถ่ายภาพเชิงเทคนิคโดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลปกติกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ถูกดัดแปลงที่สามารถถ่ายภาพได้พร้อมกัน เปรียบเทียบระบบที่ใช้กล้องดิจิทัลสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวประสิทธิภาพสูง (DSLR) กับระบบที่ใช้กล้องดิจิทัลไร้กระจก ใช้เลนส์มุมกว้างและเลนส์มุมปกติ ระบบแนวตั้งและแนวนอน เปรียบเทียบคุณภาพของภาพ ทดสอบและแก้ไขความบิดเบี้ยวและปัญหาขอบมืด สร้างระบบกล้องคู่ 8 ระบบ เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนการกันภาพเหลื่อม กำหนดพื้นที่ใช้งานได้ สร้างตารางเปรียบเทียบระบบ ระบบที่ใช้กล้อง DSLR กับเลนส์มุมกว้างระบบแนวตั้งให้ผลลัพท์ที่ดีที่สุด และเมื่อใช้ร่วมกับแหล่งแสงอินฟราเรด 850 นาโนเมตร จะสามารถลดเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพได้ 47.1% เมื่อเทียบกับระบบกล้องเดี่ยว สามารถระบุสารสีได้ 4 ใน 5 ชนิด และได้สร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพจากระบบกล้องคู่

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางภาพ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2563 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6270055023 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORD: Technical photography, Multispectral imaging, Dual camera, Image processing

Pakornsit Poungto : DEVELOPMENT OF DUAL CAMERA SYSTEM FOR TECHNICAL PHOTOGRAPHY. Advisor: Asst. Prof. CHAWAN KOOPIPAT, Ph.D.

Technical photography (TP) is a non-invasive technique used for analyzing an artwork to decide the conservation method, pigment classification, hidden detail revealing, and painting retouching. This technique requires a modified digital camera that removes a visible-pass filter to acquiring a set of broadband spectral image. The problem with this technique is that it takes time during the image acquiring process due to several combinations of light source and filter in order to collect all information in the painting. Our research aimed to develop a system that can reduce time in the image acquiring process by using one digital camera and one modified digital camera to acquired two images in different spectral bands simultaneously. Full-frame DSLR and a mirrorless camera with a wide-angle lens and normal-angle lens are compared in the topic of image quality. Lens distortion and vignette were tested and corrected. Eight dual-camera systems were created and compared in the topic of image registration error, utilized zone in order to choose the suitable system and a comparison table was created. Full-frame camera with wide-angle lens on the vertical system showed the best result. Together with a new technique using IR-850 light source, image acquisition time was reduced by 47.1% when compared to mono camera system. It can identify 4 of 5 pigments. Finally a GUI program was made to process the images.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study:	Imaging Technology	Student's Signature .....
Academic Year:	2020	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สามารถประสบความสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ อีกทั้งแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ กราบขอบพระคุณอาจารย์มา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สื่อประสาร และรองศาสตราจารย์ พรทวี พึ่งรัศมี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องเอกสารต่าง ๆ ในการดำเนินงาน ขอบคุณนางสาวสุรีย์พร คำแพง และนางสาวเดือนเต็มดวง เดชสุภา ที่ให้กำลังใจและคำแนะนำจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณโครงการพัฒนารูปแบบการบูรณะและอนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรมที่ให้ความอนุเคราะห์งบประมาณสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย

ปกรณ์สิทธิ์ พ่วงโต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง
กิตติกรรมประกาศ ..... จ
สารบัญ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงาน 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
บทที่ 2 ทฤษฎี 3
2.1 การถ่ายภาพเชิงเทคนิค (technical photography) 3
2.1.1 การถ่ายภาพการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ (visible light photography, VIS) 3
2.1.2 การถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (infrared reflectance photography, IR) . 4
2.1.3 การถ่ายภาพการสะท้อนรังสียูวี (ultraviolet reflectance photography, UVR) 5
2.1.4 การถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวี (ultraviolet-induced visible fluorescence photography, UVF) 5
2.1.5 การถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว (visible-induced infrared fluorescence photography, IRF) 6
2.1.6 การถ่ายภาพด้วยแสงเฉียง (raking light photography, RAK) 7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.7 การถ่ายภาพการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (infrared transmittance photography, IRT) 8
2.1.8 ภาพอินฟราเรดแบบสีเทียม (infrared false color image, IRFC) 8
2.2 การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม 9
2.3 การกันภาพเหลื่อม (image registration) 10
2.3.1 การซ้อนภาพโดยใช้จุดควบคุม (control point image registration) 10
2.3.2 การซ้อนภาพโดยใช้เซิร์ฟ (speeded up robust features, SURF) 11
2.4 การบิดเบี้ยวของเลนส์ (lens distortion) 11
2.5 เซ็นเซอร์รับภาพ 13
2.6 ไฟล์ดิบ (RAW file) 14
2.7 ฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ (opto-electronic conversion function, OECF) 14
2.8 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) 15
2.9 เอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง (slanted edge MTF) 15
2.10 การวิเคราะห์บล็อบ 16
2.11 ขอบมืด (vignette) 17
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
บทที่ 3 วิธีการทดลอง 19
3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง 19
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 23
3.2.1 การทดสอบกล้องและเลนส์แต่ละรุ่น 24
3.2.1.1 การแปลงไฟล์ดิบ (RAW file) เป็นไฟล์ภาพ 24
3.2.1.2 การหาฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ของกล้อง (camera opto-electronic conversion function, OECF) หรือการตอบสนองของกล้อง . 24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.1.3 การทดสอบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง (camera signal-to-noise ratio) 25
3.2.1.3 การทดสอบเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง (slanted-edge MTF) 26
3.2.1.4 การทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ 27
3.2.2 การสร้างระบบกล้องคู่ 27
3.2.2.1 การแก้ไขของผิดพลาดของอุปกรณ์ 27
3.2.2.1.1 การแก้ปัญหาขอบมืด 27
3.2.2.1.2 การแก้ปัญหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ 28
3.2.2.2 การติดตั้งระบบกล้องคู่ 28
3.2.2.3 การควบคุมกล้อง 30
3.2.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกล้องคู่ 31
3.2.2.4.1 การทดสอบการกันภาพเหลื่อม (image registration) 31
3.2.2.4.2 การกำหนดพื้นที่ใช้งาน 33
3.2.2.4.3 การสร้างตารางเปรียบเทียบแต่ละระบบ 33
3.2.3 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ของระบบกล้องคู่เทียบกับระบบกล้องเดี่ยวในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค 33
3.2.4 การปรับปรุงเพื่อลดเวลาและแก้ไขข้อจำกัดของการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว 35
3.2.4.1 เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 35
3.2.4.2 การลดเวลา 35
3.2.5 การทดสอบระบุสารสีและวิเคราะห์ภาพวาด 36
3.2.7 สร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่ 37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 38
4.1 การทดสอบกล้องและเลนส์ 38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.1 การหาฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ของกล้อง (camera opto-electronic conversion function, OECF) 38
4.1.2 การทดสอบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง (camera signal-to-noise ratio, SNR) 40
4.1.3 การทดสอบเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง (slanted-edge MTF) 41
4.1.4 การทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ 42
4.2 การสร้างระบบกล้องคู่ 45
4.2.1 การแก้ไขข้อผิดพลาดของอุปกรณ์ 45
4.2.1.1 การแก้ปัญหาขอบมืด 45
4.2.1.2 การแก้ปัญหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ 48
4.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกล้องคู่ 50
4.2.2.1 การทดสอบการกันภาพเหลื่อม (image registration) 50
4.2.2.2 การกำหนดพื้นที่ใช้งาน 52
4.2.2.3 ตารางเปรียบเทียบแต่ละระบบ 56
4.2.3 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ของระบบกล้องคู่เทียบกับระบบกล้องเดี่ยวในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค 59
4.2.3 การปรับปรุงเพื่อลดเวลาและแก้ไขข้อจำกัดของการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว 60
4.2.3.1 เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 60
4.2.3.1 การลดเวลา 63
4.3 การทดสอบระบุสารสี 64
4.4 สร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่ 70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 72
5.1 สรุปผลการวิจัย 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อเสนอแนะ 73
บรรณานุกรม 75
ประวัติผู้เขียน 90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ระบบกล้องคู่ทั้ง 8 ระบบ 29

ตารางที่ 3.2 ลำดับ แหล่งแสง ฟิลเตอร์ และเทคนิคที่ถ่ายสำหรับระบบกล้องเดี่ยวสำหรับการเปรียบเทียบเวลา 34

ตารางที่ 3.3 ลำดับ แหล่งแสง ฟิลเตอร์ และเทคนิคที่ถ่ายสำหรับระบบกล้องคู่สำหรับการเปรียบเทียบเวลา 34

ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 35

ตารางที่ 3.5 ลำดับ แหล่งแสง ฟิลเตอร์ และเทคนิคที่ถ่ายสำหรับการจัดลำดับการถ่ายและเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อลดเวลา 36

ตารางที่ 4.1 จำนวนจุดบนแผ่นทดสอบที่วัดได้จากแต่ละระบบและความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพของระบบทั้ง 8 ระบบ 51

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนพื้นที่ของพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมดของทั้ง 8 ระบบ 55

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบระบบกล้องคู่แต่ละระบบ 58

ตารางที่ 4.4 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 ชุด ของระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่ 59

ตารางที่ 4.5 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคของระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่ เมื่อตัดเวลาสูงสุดและต่ำสุด 59

ตารางที่ 4.6 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 ชุด ของระบบกล้องคู่เดิมและกล้องคู่ใหม่ 63

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคของระบบกล้องเดี่ยว กล้องคู่เดิมและกล้องคู่ใหม่เมื่อตัดเวลาสูงสุดและต่ำสุด 63

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งที่กำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card สำหรับการแปลงภาพเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องเดี่ยว 64

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ในภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องเดี่ยว 66

ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งที่กำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card สำหรับการแปลงภาพเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องคู่ 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ในภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องคู่ 69

ตารางที่ 5.1 สรุปผลแต่ละระบบ 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ผังการถ่ายภาพการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ (ซ้าย) และภาพถ่ายการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 4

ภาพที่ 2.2 ผังการถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (ซ้าย) และภาพถ่ายการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 4

ภาพที่ 2.3 ผังการถ่ายภาพการสะท้อนรังสียูวี (ซ้าย) และภาพถ่ายการสะท้อนรังสียูวีของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 5

ภาพที่ 2.4 ผังการถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวี (ซ้าย) และภาพถ่ายการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวีของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 6

ภาพที่ 2.5 ผังการถ่ายภาพการเรืองรังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว (ซ้าย) และภาพถ่ายการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 7

ภาพที่ 2.6 ผังการถ่ายภาพด้วยแสงเฉียง (ซ้าย) และภาพถ่ายด้วยแสงเฉียงของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 7

ภาพที่ 2.7 ผังการถ่ายภาพการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (ซ้าย) และภาพถ่ายการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรดของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 8

ภาพที่ 2.8 ผังการประมวลผลอินฟราเรดแบบสีเทียม (ซ้าย) และภาพอินฟราเรดแบบสีเทียมของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา) 9

ภาพที่ 2.9 ภาพจากสองแหล่ง (บน) ภาพที่ยังไม่ผ่านการซ้อนภาพ (ล่างซ้าย) และภาพที่ผ่านการซ้อนภาพ 10

ภาพที่ 2.10 จุด SURF บนภาพและวงของพื้นที่ที่สนใจ 11

ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างการบิดเบี้ยวของเลนส์ แสดงด้วยตารางที่ไม่มีความบิดเบี้ยว (ซ้าย) ตารางที่เกิดความผิดรูปแบบโป่งกลาง (กลาง) และตารางที่เกิดความผิดรูปแบบคอดกลาง (ขวา) 12

ภาพที่ 2.12 แผงฟิลเตอร์แบบเบเยอร์ 13

ภาพที่ 2.13 บล็อบที่พบในภาพ กรอบสีแดงแสดงขอบเขตของแต่ละบล็อบ 16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 2.14 ภาพที่ไม่มีขอบมืด (ซ้าย) และภาพที่มีขอบมืด (ขวา) 17

ภาพที่ 3.1 ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ KODAK Q-60 ภายใต้ตู้แสงมาตรฐาน (บน) และแถบตัวอย่างเทา 22 ระดับ ขาว และดำ (ล่าง) 25

ภาพที่ 3.2 แผนผังการประมวลผลข้อมูลสำหรับการหา OECF ของกล้อง 25

ภาพที่ 3.3 ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport ภายใต้ตู้แสงมาตรฐาน 26

ภาพที่ 3.4 การติดตั้งแผ่นกระจายแสงสำหรับการถ่ายภาพเพื่อแก้ไขปัญหาขอบมืด 28

ภาพที่ 3.5 ระบบกล้องคู่แบบแนวนอนของกล้อง Nikon D850 (ซ้าย) และ Nikon J5 (ขวา)..... 29

ภาพที่ 3.6 ระบบกล้องคู่แบบแนวตั้งของกล้อง Nikon D850 (ซ้าย) และ Nikon J5 (ขวา)..... 30

ภาพที่ 4.1 กราฟการตอบสนองของกล้อง (ซ้าย) และฟังก์ชันสำหรับการแปลงภาพให้มีการตอบสนองเป็นเส้นตรง (ขวา) ของกล้องรุ่น Nikon D850 (บน) และ Nikon J5 (ล่าง) 39

ภาพที่ 4.2 ภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) แปลงภาพให้มีการตอบสนองต่อแสงเป็นเส้นตรง ของกล้อง Nikon D850 (บน) และ Nikon J5 (ล่าง)..... 39

ภาพที่ 4.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของตัวอย่างเทาบนแผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport ของกล้อง Nikon D850 (น้ำเงิน) และ Nikon J5 (ส้ม) 40

ภาพที่ 4.4 กราฟเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของระบบที่ใช้เลนส์ NIKKOR VR 10-30 ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร (บนซ้าย) เลนส์ NIKKOR VR 10-30 ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร (บนขวา) เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร (ล่างซ้าย) และเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร (ล่างซ้าย) บนกล้องปกติและกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด กราฟกล้องปกติแสดงในเส้นแดงและเขียว กราฟกล้องอินฟราเรดแสดงในเส้นสีน้ำเงินและฟ้า 42

ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายสำหรับการหาความบิดเบี้ยวของเลนส์..... 43

ภาพที่ 4.6 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้ 44

ภาพที่ 4.7 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้ 44

ภาพที่ 4.8 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้ 44

ภาพที่ 4.9 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้ 45

ภาพที่ 4.10 ตารางค้นหาสำหรับแก้ไขขอบมืดของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร (บน) และ 18 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) 46

ภาพที่ 4.11 ตารางค้นหาสำหรับแก้ไขขอบมืดของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร (บน) และ 50 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) 47

ภาพที่ 4.12 ภาพหลังการแก้ขอบมืดของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร (บน) และ 18 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) 47

ภาพที่ 4.13 ภาพหลังการแก้ขอบมืดของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร (บน) และ 50 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) 48

ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง) 48

ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง) 49

ภาพที่ 4.16 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง) 49

ภาพที่ 4.17 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง) 50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.18 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 52

ภาพที่ 4.19 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 53

ภาพที่ 4.20 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 53

ภาพที่ 4.21 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 53

ภาพที่ 4.22 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 54

ภาพที่ 4.23 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 54

ภาพที่ 4.24 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 54

ภาพที่ 4.25 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง) 55

ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบเดิม (ซ้าย) แบบใหม่ 1 (กลาง) และแบบใหม่ 2 (ขวา) กรอบสีแดงแสดงตำแหน่งที่กำหนดสมดุลขาว กรอบสีเขียวแสดงสารสีที่สามารถตรวจพบได้ด้วยเทคนิคนี้ 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.27 ภาพช่องสัญญาณสีน้ำเงินของภาพแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ที่ถ่ายด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 1 (ซ้าย) และแบบใหม่ 2 (ขวา) กรอบสีแดงแสดงตำแหน่งของตัวอย่างแคดเมียมเรด (cadmium red)..... 61

ภาพที่ 4.28 ภาพไบนารีของช่องสัญญาณสีน้ำเงินแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ที่ถ่ายด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 1 (ซ้าย) และแบบใหม่ 2 (ขวา) กรอบสีแดงแสดงตำแหน่งของตัวอย่างแคดเมียมเรด (cadmium red)..... 62

ภาพที่ 4.29 ภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของภาพวาดด้วยระบบกล้องเดี่ยว 65

ภาพที่ 4.30 พื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนกจากระบบกล้องเดี่ยว วงกลมแต่ละสีแสดงพื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีสีนั้น..... 66

ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของภาพวาดด้วยระบบกล้องคู่..... 68

ภาพที่ 4.32 พื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนกจากระบบกล้องคู่ วงกลมแต่ละสีแสดงพื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีสีนั้น..... 68

ภาพที่ 4.33 ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละความยาวคลื่นของสารสี chrome green (เส้นสีฟ้า) และ verdigris (เส้นสีเขียว) เส้นสีเหลืองแสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 850 นาโนเมตร 70

ภาพที่ 4.34 โปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่ 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

งานศิลปะไม่ว่าจะเป็นภาพวาดบนผ้าใบหรือจิตกรรมฝาผนังล้วนเป็นสิ่งที่มีคุณค่า ถ้างานศิลปะชิ้นนั้นมีอายุมากขึ้น ก็จะเกิดการเสื่อมสภาพตามกาลเวลา เช่น สีสีดจาง สารเคลือบหลุดล่อน หรือวัสดุรองรับเสื่อมสภาพ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการอนุรักษ์งานศิลปะชิ้นนั้นให้กลับมาอยู่ในสภาพคล้ายกับตอนที่เพิ่งวาดเสร็จ อาจมีการลงสีทับในบริเวณที่สีซีดจางหรือเคลือบภาพด้วยสารเคลือบใหม่ แต่สำหรับงานศิลปะบางชิ้นที่มีมูลค่าสูงหรือมีคุณค่าต่อวัฒนธรรม เช่น เป็นภาพวาดที่มีชื่อเสียงมาจากศิลปินที่โด่งดัง บุคคลที่สนใจด้านศิลปะนั้นอยากที่จะเรียนรู้ถึงแนวคิด การวางแผน หรือเทคนิคที่ใช้ของศิลปินท่านนั้น ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการบูรณะชิ้นงานหรือศึกษาชิ้นงาน หนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญคือการเก็บข้อมูลหรือเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ เช่น การระบุชนิดของสารสีที่ใช้ในงานนั้นเพื่อหากต้องทาสีทับบริเวณที่ซีดจาง สีที่นำมาใช้นั้นอาจต้องเป็นสีที่ใช้สารสีชนิดเดียวกันเพื่อให้ภาพเมื่อบูรณะเสร็จแล้วมีความสมบูรณ์ ถูกต้อง หรืออยู่ในสภาพที่คล้ายต้นฉบับมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์ชิ้นงานนั้นสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือการวิเคราะห์แบบทำลายตัวอย่างและการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง การวิเคราะห์แบบทำลายตัวอย่างนั้นจะต้องนำชิ้นส่วนเล็ก ๆ จากชิ้นงานออกมาเพื่อนำมาวิเคราะห์หรือใช้เครื่องมือที่สร้างความเสียหายให้กับตัวชิ้นงานได้ สำหรับการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างนั้นเป็นการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์โดยที่ชิ้นงานศิลปะนั้นอยู่ในสภาพเดิม ซึ่งเทคนิคทางภาพถ่ายที่เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ลายตัวอย่างนั้นถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์งานศิลปะ เช่น การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม การถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัม การถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด การถ่ายภาพการวาวแสง หรือการถ่ายภาพเชิงเทคนิคที่เป็นการรวมการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม การถ่ายภาพการวาวแสง และการถ่ายภาพเทคนิคอื่น ๆ เพื่อเก็บข้อมูลงานศิลปะมาวิเคราะห์

แต่เนื่องจากการถ่ายภาพเชิงเทคนิคนั้นต้องถ่ายภาพถึง 7 เทคนิค เพื่อเอามาใช้ในการวิเคราะห์ทำให้เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพชิ้นงานศิลปะนั้นใช้เวลานาน หากต้องออกไปถ่ายภาพนอกสถานที่เวลาที่ใช้ในการทำงานนั้นมีจำกัด หากภาพมีขนาดใหญ่อาจต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพมากกว่า 1 วัน ซึ่งหากเราสามารถลดเวลาที่ต้องใช้ในการถ่ายภาพได้จะมีประโยชน์ต่อการทำงานเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะสร้างระบบการถ่ายภาพสำหรับการถ่ายภาพเชิงเทคนิค เพื่อลด

เวลาที่ต้องใช้ในการถ่ายภาพ ด้วยการสร้างระบบกล้องคู่ สำหรับถ่ายภาพเชิงเทคนิคโดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่มีการดัดแปลง 2 กล้องมาถ่ายภาพพร้อมกัน เพื่อลดเวลาที่ต้องใช้ในการถ่ายภาพ โดยเปรียบเทียบระบบที่ใช้กล้องดิจิทัลสะท้อนภาพแบบเลนส์เดี่ยวประสิทธิภาพสูง กับระบบที่ใช้กล้องดิจิทัลไร้กระจกและเปรียบเทียบกับการใช้ระบบกล้องเดี่ยว เพื่อศึกษาความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการถ่ายและประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ชิ้นงานศิลปะ สร้างตารางเพื่อสรุปข้อดีและด้อยของระบบทั้งหมด ทั้งนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกล้องทั้งสองด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงาน

เพื่อสร้างระบบถ่ายภาพแบบกล้องคู่สำหรับการถ่ายภาพเชิงเทคนิคที่ใช้ในการอนุรักษ์งานศิลปะ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาด้วยกล้องดิจิทัลสะท้อนภาพแบบเลนส์เดี่ยว รุ่น Nikon D850 และกล้องดิจิทัลไร้กระจก Nikon J5 กับเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร เลนส์ Nikon 24 mm f/2.8 AF-D และเลนส์ Nikon 50 mm f/1.8 G ศึกษาในหัวข้อต่อไปนี้ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง ความคมชัดของภาพ การกันภาพเหลื่อม เวลาที่ใช้ในการถ่ายและประสิทธิภาพในการวิเคราะห์งานศิลปะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ระบบกล้องคู่สำหรับถ่ายภาพเชิงเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและลดขั้นตอนลงจากเดิม

บทที่ 2
ทฤษฎี

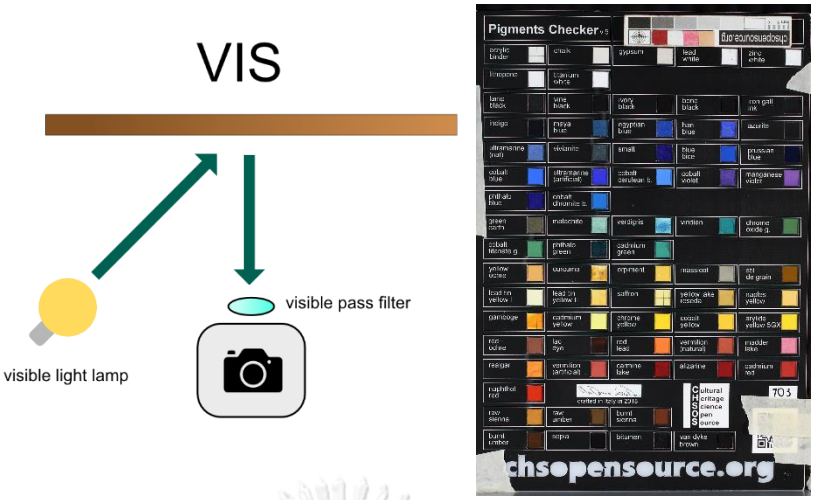
2.1 การถ่ายภาพเชิงเทคนิค (technical photography)

การถ่ายภาพเชิงเทคนิคอาจเรียกได้ว่าเป็นการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมรูปแบบหนึ่ง ที่ถูกใช้ในเพื่อวิเคราะห์งานศิลปะ หรือเพื่อระบุสารสีบนภาพวาด ซึ่งการถ่ายภาพเชิงเทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่าง เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์ หาร่องรอยการซ่อมแซม หรือประเมินความเสียหายเบื้องต้น โดยใช้การถ่ายภาพคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลายช่วงความยาวคลื่น การถ่ายภาพฟลูออเรสเซนต์ และการประมวลผลภาพ เนื่องจากกล้องถ่ายภาพส่วนใหญ่ในปัจจุบันนั้นใช้เซ็นเซอร์ชนิดซีมอส ซึ่งเซ็นเซอร์ชนิดนี้สามารถถ่ายภาพคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 300-1,000 นาโนเมตร แต่กล้องถ่ายภาพดิจิทัลปกตินั้นจะถูกติดตั้งฟิลเตอร์ที่ยอมให้เฉพาะแสงที่มองเห็นได้ผ่าน เพื่อให้กล้องสามารถถ่ายภาพได้ใกล้เคียงกับสิ่งที่ตามองเห็น เทคนิคการถ่ายภาพเชิงเทคนิคจึงเป็นการถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลที่ถูกดัดแปลงนำฟิลเตอร์ที่ตัดรังสียูวีและอินฟราเรดออก หรือสามารถเรียกกล้องชนิดนี้ว่า กล้องฟูลสเปกตรัม กล้องจะสามารถตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่กว้างขึ้น โดยถ่ายภาพภายใต้แหล่งแสงและฟิลเตอร์ต่าง ๆ กัน การถ่ายภาพเชิงเทคนิคนี้ประกอบไปด้วยเทคนิคทางภาพทั้งหมด 8 เทคนิค ดังนี้ [1]

2.1.1 การถ่ายภาพการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ (visible light photography, VIS)

เป็นการถ่ายภาพโดยใช้แหล่งแสงเป็นไฟฮาโลเจน คู่กับฟิลเตอร์ที่ตัดรังสียูวีและอินฟราเรด ภาพที่ได้จะเป็นภาพถ่ายที่สามารถถ่ายได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพปกติคล้ายกับการมองด้วยตาเปล่า แสดงถึงลักษณะการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างภาพถ่ายการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

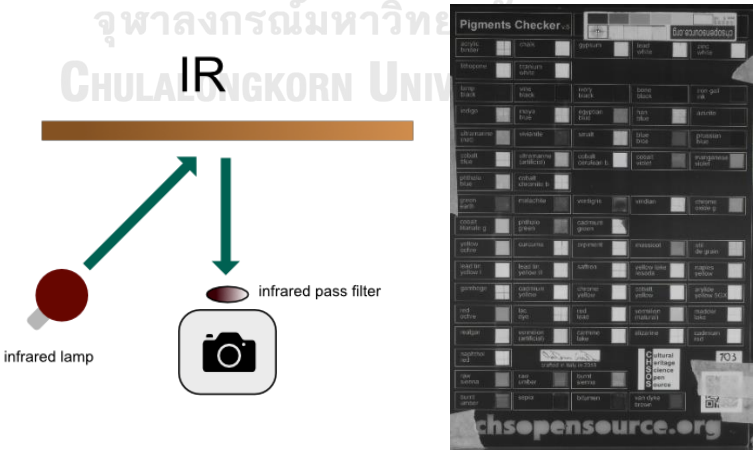


ภาพที่ 2.1 ผังการถ่ายภาพการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ (ซ้าย) และภาพถ่ายการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.1.2 การถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (infrared reflectance photography, IR)

เป็นการถ่ายภาพโดยใช้แหล่งแสงเป็นไฟฮาโลเจน คู่กับฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเท่านั้น ภาพที่ได้จะแสดงถึงลักษณะการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสารสีบนชิ้นงานศิลปะและแสดงให้เห็นถึงสิ่งที่อยู่ใต้ชั้นสี เช่น รอยร่างจากดินสอ รอยร้าวของวัสดุรองรับ ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างภาพถ่ายการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.2

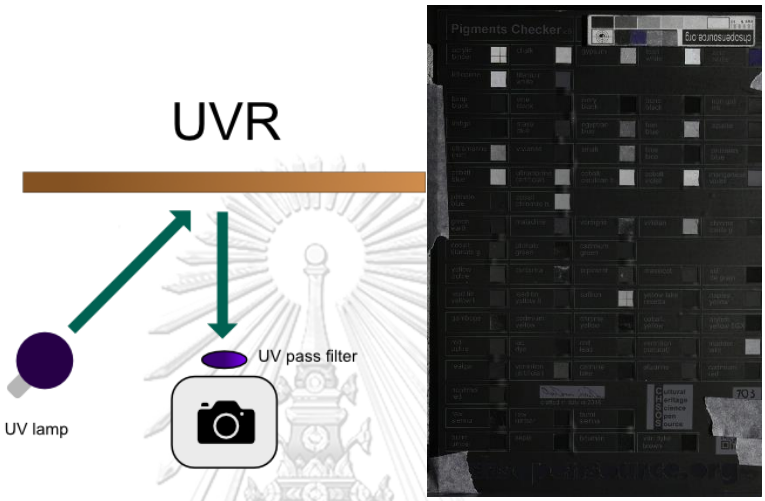
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 2.2 ผังการถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (ซ้าย) และภาพถ่ายการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.1.3 การถ่ายภาพการสะท้อนรังสียูวี (ultraviolet reflectance photography, UVR)

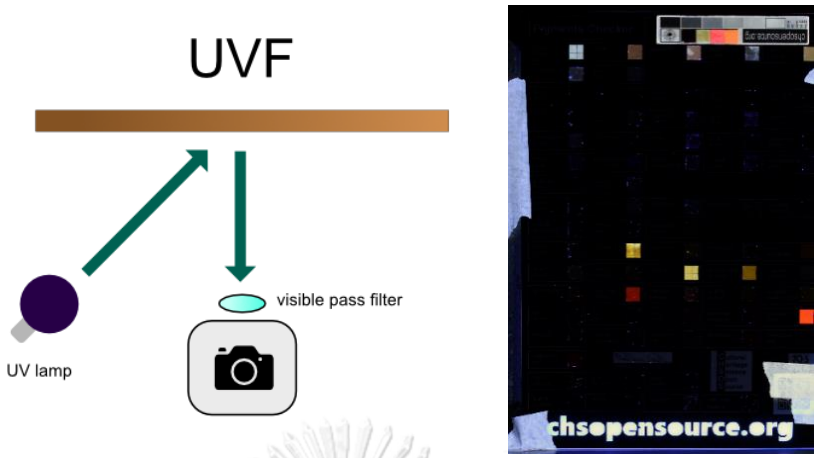
ใช้แหล่งแสงเป็นแอลอีดียูวีที่ให้พลังงานที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และใช้กับฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสียูวีผ่านเท่านั้นภาพที่ได้จะเห็นถึงการสะท้อนรังสียูวีของสารสีชนิดต่าง ๆ ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างภาพถ่ายการสะท้อนรังสียูวีของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ผังการถ่ายภาพการสะท้อนรังสียูวี (ซ้าย) และภาพถ่ายการสะท้อนรังสียูวีของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.1.4 การถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวี (ultraviolet-induced visible fluorescence photography, UVF)

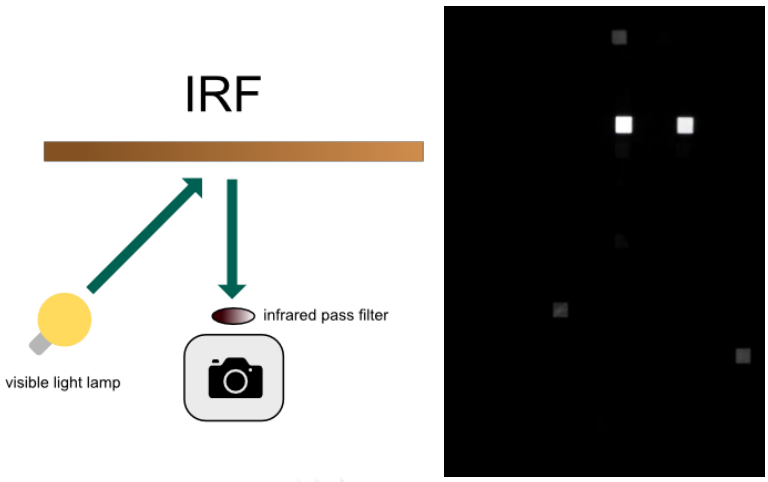
สารสีบางชนิดมีสมบัติที่เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสียูวีแล้ว จะคายพลังงานออกมาเป็นแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นได้ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงอาศัยแหล่งแสงที่เป็นแอลอีดียูวีที่ให้พลังงานที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เพื่อไปกระตุ้นสารสีภายในชิ้นงานศิลปะและถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงในช่วงที่มองเห็นได้ผ่าน ภาพที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงสารสีที่มีสมบัตินี้ เช่น curcuma, saffron, yellow lake reseda, cadmium และ madder lake นอกจากสารสีแล้วสารยึดอะคริลิกยังมีสมบัติการเรืองแสงนี้ด้วย ดังนั้นเทคนิคนี้จึงสามารถใช้เพื่อประเมินความสมบูรณ์ หรือร่องรอยการซ่อมแซมของสารเคลือบบนชิ้นงานศิลปะได้อีกด้วย ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวีของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ผังการถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวี (ซ้าย) และภาพถ่ายการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวีของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.1.5 การถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว (visible-induced infrared fluorescence photography, IRF)

สารสีบางชนิดมีสมบัติฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว สารสีบนแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ที่มีสมบัตินี้ประกอบไปด้วย egyptian blue, han blue, สารสีกลุ่มแคดเมี่ยมประกอบไปด้วย cadmium green, cadmium yellow และ cadmium red [2] สำหรับการถ่ายภาพเทคนิคนี้ใช้แหล่งแสงคือแอลอีดีขาว ติดตั้งฟิลเตอร์ที่ยอมให้เฉพาะรังสีอินฟราเรดผ่านไว้ที่กล้อง ภาพที่ได้จะเห็นเพียงจุดสว่างของบริเวณที่มีสารสีที่มีสมบัตินี้ ซึ่งเทคนิคนี้อาจไม่สามารถถ่ายได้ในบางสถานการณ์ เช่น การถ่ายภาพวาดบนเพดานสูง เพราะความเข้มแสงอาจไม่มากพอที่จะกระตุ้นสารสีให้ฟลูออเรสเซนซ์ได้ ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างภาพถ่ายการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ผังการถ่ายภาพการเรืองรังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว (ซ้าย) และภาพถ่ายการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

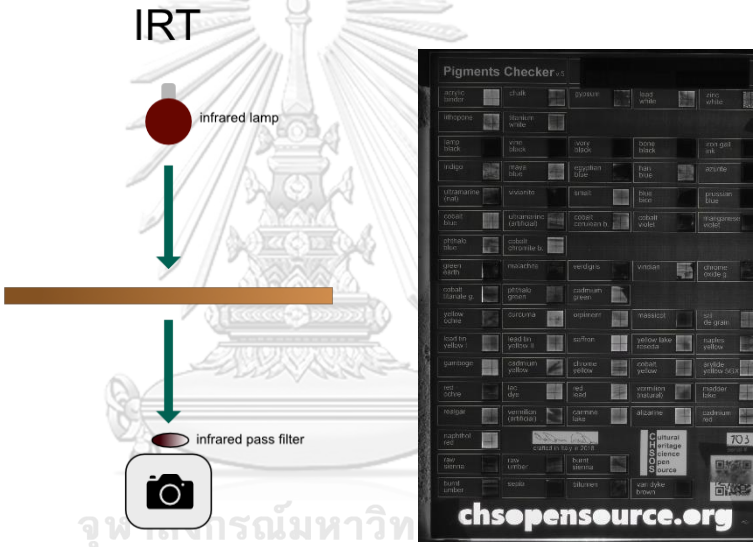
2.1.6 การถ่ายภาพด้วยแสงเฉียง (raking light photography, RAK)

เทคนิคนี้คล้ายกับการถ่ายภาพการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ โดยใช้แหล่งแสงและฟิลเตอร์เหมือนกัน แต่แหล่งแสงจะขยับเข้าไปทำมุมกับตัวชิ้นงานเพียงเล็กน้อย เทคนิคนี้จะช่วยให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวชิ้นงาน รอยยับ ความลึก รวมถึงฝีแปรงของศิลปินที่ใช้ในการสร้างสรรค์ผลงาน รวมถึงอาจเห็นฝุ่น หรือสิ่งสกปรกที่ติดอยู่บนชิ้นงาน ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างภาพถ่ายด้วยแสงเฉียงของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.6

ภาพที่ 2.6 ผังการถ่ายภาพด้วยแสงเฉียง (ซ้าย) และภาพถ่ายด้วยแสงเฉียงของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.1.7 การถ่ายภาพการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (infrared transmittance photography, IRT)

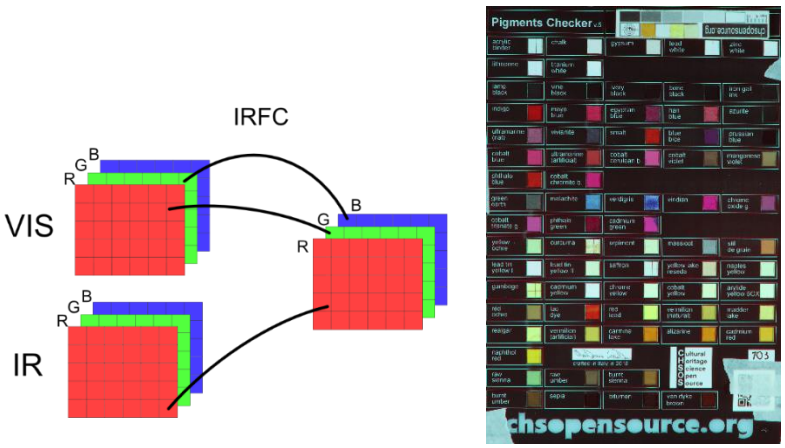
สารสีบางชนิดยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านได้ เทคนิคนี้จึงสามารถใช้ดูสิ่งที่อยู่ภายใต้ชั้นสีได้มากกว่าเทคนิคการถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด โดยใช้แหล่งแสงเป็นไฟฮาโลเจนส่องมาจากด้านหลังของชิ้นงานและถ่ายภาพทางด้านหน้าด้วยกล้องที่ติดตั้งฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่าน การใช้แหล่งแสงส่องมาจากทางด้านหลังนั้นชิ้นงานต้องมีความบางและยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่าน ดังนั้นจึงไม่สามารถถ่ายภาพด้วยเทคนิคนี้กับภาพวาดบนผนัง เพดาน หรือชิ้นงานที่มีความทึบได้ ผังการถ่ายภาพและตัวอย่างภาพถ่ายการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ผังการถ่ายภาพการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (ซ้าย) และภาพถ่ายการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรดของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.1.8 ภาพอินฟราเรดแบบสีเทียม (infrared false color image, IRFC)

เทคนิคนี้เป็นการประมวลผลภาพจากภาพถ่ายเทคนิค VIS และ IR โดยจะนำข้อมูลสีจากช่องสัญญาณสีแดงและเขียวจากภาพ VIS มาแทนที่ช่องสัญญาณสีเขียวและน้ำเงินของภาพ IR ตามลำดับ เทคนิคนี้จะช่วยให้เห็นความแตกต่างของสิ่งที่ปรากฏในภาพ IR แต่ไม่ปรากฏในภาพ VIS ได้อย่างชัดเจน แต่เนื่องด้วยภาพถ่าย IR นั้นมีแนวโน้มที่จะมีขนาดของวัตถุภายในภาพที่ใหญ่กว่าภาพถ่าย VIS ดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนการซ้อนภาพที่ทำให้ขนาดของวัตถุภายในภาพ VIS และ IR นั้นเท่ากัน ผังการประมวลผลภาพและตัวอย่างภาพอินฟราเรดแบบสีเทียมของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 แสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ผังการประมวลผลอินฟราเรดแบบสีเทียม (ซ้าย) และภาพอินฟราเรดแบบสีเทียมของแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 (ขวา)

2.2 การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม

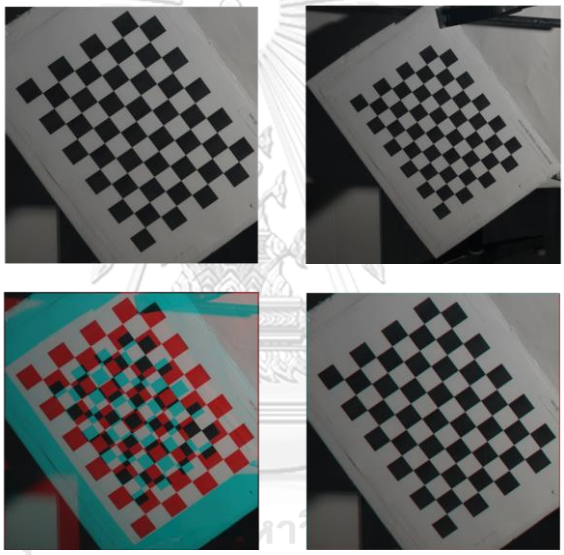
การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมเป็นการถ่ายภาพที่ช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลการสะท้อนแสงหรือรังสีของวัตถุนั้นในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ โดยอาจถ่ายด้วยฟิลเตอร์ในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ หรือใช้แหล่งแสงที่ให้พลังงานในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ โดยส่วนใหญ่แล้วการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมนั้นนิยมถ่ายกันในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นได้ จนถึงช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ในกระบวนการถ่ายนั้นจะถ่ายที่ละรูปที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ทำให้ภาพที่ได้นั้นเป็นภาพเดี่ยวที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งต่างกับการถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัมที่ภาพที่ได้นั้นในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลของการสะท้อนแสงในทุกความยาวคลื่น [3]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เทคนิคการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมนั้นถูกนำเข้ามาใช้สำหรับงานอนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรม เช่น ภาพวาด จิตกรรฝาผนัง เพราะเป็นวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบไม่ทำลายตัวอย่างและไม่จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ สามารถทำงานได้ในที่ที่ชิ้นงานนั้นอยู่ ในช่วงแรกที่นำเทคนิคนี้มาใช้จะเป็นการถ่ายภาพที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ แล้วเอามาเปรียบเทียบกันเพื่อหาร่องรอยการซ่อมแซม ดูความเสื่อมสภาพของวัสดุ แต่ในช่วงหลังเริ่มมีการนำเทคนิคนี้มาใช้เพื่อระบุสารสีบนชิ้นงาน ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์งานศิลปะนั้นจะใช้งานเทคนิคการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมในช่วงตั้งแต่ ยูวี แสงที่มองเห็นได้ และอินฟราเรด อีกทั้งยังมีการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวีอีกด้วย [4]

2.3 การกันภาพเหลื่อม (image registration)

การถ่ายภาพด้วยกล้องมากกว่า 1 กล้องนั้นตำแหน่งของเซ็นเซอร์ในการถ่ายของกล้องแต่ละกล้องนั้นจะอยู่คนละตำแหน่งกัน ภาพที่ได้จากกล้องแต่ละกล้องจึงไม่เหมือนกันหรือเมื่อนำมาซ้อนทับกันแล้วมีส่วนที่ซ้อนกับกันไม่สนิท ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลภาพเหล่านั้นมาใช้งานต่อได้ จึงต้องมีขั้นตอนการประมวลผลภาพเพื่อจัดตำแหน่งของภาพจากกล้องแต่ละกล้องให้วัตถุในภาพนั้นซ้อนทับกันได้ ซึ่งการประมวลผลภาพนี้เรียกกว่าการกันภาพเหลื่อมหรือการซ้อนภาพ ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น การซ้อนภาพโดยใช้จุดควบคุม (control point image registration) หรือการซ้อนภาพโดยใช้เซิร์ฟ (speeded up robust features, SURF) ตัวอย่างภาพที่ยังไม่ถูกซ้อนภาพและซ้อนภาพแล้ว แสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ภาพจากสองแหล่ง (บน) ภาพที่ยังไม่ผ่านการซ้อนภาพ (ล่างซ้าย) และภาพที่ผ่านการซ้อนภาพ

2.3.1 การซ้อนภาพโดยใช้จุดควบคุม (control point image registration)

การซ้อนภาพโดยใช้จุดควบคุมนั้นมีหลักการคือ การเลือกจุดที่เราสนใจหรือจุดของวัตถุที่มีเหมือนกันในภาพจากกล้องต่าง ๆ โดยการเลือกจุดนี้สามารถทำได้โดยให้ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดเองหรืออาจให้โปรแกรมประมวลผลภาพทำนายจุดที่มีเหมือนกันในภาพได้ หากกรณีที่ใช้กล้องในการถ่ายภาพเพียง 2 กล้อง เราจะได้คู่ของจุดควบคุมที่แสดงถึงพิกัดของตำแหน่งเดียวกันบนวัตถุนั้นจากทั้ง 2 กล้อง จากนั้นใช้การคำนวณทางเมทริกซ์เพื่อแปลงพิกัดของจุดจากภาพนึงไปยังอีกภาพนึง ทั้งนี้การกำหนดจุดควบคุมเองโดยผู้ใช้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการเลือกที่ไม่สามารถเลือกที่ตำแหน่งของวัตถุตำแหน่งเดียวกัน อาจมีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งสามารถใช้เทคนิคสหสัมพันธ์ไขว้ (cross-

correlation) [5] เพื่อปรับพิกัดของจุดแต่ละคู่ให้ใกล้เคียงกันมากขึ้นและส่งผลให้การซ้อนภาพมีความแม่นยำมากขึ้น

2.3.2 การซ้อนภาพโดยใช้เซิร์ฟ (speeded up robust features, SURF)

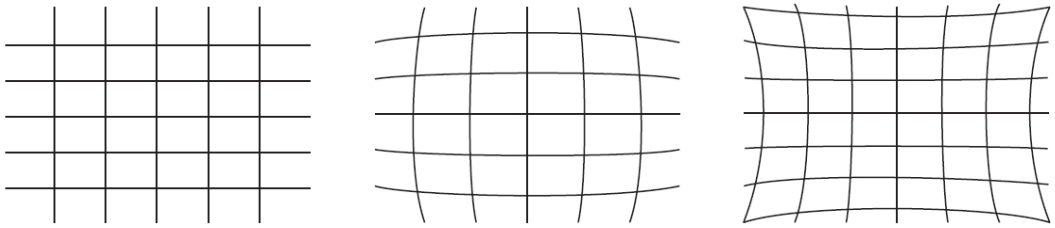
ขั้นตอนวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีมัลติสเกลสเปซ (multi-scale space) และการตรวจจับลักษณะที่มีพื้นฐานจากเฮสเซี่ยนเมทริกซ์ (hessian matrix) มีประสิทธิภาพที่ดีและแม่นยำ โดยขั้นตอนวิธีนี้ได้พัฒนาขึ้นมาโดยมีหลักการและขั้นตอนการทำงานคล้ายซิฟท์ (scale-invariant feature transform, SIFT) แต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าโดยที่มีสมบัติคล้ายกัน ขั้นตอนแรกของการทำงานคือกำหนดทิศทางจากข้อมูลในพื้นที่วงกลมรอบจุดที่สนใจ จากนั้นสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งตรงกันกับพื้นที่วงกลมก่อนหน้านี้ สกัดข้อมูลทิศทางที่สร้างจาก SURF เพื่อนำไปเทียบจุดที่ตรงกันในระหว่างรูป และแปลงรูปใดรูปหนึ่งให้จุด SURF มีตำแหน่งตรงกัน ตัวอย่างจุด SURF ที่เจอบนภาพแสดงในภาพที่ 2.10 การซ้อนภาพเทคนิคนี้นั้นสามารถทำได้แบบอัตโนมัติ เหมาะแก่การประมวลผลภาพหลาย ๆ ภาพ [6]

ภาพที่ 2.10 จุด SURF บนภาพและวงของพื้นที่ที่สนใจ

2.4 การบิดเบี้ยวของเลนส์ (lens distortion)

การบิดเบี้ยวของเลนส์คือการที่เลนส์ไม่สามารถฉายภาพแล้วคงรูปทรงเดิมของภาพได้ เกิดความบิดเบี้ยวของภาพ หรืออาจกล่าวว่าคือการที่เส้นตรงในฉากที่ถูกฉายผ่านเลนส์แล้วไม่เป็นเส้นตรงบนภาพ เกิดการผิดรูปทำให้เส้นตรงกลายเป็นเส้นโค้ง ซึ่งการบิดเบี้ยวของเลนส์นี้มี 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ความผิดรูปโป่งกลาง เส้นตรงบนภาพมีลักษณะโป่งออกมาจากภาพและความผิดรูปแบบคอด

กลาง เส้นตรงบนภาพจะเว้าเข้าหาบริเวณกลางภาพ ซึ่งทั้ง 2 ประเภทนี้เป็นการบิดเบี้ยวในเชิงรัศมี (radial distortion)



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างการบิดเบี้ยวของเลนส์ แสดงด้วยตารางที่ไม่มีความบิดเบี้ยว (ซ้าย) ตารางที่เกิดความผิดรูปแบบโป่งกลาง (กลาง) และตารางที่เกิดความผิดรูปแบบคอดกลาง (ขวา)

การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ส่วนใหญ่สามารถแก้ไขได้ด้วยโมเดลของ บราวน์-คอนราดี้ (Brown-Conrady model) โดยโมเดลนี้ได้กำหนดการแปลงพิกัดของจุดที่ไม่บิดเบี้ยวให้เป็นพิกัดของจุดที่เกิดความบิดเบี้ยว แสดงในสมการที่ 2.1

$$u_d = u_n(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + \cdots) + (P_2(r^2 + 2u_n^2) + 2P_1u_nv_n) \cdot (1 + P_3r^2 + P_4r^4 + \cdots)$$
$$v_d = v_n(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + \cdots) + (P_2(r^2 + 2v_n^2) + 2P_1u_nv_n) \cdot (1 + P_3r^2 + P_4r^4 + \cdots)$$

สมการที่ 2.1

เมื่อ $\mathrm{r} = \sqrt{(u_n - u_c)^2 + (v_n - v_c)^2}$ และ u_d, v_d คือพิกัดของภาพที่บิดเบี้ยว u_n, v_n คือพิกัดของภาพที่ไม่บิดเบี้ยว u_c, v_c คือพิกัดของศูนย์กลางการบิดเบี้ยว K_n คือสัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวเชิงรัศมีและ P_n คือสัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวแทนเจนเชียว (tangential distortion) ส่วนใหญ่แล้วการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นในภาพถ่ายทั่วไปนั้นจะพิจารณาเพียงแค่สัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวเชิงรัศมีอันดับที่ 1 และ 2 ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งการบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางนั้นตัวแปร K_1 จะมีค่าเป็นลบและการบิดเบี้ยวแบบคอดกลางนั้นตัวแปร K_1 จะมีค่าเป็นบวกและสามารถใช้สมการเพื่อแปลงพิกัดของภาพที่มีความบิดเบี้ยว ให้กลายเป็นภาพที่ไม่บิดเบี้ยวได้ [7]

$$u_d = u_n(1 + K_1r^2 + K_2r^4)$$
$$v_d = v_n(1 + K_1r^2 + K_2r^4)$$

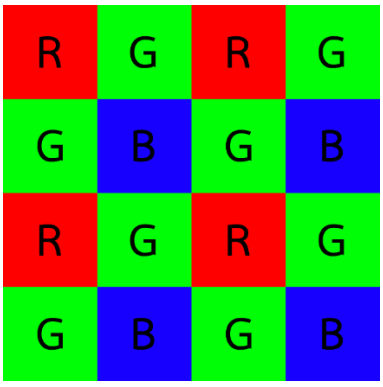
สมการที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 เซ็นเซอร์รับภาพ

การถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลนั้นหนึ่งสิ่งที่สำคัญคือเซ็นเซอร์รับภาพที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานในรูปของแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เซ็นเซอร์รับภาพนั้นมีหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพได้ แต่ในปัจจุบันเซ็นเซอร์ที่ได้รับความนิยมที่สุดคือเซ็นเซอร์ชนิดซีมอส เนื่องจากในการผลิตนั้นสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตที่ใช้สำหรับการผลิตไมโครโพรเซสเซอร์ทั่วไปได้ อีกทั้งเซ็นเซอร์ซีมอสสามารถรวมฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น ตัวอ่านข้อมูล ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ไว้ที่แผงวงจรเดียวกันได้ และเซ็นเซอร์ซีมอสใช้พลังงานน้อย เซ็นเซอร์ซีมอสมีการตอบสนองต่อพลังงานประมาณ 350 – 1,000 นาโนเมตร

สำหรับการถ่ายภาพสี กล้องถ่ายภาพจะต้องสามารถบันทึกข้อมูลสี แดง เขียว และน้ำเงินได้ โดยสำหรับกล้องถ่ายภาพทั่วไปจะใช้แผงฟิลเตอร์สีติดตั้งอยู่ที่ด้านหน้าของเซ็นเซอร์ ซึ่งทำให้แต่ละพิกเซลนั้นสามารถเก็บข้อมูลแสงได้เพียงสีเดียวและนำข้อมูลสีของพิกเซลด้านข้างมาประมวลผลเพื่อสร้างภาพสี ที่ในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสี 3 ช่องสัญญาณคือ แดง เขียว และน้ำเงิน ขั้นตอนการประมวลผลนี้ หากเราถ่ายภาพปกติกล้องจะประมวลผลในขั้นตอนนี้ภายในกล้องและบันทึกภาพสีที่ประมวลผลแล้ว แต่หากเราถ่ายภาพเป็นไฟล์ดิบ (RAW) ขั้นตอนการประมวลผลนี้จะเกิดขึ้นในโปรแกรมสำหรับการแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ รูปแบบของแผงฟิลเตอร์ที่นิยมและใช้กันบนกล้องถ่ายภาพทั่วไปคือแบบเบเยอร์ ประกอบไปด้วยฟิลเตอร์สี แดง เขียว และน้ำเงิน ดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยที่จำนวนของฟิลเตอร์สีเขียวจะมีมากกว่าฟิลเตอร์สีแดงและน้ำเงิน 2 เท่า ซึ่งมีสัดส่วนใกล้เคียงกันกับจำนวนเซลล์รูปกรวยในตามนุษย์ อีกทั้งการส่องผ่านของฟิลเตอร์แต่ละสีนั้นคล้ายกับการตอบสนองของเซลล์รูปกรวยที่ใช้ในการมองเห็นสีของมนุษย์ [8]



ภาพที่ 2.12 แผงฟิลเตอร์แบบเบเยอร์

2.6 ไฟล์ดิบ (RAW file)

ไฟล์ดิบหรือไฟล์ภาพดิบนั้นเป็นไฟล์ที่กล้องบันทึกออกมาโดยบรรจุข้อมูลที่ยังไม่ผ่านการประมวลผลใด ๆ หรือถูกประมวลผลน้อยที่สุด โดยไฟล์ดิบนั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ข้อมูลภาพหรือข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ แต่ในกล้องหลาย ๆ รุ่นมักจะมีการประมวลผลบางอย่าง เช่น การลดสัญญาณรบกวน ส่วนที่ 2 คือรายละเอียดภาพ ในส่วนนี้กล้องจะบันทึกข้อมูลการตั้งค่าของกล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการถ่ายภาพนั้น เช่น ความเร็วชัตเตอร์ รูรับแสง ความไวแสง สมดุลขาว เวลาที่ถ่าย

การแปลงไฟล์ดิบ กล้องที่สามารถบันทึกไฟล์ดิบได้จะต้องมีโปรแกรมที่ใช้ในการแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพ (RAW converter) ซึ่งควรใช้โปรแกรมจากผู้ผลิตเพื่อความถูกต้องในการแปลงข้อมูล เนื่องจากมีแค่ผู้ผลิตที่รู้รายละเอียดของอุปกรณ์ทุกชิ้นส่วนและกระบวนการประมวลผลสัญญาณของกล้อง โปรแกรมที่ใช้ในการแปลงไฟล์ดิบอื่น ๆ นั้นออกแบบมาเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ง่ายและสามารถแปลงไฟล์ดิบจากกล้องหลายรุ่นได้ โปรแกรมแปลงไฟล์ดิบส่วนมากแล้วจะมีขั้นตอนการแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพดังนี้ ขั้นตอนแรกจะเป็นการดีโมเสก (demosaicing) คือการคำนวณข้อมูลสีโดยเอาข้อมูลสีจากพิกเซลข้าง ๆ บนเซ็นเซอร์มาคำนวณ เพื่อให้ได้ภาพสีที่ใน 1 พิกเซลนั้นมีข้อมูลสีครบ 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งการแปลงนี้จะใช้การแปลงที่มีความสัมพันธ์กับฟิลเตอร์สีบนหน้าเซ็นเซอร์ ขั้นตอนที่ 2 การแปลงปริภูมิสีของกล้องให้เป็นปริภูมิสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ เช่น ปริภูมิสี CIEXYZ ขั้นตอนที่ 3 ปรับแกมมาขั้นตอนนี้เป็นการแปลงข้อมูลความสว่างที่มีการตอบสนองเป็นเส้นตรงของกล้อง ให้เป็นภาพที่มีการตอบสนองไม่เป็นเส้นตรงเพื่อให้สัมพันธ์กับระบบการมองเห็นของมนุษย์และเหมาะสมสำหรับการแสดงผลบนจอภาพ ขั้นตอนที่ 4 สมดุลขาว โดยจะกำหนดตามค่าที่ผู้ใช้ตั้งค่าไว้ในตอนถ่ายภาพนั้นหรือค่าที่ผู้ใช้เลือกไว้ในโปรแกรมที่ใช้แปลงไฟล์ดิบ การปรับสมดุลขาวนี้เป็นการปรับสีของภาพให้ตรงอุณภูมิสีของแปล่งแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพนั้นเพื่อให้ภาพที่ได้ดูเป็นธรรมชาติและสมจริง ขั้นตอนสุดท้ายคือ การลดสัญญาณรบกวนและการเพิ่มความคมชัด ขั้นตอนนี้จะลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในภาพและแก้ไขภาพเบลอที่อาจเกิดจากอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น เลนส์หรือฟิลเตอร์ [9]

2.7 ฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ (opto-electronic conversion function, OECF)

ลักษณะน้ำหนักสีของอุปกรณ์บันทึกภาพแบบดิจิทัลนั้นส่วนใหญ่แล้วจะอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของฉากกับข้อมูลดิจิทัล ถึงแม้ว่าเซ็นเซอร์รับภาพที่ใช้จะมีการ

ตอบสนองต่อความส่องสว่างแบบเส้นตรง ซึ่งไม่เหมือนกันกับระบบการมองเห็นของมนุษย์ที่ตอบสนองเป็นลอการิทึม ระบบประมวลผลในกล้องหรือในโปรแกรมจะแปลงให้สัญญาณเหล่านั้นให้ไม่เป็นเส้นตรงหรือการแก้ไขแกมมา เพื่อให้ภาพนั้นเหมาะสมกับการมองด้วยตา โดยในไฟล์ดิบที่กล้องบันทึกมานั้นการตอบสนองต่อแสงเป็นเส้นตรง (แกมมา 1.0) แต่ในโปรแกรมแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพจะปรับแกมมาของภาพ ทำให้ภาพมีการตอบสนองต่อแสงที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่เหมาะสมกับการดู โดยฟังก์ชันอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของฉากกับข้อมูลดิจิทัลนั้นคือ ฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ (opto-electronic conversion function, OECF)

การหาฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำได้ด้วยการเฉลี่ยการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อระดับความสว่างต่าง ๆ บนแผ่นทดสอบ เช่น แผ่นทดสอบ KODAK Q-13 หรือ KODAK-Q60 ที่มีตัวอย่างเทา 20 ระดับที่มีความดำต่างกันตัวอย่างละ 0.1 ตัวอย่างขาวและดำ รวม 22 ตัวอย่าง วัดค่าการสะท้อนแสงหรือความดำของแต่ละตัวอย่างด้วยเครื่องวัดสีและพล็อตกับค่าความสว่างที่กล้องถ่ายได้ ฟังก์ชันที่ได้จากการวัดวิธีนี้จะเป็นการเฉลี่ยการตอบสนองต่อแผ่นทดสอบตำแหน่งของแผ่นทดสอบและความสว่าง ปัจจัยที่ส่งผลต่อฟังก์ชันที่ได้นั้นมีหลายปัจจัย เช่น การตอบสนองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในเซ็นเซอร์แต่ละตัว ความสว่างของแหล่งแสงที่ใช้ในขณะการถ่าย โดย OECF นิยมวาดกราฟในสเกลเส้นตรง-เส้นตรง เช่น ค่าความสว่างของพิกเซล กับค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่าง [10]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.8 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR)

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหรือ SNR คือค่าที่สำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ ซึ่ง SNR สามารถอธิบายได้ในหลายทาง หนึ่งในนั้นคือการอธิบายถึงปริมาณของสัญญาณรบกวนที่ปรากฏบนภาพ SNR สามารถหาได้จากจากสัดส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) หรือในหน่วยเดซิเบล ด้วยสมการ $SNR = 20 \log \frac{\mu}{\sigma}$ โดยที่ μ คือค่าเฉลี่ยของความสว่างของบริเวณนั้น σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของบริเวณนั้น

2.9 เอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง (slanted edge MTF)

การวัดเอ็มทีเอฟเป็นวิธีที่ใช้ในการประเมินความคมชัดของภาพ โดยการวัดความเปรียบต่างในฟังก์ชันของความถี่เชิงพื้นที่ เช่น การวัดความคมชัดของอุปกรณ์หรือระบบ แต่การวัดเอ็มทีเอฟนั้น

มีขั้นตอนที่เยอะและยุ่งยาก การวัดเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงจึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการวัด ค่าที่วัดได้นั้นไม่ถูกรบกวนโดยสัญญาณรบกวนภายในภาพ มีประสิทธิภาพ และทำซ้ำได้ แต่ค่าที่ได้นั้นอาจถูกรบกวนด้วยการเพิ่มความคมชัดของภาพที่อาจเกิดในการแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพ ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้นั้นผิดเพี้ยน [11]

2.10 การวิเคราะห์บล็อบ

บล็อบหรือ binary large object คือกลุ่มของพิกเซลที่เชื่อมต่อกันในภาพไบนารี่ ซึ่งในที่นี่หมายถึงวัตถุที่มีขนาดที่เราสนใจ เพราะจุดเล็ก ๆ ในภาพไบนารี่ส่วนใหญ่มักคือสัญญาณรบกวนในภาพ การสกัดบล็อบจากภาพนั้นทำเพื่อแยกบล็อบที่มีภายในภาพออกจากกัน จากนั้นนำบล็อบที่สกัดออกมาได้ไปวิเคราะห์ต่อ เช่น ระบุว่าบล็อบที่มีในภาพเรานั้นเป็นวงกลมหรือไม่หรือการนับจำนวนคนในภาพ ซึ่งแต่บล็อบจะมีสมบัติเฉพาะตัวที่สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้ เช่น

- พื้นที่ของบล็อบ แสดงถึงจำนวนพิกเซลที่อยู่ในบล็อบนั้น ซึ่งมักใช้ในการกรองเอาบล็อบขนาดเล็ก ๆ ที่เป็นสัญญาณรบกวนออก
- ขอบเขตขอบบล็อบ เป็นขอบเขตที่ครอบคลุมพื้นที่บล็อบนั้น หรืออาจกว่าวได้ว่าเป็นกรอบของบล็อบ ซึ่งอาจเป็นสี่เหลี่ยม วงกลม หรือรูปทรงอื่น ตัวอย่างแสดงใน ภาพที่ 2.13 ขอบเขตของบล็อบที่พบในภาพ
- ศูนย์กลางของบล็อบ เป็นการหาจุดกึ่งกลางของขอบเขตของบล็อบ เพื่อใช้เป็นพิกัดแสดงจุดกึ่งกลางของบล็อบนั้น [12]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 2.13 บล็อบที่พบในภาพ กรอบสีแดงแสดงขอบเขตของแต่ละบล็อบ

2.11 ขอบมืด (vignette)

ขอบมืดนั้นสามารถเห็นได้ที่ความสว่างบริเวณขอบของภาพถ่ายที่มืดกว่าบริเวณตรงกลางภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ซึ่งขอบมืดนี้สามารแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ ขอบมืดเชิงกล (mechanical vignetting) คือขอบมืดที่เกิดจากการมีวัตถุบังแสงบริเวณขอบภาพ จะปรากฏเป็นขอบมืดที่ชัดเจนบริเวณมุมของภาพและขอบมืดเชิงแสง (optical vignetting) คือขอบมืดที่เกิดจากเลนส์ไม่สามารถรวมแสงบริเวณขอบภาพให้มีความเข้มแสงเท่ากับบริเวณกลางภาพได้จึงปรากฏเป็นขอบมืดที่มีการไล่ความสว่างจากบริเวณกลางภาพไปขอบภาพ ซึ่งขอบมืดประเภทนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการลดรูรับแสงของเลนส์ [13]

ภาพที่ 2.14 ภาพที่ไม่มีขอบมืด (ซ้าย) และภาพที่มีขอบมืด (ขวา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C. Cai และคณะ [14] ได้เสนอวิธีการซ้อนทับภาพภาพรังสีอินฟราเรดกับภาพภายใต้แสงขาว (visible image) เพราะภาพทั้ง 2 นี้มีความแตกต่างที่เกิดจากสมบัติของการสะท้อนแสงของวัตถุภายในภาพ ทำให้การซ้อนทับภาพด้วยขั้นตอนวิธีปกติอาจให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีพอ แต่เมื่อภาพนั้นมาจากฉากเดียวกันดังนี้สิ่งที่เชื่อมโยงกันระหว่างภาพทั้ง 2 นั้นคือขอบของวัตถุในภาพ โดยเสนอขั้นตอนวิธีในการระบุขอบของวัตถุภายในภาพ เพื่อนำภาพที่มีข้อมูลของขอบวัตถุในภาพอินฟราเรดและภาพใต้แสงขาวมาตรวจจับหาจุดที่น่าสนใจภายในภาพด้วย SURF เพื่อหาจุดที่มีความสัมพันธ์กัน จากนั้นใช้ขั้นตอนวิธี RANSAC เพื่อป้องกันจุดที่ไม่สัมพันธ์กันและซ้อนทับภาพทั้ง 2 ด้วยจุดที่สัมพันธ์กันที่เหลืออยู่ ทำให้ผลลัพธ์ของการซ้อนทับภาพนั้นมีความแม่นยำ

A. Cosentino [15] ได้เสนอผังงานสำหรับการระบุสารสีทางประวัติศาสตร์ที่ผสมกับกัมอารบิกโดยใช้การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม ที่ถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ถูกดัดแปลงให้สามารถถ่ายภาพได้ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 360 - 1100 นาโนเมตร และกล้องที่ใช้แผงรับภาพชนิดอินเดียม แกลเลียม แอสเซไน สำหรับการถ่ายภาพรังสีอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่น 900 - 1700 นาโนเมตร โดยผังงานที่เขาสร้างขึ้นนั้นสามารถใช้ระบุกลุ่มของสารสีจำนวน 56 ชนิดได้ดีเมื่อบริเวณที่ต้องการระบุนั้นมีชั้นสีของภาพวาดเพียงชั้นเดียวและชั้นสีนั้นเกิดจากการใช้สารสีชนิดเดียว ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะมีข้อจำกัดที่การวิเคราะห์ข้อมูลจากข้อมูลที่ได้มา แต่ด้วยราคาอุปกรณ์ที่ต่ำและใช้เวลาในการทำงานน้อยทำให้วิธีนี้เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการนำมาใช้งาน ถึงแม้ใช้เพียงแค่ตรวจสอบบริเวณที่ถูกตกแต่งหรือซ่อมแซมภายในภาพ อีกทั้งเป็นวิธีที่ที่ดีสำหรับการนำมาใช้ในการระบุชนิดของสารสีในเบื้องต้นอีกด้วย

J. Kelcey และ A. Lucieer [16] ได้พัฒนาระบบถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมสำหรับการติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับด้วยกล้อง 6 กล้อง เขาได้อธิบายถึงการแก้ไขปัญหาจากระบบการถ่ายภาพเช่นปัญหาจากเซ็นเซอร์รับภาพ เลนส์ เป็นต้น การแก้ไขปัญหาหลักของระบบถ่ายภาพที่เขาสนใจคือการลดสัญญาณรบกวนด้วยการถ่ายภาพมืดเพื่อเก็บข้อมูลสัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบ ผลของการส่องผ่านของฟิลเตอร์และการตอบสนองของกล้อง รวมถึงการแก้ปัญหาขอบภาพมืดสามารถที่สามารถแก้ไขร่วมกันได้และปัญหาการบิดเบี้ยวของเลนส์ถ่ายภาพที่ส่งผลให้ภาพถ่ายที่ได้มีความบิดเบี้ยวจากความเป็นจริงซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยโมเดลของบราวน์-คอนราดี อีกทั้งยังเสนอการประมวลผลข้อมูลที่ได้เพื่อเพิ่มคุณภาพและการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การซ้อนทับภาพจากทั้ง 6 กล้องเข้าด้วยกัน แล้วนำมาแสดงผลแบบสีเทียมเพื่อแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่มีลักษณะการสะท้อนแสงแตกต่างกันได้เช็ดเจนยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Z. Zhang [17] ได้เสนอวิธีการแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพที่สามารถทำได้สะดวก โดยการถ่ายภาพแผ่นทดสอบชนิดกระดานหมากรุกตั้งแต่สองรูปขึ้นไปที่มุมและตำแหน่งต่างกัน โดยอาจขยับกล้องหรือแผ่นทดสอบก็ได้และสามารถอธิบายความบิดเบี้ยวของเลนส์ที่เกิดขึ้นได้ด้วยการคำนวน ซึ่งวิธีนี้ถูกเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1998 แต่วิธีนี้มีประสิทธิภาพดี ทำงานง่าย จึงยังคงเป็นที่นิยมมาจนถึงปัจจุบัน

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการสร้างระบบกล้องคู่

3.1.1.1 กล้องดิจิทัลแบบสะท้อนเลนส์เดี่ยว Nikon D850 จากบริษัท Nikon ประเทศญี่ปุ่น จำนวน 2 กล้อง

- เซ็นเซอร์ขนาดเต็มกรอบภาพ 35.9 x 23.9 มิลลิเมตร ชนิดซีมอส
- ความละเอียดภาพ 45.4 ล้านพิกเซล หรือ 8,256 x 5,504 พิกเซล
- พิกเซลขนาดประมาณ 4.35 ไมครอน
- ความไวแสงฐาน 64
- ขนาดกล้อง กว้าง 146 x 124 x 78.5 มิลลิเมตร
- น้ำหนักกล้องรวมแบตเตอร์รี่และหน่วยความจำ 1,005 กรัม

3.1.1.2 กล้องดิจิทัลไร้กระจกแบบเปลี่ยนเลนส์ได้ Nikon J5 จากบริษัท Nikon ประเทศญี่ปุ่น จำนวน 2 กล้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- เซ็นเซอร์ขนาด 13.2 x 8.8 มิลลิเมตร ชนิดซีมอส
- ความละเอียดภาพ 20.7 ล้านพิกเซล หรือ 5,568 x 3,712 พิกเซล
- พิกเซลขนาดประมาณ 2.36 ไมครอน
- ความไวแสงฐาน 160
- ขนาดกล้อง 98.3 x 59.7 x 31.5 มิลลิเมตร
- น้ำหนักกล้องรวมแบตเตอร์รี่และหน่วยความจำ 265 กรัม

3.1.1.3 เลนส์มุมกว้าง Nikon 24 mm f/2.8 AF-D จากบริษัท Nikon ประเทศญี่ปุ่น จำนวน 2 เลนส์

- ทางยาวโฟกัส 24 มิลลิเมตร มุมรับภาพ 84 องศา รูรับแสง f/2.8 – f/22

- ขนาดฟิลเตอร์ 52 มิลลิเมตร

- น้ำหนัก 270 กรัม

3.1.1.4 เลนส์มุมปกติ Nikon 50 mm f/1.8 G จากบริษัท Nikon ประเทศญี่ปุ่น จำนวน 2 เลนส์

- ทางยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร มุมรับภาพ 47 องศา รูรับแสง f/1.8 – f/16

- ขนาดฟิลเตอร์ 58 มิลลิเมตร

- น้ำหนัก 185 กรัม

3.1.1.5 เลนส์ซูม NIKKOR VR 10-30 mm f/3.5-5.6 จากบริษัท Nikon ประเทศญี่ปุ่น จำนวน 2 เลนส์

- ทางยาวโฟกัส 10-30 มิลลิเมตร มุมรับภาพ 77-29 องศา รูรับแสง 3.5-16

- น้ำหนัก 85 กรัม

3.1.1.6 เพลทยึดกล้องรูปตัวแอล Andoer universal L-shape plate bracket จากบริษัท Andoer ประเทศจีน จำนวน 4 ตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.1.7 เพลทยึดกล้อง Andoer PU-140 จากบริษัท Andoer ประเทศจีน จำนวน 1 ตัว

3.1.1.8 สายลั่นชัตเตอร์ MC-30 จากประเทศจีน จำนวน 2 ตัว

3.1.1.9 ขาตั้งกล้อง SLIK Grand Master จากบริษัท SLIK ประเทศญี่ปุ่น จำนวน 1 ตัว

3.1.1.10 ชุดฟิลเตอร์ CHSOS - TP Filters set V.2 – Robertina จาก Cultural Heritage Science Open Source ประเทศอิตาลี่

- ประกอบไปด้วย ฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงขาวผ่าน ฟิลเตอร์ที่ยอมให้ยูวีผ่าน และฟิลเตอร์ที่ยอมให้อินฟราเรดผ่าน

- ฟิลเตอร์ขนาด 72 มิลลิเมตร

- ที่แปลงฟิลเตอร์จากขนาด 52 มิลลิเมตร ไปยัง 72 มิลลิเมตร จำนวน 1 ตัว

3.1.1.11 ฟิลเตอร์ Cokin 720-89B ขนาด 100 มิลลิเมตร และที่จับฟิลเตอร์ จากบริษัท Cokin ประเทศฝรั่งเศส

3.1.1.12 ฟิลเตอร์ Rocolax UV-IR cut ขนาด 77 มิลลิเมตร จากบริษัท Rocolax ประเทศไต้หวัน

3.1.1.13 ที่แปลงฟิลเตอร์จากขนาด 52 มิลลิเมตร ไปยัง 77 มิลลิเมตร จำนวน 1 ตัว

3.1.1.14 ที่แปลงฟิลเตอร์จากขนาด 58 มิลลิเมตร ไปยัง 77 มิลลิเมตร จำนวน 1 ตัว

3.1.2 แหล่งแสง

3.1.2.1 ไฟฮาโลเจน จำนวน 2 ตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1.2.2 ไฟแอลอีดีขาว Eve A60 จากบริษัท อีฟ ไลท์ติ้ง ประเทศไทย

3.1.2.3 ไฟแอลอีดียูวี CHSOS – Fabrizio - 365 นาโนเมตร (CHSOS – UV LED) จาก Cultural Heritage Science Open Source ประเทศอิตาลี่

3.1.2.4 ไฟแอลอีดีขาวสำหรับการถ่ายการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อกระตุ้นด้วยแสงขาว CHSOS – Alice จาก Cultural Heritage Science Open Source ประเทศอิตาลี่

3.1.2.5 ไฟแอลอีดีอินฟราเรดความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร OWSOO CA-LED09H จากบริษัท OWSOO ประเทศจีน

3.1.3 แผ่นทดสอบและอุปกรณ์อื่น ๆ

3.1.3.1 แผ่นทดสอบ KODAK Q-60

3.1.3.2 แผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport

3.1.3.3 แผ่นกระจายแสง ELECTRA color balance panel

3.1.3.4 แผ่นทดสอบ Technical Photography and MSI calibration card (TP and MSI calibration card) จาก Cultural Heritage Science Open Source ประเทศอิตาลี่

- ตัวอย่างเทา 6 ระดับ N2 N3.5 N5 N6.5 N8 และ N9.5

- ตัวอย่างสารสี 4 ชนิดที่ผสมกับสารยึดอะคริลิกคือ shellac, madder lake, zinc white และ cadmium red

- หมุดสำหรับแสดงทิศทางของแหล่งแสง

3.1.3.5 แผ่นทดสอบ Pigments Checker v.5 จาก Cultural Heritage Science Open Source ประเทศอิตาลี่

- ประกอบไปด้วยตัวอย่างสารสีสำคัญทางประวัติศาสตร์ 58 ชนิด

3.1.3.6 แผ่นทดสอบตารางหมากรุกที่แต่ละช่องมีขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.3.7 เครื่องวัดความดำ TECHKON SpectroDens จากบริษัท TECHKON GmbH ประเทศเยอรมัน

- เรขาคณิตการวัด 0/45

- ช่วงความยาวคลื่นที่วัดได้ 400 – 700 นาโนเมตร วัดทุก ๆ 10 นาโนเมตร

- พื้นที่การวัด 3 มิลลิเมตร

3.1.3.8 ตู้แสงมาตรฐาน D65

3.1.3.9 พู่กัน

3.1.3.10 สารสี 5 ชนิดคือ chrome oxide green, yellow ochre, phthalo blue, alizarin red และ red ochre

3.1.3.11 สารยึดกัมอะราบิก

3.1.4 คอมพิวเตอร์และโปรแกรม

3.1.4.1 โน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ HP รุ่น Pavillon 15-bc021tx จากบริษัท HP ประเทศสหรัฐอเมริกา

- ระบบปฏิบัติการ Windows 10 pro รุ่น 19043.1110
- ซีพียู Intel Core i7-6700HQ
- แรม 16 กิกะไบต์

3.1.4.2 โปรแกรม Nikon Capture NX-D รุ่น 1.6.2

3.1.4.3 โปรแกรม MATLAB รุ่น R2020b update 4

3.1.4.4 โปรแกรม TECHKON Spectro Connect รุ่น 2.9

3.1.4.5 โปรแกรม RawTherapee รุ่น 5.8

3.1.4.6 โปรแกรม Adobe Photoshop CC 2021 รุ่น 22.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนคือ การทดสอบกล้องและเลนส์แต่ละรุ่น การสร้างระบบกล้องคู่ การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ของระบบกล้องคู่เทียบกับระบบกล้องเดี่ยวในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค การปรับปรุงเพื่อลดเวลาและแก้ไขข้อจำกัดของการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว การทดสอบระบุสารสีและวิเคราะห์ภาพวาด สร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่

ในงานวิจัยนี้เลนส์ Nikon 24 mm f/2.8 AF-D และ Nikon 50 mm f/1.8 G ซึ่งเป็นเลนส์มุมกว้างและมุมปกติ จะถูกติดตั้งเข้ากับกล้อง Nikon D850 ตามลำดับ เนื่องจากกล้อง Nikon J5 นั้นมีขนาดเซ็นเซอร์ที่เล็กกว่ากล้อง Nikon D850 อยู่ประมาณ 2.7 เท่า ดังนั้นเพื่อที่จะได้ภาพที่มีองศา

รับภาพใกล้เคียงกันจึงใช้เลนส์ NIKKOR VR 10-30 mm f/3.5-5.6 ที่ทางยาวโฟกัส 10 และ 18 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบกับกล้อง Nikon D850 ที่ติดตั้งเลนส์มุมกว้างและมุมปกติ

3.2.1 การทดสอบกล้องและเลนส์แต่ละรุ่น

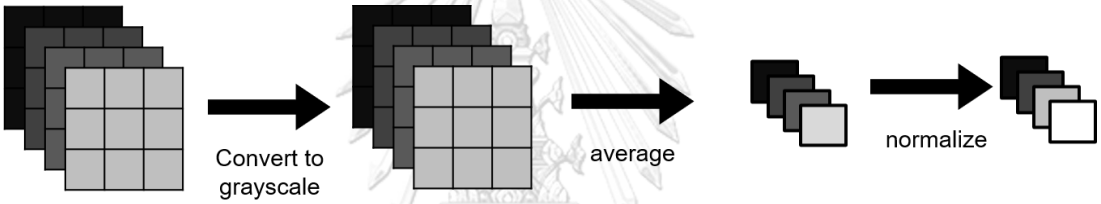
3.2.1.1 การแปลงไฟล์ดิบ (RAW file) เป็นไฟล์ภาพ

การถ่ายภาพในงานวิจัยนี้ถ่ายเป็นไฟล์ดิบทั้งหมด เพราะเป็นไฟล์ที่ไม่ผ่านการประมวลผลใด ๆ ทั้งสิ้น รวมถึงการปรับสมดุลขาวให้มีความถูกต้อง ซึ่งสามารถทำในภายหลังได้ โดยใช้โปรแกรม Nikon Capture NX-D โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำเข้าไฟล์ดิบที่ได้จากกล้อง ใช้เครื่องมือกำหนดจุดเทา (gray point sample tool) เลือกจุดที่ใช้ในการกำหนดสมดุลขาว ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างขาวบนแผ่นทดสอบเป็นจุดสำหรับกำหนดสมดุลขาว จากนั้นปิดการควบคุมภาพบิดเบี้ยวอัตโนมัติ (auto distortion control) และการควบคุมขอบภาพมืด (vignette control) จากนั้นส่งออกภาพโดยเลือกแปลงภาพ (convert file) และเลือกชนิดไฟล์ภาพที่ต้องการนำไปใช้งาน

3.2.1.2 การหาฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ของกล้อง (camera opto-electronic conversion function, OECF) หรือการตอบสนองของกล้อง

ถ่ายแผ่นทดสอบ KODAK Q-60 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวอย่างเทา 22 ระดับ ขาวและดำ ภายในตู้แสงมาตรฐาน D65 โดยปรับการเปิดรับแสง (exposure) ให้ได้ค่าความสว่างบริเวณตัวอย่างขาวประมาณ 250 จากนั้นนำไฟล์ดิบ (RAW) ที่ได้มาแปลงเป็นไฟล์ภาพด้วยวิธีในข้อ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็นไฟล์ TIFF 16 บิต กำหนดสมดุลขาวที่ตำแหน่งตัวอย่างขาวบนแผ่นทดสอบ ภาพที่ได้ในขั้นตอนนี้แสดงในภาพที่ 3.1 นำภาพ ที่ได้มาแปลงเป็นภาพเทาด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้คำสั่ง rgb2gray ครอปภาพเอาเฉพาะตำแหน่งตัวอย่างแต่ละระดับสีที่ความละเอียด 100x100 และ 50x50 พิกเซล สำหรับกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 ตามลำดับ นำค่าความสว่างที่ได้จากภาพที่ตัดแล้วมาเฉลี่ย จากนั้นหารด้วยค่าความสว่างสูงสุดของตัวอย่างทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ภาพที่ 3.1 ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ KODAK Q-60 ภายใต้ตู้แสงมาตรฐาน (บน) และแถบตัวอย่างเทา 22 ระดับ ขาว และดำ (ล่าง)



ภาพที่ 3.2 แผนผังการประมวลผลข้อมูลสำหรับการหา OECF ของกล้อง

ใช้เครื่องวัดความดำ TECHKON SpectroDens วัดค่าความดำในแต่ละความยาวคลื่นบนแต่ละตัวอย่าง จากนั้นคำนวนค่าการสะท้อนแสงรวมและหารด้วยค่าสูงสุด สร้างกราฟโดยให้แกนนอนคือค่าความสว่างของภาพแกนตั้งคือค่าการสะท้อนแสงและใช้คำสั่ง polyfit ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาฟังก์ชันที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้ จะได้ฟังก์ชันสำหรับการแปลงภาพจากกล้องที่มีการตอบสนองแบบไม่เป็นเส้นตรงให้มีการตอบสนองแบบเส้นตรง เพื่อใช้สำหรับการทดสอบอื่น ๆ

3.2.1.3 การทดสอบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง (camera signal-to-noise ratio)

ถ่ายภาพแผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport ในตู้แสงมาตรฐาน โดยปรับการเปิดรับแสงให้ค่าความสว่างบริเวณตัวอย่างขาวมีค่าประมาณ 250 ดังแสดงในภาพที่ 3.3 กล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 ใช้ค่าความไวแสงที่ 64 และ 160 ตามลำดับ โดยถ่ายทั้งหมด 5 ภาพสำหรับแต่ละกล้อง แปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพด้วยวิธีในข้อที่ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็น

ไฟล์ TIFF 8 บิต จากนั้นครอปภาพที่ได้ที่บริเวณตัวอย่างขาว ดำ และเทา 4 ระดับ ที่ความละเอียด 100x100 แปลงภาพเป็นภาพเทาด้วยคำสั่ง rgb2gray ในโปรแกรม MATLAB และแปลงภาพด้วยฟังก์ชันที่ได้จากกระบวนการหา OECF จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนด้วยสมการที่ 3.1 นำค่าที่ได้จากทั้ง 5 ภาพมาเฉลี่ยและสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์

$$SNR = 20 \log \frac{\mu}{\sigma} \qquad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ μ คือ ค่าเฉลี่ยของความสว่างของบริเวณนั้น

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของบริเวณนั้น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3.3 ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport ภายใต้ตู้แสงมาตรฐาน

3.2.1.3 การทดสอบเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง (slanted-edge MTF)

การทดสอบความคมชัดด้วยวิธี slanted-edge MTF เพื่อหาความคมชัดของเลนส์และฟิลเตอร์ทำได้โดยนำแผ่นกระดาษดำติดไว้บนกระดาษขาว โดยให้กระดาษดำทำมุมประมาณ 5 องศา จำนวน 2 ชิ้น แล้ววางไว้ที่ขอบภาพด้านใดด้านหนึ่งและตรงกลางภาพ ถ่ายภาพโดยใช้กล้องและเลนส์ทั้งหมด โดยถ่ายทั้งใส่ฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงขาวผ่านและฟิลเตอร์ที่ให้รังสีอินฟราเรดผ่าน พยายามให้แผ่นทดสอบทั้งหมดได้รับแสงเท่ากันทุกแผ่น

เนื่องจากโปรแกรม Nikon Capture NX-D ที่ใช้ในการแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพนั้นไม่สามารถปิดการเพิ่มความคมชัดได้ ในการทดสอบนี้จึงใช้โปรแกรม RawTherapee ใน

การแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพเส้นตรง TIFF 8 บิต ด้วยโหมด linear ในโปรแกรมและปิดการปรับแต่งภาพเพิ่มเติมทั้งหมด เช่น การลดความบิดเบี้ยวของภาพและการปรับความคมชัด จากนั้นใช้ชุดคำสั่ง sfrmat3 บนโปรแกรม MATLAB เพื่อหาเอ็มทีเอฟของเลนส์และฟิลเตอร์ โดยกำหนดความถี่การเก็บข้อมูลสำหรับกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 ที่ 0.00434 และ 0.00236 มิลลิเมตร ตามลำดับ เลือกตำแหน่งที่เป็นรอยต่อของกระดาษดำและขาว ทั้งบริเวณกลางภาพและขอบภาพ จะได้กราฟเอ็มทีเอฟของระบบนั้น เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

3.2.1.4 การทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์

การบิดเบี้ยวของเลนส์ สามารถตรวจสอบได้โดยถ่ายภาพแผ่นทดสอบตารางหมากรุก ที่แต่ละช่องมีขนาด 20x20 มิลลิเมตร ที่มุมและตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยเลนส์ทั้ง 3 เลนส์ ละ 10-15 ภาพ แปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพด้วยวิธีในข้อ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็นภาพ TIFF 8 บิต จากนั้นใช้แอปพลิเคชัน camera calibrator ในโปรแกรม MATLAB นำเข้าภาพที่ถ่ายมาทั้งหมด จากนั้นแอปพลิเคชันจะคำนวนค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่อธิบายถึงความบิดเบี้ยวของเลนส์นั้น ส่งออกตัวแปรที่บันทึกค่าสัมประสิทธิ์เหล่านั้นเพื่อนำไปใช้ในการแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์และสร้างกราฟแสดงรูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ เปรียบเทียบการบิดเบี้ยวของเลนส์แต่ละเลนส์

3.2.2 การสร้างระบบกล้องคู่

3.2.2.1 การแก้ไขของผิดพลาดของอุปกรณ์

3.2.2.1.1 การแก้ปัญหาขอบมืด

ปัญหาขอบมืดจากเลนส์และฟิลเตอร์นั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการสร้างตารางค้นหา (look-up table) สำหรับแต่ละเลนส์และฟิลเตอร์ โดยใช้แผ่นกระจายแสง ELECTRA color balance panel ประกบไว้ที่ด้านหน้าเลนส์และฟิลเตอร์ ดังภาพที่ 3.4 ให้แหล่งแสงที่มีความสม่ำเสมอของความสว่าง ผ่านแผ่นกระจายแสงและเข้าสู่กล้องถ่ายภาพ ถ่ายภาพจำนวน 10 ภาพ/เลนส์/ฟิลเตอร์ จากนั้นแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพด้วยวิธีในขั้นตอนที่ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็นไฟล์ TIFF 8 บิต และเนื่องจากไม่สามารถวางแผ่นทดสอบที่มีตัวอย่างสีขาวสำหรับการกำหนดสมดุลขาว ดังนั้นการกำหนดสมดุลขาวจึงกำหนดไว้ที่บริเวณจุดกึ่งกลางของภาพ จากนั้นนำเข้าภาพที่ได้ทั้ง 10 ภาพ เข้าสู่โปรแกรม MATLAB เฉลี่ยภาพทั้ง 10 ภาพ แปลงภาพที่เฉลี่ยแล้วเป็นภาพเทาด้วยคำสั่ง rgb2gray และหารทุกตำแหน่งด้วยค่าสูงสุด จะได้ตารางค้นหาสำหรับใช้แก้ไขปัญหาขอบมืดของเลนส์และฟิลเตอร์

การใช้งานตารางค้นหาสำหรับการแก้ปัญหาขอบมืดนั้นสามารถใช้งานโดย นำเข้ารูปที่ต้องการแก้ไขเข้าสู่โปรแกรม MATLAB จากนั้นแปลงให้เป็นภาพเส้นตรงโดยใช้สมการที่ได้จากข้อ 3.2.1.2 และใช้ สมการที่ 3.2 เพื่อแก้ขอบมืด

$$Vignette\ free\ image = \frac{Input\ image}{Look\ up\ table} \qquad \text{สมการที่ 3.2}$$

ภาพที่ 3.4 การติดตั้งแผ่นกระจายแสงสำหรับการถ่ายภาพเพื่อแก้ไขปัญหาขอบมืด

3.2.2.1.2 การแก้ปัญหาความบิดเบี้ยวของเลนส์

นำเข้าภาพ TIFF ที่มีความบิดเบี้ยวของเลนส์เข้าสู่โปรแกรม MATLAB จากนั้น นำเข้าตัวแปรที่บันทึกค่าสัมประสิทธิ์ที่อธิบายถึงความบิดเบี้ยวของเลนส์นั้น ๆ ที่ได้จากข้อ 3.2.1.4 จากนั้นใช้คำสั่ง undistortImage เพื่อแก้ไขภาพที่มีความบิดเบี้ยวของเลนส์

เนื่องจากตัวแปรที่บันทึกค่าสัมประสิทธิ์ที่อธิบายถึงความบิดเบี้ยวของเลนส์ที่ได้จากข้อ 3.2.1.4 นั้นจะสามารถใช้ได้กับภาพที่มีความละเอียดและทิศทางตรงกัน หากต้องการใช้ตัวแปรนั้นกับภาพจากกล้องเดียวกัน แต่ทิศทางต่างกันต้องหมุนภาพให้มีทิศทางตรงกันกับภาพที่ใช้สร้างตัวแปรบันทึกค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งในโปรแกรม MATLAB สามารถใช้คำสั่ง rot90 ในการหมุนภาพได้

3.2.2.2 การติดตั้งระบบกล้องคู่

ในงานวิจัยนี้จะสร้างระบบกล้องคู่ขึ้นมาทั้งหมด 8 ระบบ ดังในตารางที่ 3.1 โดยใช้กล้อง ถ่ายภาพปกติที่ไม่ได้ถูกดัดแปลงคู่กับกล้องถ่ายภาพฟูลสเปกตรัม (กล้องที่ถูกดัดแปลงนำฟิลเตอร์ตัดรังสียูวีและอินฟราเรดออก)

ตารางที่ 3.1 ระบบกล้องคู่ทั้ง 8 ระบบ

ลำดับ	กล้อง	เลนส์	ตำแหน่ง
1	Nikon D850	มุมกว้าง	แนวตั้ง
2	Nikon D850	มุมกว้าง	แนวนอน
3	Nikon D850	มุมปกติ	แนวตั้ง
4	Nikon D850	มุมปกติ	แนวนอน
5	Nikon J5	มุมกว้าง	แนวตั้ง
6	Nikon J5	มุมกว้าง	แนวนอน
7	Nikon J5	มุมปกติ	แนวตั้ง
8	Nikon J5	มุมปกติ	แนวนอน

การติดตั้งระบบกล้องคู่แนวนอน

การติดตั้งระบบกล้องคู่แบบแนวนอนนั้นใช้เพลท Andoer PU-140 ซึ่งเป็นเพลทที่มีสกรูขนาด ¼ นิ้ว จำนวน 2 ชิ้น ทำให้สามารถยึดกล้องสองกล้องเข้าด้วยกันได้ และติดตั้งกล้องคู่ที่ยึดกันแล้วเข้ากับขาตั้งกล้อง SLIK Grand Master โดยให้กล้องทั้งสองนั้นชิดกันมากที่สุดโดยที่กล้องยังสามารถทำงานได้ตามปกติ สำหรับกล้อง Nikon D850 ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเลนส์ของทั้ง 2 กล้องคือประมาณ 16.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะใกล้ที่สุดเนื่องจากห่วงสำหรับร้อยสายคล้องคอจะชนกับกล้องอีกกล้องพอดี สำหรับกล้อง Nikon J5 ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเลนส์ของทั้ง 2 กล้องคือประมาณ 11.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะใกล้ที่สุดที่กล้องจะทำงานได้เมื่อติดตั้งที่จับฟิลเตอร์ของฟิลเตอร์ Cokin 720-89B ภาพตัวอย่างระบบกล้องคู่แบบแนวนอนของกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 แสดงในภาพที่ 3.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 3.5 ระบบกล้องคู่แบบแนวนอนของกล้อง Nikon D850 (ซ้าย) และ Nikon J5 (ขวา)

การติดตั้งระบบกล้องคู่แนวตั้ง

การติดตั้งระบบกล้องคู่แบบแนวตั้งนั้นใช้เพลทรูปตัวแอล Andoer universal L-shape plate bracket ยึดกล้องแต่ละกล้อง จากนั้นนำกล้องที่ยึดเพลทรูปตัวแอลมาติดตั้งเข้ากับเพลท Andoer PU-140 อีกที โดยขันสกรูเชื่อมระหว่างเพลทรูปตัวแอลกับเพลท Andoer PU-140 โดยให้เพลทรูปตัวแอลชนกัน (สกรูของเพลทรูปตัวแอลจะชนกันพอดี) ในการติดตั้งเพลทรูปตัวแอลกับกล้องนั้นจะติดตั้งกล้องที่ระยะสูงสุดของเพลท เพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งระบบในคราวหลัง สำหรับกล้อง Nikon D850 ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเลนส์ของทั้ง 2 กล้องคือประมาณ 12.2 เซนติเมตร สำหรับกล้อง Nikon J5 ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเลนส์ของทั้ง 2 กล้องคือประมาณ 8.1 เซนติเมตร ภาพตัวอย่างระบบกล้องคู่แบบแนวตั้งของกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 แสดงในภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6 ระบบกล้องคู่แบบแนวตั้งของกล้อง Nikon D850 (ซ้าย) และ Nikon J5 (ขวา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.2.3 การควบคุมกล้อง

สำหรับกล้อง Nikon D850 กล้องทั้ง 2 จะถูกติดตั้งสายลั่นชัตเตอร์ MC-30 เพื่อใช้ในการควบคุมการถ่ายภาพ เนื่องจากกล้อง Nikon D850 นั้นเป็นกล้องดิจิทัลแบบมีกระจกสะท้อนโดยปกติแล้วเมื่อกดปุ่มถ่ายภาพกล้องจะยกกระจกที่อยู่หน้าเซ็นเซอร์ขึ้นและชัตเตอร์จะถูกเปิดตามเวลาการถ่ายภาพที่ตั้งค่าเอาไว้ เมื่อครบเวลาชัตเตอร์จะปิดและกระจกจะเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนหากถ่ายภาพด้วยกล้องกล้องเดียวบนขาตั้งกล้องการสั่นสะเทือนนี้จะไม่เป็นปัญหาแต่เมื่อติดตั้งกล้องตั้งแต่ 2 กล้องขึ้นไปบนขาตั้งกล้องเดียวกัน การสั่นสะเทือนจากกล้องกล้องหนึ่งจะส่งผลกระทบกับกล้องกล้องอื่นด้วยเมื่อถ่ายภาพพร้อมกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เปิดฟังก์ชัน silent live view photography (mode 1) เมื่อเปิดใช้งาน

ฟังก์ชันนี้กล้องจะถ่ายภาพโดยใช้ชัตเตอร์อิเล็กโทรนิคซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการสั่นสะเทือนเมื่อถ่ายภาพ และสามารถถ่ายภาพพร้อมกันด้วยกล้อง 2 กล้องโดยที่ไม่เกิดความสั่นไหวเกิดขึ้นกับภาพที่ได้

สำหรับกล้อง Nikon J5 เนื่องจากกล้องนี้เป็นกล้องคอมแพ็ค เน้นขนาดที่เล็กและใช้งานง่าย จึงทำให้กล้องรุ่นนี้มีข้อจำกัดด้านการเชื่อมต่ออุปกรณ์เสริม เช่น สายลั่นชัตเตอร์ ซึ่งในการทดลองนี้จึงได้นำสายลั่นชัตเตอร์แบบเข็มแทง มาดัดแปลงติดเข้ากับปุ่มชัตเตอร์ของกล้อง เพื่อให้สามารถสั่งถ่ายภาพโดยที่ไม่ต้องสัมผัสตัวกล้องโดยตรงทำให้ไม่เกิดการสั่นสะเทือนจากการสัมผัสตัวกล้องและสามารถถ่ายได้พร้อมกัน อีกทั้งกล้องชนิดนี้เป็นกล้องแบบไร้กระจกที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นขนาดของชัตเตอร์จึงเล็กด้วยเช่นกัน ทำให้เมื่อถ่ายภาพพร้อมกันด้วยกล้อง 2 กล้องบนขาตั้งกล้องตัวเดียวกัน การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นน้อยมากจนไม่ส่งผลกระทบต่อกล้องอื่น ๆ

การโฟกัสของกล้องทั้ง 2 รุ่นนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบโฟกัสอัตโนมัติ เนื่องจากมีความรวดเร็วและแม่นยำไม่ว่าจะติดตั้งฟิลเตอร์ใด เนื่องจากกล้อง Nikon J5 นั้นเป็นกล้องแบบไร้กระจกดังนั้นการโฟกัสจะเป็นการโฟกัสบนเซ็นเซอร์ ทำให้โฟกัสมีความแม่นยำถึงแม้ติดตั้งฟิลเตอร์ที่ไม่ใช่ฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงที่มองเห็นได้ผ่าน เช่นเดียวกันกับกล้อง Nikon D850 เมื่อใช้ฟังก์ชัน silent live view photography (mode 1) กล้องจะยกกระจกขึ้นตลอดเวลาและการโฟกัสจะเป็นการโฟกัสบนเซ็นเซอร์เช่นเดียวกัน

3.2.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกล้องคู่

3.2.2.4.1 การทดสอบการกันภาพเหลื่อม (image registration)

ถ่ายภาพแผ่นทดสอบแบบจุด ที่แต่ละจุดมีขนาด 1 มิลลิเมตร และห่าง 5 มิลลิเมตร ด้วยระบบกล้องคู่ทั้ง 8 ระบบ โดยกล้องดัดแปลงจะติดตั้งฟิลเตอร์ Cokin 720-89B สำหรับระบบที่ใช้เลนส์มุมกว้างและมุมปกติ จะถ่ายที่ระยะห่างระหว่างแผ่นทดสอบถึงกล้อง 1 และ 1.6 เมตร ตามลำดับ แปลงไฟล์ดิบที่ถ่ายได้เป็นไฟล์ภาพตามขั้นตอนในข้อที่ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็นไฟล์ TIFF 8 บิต นำภาพที่ได้มาแก้ไขขอบมืดและความบิดเบี้ยว ด้วยวิธีตามขั้นตอนที่ 3.2.2.1.1 และ 3.2.2.1.2 ตามลำดับ จากนั้นซ้อนภาพด้วยวิธีซ้อนภาพแบบใช้จุดควบคุม (control point image registration) ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยนำเข้าภาพจากกล้องทั้ง 2 เข้าสู่โปรแกรม โดยกำหนดให้ภาพจากกล้องปกติเป็นภาพหลักและภาพจากกล้องดัดแปลงเป็นภาพที่จะนำมาซ้อน ใช้คำสั่ง cpselect เพื่อเลือกจุดควบคุมโดยเลือกจุดควบคุมที่จุดตรงมุมทั้ง 4 บนแผ่นทดสอบของภาพทั้ง 2 กล้อง เมื่อได้ข้อมูลของตำแหน่งจุดควบคุมทั้ง 4 คู่แล้ว ปรับตำแหน่งของจุดควบคุมด้วยวิธีสหสัมพันธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไขว้ (cross-correlation) เพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งของจุดควบคุมในแต่ละคู่นั้นอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันบนแผ่นทดสอบ โดยใช้คำสั่ง cpcorr จากนั้นใช้คำสั่ง fitgeotrans เพื่อประมาณการแปลงภาพแบบโปรเจคทีฟ (projective transformation) และใช้คำสั่ง imwarp เพื่อซ้อนภาพจากกล้องทั้ง 2 กล้อง

เมื่อซ้อนภาพแล้ว การวัดความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพนั้นทำโดย แปลงภาพที่ซ้อนแล้วให้เป็นภาพไบนารีโดยใช้ขีดเริ่มเปลี่ยนในการแปลงที่ต่างกันในแต่ละภาพด้วยคำสั่ง imbinarize อาจใช้ฟิลเตอร์ปิดและเปิด (open and close filter) เพื่อทำให้เห็นจุดทุกจุดบนแผ่นทดสอบ สำหรับในบางกรณีอาจใช้โปรแกรมแก้ไขภาพเพื่อกำจัดภาพส่วนที่ไม่ได้ใช้เพื่อให้ภาพสามารถเห็นจุดทุกจุดบนแผ่นทดสอบ จากนั้นใช้การวิเคราะห์บล็อบเพื่อหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของจุดทุกจุดบนแผ่นทดสอบด้วยคำสั่ง regionprops เนื่องจากภาพกล้อง Nikon D850 นั้นมีความละเอียดที่สูงมาก ในบางกรณีโปรแกรม MATLAB ไม่สามารถวิเคราะห์บล็อบด้วยคำสั่งดังกล่าวได้ ในการทดลองนี้จึงย่อภาพไบนารีลงครึ่งนึงก่อนนำไปวิเคราะห์บล็อบ เมื่อได้ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแต่ละจุดจากภาพทั้ง 2 กล้องแล้ว ใช้ชุดคำสั่ง ipdm หรือ inter-point distance matrix เพื่อจับคู่ตำแหน่งของจุดเดียวกันบนแผ่นทดสอบ จากข้อมูลตำแหน่งของจุดศูนย์กลางที่ได้จากภาพทั้ง 2 (เนื่องจากคำสั่ง regionprops นั้นจะสแกนภาพจากมุมซ้ายบนของภาพลงมาทีละคอลัมน์จนถึงคอลัมน์สุดท้ายทางด้านขวาสุดของภาพ เนื่องจากการติดตั้งระบบกล้องคู่นั้นไม่สามารถติดตั้งให้สมบูรณ์ได้ กล้องทั้งสองอาจก้มหรือเงย เอียงซ้ายหรือขวาเล็กน้อย ดังนั้นจึงส่งผลต่อลำดับของจุดที่โปรแกรมสแกนหาเจอ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจับคู่เพื่อให้ลำดับของจุดจากกล้องทั้ง 2 ตรงกัน) จากนั้นคำนวณระยะห่างของตำแหน่งของจุดได้ด้วยสมการที่ 3.3 และนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และผลรวม เพื่อนำไปวิเคราะห์เลือกระบบที่เหมาะสม

$$x_{difference} = x_{visible\ cam} - x_{modified\ cam}$$
$$y_{difference} = y_{visible\ cam} - y_{modified\ cam} \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

$$Distance = \sqrt{x_{difference}^2 - y_{difference}^2}$$

เมื่อ $x_{visible\ cam}$ และ $y_{visible\ cam}$ คือพิกัดในแกน x และ y ของศูนย์กลางแต่ละจุดในภาพจากกล้องปกติ

$x_{modified\ cam}$ และ $y_{modified\ cam}$ คือพิกัดในแกน x และ y ของศูนย์กลางแต่ละจุดในภาพจากกล้องดัดแปลง

3.2.2.4.2 การกำหนดพื้นที่ใช้งาน

นำภาพถ่ายที่ซ้อนทับกันแล้วจากข้อ 3.2.2.4.1 มากำหนดเป็นพื้นที่ใช้งาน โดยให้สัดส่วนความกว้างต่อความสูงของพื้นที่ใช้งานเป็นสัดส่วนเดียวกันกับสัดส่วนภาพถ่าย เลือกพื้นที่ที่ภาพจาก 2 กล้องซ้อนทับกันและเผื่อพื้นที่สำหรับการหมุนภาพในกรณีที่กล้องทั้ง 2 กล้องติดตั้งไม่ขนานกัน คำนวณเทียบสัดส่วนระหว่างพื้นที่ภาพในส่วนพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมด

3.2.2.4.3 การสร้างตารางเปรียบเทียบแต่ละระบบ

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดและสร้างตารางเปรียบเทียบในหัวข้อดังนี้ ราคา ความละเอียดภาพ เวลาที่ใช้ในการจัดการภาพหลังการถ่าย ความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพ และสัดส่วนพื้นที่ใช้งาน พร้อมทั้งเลือกระบบที่เหมาะสม

3.2.3 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ของระบบกล้องคู่เทียบกับระบบกล้องเดี่ยวในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

นำระบบกล้องคู่ที่เลือกจากข้อ 3.2.2.4.3 และระบบกล้องเดี่ยวที่ใช้กล้องและเลนส์รุ่นเดียวกันกับระบบกล้องคู่ที่เลือกมา จับเวลาและถ่ายภาพเชิงเทคนิค 7 ชุด โดยในแต่ละชุดประกอบไปด้วย 7 เทคนิค ดังนี้

I. การถ่ายภาพการสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ (VIS)
II. การถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด (IR)
III. การถ่ายภาพการสะท้อนรังสียูวี (UVR)
IV. การถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวี (UVF)
V. การถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว (IRF)
VI. การถ่ายภาพด้วยแสงเฉียง (RAK)
VII. การถ่ายภาพการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (IRT)

โดยมีลำดับการถ่าย ฟิลเตอร์ที่ใช้สำหรับแต่ละกล้อง เทคนิคที่ถ่ายสำหรับระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่ดังแสดงในตางรางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยก่อนการจับเวลาให้ติดตั้งและจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพให้พร้อมใช้งาน รวมถึงปรับตั้งกล้องให้มีความสว่างของภาพที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพลำดับที่ 1 เมื่อเริ่มจับเวลาให้กดชัตเตอร์เพื่อถ่ายภาพลำดับที่ 1 ทันทีและสิ้นสุดการจับเวลาเมื่อกล้องถ่ายภาพในลำดับสุดท้ายของแต่ละชุดสำเร็จ เมื่อถ่ายภาพครบทุกชุด

ตัดข้อมูลเวลาสูงสุดและต่ำสุด ให้เหลือข้อมูลเวลาที่ใช้ในการถ่ายเพียง 5 ชุด เฉลี่ยข้อมูลทั้ง 5 และเปรียบเทียบผล

ตารางที่ 3.2 ลำดับ แหล่งแสง ฟิลเตอร์ และเทคนิคที่ถ่ายสำหรับระบบกล้องเดี่ยวสำหรับการเปรียบเทียบเวลา

ลำดับ	แหล่งแสง	ฟิลเตอร์ที่ใส่	เทคนิคที่ถ่าย
1	Halogen	CHSOS – VIS pass	VIS
2	Halogen	CHSOS – IR pass	IR
3	CHSOS – Alice (White LED)	CHSOS – IR pass	IRF
4	CHSOS - UV LED + CHSOS – Alice (White LED)	CHSOS – UV pass	UVR
5	CHSOS - UV LED	CHSOS – VIS pass	UVF
6	Halogen, แสงเฉียง	CHSOS – VIS pass	RAK
7	Halogen, ส่องทางด้านหลัง	CHSOS – IR pass	IRT

ตารางที่ 3.3 ลำดับ แหล่งแสง ฟิลเตอร์ และเทคนิคที่ถ่ายสำหรับระบบกล้องคู่สำหรับการเปรียบเทียบเวลา

ลำดับ	แหล่งแสงที่ใช้	ฟิลเตอร์ที่ใส่		เทคนิคที่ถ่าย	
		กล้อง 1	กล้อง 2	กล้อง 1	กล้อง 2
1	CHSOS - UV LED	CHSOS – UV pass	VIS pass	UVR	UVF
2	CHSOS – Alice (White LED)	CHSOS – IR pass	VIS pass	IRF	VIS
3	Halogen	CHSOS – IR pass	-*	IR	-*
4	Halogen, แสงเฉียง	-*	VIS pass	-*	RAK
5	Halogen, ส่องทางด้านหลัง	CHSOS – IR pass	-*	IRT	-*

* ไม่ได้ถ่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.4 การปรับปรุงเพื่อลดเวลาและแก้ไขข้อจำกัดของการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว

3.2.4.1 เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่

เพื่อลดข้อจำกัดทางด้านความเข้มแสงของแหล่งแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว งานวิจัยนี้จึงได้คิดค้นการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ โดยทดลองดังนี้ ถ่ายภาพแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 พร้อมแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบเดิมและแบบใหม่ตามรายละเอียดในตารางที่ 3.4 จากนั้นแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพด้วยวิธีในข้อ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็นไฟล์ TIFF 8 บิต กำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งสารสีแคดเมียมเรด (cadmium red) บนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card ให้มีความสว่างประมาณ 70 สำหรับภาพถ่ายเทคนิคเดิม สำหรับเทคนิคใหม่ให้กำหนดสมดุลขาว และชดเชยความสว่างที่ตำแหน่ง N8 บนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card ให้มีความสว่างประมาณ 100 จากนั้นสกัดข้อมูลจากช่องสัญญาณสีน้ำเงินออกมาและแปลงเป็นภาพไบนารีโดยกำหนดขีดเริ่มเปลี่ยนจากค่าความสว่างเฉลี่ยที่ตำแหน่งสารสีแคดเมียมเรด (cadmium red) ที่อยู่บนแผ่นทดสอบเดียวกัน เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่

เทคนิค	แหล่งแสง	กล้องและเลนส์	ฟิลเตอร์
แบบเดิม	CHSOS – Alice	Nikon D850 + 24 mm.	CHSOS – IR pass
แบบใหม่ 1	Eve A60 (White LED)		Cokin 720-89B (IR pass)
แบบใหม่ 2	CHSOS - UV LED + Eve A60 (White LED)		Cokin 720-89B (IR pass)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.4.2 การลดเวลา

เพื่อให้ใช้เวลาในการถ่ายได้น้อยที่สุด จึงต้องทดลองจัดลำดับการถ่ายและเลือกใช้อุปกรณ์ใหม่ ในการทดลองนี้จะใช้ระบบที่เลือกจากข้อ 3.2.2.4.3 มาปรับปรุงโดยเปลี่ยนมาใช้กล้องฟลูสเปคตรัมกับกล้องที่ติดตั้งฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านและใช้แหล่งแสง OWSOO CA-LED09H ที่เป็นแอลอีดีอินฟราเรดความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร สำหรับการถ่ายภาพการสะท้อนรังสีอินฟราเรด เลือกใช้เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วย

แสงขาวแบบใหม่ จากข้อที่ 3.2.4.1 โดยถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 เทคนิค จำนวน 7 ชุด พร้อมจับเวลาในแต่ละชุด โดยมีลำดับและรายละเอียดอุปกรณ์ดังตารางที่ 3.5 จากนั้นตัดข้อมูลเวลาสูงสุดและต่ำสุดออก เฉลี่ยเวลาที่เหลือทั้ง 5 และวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 3.5 ลำดับ แหล่งแสง ฟิลเตอร์ และเทคนิคที่ถ่ายสำหรับการจัดลำดับการถ่ายและเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อลดเวลา

ลำดับ	แหล่งแสงที่ใช้	ฟิลเตอร์ที่ใส่		เทคนิคที่ถ่าย	
		กล้องฟูลสเปกตรัม	กล้องอินฟราเรด	กล้องฟูลสเปกตรัม	กล้องอินฟราเรด
1	CHSOS - UV LED + Eve A60 (White LED)	CHSOS – UV pass	Cokin 720-89B (IR pass)	UVR	IRF
2	Eve A60 (White LED) + IR-850 LED	Rocolax UV-IR cut (VIS pass)	Cokin 720-89B (IR pass)	VIS	IR
3	CHSOS - UV LED	Rocolax UV-IR cut (VIS pass)	-*	UVF	-*
4	Eve A60 (White LED), แสงเฉียง	Rocolax UV-IR cut (VIS pass)	-*	RAK	-*
5	Eve A60 (White LED), ส่องทางด้านหลัง	-*	Cokin 720-89B (IR pass)	-*	IRT

* ไม่ได้ถ่าย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.5 การทดสอบระบุสารสีและวิเคราะห์ภาพวาด

เตรียมตัวอย่างภาพวาดโดยเตรียมสีน้ำจากการผสมกันของสารสีที่มีอยู่ในแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 และสารยึดกัมอะราบิก ในอันตราส่วน 1:4 คนสารสีกับสารยึดกัมอะราบิกให้เข้ากัน ใช้ดินสอวาดภาพลงบนกระดาษการ์ดขนาดกว้างและยาว 11 และ 12.5 เซนติเมตร ตามลำดับ จากนั้นใช้สีน้ำที่เตรียมไว้ทาลงบนพื้นที่ที่ต้องการด้วยพู่กัน เตรียมทั้งหมด 5 สี

ถ่ายตัวอย่างภาพวาดด้วยระบบกล้องคู่และกล้องเดี่ยว สำหรับระบบกล้องคู่ใช้ระบบที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 และระบบกล้องเดี่ยวใช้กล้องและเลนส์ที่ตรงกันกับระบบกล้องคู่โดยมีลำดับการถ่าย แหล่งแสง และฟิลเตอร์ สำหรับระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่ตามตารางที่ 3.2 และ 3.5 ตามลำดับ กำหนดสมดุลขาว ชดเชยความสว่าง จากนั้นแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์และขอบมืด

สำหรับระบบกล้องคู่ ซ้อนภาพทั้ง 7 ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยให้ภาพจากเทคนิค VIS เป็นภาพหลัก โดยมีขั้นตอนดังนี้

- แปลงภาพทั้ง 7 เป็นภาพขาวดำด้วยคำสั่ง rgb2gray
- หาจุด SURF ของภาพทั้ง 7 ด้วยคำสั่ง detectSURFFeatures และสกัดออกมาด้วยคำสั่ง extractFeatures
- จับคู่จุด SURF ที่มีเหมือนกันในภาพทั้ง 2 โดยจับคู่ภาพเทคนิคอื่น ๆ กับภาพเทคนิค VIS
- ใช้คำสั่ง estimateGeometricTransform กับคู่ของจุดที่ได้เพื่อประมาณการแปลงภาพแบบโปรเจคทีฟ (projective transformation)
- ใช้คำสั่ง imwarp เพื่อซ้อนภาพทุกภาพเข้ากับภาพเทคนิค VIS

สร้างภาพ IRFC โดยนำข้อมูลช่องสัญญาณสีแดงและสีเขียวของภาพเทคนิค VIS มาแทนที่ข้อมูลในช่องสัญญาณสี เขียวและน้ำเงินของภาพเทคนิค IR ตามลำดับ ในกรณีของระบบกล้องคู่ให้ใช้ภาพ IRFC กับ VIS ที่ซ้อนแล้ว และสร้างภาพไบนารีของภาพเทคนิค IRF ด้วยวิธีในข้อ 3.2.4.1 จากนั้นทดสอบระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนก เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผล

3.2.7 สร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่

ใช้โปรแกรม MATLAB App Designer ที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างโปรแกรมที่มีส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) สำหรับการแก้ไขความบิดเบี้ยวและขอบมืด ซ้อนภาพ สร้างภาพอินฟราเรดแบบสีเทียม สร้างภาพไบนารีสำหรับเทคนิคถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว โดยมีลำดับการทำงานดังนี้

- นำเข้าภาพ
- แก้ไขขอบมืดด้วยตารางค้นหาที่ได้จากข้อ 3.2.2.1.1
- แก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์จาก จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1.2
- ซ้อนภาพแบบอัตโนมัติด้วย SURF ตามขั้นตอนในข้อที่ 3.2.5
- สร้างภาพอินฟราเรดแบบสีเทียม
- สร้างภาพไบนารีตามขั้นตอนในข้อที่ 3.2.4.1
- ส่งออกภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การทดสอบกล้องและเลนส์

4.1.1 การหาฟังก์ชันการแปลงออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ของกล้อง (camera opto-electronic conversion function, OECF)

ฟังก์ชันสำหรับการแปลงการตอบสนองของภาพให้เป็นเส้นตรงที่ได้จากฟังก์ชัน polyfit ในโปรแกรม MATLAB ของกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 แสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ สำหรับฟังก์ชันที่ได้นั้นแสดงลักษณะเฉพาะตัวของเซ็นเซอร์ของกล้องแต่ละรุ่นและการประมวลผลภาพของโปรแกรมที่ใช้ในการแปลงไฟล์ภาพ โดยส่วนมากแล้วเซ็นเซอร์ชนิดซีมอสนั้นมีการตอบสนองต่อแสงที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรง แต่การมองเห็นของมนุษย์นั้นมีการตอบสนองต่อแสงที่ไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นในกระบวนการประมวลผลภาพจะมีขั้นตอนในการแปลงสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ให้กลายเป็นภาพและปรับภาพให้มีการตอบสนองแบบไม่เป็นเส้นตรงเพื่อให้ภาพที่ได้มองด้วยตาแล้วมีความสวยงาม คล้ายกับการมองเห็นจริง ฟังก์ชันที่ได้นี้มีความจำเป็นสำหรับการนำไปใช้สำหรับการทดสอบอื่น ๆ ต่อไป

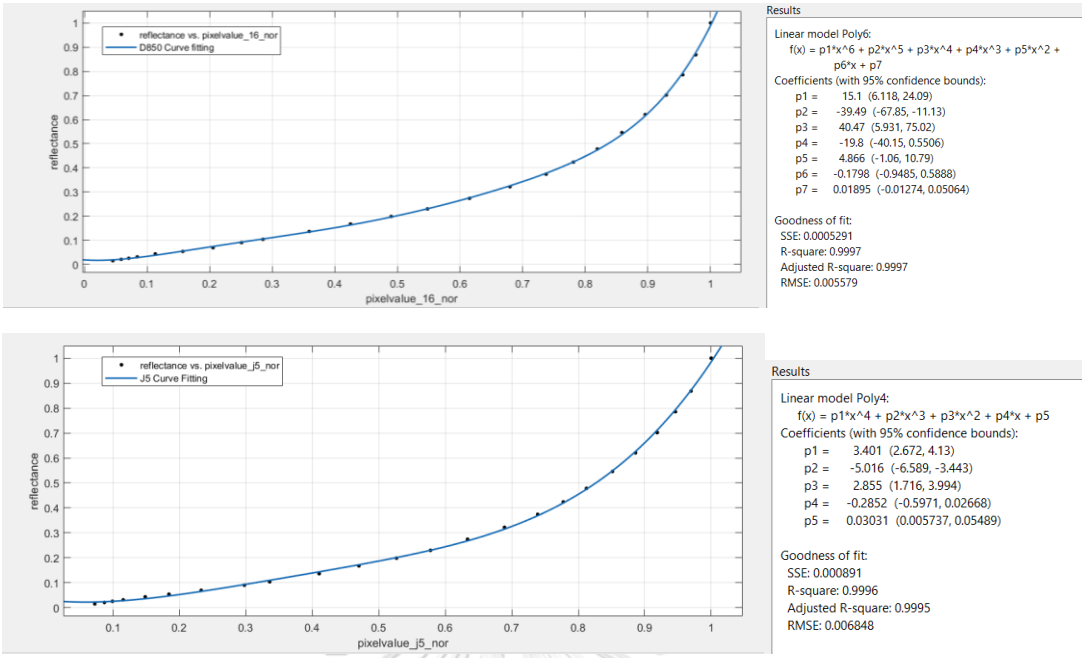
$$y(x) = 15.1x^6 - 39.49x^5 + 40.47x^4 - 19.8x^3 + 4.866x^2 - 0.1798x + 0.01895$$ สมการที่ 4.1

$$y(x) = 3.401x^4 - 5.016x^3 + 2.855x^2 - 0.2852x + 0.03031$$ สมการที่ 4.2

เมื่อ $y(x)$ คือ ค่าความสว่างหลังการแปลงภาพให้ตอบสนองเป็นเส้นตรง

x คือ ค่าความสว่างของภาพที่ตอบสนองไม่เป็นเส้นตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

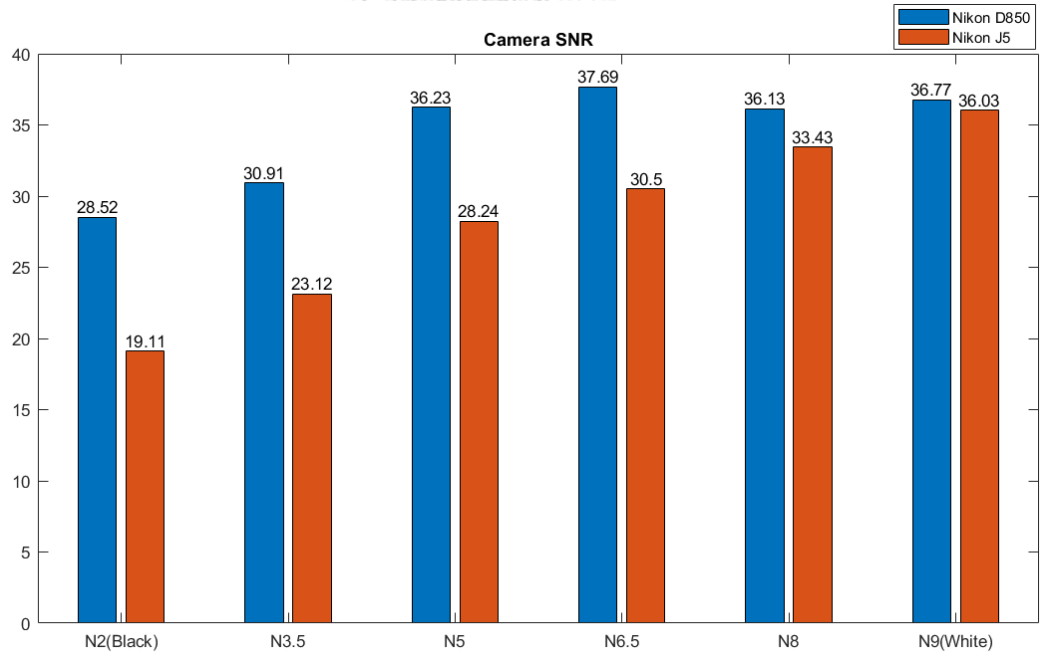


ภาพที่ 4.1 กราฟการตอบสนองของกล้อง (ซ้าย) และฟังก์ชันสำหรับการแปลงภาพให้มีการตอบสนองเป็นเส้นตรง (ขวา) ของกล้องรุ่น Nikon D850 (บน) และ Nikon J5 (ล่าง)

ภาพที่ 4.2 ภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) แปลงภาพให้มีการตอบสนองต่อแสงเป็นเส้นตรง ของกล้อง Nikon D850 (บน) และ Nikon J5 (ล่าง)

4.1.2 การทดสอบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง (camera signal-to-noise ratio, SNR)

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของตัวอย่าง ดำ เทา 4 ระดับ และขาว บนแผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport ของกล้อง Nikon D850 (น้ำเงิน) และ Nikon J5 (ส้ม) แสดงในภาพที่ 4.3 โดยกล้องทั้งสองถ่ายที่ค่าความไวแสงฐาน (base ISO) พบว่าที่ทุกตัวอย่างความสว่างกล้อง Nikon D850 นั้นมี SNR ที่สูงกว่ากล้อง Nikon J5 โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีความสว่างต่ำ ถึงแม้ว่ากล้อง Nikon D850 จะมีจำนวนพิกเซลที่สูงกว่ามาก แต่ด้วยเซ็นเซอร์ที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้ขนาดแต่ละพิกเซลมีขนาดใหญ่กว่า โดยที่กล้อง Nikon D850 มีขนาดพิกเซลประมาณ 4.35 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่ากล้อง Nikon J5 ที่มีขนาดพิกเซลอยู่ที่ 2.36 ไมครอน ขนาดพิกเซลที่ใหญ่กว่านี้ส่งผลให้แต่ละพิกเซลบนเซ็นเซอร์มีพื้นที่รับแสงที่มากกว่า จึงส่งผลให้สัญญาณที่ได้นั้นมากกว่ากล้อง Nikon J5 และอีกปัจจัยที่มีผลนั้นก็คือการพัฒนากล้อง กล้อง Nikon D850 นั้นวางจำหน่ายหลังกล้อง Nikon J5 ประมาณ 2 ปี เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต รวมถึงการออกแบบ การประมวลผลสัญญาณจึงมีประสิทธิภาพกว่า

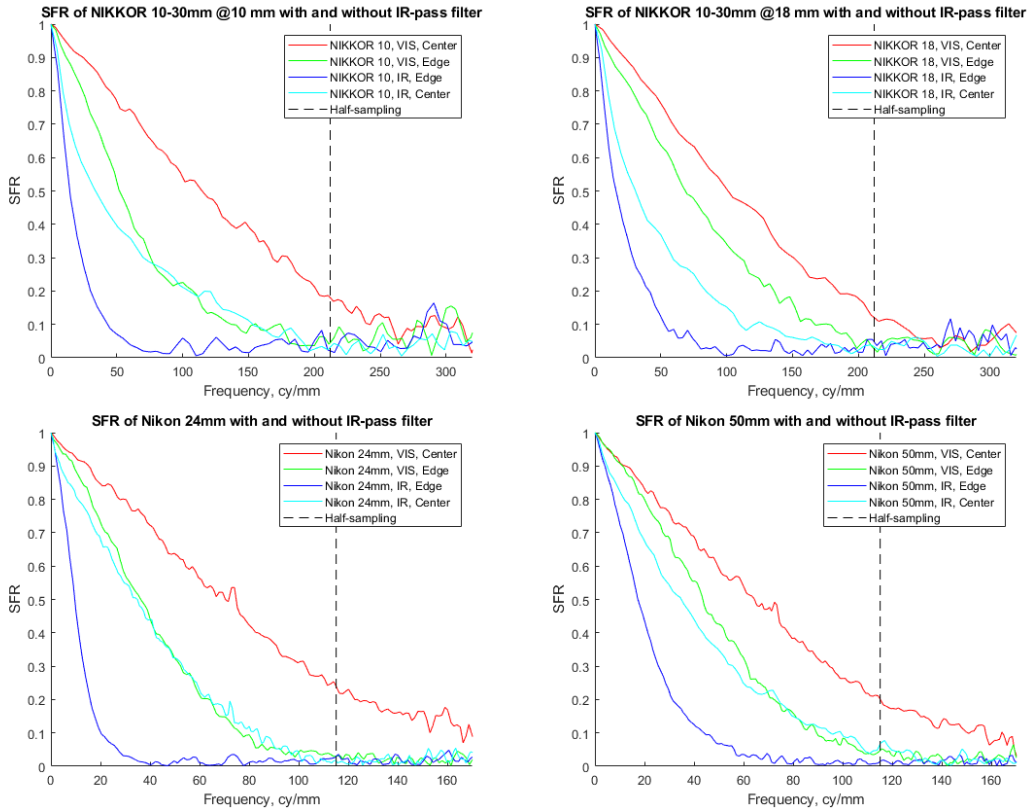


ภาพที่ 4.3 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของตัวอย่างเทาบนแผ่นทดสอบ X-Rite ColorChecker Passport ของกล้อง Nikon D850 (น้ำเงิน) และ Nikon J5 (ส้ม)

4.1.3 การทดสอบเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง (slanted-edge MTF)

กราฟเอ็มทีเอฟของระบบที่ใช้เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 และ 18 มิลลิเมตร และเลนส์ Nikon 24 และ 50 มิลลิเมตร บนกล้องปกติและกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด แสดงในภาพที่ 4.4 โดยกราฟของกล้องปกติแสดงในเส้นแดงและเขียว กราฟกล้องอินฟราเรดแสดงในเส้นสีน้ำเงินและฟ้า พบว่าการตอบสนองต่อความถี่เชิงพื้นที่ (spatial frequency response, SNR) ของเลนส์ทั้ง 3 ลดลงเมื่อติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรดและลดลงอย่างมากโดยเฉพาะที่ขอบเลนส์ โดยเลนส์ Nikon 24 และ 50 มิลลิเมตร มีความคมชัดมากกว่าเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ทั้งใส่และไม่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด เลนส์ทั้ง 3 นี้เป็นเลนส์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานสำหรับการถ่ายภาพทั่วไปหรือถ่ายภาพภายใต้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ เมื่อเรานำเลนส์เหล่านี้มาใช้ในการถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด เลนส์อาจไม่สามารถโฟกัสภาพจากขอบเลนส์และกลางเลนส์ให้อยู่ในระนาบเดียวกันได้ ส่งผลให้ภาพบริเวณขอบมีความคมชัดที่ต่ำกว่ากลางภาพ อีกทั้งคุณภาพของฟิลเตอร์ที่ใช้งานมีผลอย่างยิ่งต่อความคมชัด โดยเฉพาะบริเวณขอบภาพ ในการทดลองนี้ฟิลเตอร์ที่ใช้นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ซึ่งใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ทั้ง 3 มากพอสมควร ดังนั้นความคมชัดที่ลดลงบริเวณขอบภาพนั้นไม่ได้เกิดจากฟิลเตอร์ที่ใช้ ทั้งนี้ความคมชัดของเลนส์ทั้ง 3 สำหรับการถ่ายภาพภายใต้ขาวนั้นมีความคมชัดที่ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



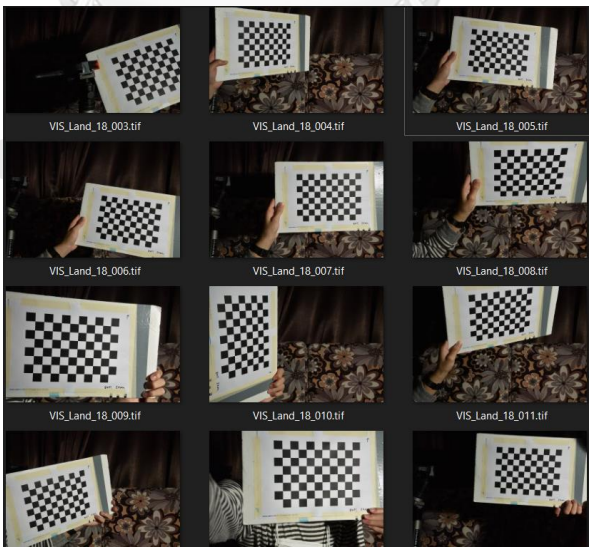
ภาพที่ 4.4 กราฟเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของระบบที่ใช้เลนส์ NIKKOR VR 10-30 ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร (บนซ้าย) เลนส์ NIKKOR VR 10-30 ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร (บนขวา) เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร (ล่างซ้าย) และเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร (ล่างซ้าย) บนกล้องปกติและกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด กราฟกล้องปกติแสดงในเส้นแดงและเขียว กราฟกล้องอินฟราเรดแสดงในเส้นสีน้ำเงินและฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

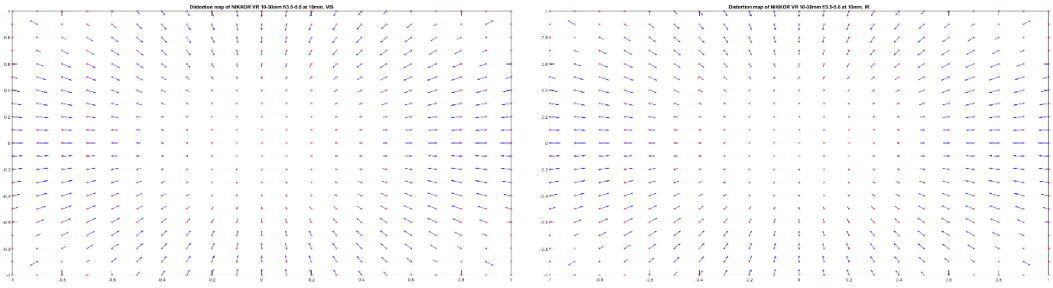
4.1.4 การทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์

ตัวอย่างภาพการถ่ายแผ่นทดสอบตารางหมากรุกภายใต้แสงที่มองเห็นได้ แสดงในภาพที่ 4.5 และแผนที่แสดงรูปแบบความบิดเบี้ยวของเลนส์ทั้ง 3 บนกล้องปกติและกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด แสดงในภาพที่ 4.6 – 4.9 สำหรับภาพจากกล้องปกติ การบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางปรากฏบนเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร และเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร ปรากฏเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ สำหรับการบิดเบี้ยวแบบคอดกลางนั้นปรากฏอย่างชัดเจนบนเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 4.7 และสำหรับเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร นั้นรูปแบบการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นนั้นมีความไม่สม่ำเสมอ โดยที่ความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางเกิดบริเวณกลางภาพและการบิดเบี้ยวแบบคอดกลางเกิดที่บริเวณขอบของภาพ แสดงในภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณารูปแบบความบิดเบี้ยวของเลนส์ทั้ง 3

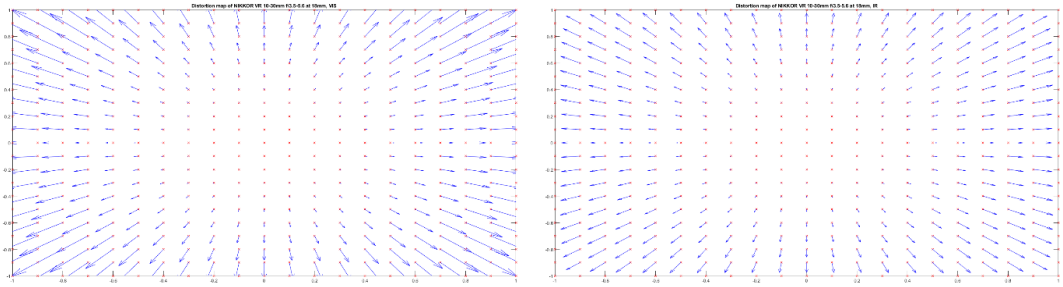
บนกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร การบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นมีรูปแบบโป่งกลางและมีความบิดเบี้ยวที่ใกล้เคียงกับความบิดเบี้ยวที่เกิดบนกล้องปกติ สำหรับเลนส์ Nikon 24 และ 50 มิลลิเมตร นั้นปรากฏให้เห็นถึงความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางอย่างชัดเจนและสูงกว่าบนกล้องปกติ สังเกตได้จากความยาวของลูกศรสีน้ำเงินที่มากขึ้น ในภาพแผนที่แสดงรูปแบบการบิดเบี้ยวทางด้านขวา ในภาพที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ และสำหรับเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร ความบิดเบี้ยวแบบคอดกลางปรากฏน้อยกว่าบนกล้องปกติ สังเกตได้จากความยาวของลูกศรสีน้ำเงินที่สั้นลงในภาพที่ 4.7 โดยสำหรับเลนส์มุมกว้างการเกิดความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางนั้นเป็นสิ่งที่พบโดยปกติสำหรับเลนส์มุมกว้าง สำหรับความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นบนเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร นั้นอาจเกิดได้จากการออกแบบโครงสร้างภายในของเลนส์และความไม่สมบูรณ์แบบในกระบวนการผลิตเลนส์ เลนส์ที่นำมาทดสอบทั้ง 3 นี้เป็นเลนส์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการถ่ายภาพปกติหรือถ่ายภาพภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ซึ่งความบิดเบี้ยวของเลนส์นั้นโดยส่วนใหญ่แล้วทางผู้ผลิตจะออกแบบเพื่อควบคุมการบิดเบี้ยวให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการใช้งานหรือมีโปรแกรมประมวลผลภาพเพื่อชดเชยความบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้น แต่หากเราติดตั้งฟิลเตอร์ชนิดอื่นเพื่อนำไปถ่ายภาพในช่วงความยาวคลื่นอื่นนอกจากความยาวคลื่นในช่วงที่มองเห็นได้ โปรแกรมที่ใช้ในการแก้ไขความบิดเบี้ยวจะไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากรูปแบบความบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นนั้นไม่เหมือนเดิม



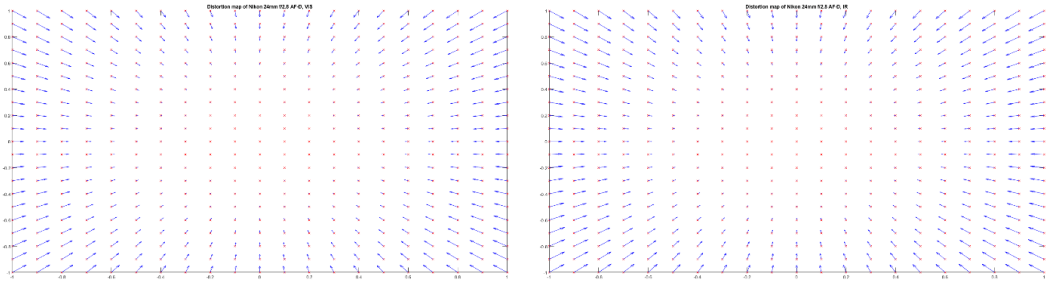
ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายสำหรับการหาความบิดเบี้ยวของเลนส์



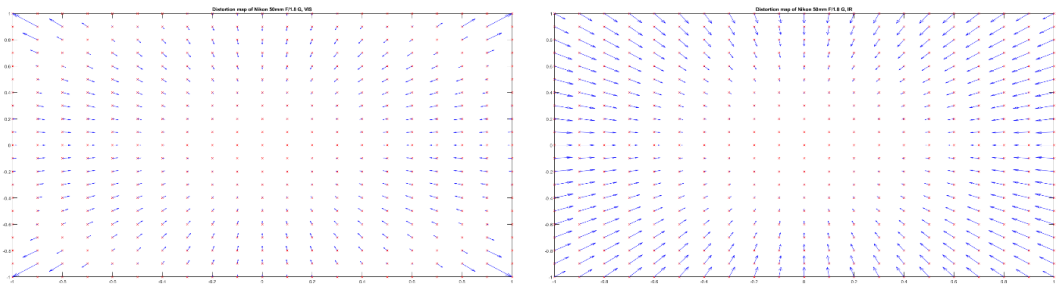
ภาพที่ 4.6 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้



ภาพที่ 4.7 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้



ภาพที่ 4.8 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้



ภาพที่ 4.9 รูปแบบการบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องอินฟราเรด (ขวา) จุดแดงแสดงจุดต้นฉบับและหัวลูกศรสีน้ำเงินแสดงจุดที่ฉายผ่านเลนส์และฟิลเตอร์นี้

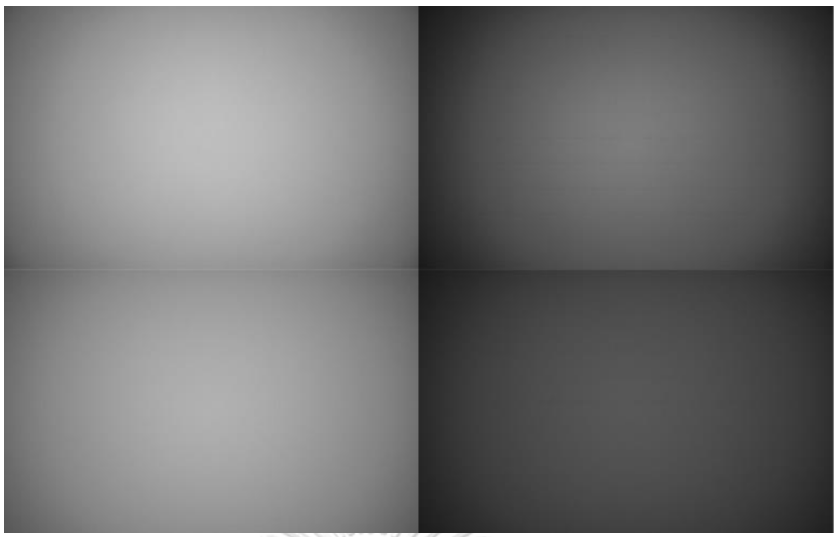
4.2 การสร้างระบบกล้องคู่

4.2.1 การแก้ไขข้อผิดพลาดของอุปกรณ์

4.2.1.1 การแก้ปัญหาขอบมืด

ขอบมืดของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 และ 18 มิลลิเมตร บนกล้องปกตินั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่หากพิจารณาขอบมืดที่เกิดบนกล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรดนั้น จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเกิดขอบมืดมากกว่าภาพที่ได้จากกล้องปกติ ภาพตารางค้นหาสำหรับแก้ไขขอบมืดแสดงในภาพที่ 4.10 โดยปกติแล้วการติดตั้งฟิลเตอร์ไว้ที่ด้านหน้าของเลนส์นั้นอาจก่อให้เกิดปัญหาขอบมืดได้หากองศารับภาพของเลนส์กว้างจนครอบคลุมบริเวณขอบที่เป็นโครงสำหรับยึดแผ่นฟิลเตอร์ แต่ในกรณีนี้ฟิลเตอร์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถึง 100 มิลลิเมตร ซึ่งใหญ่มากพอที่จะครอบคลุมองศารับภาพของเลนส์ทั้งหมด ดังนั้นปัญหาขอบมืดของภาพอินฟราเรดนี้เกิดจากตัวเลนส์เองที่ไม่สามารถรวมรังสีอินฟราเรดบริเวณขอบภาพให้ตกลงบนเซ็นเซอร์ได้ ภาพหลังการแก้ไขขอบมืดแล้วของแสดงในภาพที่ 4.12

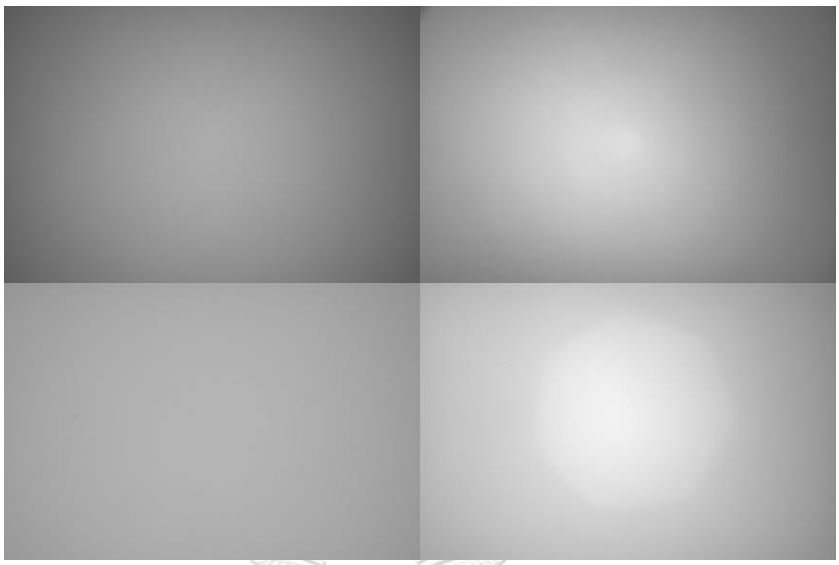
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



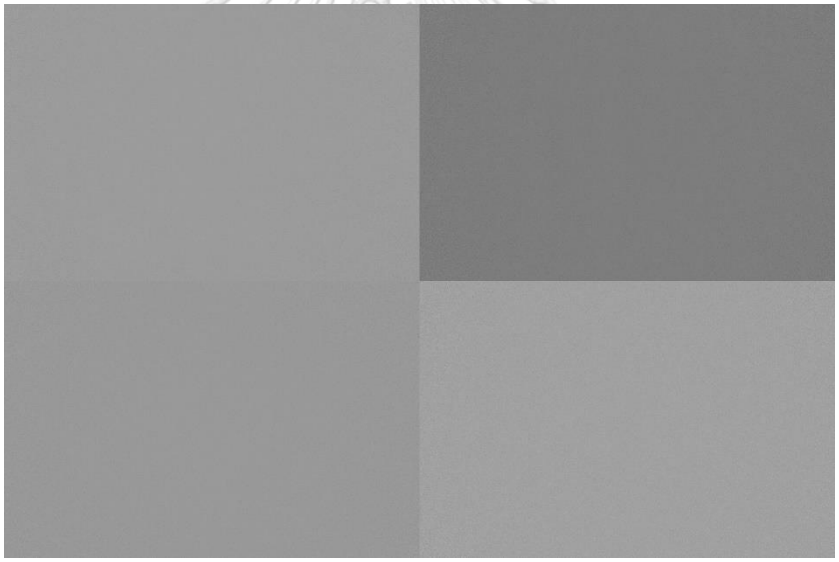
ภาพที่ 4.10 ตารางค้นหาสำหรับแก้ไขขอบมืดของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร (บน) และ 18 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา)

สำหรับเลนส์ Nikon 24 และ 50 มิลลิเมตรนั้น เมื่อพิจารณาภาพตารางค้นหาสำหรับแก้ไขขอบมืดของเลนส์ทั้ง 2 ที่แสดงในภาพที่ 4.11 บนกล้องปกติ เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร นั้นเกิดขอบมืดมากกว่าเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร โดยที่เลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร มีขอบมืดน้อยมากหรืออาจไม่มีเลย สังเกตได้จากภาพตารางค้นหาที่มีความสม่ำเสมอของความสว่างบริเวณขอบภาพไปจนถึงกลางภาพ ซึ่งต่างจากเลนส์รุ่นอื่นที่ขอบภาพจะมีความสว่างต่ำกว่า แต่เลนส์ทั้ง 2 รุ่นนี้มีขอบมืดที่น้อยกว่าเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเลนส์ทั้ง 2 บนกล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด พบกว่าขอบมืดที่เกิดนั้นใกล้เคียงกับบนกล้องปกติ แต่สำหรับเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร ที่บริเวณกลางภาพจะพบจุดสว่างทรง 7 เหลี่ยมที่เป็นรูปทรงเดียวกันกับใบมีดรูรับแสงของเลนส์ จุดสว่างนี้เกิดได้จากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่แล้วเกิดจากสารเคลือบเลนส์ภายในตัวเลนส์ที่มีสมบัติสะท้อนรังสีอินฟราเรดหรือปฏิสัมพันธ์ต่อรังสีอินฟราเรดที่เกิดขึ้นระหว่างสารเคลือบเลนส์และชิ้นเลนส์ เนื่องจากเลนส์เหล่านี้ถูกออกแบบมาเพื่อถ่ายภาพภายใต้แสงที่มองเห็นได้ ปัญหานี้จึงไม่พบในภาพจากกล้องปกติ จุดสว่างนี้จะค่อย ๆ จางหายไปเมื่อเปิดรูรับแสงให้กว้างขึ้นแต่อาจส่งผลถึงความคมชัดที่บริเวณขอบภาพหรือระยะชัดที่แคบลงที่อาจก่อปัญหาในการถ่ายภาพชิ้นงานที่มีความลึก ทั้งนี้จุดสว่างนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้ตารางค้นหาเดียวกันกับที่ใช้แก้ปัญหาขอบมืด ภาพหลังการแก้ไขขอบมืดแล้วแสดงในภาพที่ 4.13

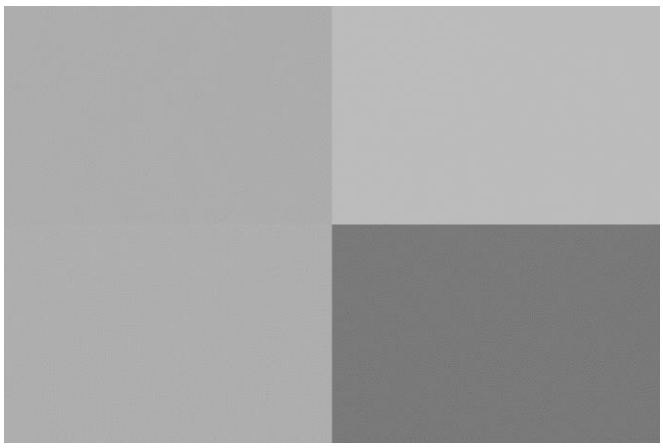
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.11 ตารางค้นหาสำหรับแก้ไขขอบมืดของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร (บน) และ 50 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา)



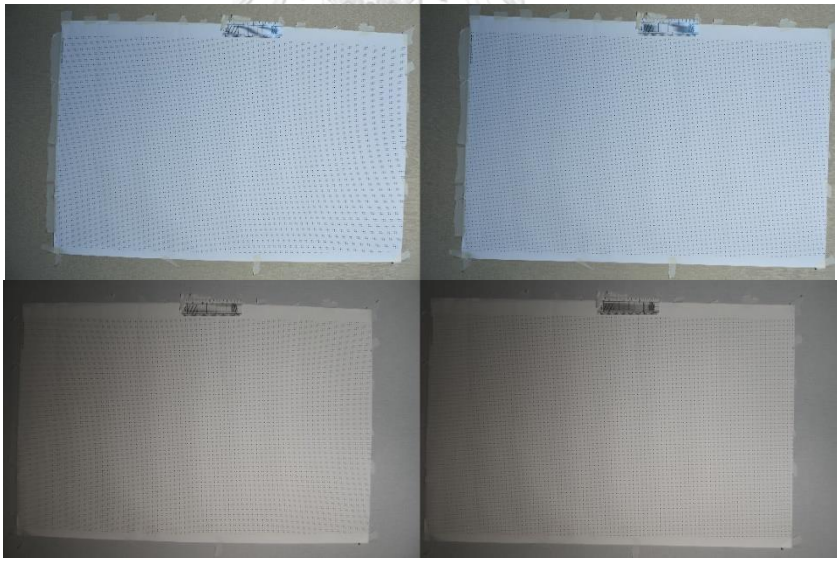
ภาพที่ 4.12 ภาพหลังการแก้ขอบมืดของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร (บน) และ 18 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา)



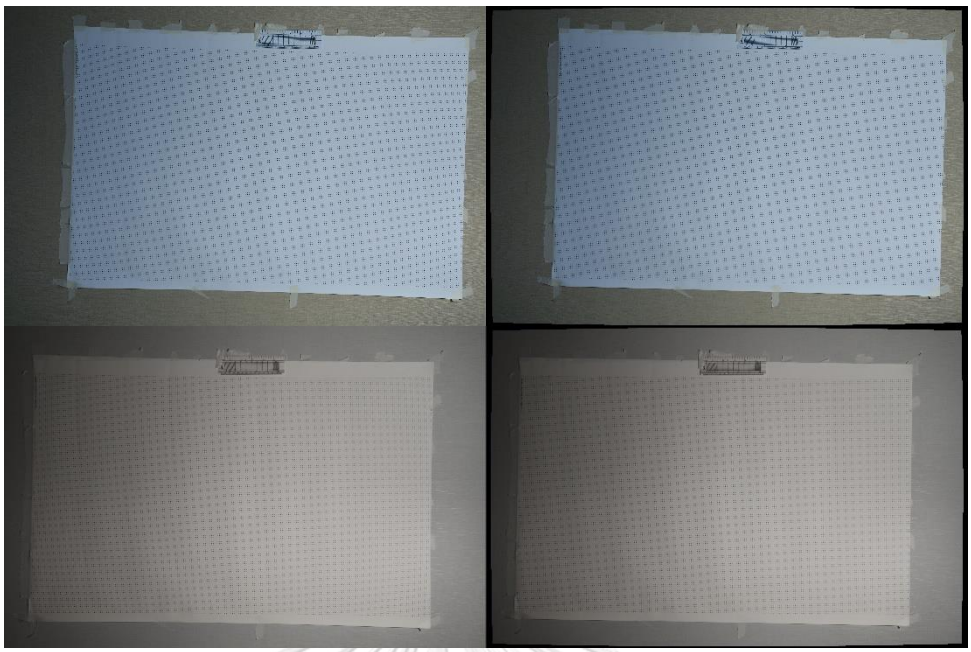
ภาพที่ 4.13 ภาพหลังการแก้ขอบมืดของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร (บน) และ 50 มิลลิเมตร (ล่าง) บนกล้องปกติ (ซ้าย) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา)

4.2.1.2 การแก้ปัญหาความบิดเบี้ยวของเลนส์

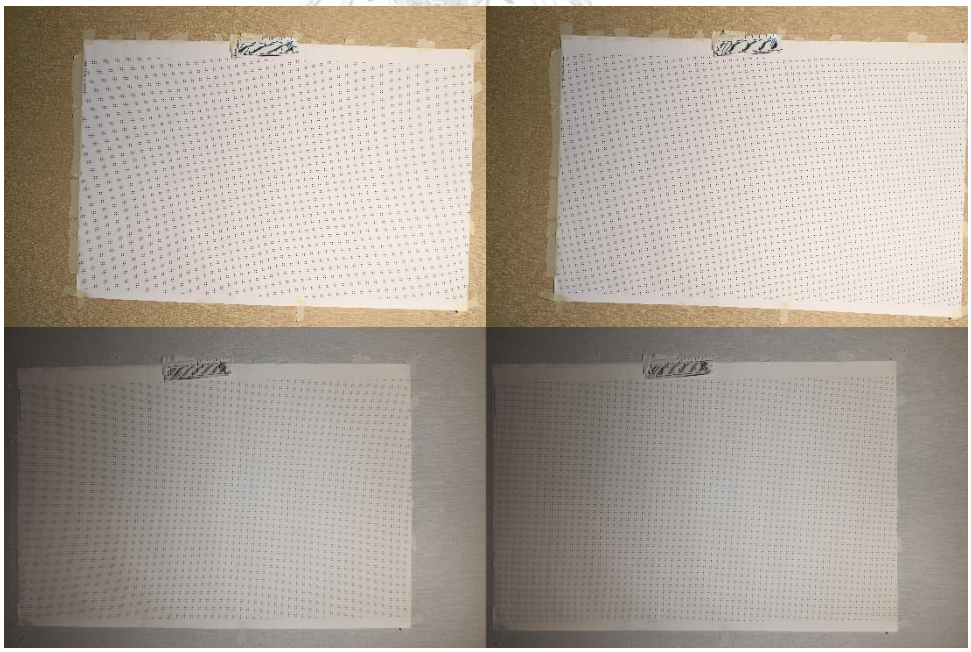
ตัวอย่างการแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ทั้ง 3 บนกล้องปกติและกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรดแสดงในภาพที่ 4.14 – 4.17 ความบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นได้ถูกแก้ไขสังเกตได้จากขอบของกระดาษที่จากเดิมมีความโค้ง เมื่อแก้ไขขอบกระดาษจะตรงเหมือนกับวัตถุจริง



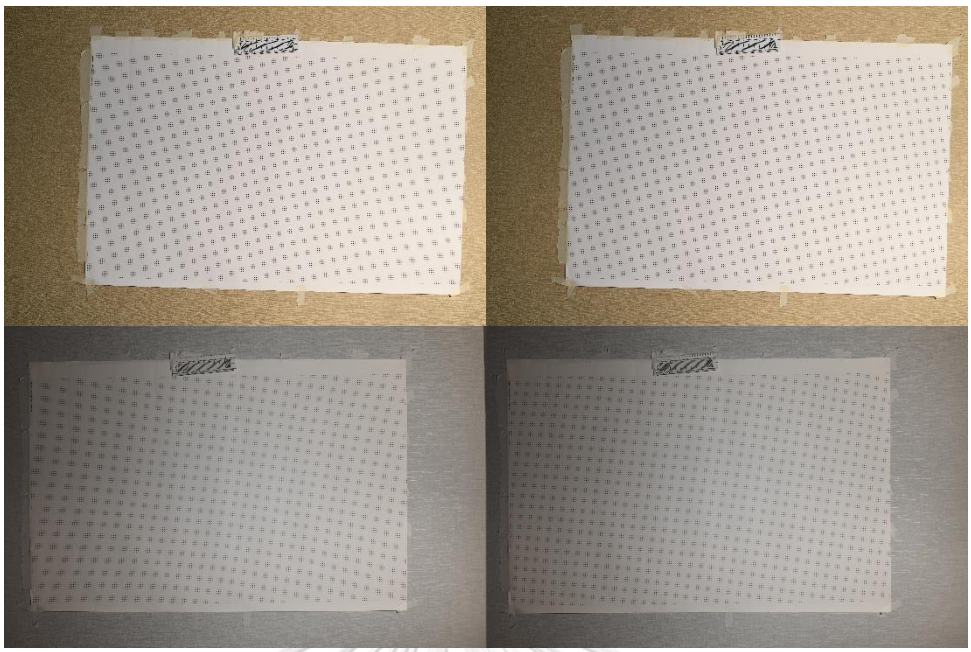
ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง)



ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง)



ภาพที่ 4.16 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง)



ภาพที่ 4.17 ตัวอย่างภาพก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) การแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ (บน) และกล้องดัดแปลงที่ใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรด (ล่าง)

4.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกล้องคู่

4.2.2.1 การทดสอบการกันภาพเหลื่อม (image registration)

จำนวนจุดบนแผ่นทดสอบที่วัดได้จากแต่ละระบบและความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพแสดงในตารางที่ 4.1 จำนวนจุดที่วัดได้จากทุกระบบคือ 23,160 จุด แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้นั้นเกิดจากการคำนวณด้วยจำนวนจุดที่เท่ากัน ระบบแนวตั้งนั้นมีแนวโน้มที่จะมีความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพต่ำกว่าระบบแนวนอน เพราะเซ็นเซอร์ของกล้องทั้ง 2 กล้องนั้นอยู่ใกล้กันมากกว่าระบบแนวนอน ยกเว้นระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850 และเลนส์ 50 มิลลิเมตร ถึงแม้ว่าองศารับภาพนั้นจะใกล้เคียงกับระบบที่ใช้กล้อง Nikon J5 ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร ซึ่งอาจเกิดจากรูปทรงของกล้องที่มีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้ระยะห่างของเซ็นเซอร์ทั้ง 2 นั้นมากขึ้นและความไม่สม่ำเสมอของการบิดเบี้ยวดังแสดงในภาพที่ 4.9 ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนภาพนี้ยังเกิดได้จากปัจจัยอื่นอีก เช่น วิธีที่ใช้ซ้อนภาพ ความไม่สมบูรณ์ในการติดตั้งระบบ กล้องทั้ง 2 นั้นอาจไม่สามารถติดตั้งให้อยู่ในระนาบเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์ และความคมชัดของเลนส์ก็ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนที่วัดได้ด้วย จุดที่ไม่คมชัดหรือเบลอในภาพถ่ายอินฟราเรดนั้นส่งผลให้การวัดตำแหน่งของศูนย์กลางคลาดเคลื่อนไป

เมื่อเรียงลำดับระบบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด 3 อันดับ โดยเรียงจากน้อยไปมากสามารถเรียงได้ดังนี้ กล้อง Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร แบบแนวตั้ง กล้อง Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร แบบแนวตั้ง และกล้อง Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร แบบแนวนอน

ตารางที่ 4.1 จำนวนจุดบนแผ่นทดสอบที่วัดได้จากแต่ละระบบและความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพของระบบทั้ง 8 ระบบ

กล้อง	**เลนส์**	**ตำแหน่ง**	**จำนวนจุดที่พบ**	**ระยะทางสูงสุด (มม.)**	**ระยะทางเฉลี่ย (มม.)**
Nikon J5	NIKKOR 10-30 มม. @ 10 มม.	แนวตั้ง	23,160	1.371	0.578
Nikon J5	NIKKOR 10-30 มม. @ 10 มม.	แนวนอน		1.995	1.046
Nikon J5	NIKKOR 10-30 มม. @ 18 มม.	แนวตั้ง		0.837	0.298
Nikon J5	NIKKOR 10-30 มม. @ 18 มม.	แนวนอน		1.278	0.605
Nikon D850	Nikon 24 มม.	แนวตั้ง		0.857	0.441
Nikon D850	Nikon 24 มม.	แนวนอน		0.962	0.505
Nikon D850	Nikon 50 มม.	แนวตั้ง		1.368	0.852
Nikon D850	Nikon 50 มม.	แนวนอน		1.337	0.760

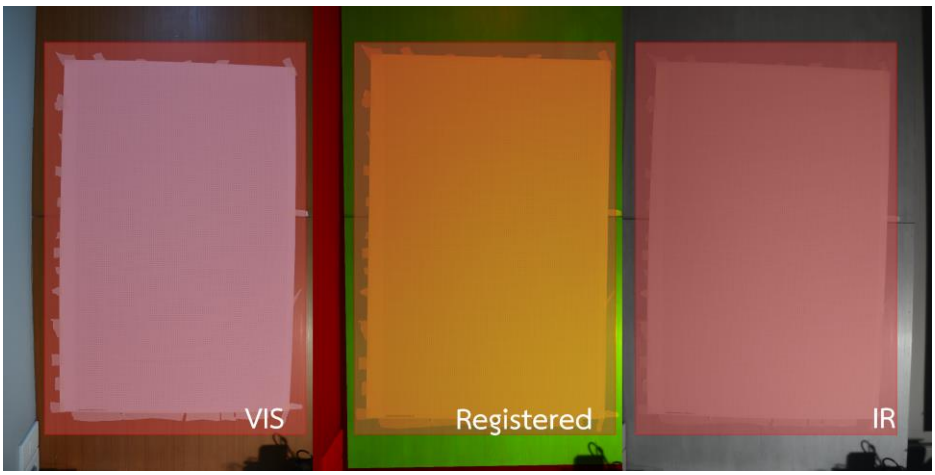
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.2.2 การกำหนดพื้นที่ใช้งาน

การกำหนดพื้นที่ใช้งานนั้นกำหนดโดยเลือกพื้นที่ของภาพที่ซ้อนทับกัน เผื่อระยะจากขอบภาพทั้ง 4 ไว้สำหรับการหมุนภาพในกรณีที่กล้องทั้ง 2 ไม่ขนานกันและเผื่อการแก้ไขความบิดเบี้ยวแล้ว โดยภาพแสดงพื้นที่ใช้งานแสดงในภาพที่ 4.18 – 4.25 และสัดส่วนพื้นที่ของพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาสัดส่วนพื้นที่ของพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมด พบว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon J5 นั้นมีพื้นที่ใช้งานมีขนาดใหญ่กว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850 เป็นเพราะขนาดกล้องที่เล็กกว่าเซ็นเซอร์จึงใกล้กัน พื้นที่ภาพที่ซ้อนทับกันจึงมากกว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850 หากพิจารณาเทียบระบบแนวนอนกับแนวตั้ง พบว่าระบบแนวนอนมีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่ใช้งานมากกว่าระบบแนวตั้ง โดยเฉพาะระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850 เพราะกล้อง Nikon D850 มีน้ำหนักมาก เมื่อติดตั้งอยู่บนเพลทรูปตัวแอล กล้องอาจเอียงเล็กน้อย ทำให้พื้นที่ภาพที่ทับซ้อนกันของภาพจาก 2 กล้องน้อยลง หากพิจารณาระบบกล้อง Nikon D850 เลนส์ 50 มิลลิเมตร แบบแนวตั้ง จะเห็นถึงผลของความเอียงเล็กน้อยนี้เสริมกับเลนส์ที่มีองศารับภาพแคบกว่าเลนส์ 24 มิลลิเมตร ที่เป็นเลนส์มุมกว้าง การขยับหรือเอียงเพียงเล็กน้อยจะปรากฏในภาพอย่างชัดเจน จึงต้องเสียพื้นที่เพื่อเผื่อการหมุนภาพเพื่อชดเชยปัญหาตรงนี้ แต่อย่างไรก็ตามระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850 นั้นถึงแม้ว่าพื้นที่ใช้งานจะน้อยกว่าแต่ได้เปรียบในด้านความละเอียดภาพที่มากกว่า การทดสอบนี้ทดสอบที่ระยะ 1 เมตร สำหรับระบบที่ใช้เลนส์มุมกว้างและ 1.6 เมตร สำหรับระบบที่ใช้เลนส์มุมปกติ สำหรับการถ่ายที่ระยะอื่นผลลัพธ์อาจต่างกันออกไป หากกล้องกับชิ้นงานอยู่ใกล้กันมากกว่าระยะที่ใช้ในการทดลองพื้นที่ส่วนที่ซ้อนทับกันอาจน้อยลงและหากกล้องกับชิ้นงานอยู่ไกลกันมากกว่าระยะที่ใช้ในการทดลองพื้นที่ส่วนที่ทับซ้อนอาจมากขึ้น

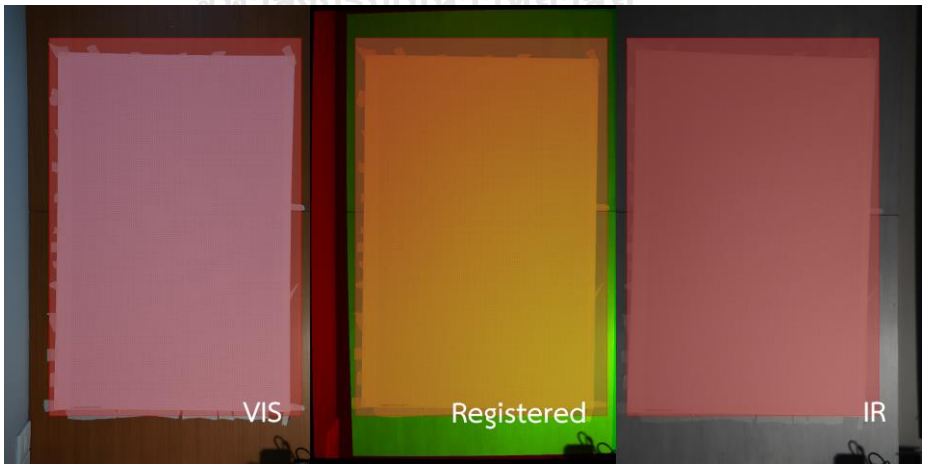
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.18 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)



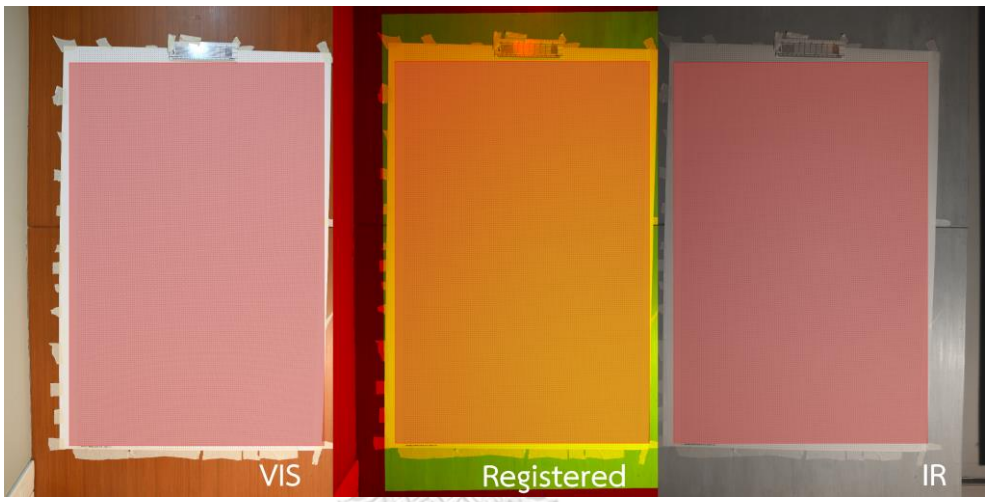
ภาพที่ 4.19 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)

ภาพที่ 4.20 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)



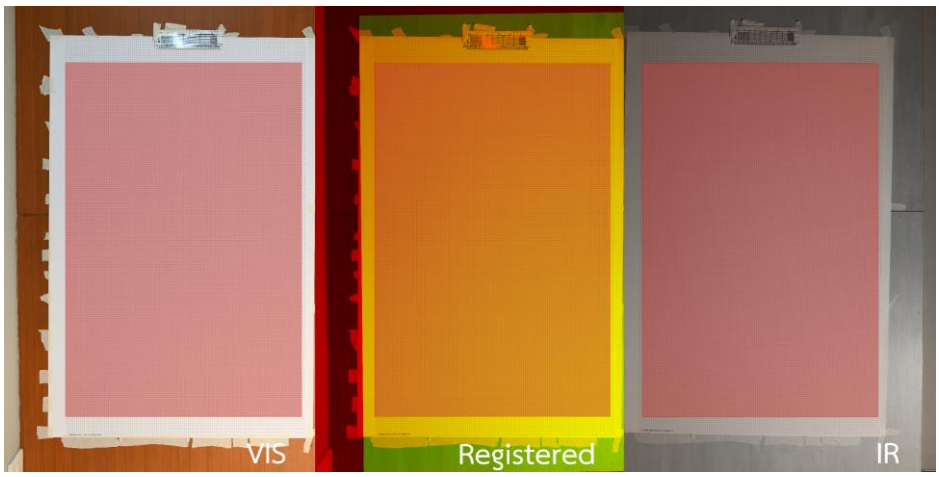
ภาพที่ 4.21 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon J5 เลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)

ภาพที่ 4.22 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)



ภาพที่ 4.23 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)

ภาพที่ 4.24 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร แนวนอน สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)



ภาพที่ 4.25 พื้นที่ใช้งานของระบบ Nikon D850 เลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร แนวตั้ง สี่เหลี่ยมสีแดงแสดงพื้นที่ใช้งานของกล้องปกติ (ซ้าย) กล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด (ขวา) และภาพหลังการซ้อนภาพ (กลาง)

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนพื้นที่ของพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมดของทั้ง 8 ระบบ

กล้อง	**เลนส์**	**ตำแหน่ง**	**สัดส่วนพื้นที่ของพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมด** (%)
Nikon J5	NIKKOR VR 10-30 มม. ที่ 10 มม.	แนวตั้ง	71.1
Nikon J5	NIKKOR VR 10-30 มม. ที่ 10 มม.	แนวนอน	71.9
Nikon J5	NIKKOR VR 10-30 มม. ที่ 18 มม.	แนวตั้ง	67.7
Nikon J5	NIKKOR VR 10-30 มม. ที่ 18 มม.	แนวนอน	71.7
Nikon D850	Nikon 24 มม.	แนวตั้ง	60.1
Nikon D850	Nikon 24 มม.	แนวนอน	67.2
Nikon D850	Nikon 50 มม.	แนวตั้ง	56.9
Nikon D850	Nikon 50 มม.	แนวนอน	66.2

4.2.2.3 ตารางเปรียบเทียบแต่ละระบบ

ในการทดลองนี้ได้ทดลองแปลงไฟล์ดิบจากกล้องทั้ง 2 รุ่น เป็นไฟล์ภาพ TIFF จำนวน 10 ภาพ และจับเวลาตั้งแต่เริ่มคำสั่งแปลงภาพจนแปลงภาพเสร็จ ไฟล์ดิบจากกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 นั้นใช้เวลาในการแปลงภาพ 134 วินาที และ 40 วินาที ตามลำดับ ซึ่งกล้อง Nikon D850 นั้นต้องใช้เวลาในการแปลงมากกว่า 3.4 เท่า

ตารางเปรียบเทียบแต่ละระบบแสดงในตารางที่ 4.3 แต่ละระบบมีข้อดีข้อเสียต่างกันออกไป ระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850 นั้นให้คุณภาพของภาพที่ดีกว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon J5 ในแง่ของความละเอียดภาพที่สูง ความคมชัดของเลนส์ ซึ่งประสิทธิภาพข้างต้นนี้มาจากราคากล้องที่สูงและเทคโนโลยีที่ทันสมัย แต่ความละเอียดภาพที่สูงนี้ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้เวลาในการประมวลผลภาพที่มากขึ้น อีกทั้งการควบคุมกล้องสามารถทำได้อย่างอิสระและสะดวกเนื่องจากปุ่มต่าง ๆ บนตัวกล้องนั้นได้ออกแบบมาเพื่อการเข้าถึงการควบคุมกล้องทุกอย่างโดยที่ไม่ต้องกดเข้าหน้าเมนูและมีอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่น ๆ ให้เลือกใช้ เช่น สายลั่นชัต-เตอร์ ซึ่งกล้อง Nikon J5 นั้นเป็นกล้องที่ออกแบบมาสำหรับผู้ใช้งานทั่วไป เน้นที่ขนาดที่เล็กและพกพาง่ายทำให้การควบคุมกล้องนั้นไม่สามารถควบคุมได้อย่างอิสระและมีข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์ต่อพ่วง กล้อง Nikon D850 มีเลนส์ที่หลากหลายให้เลือกใช้มากกว่ากล้อง Nikon J5 แต่ตัวกล้อง Nikon D850 มีขนาดใหญ่และน้ำหนักเยอะ ดังนั้นขาตั้งกล้องและระบบยึดอุปกรณ์นั้นต้องมีความแข็งแรงมากพอที่จะยึดอุปกรณ์ทั้งหมดได้และเสถียร ขนาดรวมของระบบนี้จึงใหญ่อาจไม่สะดวกสำหรับการนำออกไปถ่ายในสถานที่ที่เข้าถึงยากหรือต้องใช้จำนวนคนหลายคนในการเคลื่อนย้ายระบบ สำหรับระบบที่ใช้กล้อง Nikon J5 นั้นมีข้อดีในแง่ของขนาดกล้องที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การติดตั้งจึงสามารถทำได้โดยง่าย ขาตั้งกล้องและระบบยึดอุปกรณ์นั้นสามารถยึดกล้องได้อย่างเสถียรและปลอดภัย อีกทั้งยังเคลื่อนย้ายง่าย สามารถนำไปถ่ายในสถานที่ยาก ๆ ได้ เช่น การถ่ายจิตกรรมบนเพดานสูง สำหรับระบบแนวตั้งนั้นมีแนวโน้มที่จะมีความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพที่ต่ำกว่าระบบแนวตั้ง แต่พื้นที่ใช้งานน้อยกว่าระบบแนวนอน อีกทั้งระบบแนวตั้งจะสามารถเข้าถึงช่องเชื่อมต่อต่าง ๆ ด้านข้างตัวกล้องได้ ซึ่งต่างจากระบบแนวนอนที่จะมีด้านใดด้านหนึ่งติดกับกล้องอีกกล้อง ซึ่งการเข้าถึงได้นี้มีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนหน่วยความจำของตัวกล้อง ระบบที่ใช้เลนส์มุมกว้างนั้นมีข้อดีในแง่ของพื้นที่ในการทำงานที่เล็ก สามารถเข้าใกล้ชิ้นงานได้ใกล้มากกว่าระบบที่ใช้เลนส์มุมปกติ

ระบบที่เหมาะสมคือกล้อง Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร ระบบแนวตั้ง เพราะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพเฉลี่ยที่ต่ำเป็นอันดับที่ 2 มีคุณภาพของภาพสูง ต้องการพื้นที่ในการทำงานที่น้อย อีกทั้งเราให้ความสำคัญกับการใช้งานจริงในภาคสนาม เนื่องจากในขณะที่ถ่ายภาพเชิงเทคนิคของงานศิลปะนั้นไม่เพียงแค่เป็นการบันทึกภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์สารสีเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการบันทึกประวัติศาสตร์อันมีคุณค่าเก็บไว้อีกด้วย การเลือกระบบมาใช้งานจึงต้องให้ความสำคัญในแง่ของการถ่ายภาพที่มีความละเอียดสูงและมีคุณภาพดีมากกว่าการถ่ายภาพมาระบุสารสีเพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าระบบนี้จะมีขนาดใหญ่และน้ำหนักเยอะแต่ยังคงสามารถติดตั้งและใช้งานได้โดยไม่เกิดปัญหา อีกทั้งการเลือกใช้เลนส์มุมกว้างนั้นหากมีกล้องกล้องใดกล้องหนึ่งเอียงเล็กน้อย ผลของความเอียงจะปรากฏให้เห็นในภาพน้อยกว่าการเลือกใช้เลนส์มุมปกติ อีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญคือการควบคุมกล้องและอุปกรณ์เสริม กล้อง Nikon D850 นั้นสามารถให้ผู้ใช้ควบคุมกล้องได้อย่างเต็มระบบซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการนำออกไปถ่ายในภาคสนาม เนื่องจากการทำงานจริงในภาคสนามนั้นเวลาที่มีนั้นมีจำกัด การปรับค่าการถ่ายภาพต่าง ๆ ต้องทำได้อย่างรวดเร็วและสามารถควบคุมการทำงานทุกอย่างของกล้องได้ อีกทั้งการเลือกระบบแนวตั้งสามารถเปลี่ยนหน่วยความจำของกล้องได้โดยที่ไม่ต้องถอดกล้องออกมาจากขาตั้งกล้องทำให้การเปลี่ยนหน่วยความจำนั้นสามารถทำได้โดยที่มั่นใจได้ว่าตำแหน่งของกล้องจะไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการพัฒนากล้องถ่ายภาพให้มีคุณภาพที่สูงขึ้นโดยที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการนำมาสร้างระบบกล้องคู่เนื่องจากได้ภาพที่มีคุณภาพสูงและจะมีความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนภาพที่ต่ำโดยสามารถนำหลักการสร้างระบบกล้องคู่จากงานนี้ไปปรับใช้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบระบบกล้องคู่แต่ละระบบ

กล้อง	**Nikon D850**				**Nikon J5**			
เลนส์	มุมกว้าง		มุมปกติ		มุมกว้าง		มุมปกติ	
ตำแหน่ง	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน
ราคา	แพง				ถูก			
ความละเอียดภาพ (ล้านพิกเซล)	45.4				20.7			
เวลาที่ใช้ประมวลผล	สูง				ต่ำ			
ความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพ	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
พื้นที่ใช้งาน	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง
การควบคุม	ดี				มีข้อจำกัด			
น้ำหนัก (กรัม)	2,835	2,631	2,665	2,461	985	781	985	781
ความเสถียรของการติดตั้ง	ดี	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
ระยะจากกล้องถึงชิ้นงาน	ใกล้มาก		ใกล้		ใกล้มาก		ใกล้	

4.2.3 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ของระบบกล้องคู่เทียบกับระบบกล้องเดี่ยวในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 ชุด ของระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่แสดงในตารางที่ 4.4 เวลาที่ตัดเวลาสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละระบบ พร้อมคำนวณความแตกต่างของเวลาแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 ชุด ของระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่

	เวลาที่ใช้ (วินาที)	
ชุดที่	**กล้องเดี่ยว**	**กล้องคู่**
1	233	142
2	204	128
3	215	129
4	202	128
5	203	140
6	199	131
7	217	130

ตารางที่ 4.5 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคของระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่ เมื่อตัดเวลาสูงสุดและต่ำสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	เวลาที่ใช้ (วินาที)	
ชุดที่	**กล้องเดี่ยว**	**กล้องคู่**
1	204	128
2	215	129
3	202	140
4	203	131
5	217	130
เฉลี่ย	208	132
เวลาที่ต่าง	76 (36.5%)	

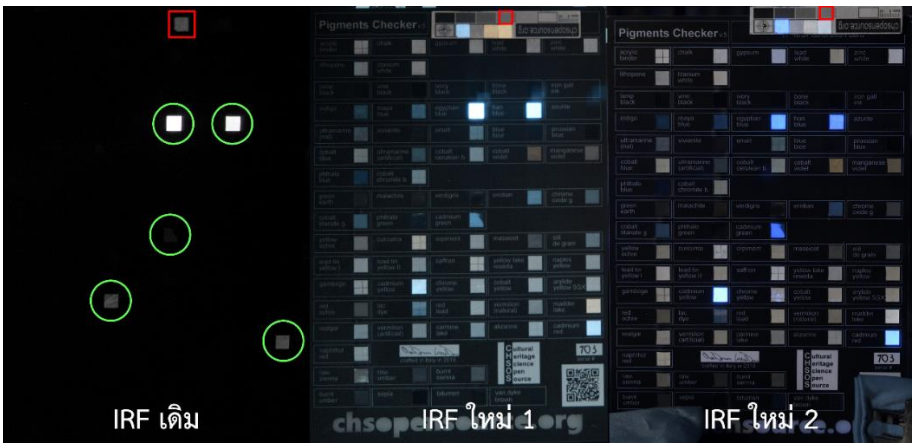
ในขณะถ่ายภาพในแต่ละชุด เวลาที่ใช้เพื่อเปลี่ยนฟิลเตอร์และแหล่งแสงนั้นได้ถูกลดด้วยการใช้กล้องคู่ ระบบกล้องคู่สามารถลดเวลาที่ต้องใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคได้ถึง 36.5% เวลาที่ลดได้นี้อาจไม่เห็นผลได้อย่างชัดเจนเมื่อถ่ายชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก แต่สำหรับงานศิลปะที่มีขนาดใหญ่ เวลาที่ลดลงนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก

การนำระบบถ่ายภาพทั้งกล้องเดี่ยวและกล้องคู่นี้ออกไปถ่ายนอกสถานที่อาจต้องใช้เวลาในการถ่ายมากกว่าเวลาที่ใช้ในการทดลองนี้ เนื่องจากการทดลองนี้ทำในห้องทดลองซึ่งผู้วิจัยมีความคุ้นชินกับตำแหน่งของแหล่งแสง ฟิลเตอร์ รวมถึงสวิตช์ไฟ และอุปกรณ์ต่อพ่วง แต่คาดว่าเวลาที่ใช้ในการถ่ายด้วยระบบกล้องคู่จะต่ำกว่าระบบกล้องเดี่ยวตามผลการทดลองที่ได้ ก่อนเริ่มบันทึกข้อมูล ผู้วิจัยได้ฝึกซ้อมการถ่ายภาพแต่ละระบบเพื่อให้การเปลี่ยนฟิลเตอร์ แหล่งแสง การควบคุมกล้องสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และไม่เกิดความผิดพลาดในขณะทดลอง เวลาที่แสดงในผลการทดลองนี้รวมเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบการโฟกัสและความสั่นไหวที่เกิดขึ้นแล้ว ในขณะทดลองถ่ายภาพด้วยระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่นั้น จากตารางที่ 3.2 การถ่ายภาพลำดับที่ 3 หรือการถ่ายเทคนิค IRF นั้นได้ปรับการโฟกัสของกล้องเป็นระบบแมนนวล เพราะภาพเทคนิค IRF นั้นมืดมากจนกล้องไม่สามารถโฟกัสได้และเมื่อถ่ายเทคนิค IRF เสร็จจึงปรับกล้องให้โฟกัสอัตโนมัติเช่นเดิม

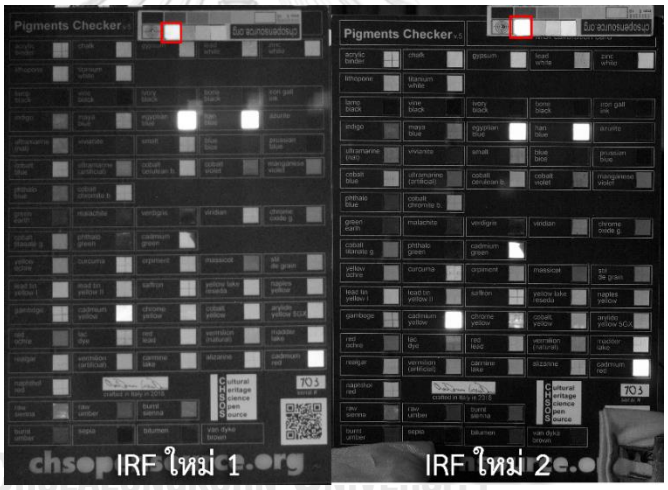
4.2.3 การปรับปรุงเพื่อลดเวลาและแก้ไขข้อจำกัดของการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว

4.2.3.1 เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่

ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว ทั้ง 3 เทคนิคแสดงในภาพที่ 4.26 หากพิจารณาภาพ IRF เดิมจะพบว่ามีจุดสว่างอยู่ 6 จุด ประกอบไปด้วยตัวอย่างแคดเมียมเรด (cadmium red) บนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card ตัวอย่างสีน้ำเงินอียิปต์ (egyptian blue) สีน้ำเงินฮาน (han blue) และสารสีกลุ่มแคดเมียมสีแดง เขียว และเหลือง ที่แสดงในวงสีเขียวในภาพ โดยที่สารสีแคมเมียมสีเขียวนั้นมีความสว่างน้อยมาก สารสีทั้ง 5 ชนิดนี้เป็นสารสีที่สามารถตรวจพบได้ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว ดังนั้นหากต้องการคิดค้นวิธีใหม่ วิธีใหม่ต้องสามารถตรวจพบสารสีทั้ง 5 ชนิดนี้ด้วย จึงจะสามารถนำมาใช้แทนเทคนิคแบบเดิมได้

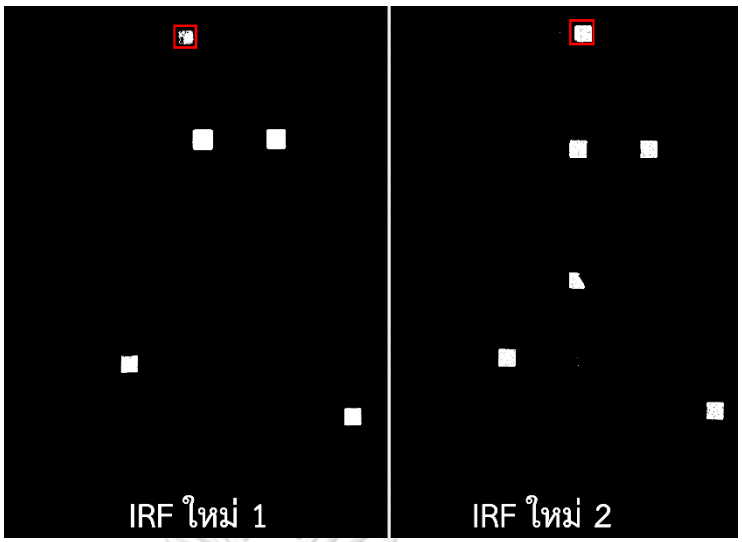


ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบเดิม (ซ้าย) แบบใหม่ 1 (กลาง) และแบบใหม่ 2 (ขวา) กรอบสีแดงแสดงตำแหน่งที่กำหนดสมดุลขาว กรอบสีเขียวแสดงสารสีที่สามารถตรวจพบได้ด้วยเทคนิคนี้



ภาพที่ 4.27 ภาพช่องสัญญาณสีน้ำเงินของภาพแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ที่ถ่ายด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 1 (ซ้าย) และแบบใหม่ 2 (ขวา) กรอบสีแดงแสดงตำแหน่งของตัวอย่างแคดเมียมเรด (cadmium red)

จากภาพที่ 4.26 หากเรากำหนดสมดุลขาวและปรับความสว่างที่ตำแหน่งตัวอย่างแคดเมียมเรดไว้ที่ประมาณ 100 สำหรับภาพถ่ายเทคนิคใหม่ทั้ง 2 เมื่อสกัดข้อมูลช่องสัญญาณสีน้ำเงินออกมา (แสดงในภาพที่ 4.27) จะได้ค่าความสว่างของตัวอย่างแคดเมียมเรดประมาณ 240 และ 254 สำหรับภาพเทคนิคใหม่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อแปลงภาพเป็นภาพไบนารีด้วยขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นความสว่างของตัวอย่างแคดเมียมเรด แสดงในภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 ภาพไบนารีของช่องสัญญาณสีน้ำเงินแผ่นทดสอบ pigment checker v.5 ที่ถ่ายด้วยเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 1 (ซ้าย) และแบบใหม่ 2 (ขวา) กรอบสีแดงแสดงตำแหน่งของตัวอย่างแคดเมียมเรด (cadmium red)

จากภาพ 4.28 พบว่าเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ 2 นั้นสามารถตรวจพบตำแหน่งของสารสีที่มีสมบัตินี้ได้เช่นเดียวกันกับเทคนิคเดิม ในขณะที่เทคนิคแบบใหม่ 1 นั้นตรวจพบได้เพียง 4 ชนิด ซึ่งเทคนิคใหม่นี้สามารถแก้ไขปัญหาความเข้มแสงของแหล่งแสงเดิมที่ใช้ที่ต้องเข้าใกล้ตัวชิ้นงานมาก จนทำให้ในหลายสถานการณ์ไม่สามารถถ่ายภาพเทคนิคนี้ได้ เนื่องจากเทคนิคเดิมนั้นแหล่งแสงที่ใช้คือไฟแอลอีดีขาว CHSOS – Alice ที่เป็นแอลอีดีขาวปกติที่ติดตั้งฟิลเตอร์ X-Nite CC1 ซึ่งเป็นฟิลเตอร์ที่ตัดรังสีอินฟราเรด เนื่องจากไฟแอลอีดีโดยส่วนใหญ่แล้วใช้วัสดุกลุ่มฟอสฟอเป็นสารเรืองแสง ซึ่งมักจะมีพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 700-800 นาโนเมตร ซึ่งจะมารบกวนการถ่ายภาพในย่านอินฟราเรด เทคนิคใหม่นี้ใช้ไฟแลออีดีขาวที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปในท้องตลาดจึงทำให้ตัวเลือกการใช้แหล่งแสงนั้นมีมากขึ้น แต่ต้องใช้ร่วมกับไฟแอลอีดียูวีที่ต้องใช้สำหรับการถ่ายภาพในเทคนิคการถ่ายภาพการสะท้อนรังสียูวีและการฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยยูวี อีกทั้งในเทคนิคใหม่นี้ได้เปลี่ยนมาใช้ฟิลเตอร์อินฟราเรดที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดตั้งแต่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตร ผ่าน ซึ่งเป็นฟิลเตอร์อินฟราเรดที่สามารถหาได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีหลายเกรดให้เลือกใช้ อีกประโยชน์ของการถ่ายภาพด้วยเทคนิคใหม่นี้คือ ภาพที่ได้มีคามสว่างเพียงพอที่จะใช้สำหรับการซ้อนภาพแบบอัตโนมัติ ซึ่งภาพถ่ายด้วยเทคนิคเดิมนั้นมืดมากจนไม่สามารถซ้อนภาพด้วยระบบอัตโนมัติได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.3.1 การลดเวลา

เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 ชุด ของระบบกล้องคู่เดิมและกล้องคู่ใหม่ แสดงในตารางที่ 4.6 เวลาที่ตัดเวลาสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละระบบ พร้อมคำนวณความแตกต่างของเวลาแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้ง 7 ชุด ของระบบกล้องคู่เดิมและกล้องคู่ใหม่

	เวลาที่ใช้ (วินาที)	
ชุดที่	**กล้องคู่เดิม**	**กล้องคู่ใหม่**
1	142	112
2	128	114
3	129	99
4	128	111
5	140	111
6	131	128
7	130	104

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคของระบบกล้องเดี่ยว กล้องคู่เดิมและกล้องคู่ใหม่ เมื่อตัดเวลาสูงสุดและต่ำสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	เวลาที่ใช้ (วินาที)		
ชุดที่	**กล้องเดี่ยว**	**กล้องคู่**	**กล้องคู่ใหม่**
1	**204**	**128**	**104**
2	**215**	**129**	**111**
3	**202**	**140**	**111**
4	**203**	**131**	**112**
5	**217**	**130**	**114**
เฉลี่ย	**208**	**132**	**110**
เวลาที่ต่างจกระบบกล้องเดี่ยว		76 (36.5 %)	98 (47.1 %)

การเปลี่ยนอุปกรณ์บางส่วน การจัดลำดับการถ่าย รวมถึงการใช้เทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ สามารถลดเวลาที่ใช้ใน

การถ่ายได้ถึง 47.1 % เมื่อเทียบกับระบบกล้องเดี่ยวแบบเดิม ถึงแม้จำนวนลำดับที่ใช้ในการถ่ายของระบบกล้องคู่ใหม่นั้น เท่ากันกับระบบกล้องคู่เดิม แต่การเปลี่ยนอุปกรณ์และการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ สามารถทำให้สามารถถ่ายภาพในลำดับที่ 1 ที่ต้องใช้ความเร็วชัตเตอร์ช้า สามารถถ่ายพร้อมกันได้โดยที่ไม่มีการรบกวนกันของแหล่งแสง ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการถ่ายนั้นต่ำลง ซึ่งระบบกล้องคู่ใหม่นั้นใช้เวลาในการถ่ายน้อยกว่าระบบกล้องคู่เดิม 10.6 %

4.3 การทดสอบระบุสารสี

ระบบกล้องเดี่ยวที่ใช้นั้นใช้กล้อง Nikon D850 และเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร ซึ่งตรงกันกับระบบกล้องคู่ที่ได้จากผลการทดลองข้อที่ 4.2.5.1 โดยได้ถ่ายภาพตัวอย่างภาพวาดที่รู้ชนิดสารสีพร้อมกับแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card แปลงไฟล์ภาพด้วยวิธีในข้อที่ 3.2.1.1 โดยแปลงเป็นไฟล์ TIFF 8 บิต กำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card ดังแสงในตารางที่ 4.8 สำหรับภายถ่ายเทคนิค IRT เนื่องจากแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card นั้นทึบแสง จึงชดเชยความสว่างให้ความสว่างสูงสุดบนภาพวาดอยู่ที่ประมาณ 200 จากนั้นนำภาพเทคนิค VIS และ IR มาสร้างภาพ IRFC หรือภาพอินฟราเรดแบบสีเทียม ภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ด้วยระบบกล้องเดี่ยว แสดงในภาพที่ 4.29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งที่กำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card สำหรับการแปลงภาพเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องเดี่ยว

เทคนิค	**ตัวอย่างบนแผ่น TP and MSI calibration card**	**ค่าความสว่าง**
VIS	N8	200
UVR	N8	150
UVF	N8	150
IRF	แคดเมียมเรด	70
IR	N8	150
RAK	N8	200

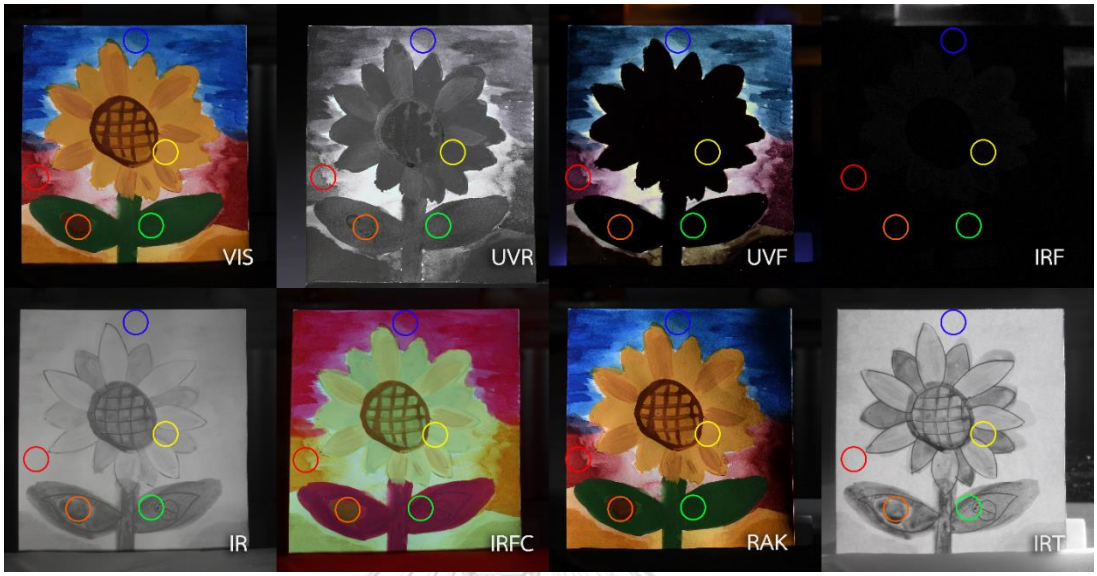
ภาพที่ 4.29 ภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของภาพวาดด้วยระบบกล้องเดี่ยว

หากพิจารณาภาพถ่ายเทคนิค IR และ IRT พบว่าเห็นรอยร่างของดินสอที่อยู่ใต้ชั้นสีและด้วยวัสดุที่ใช้วาดภาพนั้นเป็นกระดาษการ์ด ซึ่งมีความโปร่งแสงทำให้ภาพถ่ายเทคนิค IRT นั้นเห็นถึงรอยร่างที่ชัดเจนมากและบริเวณด้านซ้าย ขวา และบนของดอกไม้ ไม่พบความแตกต่างของสีแดงและน้ำเงินที่ระบาย กระดาษที่ใช้ในการวาดภาพนี้มีองค์ประกอบของสารเพิ่มความสว่าง (optical brightening agent, OBA) ทำให้เห็นการวาวแสงในพื้นที่ที่ไม่ได้ระบายสีในภาพเทคนิค UVF แต่จะเห็นได้ว่าบริเวณด้านซ้าย ขวา และบนของดอกไม้ จะปรากฏสีน้ำเงินและสีแดงในภาพ ซึ่งสีนี้เกิดจากการที่กระดาษวาวแสงและผ่านชั้นสีออกมา ไม่ได้เป็นการวาวแสงของสารสี เมื่อพิจารณาภาพถ่ายเทคนิค RAK เนื่องจากสีที่ใช้เป็นสีน้ำที่มีความหนาของชั้นสีค่อนข้างน้อย จึงไม่เห็นถึงฝีแปรงที่ชัดเจน แต่สามารถเห็นถึงรูฟองอากาศที่เกิดบนชั้นสีในบริเวณกลีบดอกไม้ด้านล่างและเห็นเงาทางด้านขวาของภาพที่เกิดจากการงอของกระดาษเมื่อสีแห้ง

ทดสอบระบุสารสีทั้ง 5 ด้วยวิธีแผนผังจำแนก โดยระบุในตำแหน่งวงกลมที่แสดงในภาพที่ 4.30 มีรายละเอียดดังนี้

- สารสีสีแดง ระบุโดยใช้พื้นที่ในวงกลมแดง
- สารสีสีเขียว ระบุโดยใช้พื้นที่ในวงกลมเขียว
- สารสีสีเหลือง ระบุโดยใช้พื้นที่ในวงกลมเขียว
- สารสีสีน้ำเงิน ระบุโดยใช้พื้นที่ในวงกลมน้ำเงิน
- สารสีสีน้ำตาล ระบุโดยใช้พื้นที่ในวงกลมน้ำตาล

การระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนกมีลำดับดังนี้ VIS UVR UVF IRF IR และ IRCF ซึ่งในบางสีอาจข้ามการวิเคราะห์ในบางเทคนิค ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.9



ภาพที่ 4.30 พื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนกจากระบบกล้องเดี่ยว วงกลมแต่ละสีแสดงพื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีสีนั้น

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ในภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องเดี่ยว

ลำดับ	เทคนิค	สารสี				
		เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	แดง	น้ำตาล
1	VIS	เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	แดง	น้ำตาล
2	UVR	มืด	-	มืด	มืด	มืด
3	UVF	-	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ
4	IRF	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
5	IR	สว่าง	สว่าง	สว่าง	สว่าง	มืด
6	IRFC	แดง	เหลืองอมเขียว	แดง	เหลือง	-

สี	สารสีที่เป็นไปได้
เขียว	Chrome Green, Phthalo green
เหลือง	Cobalt yellow, Orpiment, Lead tin yellow I, Lead tin yellow II, Gamboge, Yellow Ochre

น้ำเงิน	Maya Blue, Indigo, Phthalo blue
แดง	Realgar, Alizarin, Red lead, Vermilion
น้ำตาล	Red Ochre

จากผลการระบุในตารางที่ 4.9 ระบบกล้องเดี่ยวสามารถระบุกลุ่มของสารสีที่มีสารสีที่ใช้จริงอยู่ได้ทุกสี โดยชื่อสารสีที่ขีดเส้นใต้คือสารสีที่ใช้จริง

สำหรับระบบกล้องคู่ หลังจากถ่ายภาพเสร็จแปลงไฟล์ดิบเป็นไฟล์ภาพ TIFF 8 บิตด้วยวิธีในข้อที่ 3.2.1.1 โดยกำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card ดังแสงในตารางที่ 4.10 สำหรับภาพเทคนิค IRT ชดเชยความสว่างให้ความสว่างสูงสุดบนภาพวาดอยู่ที่ประมาณ 200 สำหรับการสร้างภาพไบนารีของภาพเทคนิค IRF แบบใหม่นั้นมีค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ 253 ภาพที่ได้แสดงในภาพที่ 4.31

ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งที่กำหนดสมดุลขาวและชดเชยความสว่างที่ตำแหน่งบนแผ่นทดสอบ TP and MSI calibration card สำหรับการแปลงภาพเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องคู่

เทคนิค	**ตัวอย่างบนแผ่น TP and MSI calibration card**	**ค่าความสว่าง**
VIS	N8	200
UVR	N8	150
UVF	N8	150
IRF	N8	100
IR	N8	150
RAK	N8	200

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อพิจารณาภาพถ่าย IR และ IRT พบว่าเห็นรอยร่างดินสอเช่นเดียวกันกับระบบกล้องเดี่ยว แต่ในภาพ IR จะเห็นความแตกต่างของความสว่างในพื้นที่สารสีแดงและสีน้ำเงินบริเวณรอบดอกไม้ ภาพในเทคนิค IRFC นั้นมีสีที่ต่างออกไปจากระบบกล้องเดี่ยว เพราะข้อมูลในช่องสัญญาณสีแดงของภาพ IR นั้นไม่เหมือนกัน จากนั้นทดสอบระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนก โดยมีลำดับและพื้นที่การระบุสารสีเช่นเดียวกันกับระบบกล้องเดี่ยว พื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีแสดงในภาพที่ 4.32 และได้ผลการระบุสารสีดังตารางที่ 4.11

ภาพที่ 4.31 ภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของภาพวาดด้วยระบบกล้องคู่

ภาพที่ 4.32 พื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีด้วยวิธีแผนผังจำแนกจากระบบกล้องคู่ วงกลมแต่ละสีแสดงพื้นที่ที่ใช้ในการระบุสารสีสีนั้น

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ในภาพถ่ายเทคนิคต่าง ๆ ของระบบกล้องคู่

ลำดับ	เทคนิค	สารสี				
		เขียว	**เหลือง**	**น้ำเงิน**	**แดง**	**น้ำตาล**
1	**VIS**	เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	แดง	น้ำตาล
2	**UVR**	มืด	-	มืด	มืด	มืด
3	**UVF**	-	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ
4	**IRF**	ไม่พบ	-	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
5	**IR**	มืด	สว่าง	สว่าง	สว่าง	มืด
6	**IRFC**	ม่วง	เขียวอมเหลือง	แดงอมม่วง	เหลืองอมเขียว	-

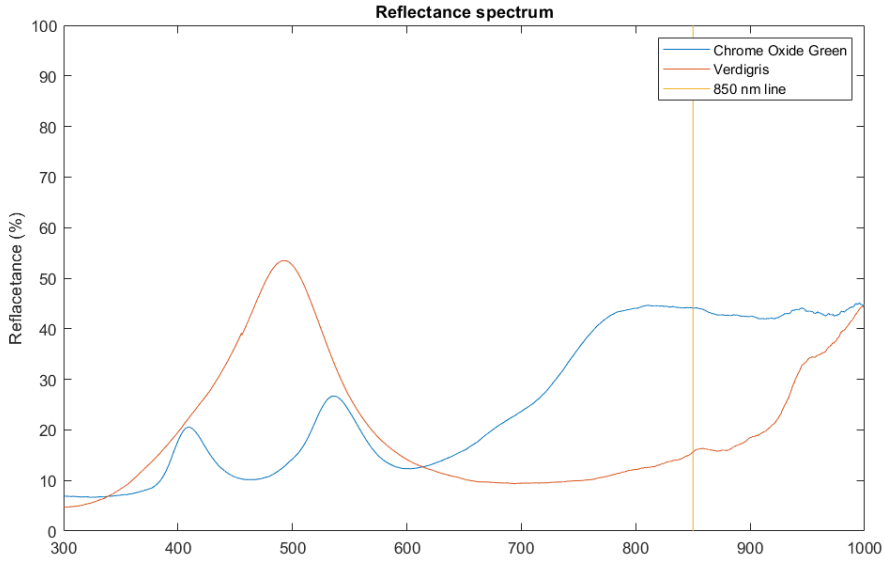
สี	**สารสีที่เป็นไปได้**
เขียว	Verdigris
เหลือง	Cobalt yellow, Orpiment, Lead tin yellow I, Lead tin yellow II, Gamboge, Yellow Ochre
น้ำเงิน	Maya Blue, Indigo, Phthalo blue
แดง	Realgar, Alizarin, Red lead, Vermilion
น้ำตาล	Red Ochre

จากผลการระบุในตารางที่ 4.11 ระบบกล้องคู่สามารถระบุกลุ่มของสารสีที่มีสารสีที่ใช้จริงอยู่ได้ 4 ใน 5 ชนิด โดยชื่อสารสีที่ขีดเส้นใต้คือสารสีที่ใช้จริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับสารสีที่ไม่สามารถตรวจพบได้ในระบบกล้องคู่คือ chrome green ซึ่งหากพิจารณาผลการวิเคราะห์พบว่าความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ระหว่างระบบกล้องเดี่ยวและกล้องคู่นั้นต่างกันที่ภาพ IR ซึ่งในระบบกล้องเดี่ยวสามารถระบุได้ว่า สว่าง แต่กล้องคู่ระบุได้ว่า มืด วิธีการระบุสารสีด้วยแผนผังจำแนกนั้นการระบุ มืด หรือสว่างนี้จะแบ่งกันที่ค่าความสว่าง 100 ถ้าพื้นที่นั้นมีค่าความสว่างมากกว่า 100 จะได้ผลคือ สว่าง และถ้าความสว่างในบริเวณนั้นต่ำกว่า 100 จะได้ผลคือมืด ดังนั้นผลการระบุสารสีสีเขียวของระบบกล้องคู่จึงเป็นสารสี verdigris ซึ่งหากพิจารณาค่าการสะท้อนแสงในช่วงรังสีอินฟราเรดจากฐานข้อมูล CHSOS [18] ของสารสี chrome green และ verdigris ในภาพที่ 4.31 พบว่าภาพเทคนิค IR ของระบบกล้องคู่นั้นใช้แหล่งแสงเป็นไฟฮาโลเจน ซึ่งให้พลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรดครอบคลุมช่วง 700 – 1,000 นาโนเมตร ภาพที่ได้จึงเป็นภาพที่มาจากการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสารสีตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 700 – 1,000 ซึ่งต่างจากระบบ

กล้องคู่ที่ใช้แหล่งแสงเป็นแอลอีดีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร ภาพเทคนิค IR จากระบบกล้องคู่นั้น จึงมาจากการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสารสีในช่วงความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรเท่านั้น ภาพที่ได้จึงมีความสว่างน้อยกว่าและถูกระบุผลการวิเคราะห์เป็นมืด ซึ่งตรงกันกับการระบุสารสี verdigris ด้วยระบบกล้องเดี่ยวที่มีการสะท้อนรังสีอินฟราเรดน้อยกว่าสารสี chrome green ดังนั้นจึงต้องสร้างฐานข้อมูลและแผนผังใหม่สำหรับการใช้ระบบกล้องคู่ที่ใช้แหล่งแสงแอลอีดีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร ในการระบุสารสี



ภาพที่ 4.33 ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละความยาวคลื่นของสารสี chrome green (เส้นสีฟ้า) และ verdigris (เส้นสีเขียว) เส้นสีเหลืองแสดงตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 850 นาโนเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 สร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่

โปรแกรมประมวลผลภาพแบบอัตโนมัติได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้สะดวกในการนำเทคนิคการถ่ายภาพแบบกล้องคู่ไปใช้งานในอนาคต โดยมีส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 4.32 และรายละเอียดตามหมายเลขในภาพดังนี้

1 – ปุ่มสำหรับเลือกแฟ้มที่เก็บไฟล์ภาพ TIFF

2 – แสดงที่อยู่ของแฟ้มที่เลือก

3 – ปุ่มสำหรับการประมวลผลภาพ (แก้ไขขอบมืด แก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์ ซ้อนภาพสร้างภาพอินฟราเรดแบบสีเทียม)

4 – แสดงภาพถ่ายถ่ายเชิงเทคนิคที่ซ้อนภาพแล้วทั้ง 8 เทคนิค

5 - แสดงสถานการณ์ทำงาน

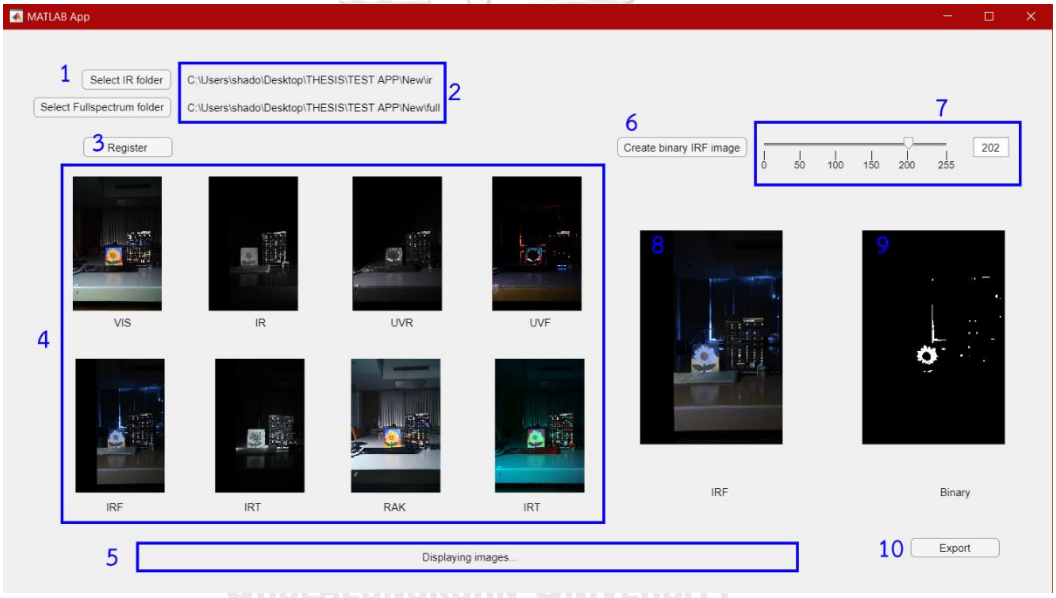
6 - ปุ่มสำหรับการเริ่มแปลงภาพไบนารี

7 – แถบปรับค่าขีดเริ่มเปลี่ยนสำหรับการแปลงภาพไบนารี

8 – พื้นที่แสดงภาพถ่ายเทคนิค IRF

9 - พื้นที่แสดงภาพไบนารี

10 - ปุ่มสำหรับส่งออกภาพ



ภาพที่ 4.34 โปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่

ภาพที่ส่งออกแล้วสามารถนำไปเทียบกับแผนผังระบุสารสีเพื่อระบุชนิดของสารสี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของกล้อง Nikon D850 และ Nikon J5 โดยกล้อง Nikon D850 มีประสิทธิภาพในแง่ของความละเอียดภาพที่สูงกว่าและมีสัญญาณรบกวนในภาพส่วนมืดที่ต่ำกว่ากล้อง Nikon J5 เมื่อทดสอบเลนส์ Nikon 24 และ 50 มิลลิเมตร บนกล้อง Nikon D850 และเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 และ 18 มิลลิเมตร บนกล้อง Nikon J5 ในหัวข้อความคมชัดพบว่าเลนส์ Nikon 24 และ 50 มิลลิเมตรนั้นมีความคมชัดสูงกว่าเลนส์ NIKKOR VR 10-30 มิลลิเมตร และเลนส์ทั้ง 3 เมื่อติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรดแล้วมีความคมชัดลดลง สำหรับความบิดเบี้ยวของเลนส์นั้นเลนส์มุมกว้างทั้ง 2 มีความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลาง เลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร นั้นมีความบิดเบี้ยวของเลนส์ที่ไม่สม่ำเสมอโดยมีความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางที่บริเวณกลางภาพและมีความบิดเบี้ยวแบบคอดกลางที่บริเวณขอบภาพซึ่งต่างจากเลนส์ NIKKOR VR 10-30 ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร ที่เกิดความบิดเบี้ยวแบบคอดกลางอย่างสม่ำเสมอ เมื่อติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรดความบิดเบี้ยวของเลนส์มีแนวโน้มเกิดความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลางมากขึ้นหรือเกิดความบิดเบี้ยวแบบคอดกลางที่ลดลง แต่เลนส์ NIKKOR VR 10-30 ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร มีความบิดเบี้ยวของเลนส์เมื่อติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรดใกล้เคียงกับบนกล้องปกติ ซึ่งความบิดเบี้ยวของเลนส์สามารถแก้ไขได้ด้วยโมเดลของบราวน์-คอนราดี้ สำหรับปัญหาขอบมืดของเลนส์เลนส์ทุกรุ่นมีขอบมืดและมีมากขึ้นเมื่อติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด ยกเว้นเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร ที่มีขอบมืดน้อยบนกล้องปกติแต่หากติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรดแล้วจะพบจุดสว่างบริเวณกลางภาพ ขอบมืดที่พบและจุดสว่างสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตารางค้นหา

ระบบกล้องคู่ที่สร้างด้วยกล้องและเลนส์ข้างต้นทั้ง 8 ระบบนั้นเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพพบว่าระบบแนวตั้งนั้นมีแนวโน้มที่จะมีความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพต่ำกว่าระบบแนวนอนเนื่องจากเซ็นเซอร์ที่ใกล้กัน เมื่อกำหนดพื้นที่ใช้งานของระบบทั้ง 8 โดยเผื่อระยะสำหรับการหมุนภาพและแก้ไขความบิดเบี้ยวของเลนส์พบว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon J5 นั้นมีสัดส่วนของพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมดที่มากกว่ากล้อง Nikon D850 เนื่องจากระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ที่ใกล้กันทำให้พื้นที่ที่ภาพซ้อนทับกันนั้นมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบระบบแนวตั้งกับแนวนอนพบว่าระบบแนวนอนนั้นมีพื้นที่ใช้งานมากกว่าระบบแนวตั้ง ถึงแม้ว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon D850

นั้นมีสัดส่วนพื้นที่ใช้งานต่อพื้นที่ภาพทั้งหมดน้อยกว่าระบบที่ใช้กล้อง Nikon J5 แต่ด้วยความละเอียดของภาพที่สูงจึงทำให้ความละเอียดของพื้นที่ใช้งานนั้นสูงกว่า ตารางสรุปสำหรับเปรียบเทียบระบบแต่ละระบบแสดงในตารางที่ 5.1 และได้ระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานคือระบบกล้องคู่แบบแนวตั้ง ที่ใช้กล้อง Nikon D850 เลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร เนื่องจากให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพที่ต่ำ มีคุณภาพของภาพสูง ใช้พื้นที่ทำงานน้อย และควบคุมกล้องได้เต็มระบบ

อีกทั้งในงานวิจัยได้ปรับปรุงระบบกล้องคู่โดยใช้กล้องดัดแปลงที่ถอดฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงขาวผ่านจำนวน 2 กล้อง มาใช้ในระบบกล้องคู่และเปลี่ยนแหล่งแสงอินฟราเรดมาใช้แอลอีดีที่ให้พลังงานที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร โดยเมื่อใช้ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาวแบบใหม่ที่ช่วยแก้ปัญหาความเข้มแสงไม่พอของเทคนิคเดิมจะสามารถลดเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพเชิงเทคนิคได้ถึง 47.1% เมื่อเทียบกับระบบกล้องเดี่ยว เมื่อนำระบบนี้ไปทดสอบระบุสารสีด้วยแผนผังจำแนกพบว่าสามารถระบุสารสีได้ 4 จาก 5 ชนิด เนื่องจากแหล่งแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพอินฟราเรดมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเทคนิคเดิม จึงทำให้ภาพอินฟราเรดที่ได้นั้นมีความแตกต่างจากเทคนิคเดิมที่ใช้กับการระบุสารสีด้วยแผนผังจำแนก จึงต้องสร้างฐานข้อมูลใหม่สำหรับการถ่ายภาพด้วยระบบกล้องคู่แบบใหม่นี้ อีกทั้งได้สร้างซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพจากระบบกล้องคู่แบบอัตโนมัติที่จะช่วยแก้ไขความบิดเบี้ยวและขอบมืดของเลนส์ ซ้อนภาพทั้งหมด สร้างภาพอินฟราเรดแบบสีเทียมและภาพไบนารีสำหรับเทคนิคถ่ายภาพการฟลูออเรสเซนซ์รังสีอินฟราเรดเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงขาว และส่งออกภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรสร้างฐานข้อมูลและทำแผนผังจำแนกสำหรับการระบุสารสีด้วยภาพถ่ายเชิงเทคนิคด้วยระบบกล้องคู่

5.2.2 โปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่ที่สร้างขึ้นนั้นใช้ภาษา MATLAB ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลนานและต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง ดังนั้นควรสร้างโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพระบบกล้องคู่ด้วยภาษาอื่นที่มีความรวดเร็ว

ตารางที่ 5.1 สรุปผลแต่ละระบบ

กล้อง	Nikon D850				Nikon J5			
เลนส์	มุมกว้าง		มุมปกติ		มุมกว้าง		มุมปกติ	
ตำแหน่ง	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน	แนวตั้ง	แนวนอน
ราคา (บาท)	124,900 (พ.ศ. 2560)				21,990 (พ.ศ. 2558)			
ความละเอียดภาพ (ล้านพิกเซล)	45.4				20.7			
เวลาที่ใช้แปลงไฟล์ RAW เป็นไฟล์ TIFF จำนวน 10 ภาพ (วินาที)	134				40			
ความคลาดเคลื่อนของการซ้อนภาพเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	0.441	0.505	0.852	0.76	0.578	1.046	0.298	0.605
สัดส่วนพื้นที่ใช้งาน (%)	60.1	67.2	56.9	66.2	71.1	71.9	67.7	71.7
การควบคุมกล้อง	ควบคุมได้เต็มระบบ				มีข้อจำกัด			
น้ำหนักโดยประมาณ (กรัม)	2,835	2,631	2,665	2,461	985	781	985	781
ความเสถียรของการติดตั้ง	ดี	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
ระยะจากกล้องถึงชิ้นงาน (เมตร)	1		1.6		1		1.6	

CHULALONGKORN UNIVERSITY จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

1. Cosentino, A., et al., *Panoramic multispectral imaging: training and case studies.* Belgian Association of conservators Bulletin, 2nd Trimester, 2014: p. 7-11.
2. Thoury, M., et al., *Near-Infrared Luminescence of Cadmium Pigments: In situ Identification and Mapping in Paintings.* Applied Spectroscopy, 2011. **65**(8): p. 939-951.
3. Amigo, J.M., *Hyperspectral and multispectral imaging: Setting the scene*, in *Data Handling in Science and Technology*. 2020, Elsevier. p. 3-16.
4. Liang, H., *Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation.* Applied Physics A, 2012. **106**(2): p. 309-323.
5. Lewis, J. *Fast normalized cross-correlation, 1995*. in *Vision Interface*. 2010.
6. Panchal, P., S. Panchal, and S. Shah, *A comparison of SIFT and SURF.* International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 2013. **1**(2): p. 323-327.
7. Stankiewicz, O., G. Lafruit, and M. DombDski. *Multiview Video: Acquisition, Processing, Compression and Virtual View Rendering*. 2017.
8. Allen, E. and E. Bilissi, *Chapter 14 - Digital cameras and scanners*, in *The Manual of Photography (Tenth Edition)*, E. Allen and S. Triantaphillidou, Editors. 2011, Focal Press: Oxford. p. 263-288.
9. Triantaphillidou, S. and E. Allen, *Chapter 17 - Digital image file formats*, in *The Manual of Photography (Tenth Edition)*, E. Allen and S. Triantaphillidou, Editors. 2011, Focal Press: Oxford. p. 315-328.
10. Triantaphillidou, S., *Chapter 21 - Tone reproduction*, in *The Manual of Photography (Tenth Edition)*, E. Allen and S. Triantaphillidou, Editors. 2011, Focal Press: Oxford. p. 377-392.
11. Burns, P.D. *Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis*. in *Is and Ts Pics Conference*. 2000. SOCIETY FOR IMAGING SCIENCE & TECHNOLOGY.
12. Moeslund, T.B., *BLOB Analysis*, in *Introduction to Video and Image Processing: Building Real Systems and Applications*. 2012, Springer London: London. p. 103-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

115.

13. Emery, W. and A. Camps, *Chapter 3 - Optical Imaging Systems*, in *Introduction to Satellite Remote Sensing*, W. Emery and A. Camps, Editors. 2017, Elsevier. p. 85-130.
14. Cai, C., X. Ding, and H. Zhu. *Registration of Infrared and Visible Image Based on OpenCV*. in *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2018. IEEE.
15. Cosentino, A., *Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method.* Heritage Science, 2014. **2**(1): p. 1-12.
16. Kelcey, J. and A. Lucieer, *Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing.* Remote sensing, 2012. **4**(5): p. 1462-1493.
17. Zhang, Z., *A flexible new technique for camera calibration.* IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000. **22**(11): p. 1330-1334.
18. Cosentino, A., *Reflectance Spectroscopy (200-1000 nm) (GorgiasUV) Pigments-Checker Database*. Cultural Heritage Science Open Source

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

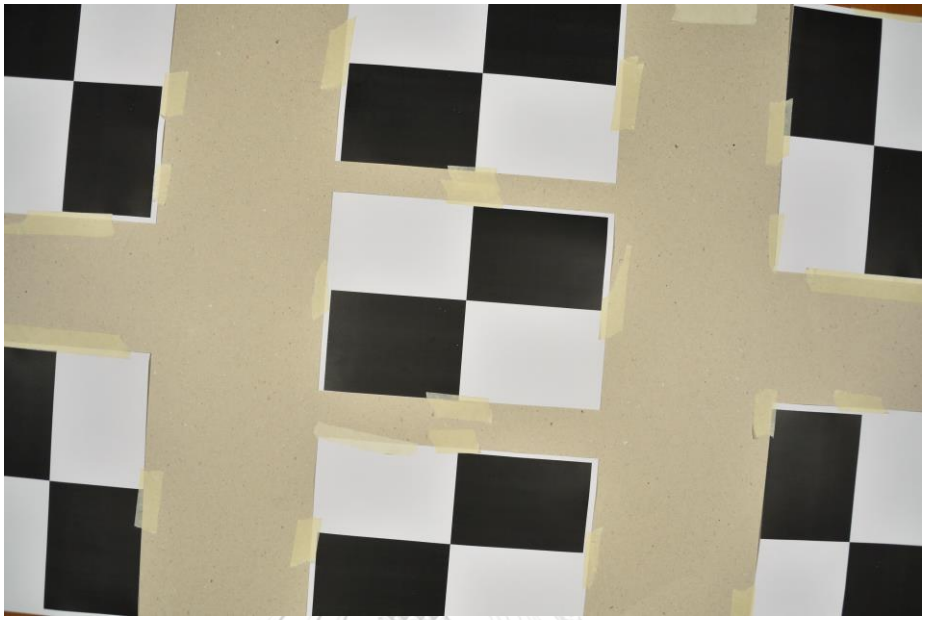
ภาพที่ใช้ทดสอบหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง

ภาพที่ ก.1 ภาพที่ใช้ทดสอบหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง Nikon D850

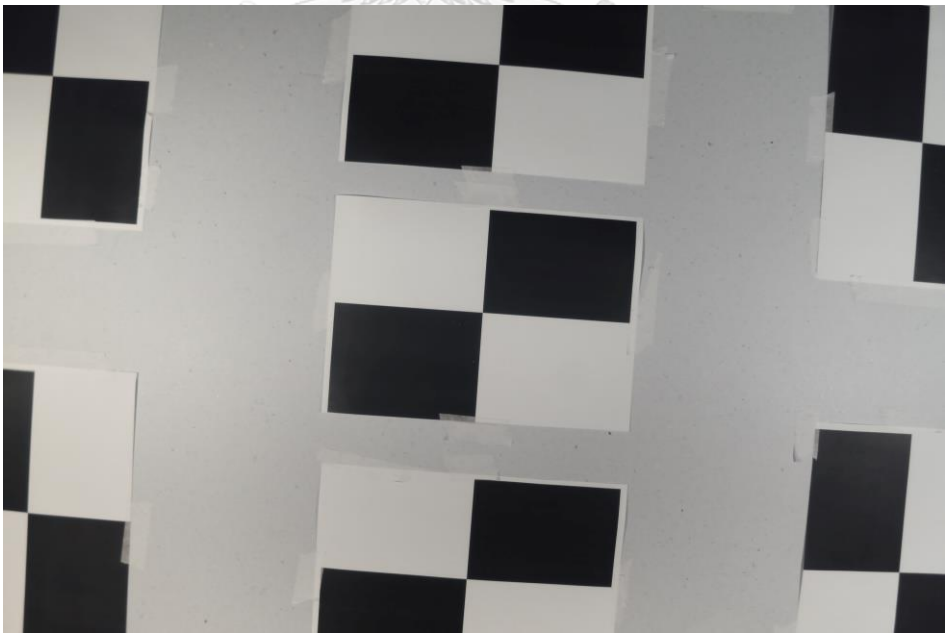
ภาพที่ ก.2 ภาพที่ใช้ทดสอบหาอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของกล้อง Nikon J5

ภาคผนวก ข

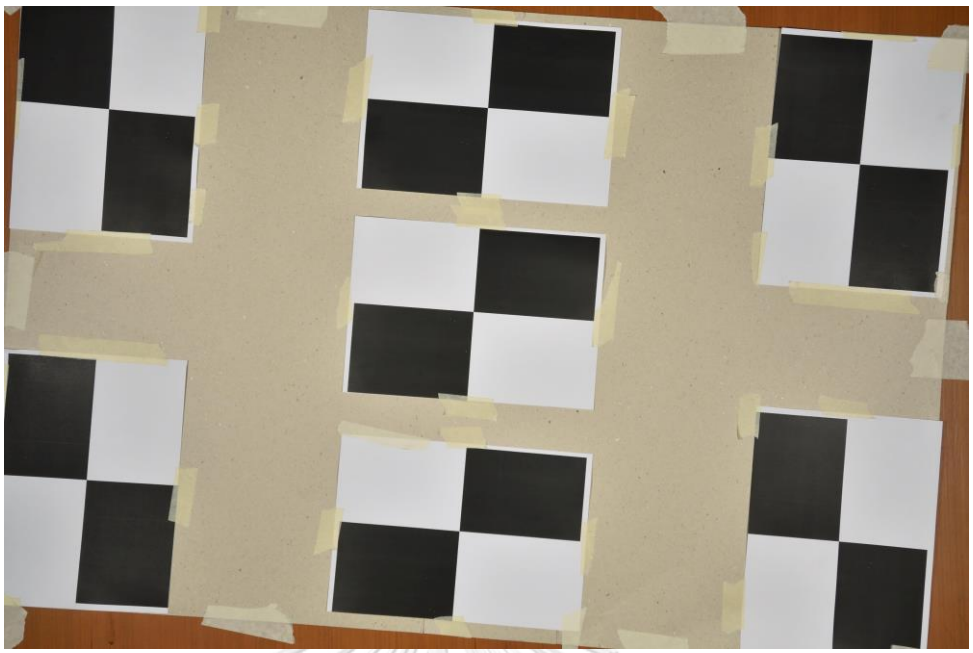
ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียง



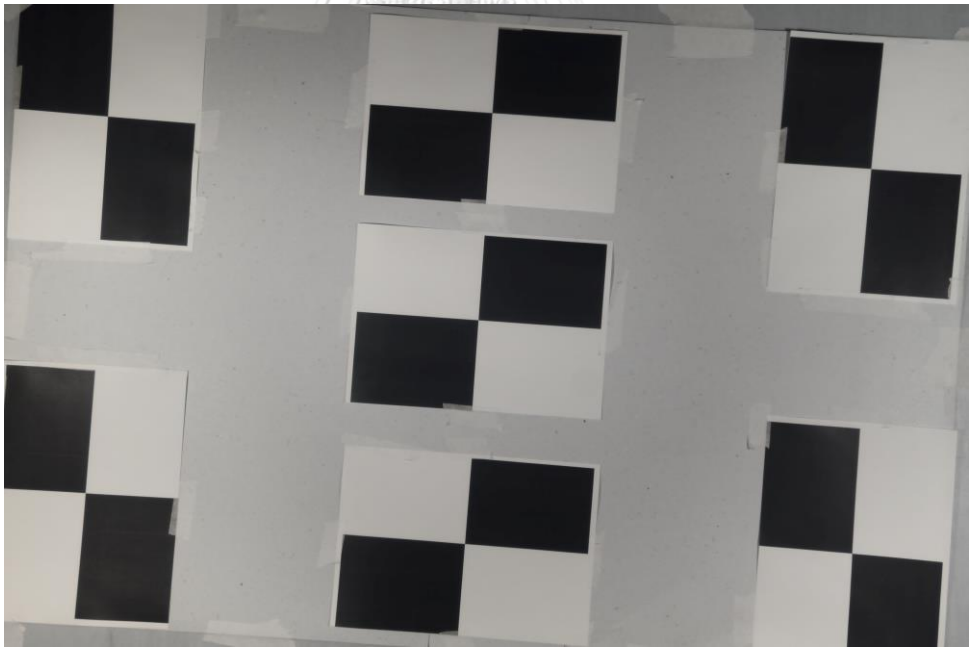
ภาพที่ ข.1 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องปกติรุ่น Nikon J5 และเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตรที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร



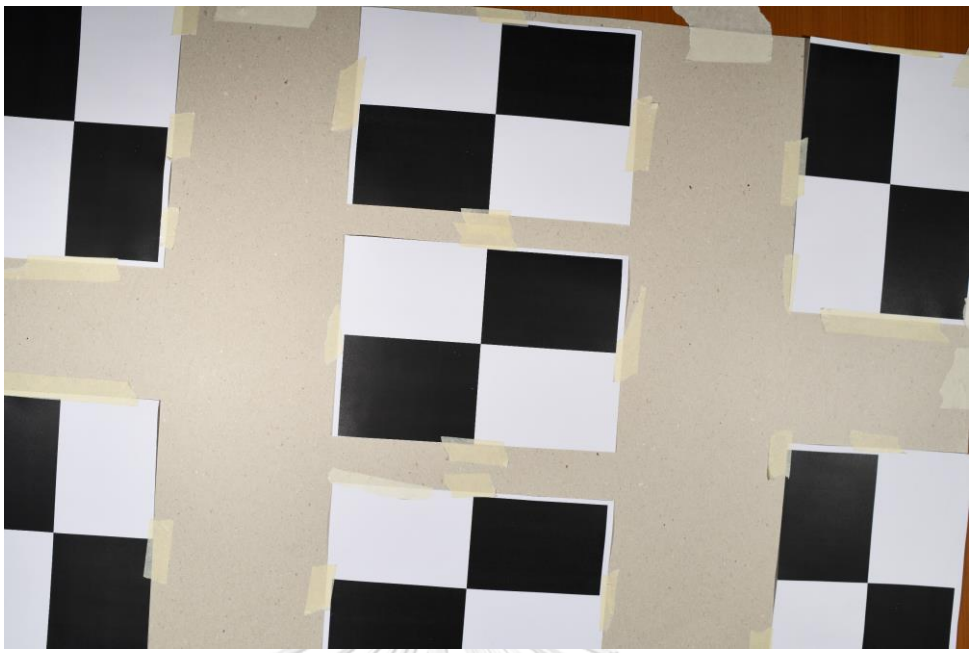
ภาพที่ ข.2 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องดัดแปลงใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรดรุ่น Nikon J5 และเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตรที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร



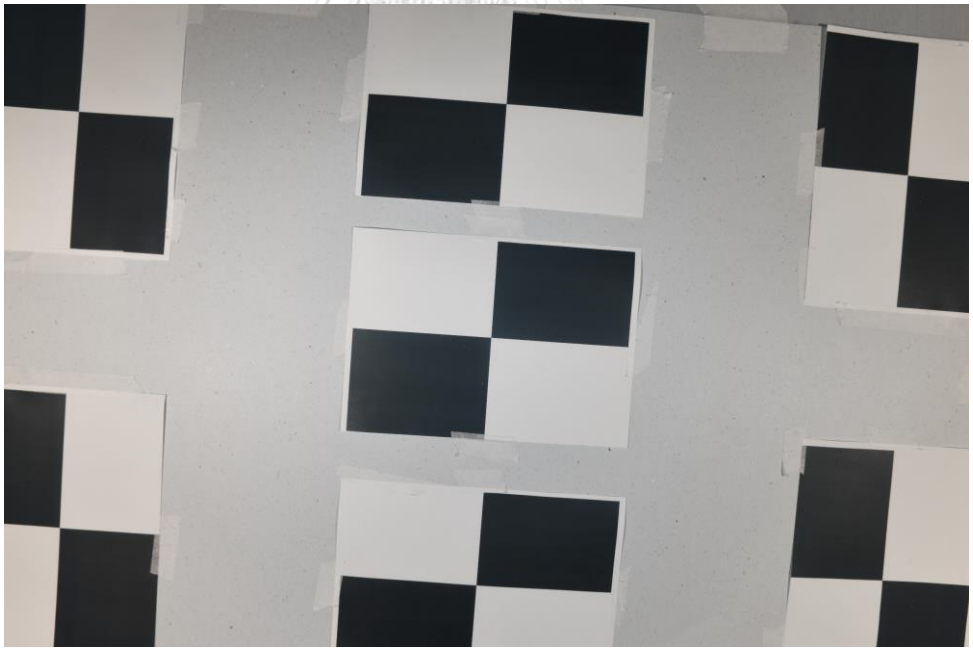
ภาพที่ ข.3 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องปกติรุ่น Nikon J5 และเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตรที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร



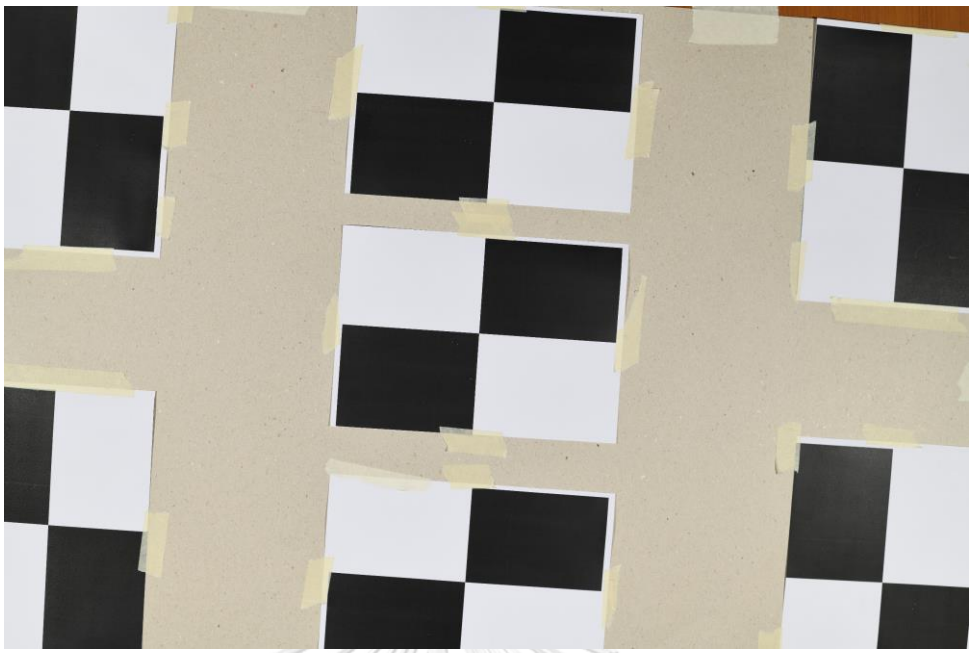
ภาพที่ ข.4 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องดัดแปลงใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรดรุ่น Nikon J5 และเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตรที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร



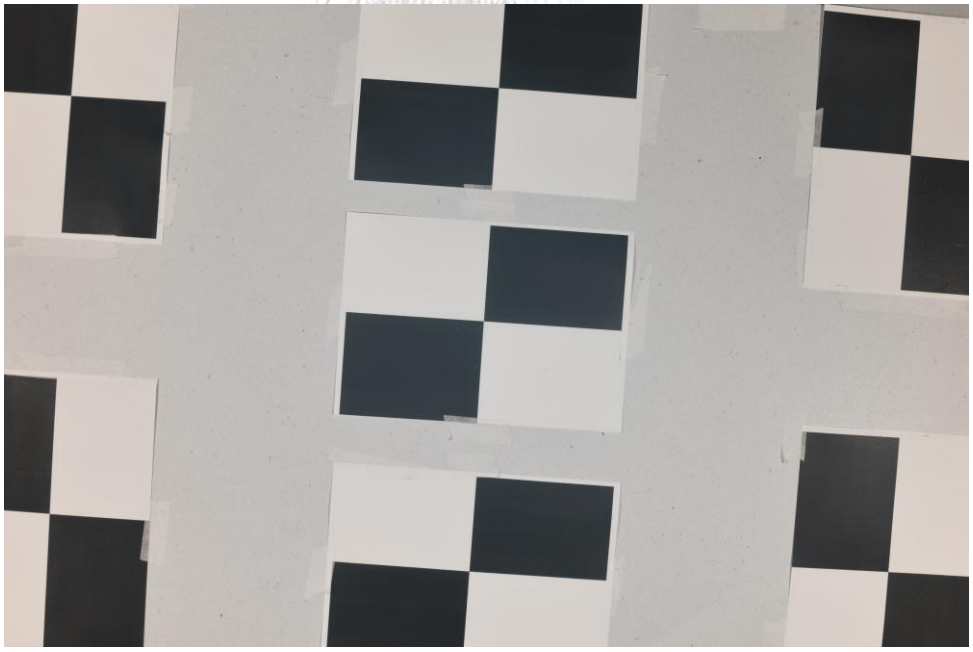
ภาพที่ ข.5 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องปกติรุ่น Nikon D850 และเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร



ภาพที่ ข.6 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องดัดแปลงใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรดรุ่น Nikon D850 และเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร



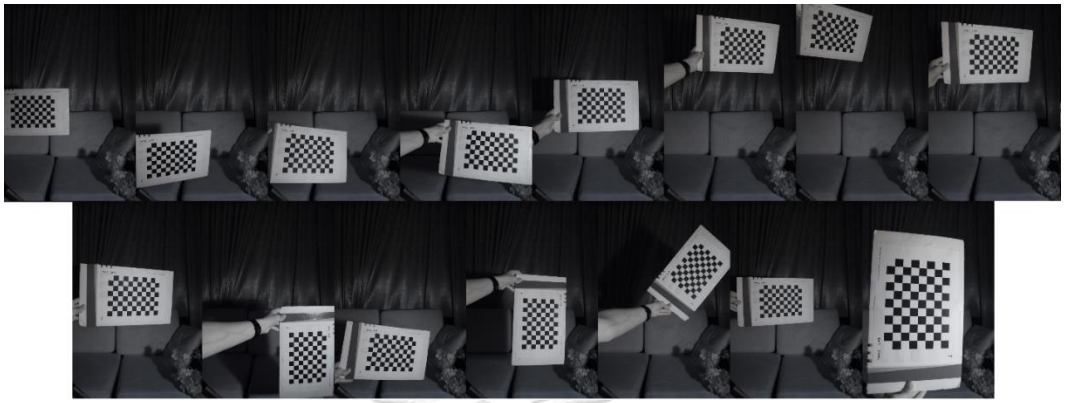
ภาพที่ ข.7 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องปกติรุ่น Nikon D850 และเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร



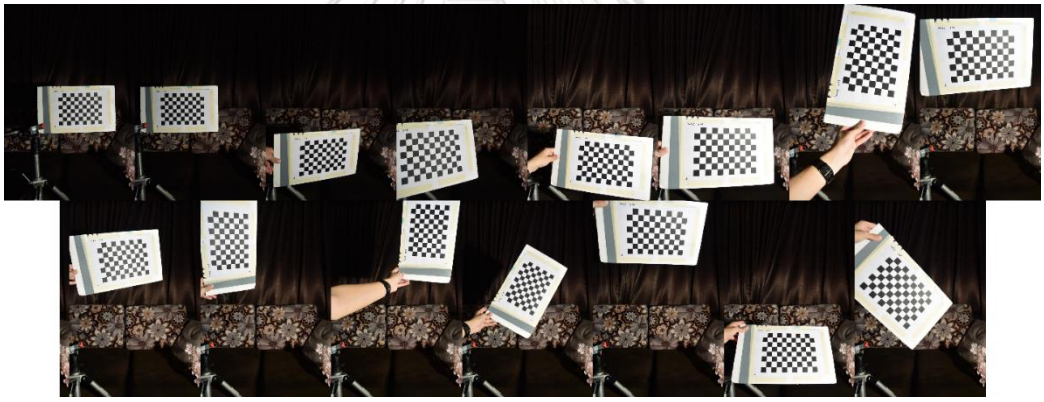
ภาพที่ ข.8 ภาพที่ใช้ทดสอบหาเอ็มทีเอฟแบบขอบเอียงของกล้องดัดแปลงใส่ฟิลเตอร์อินฟราเรดรุ่น Nikon D850 และเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ค

ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์

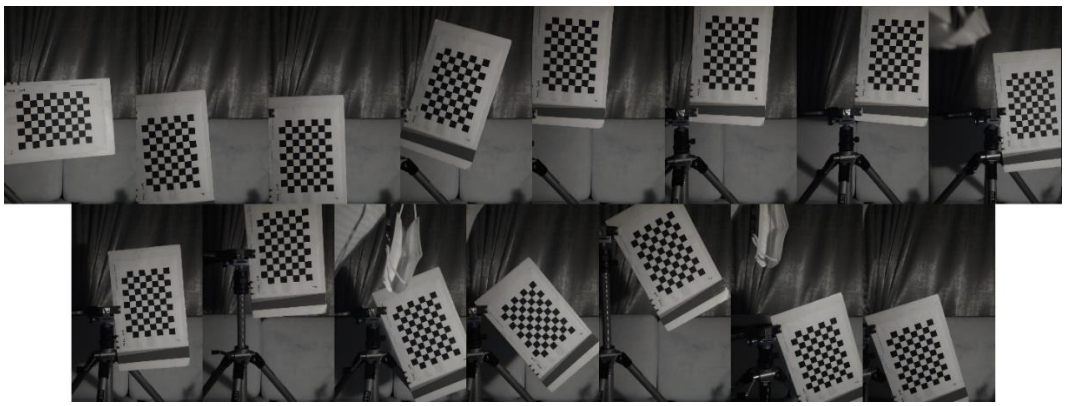


ภาพที่ ค.1 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร บนกล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด

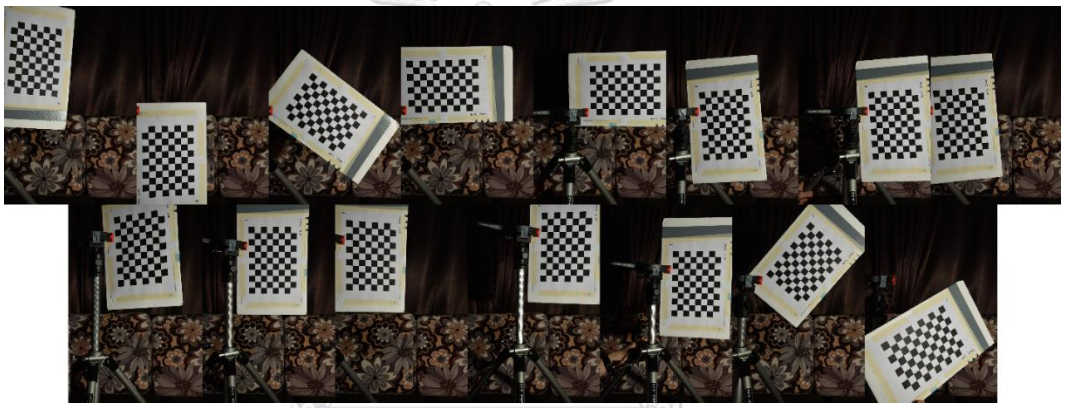


ภาพที่ ค.2 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 10 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ

Chulalongkorn University



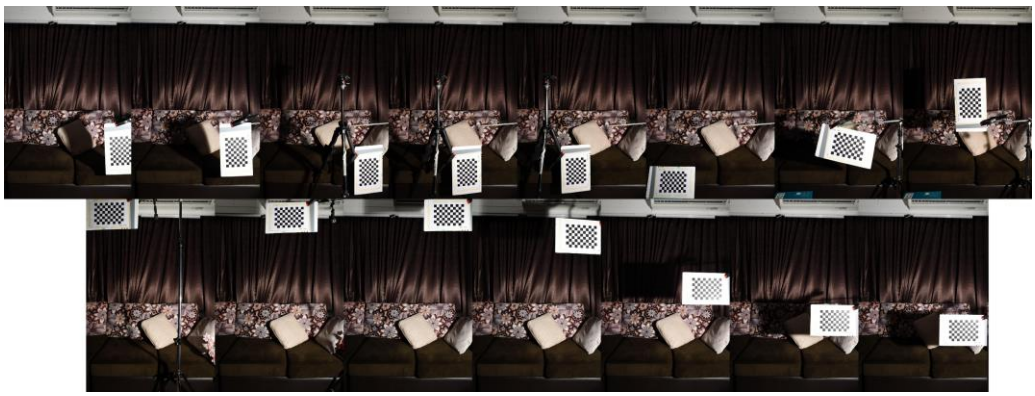
ภาพที่ ค.3 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร บนกล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด



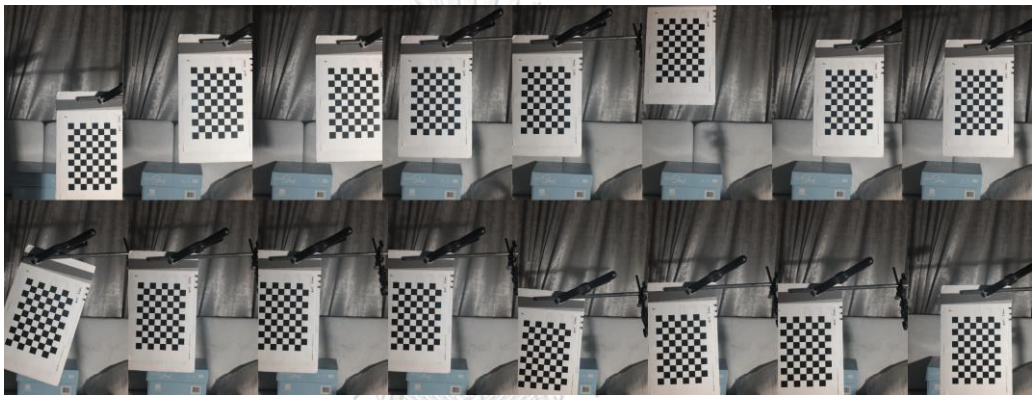
ภาพที่ ค.4 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ NIKKOR 10-30 มิลลิเมตร ที่ทางยาวโฟกัส 18 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

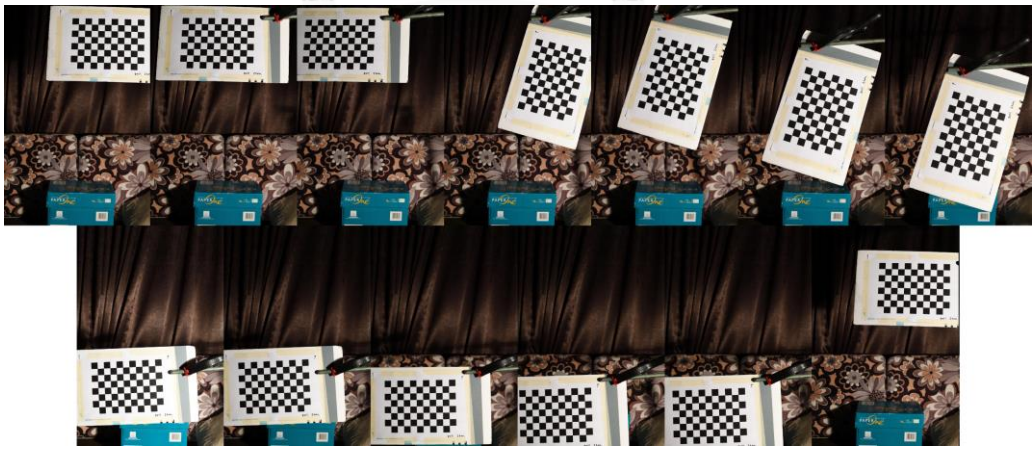
ภาพที่ ค.5 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร บนกล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด



ภาพที่ ค.6 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 24 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ



ภาพที่ ค.7 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร บนกล้องดัดแปลงที่ติดตั้งฟิลเตอร์อินฟราเรด



ภาพที่ ค.8 ภาพที่ใช้ทดสอบหาความบิดเบี้ยวของเลนส์ Nikon 50 มิลลิเมตร บนกล้องปกติ

ภาคผนวก ง

ชุดคำสั่งที่ใช้ทดสอบการกันภาพเหลื่อม

```
load 'D:\MATLAB Drive 2\cameraParams_IR.mat'
load 'D:\MATLAB Drive 2\cameraParams_VIS.mat'


vis = im2double(imread('VIS_10.tif'));
ir = im2double(imread('IR_10.tif'));

vis = undistortImage(vis,cameraParams_VIS);
ir = undistortImage(ir,cameraParams_IR);

vis = rgb2gray(vis);
ir = rgb2gray(ir);

% select control points
[move_point,fixed_point] = cpselect(ir,vis,'Wait',true);
movingPointsAdjusted = cpcorr(move_point,fixed_point,ir,vis)

% create tranformation
tform1 = fitgeotrans(movingPointsAdjusted,fixed_point,'projective');
% tranform the moving image
Rfixed = imref2d(size(vis));
registered1 = imwarp(ir,tform_j5_10_land,'OutputView',Rfixed);

reg = imresize(registered1, 1/2);
vis_rs = imresize(vis, 1/2);

% show image
figure, imshowpair(vis,registered1)
figure, imshow([vis_rs, reg])

```

ภาพที่ ง.1 ชุดคำสั่งที่ใช้ในการซ้อนภาพแบบจุดควบคุม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

```
%% IR

irr2 = im2double(imread('ir3_undis_msked.tif'));
b = ~imbinarize(irr2(:,:,1),0.5);

figure, imshow(b)

cbf = imclearborder(b);

cbf = logical(imfill(cb, 'holes'));

cbf = imdilate(cbf,strel('disk',2));


rp = regionprops(cbf,irr2(:,:,1),{'Centroid', 'Area'})

n=numel(rp);
for j=1:n
    Position(j,1)=rp(j).Centroid(1);
    Position(j,2)=rp(j).Centroid(2);
    Area(j) = rp(j).Area;
end

%% VIS

vis_new = im2double(imread('vis3_undis_masked.tif'));
vb = ~imbinarize(vis_new,0.5);
figure, imshow(vb)

v_cbf = imclearborder(vb);

v_cbf = logical(imfill(v_cbf, 'holes'));

v_cbf = imclose(v_cbf, strel('disk', 5));

v_cbf = imdilate(v_cbf,strel('disk',1));

v_rp = regionprops(v_cbf,vis_new,{'Centroid', 'Area'})

v_n=numel(v_rp);
for j=1:v_n
    v_Position(j,1)=v_rp(j).Centroid(1);
    v_Position(j,2)=v_rp(j).Centroid(2);
    v_Area(j) = v_rp(j).Area;
end

```

ภาพที่ ง.2 ชุดคำสั่งที่ใช้แปลงภาพเป็นไบนารี่และหาบล็อบ

```
%% Distance

figure, scatter(Position(:,1),Position(:,2),'bo')
hold on
scatter(v_Position(:,1),v_Position(:,2), 'r*')
hold off


d = ipdm(v_Position,Position,'Subset','nearest','result','struct')

for i = 1:length(v_Position)
x_diff(i) = v_Position(i,1) - Position(d.columnindex(i),1);
y_diff(i) = v_Position(i,2) - Position(d.columnindex(i),2);
end

disp(['Max x: ' , num2str(max(abs(x_diff))),', Min x: ' , num2str(min(abs(x_diff))),...
    ' , Sum abs(x): ', num2str(sum(abs(x_diff))),  ' , mean x: ', num2str(mean(abs(x_diff)))])
disp(['Max y: ' , num2str(max(abs(y_diff))), ', Min y: ' , num2str(min(abs(y_diff))),...
    ' , Sum abs(y): ', num2str(sum(abs(y_diff))),  ' , mean y: ', num2str(mean(abs(y_diff)))])
report = [max(abs(x_diff)) min(abs(x_diff)) sum(abs(x_diff)) mean(abs(x_diff)) max(abs(y_diff)) ...
    min(abs(y_diff)) sum(abs(y_diff)) mean(abs(y_diff))]


Distance = [mean(d.distance) min(d.distance) max(d.distance) sum(d.distance)]
```

ภาพที่ ง.3 ชุดคำสั่งที่ใช้คำนวนระยะห่างระหว่างจุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ

ชุดคำสั่งที่ใช้ประมวลผลภาพเพื่อทดสอบระบุสารสี

```
% Load all parameter
load 'C:\Users\shado\Desktop\THESIS\New Dual-cam'\'NewDual-LensCal Vig.mat'

% Folder Selection
% File name must be UPPERCASE
myFolder = 'C:\Users\shado\Desktop\THESIS\FINAL\NewDualCam TIFF\new';

%Import
% VIS
set.im{1} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\VIS.tif')));
% IR
set.im{2} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\IR.tif')));
% UVR
set.im{3} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\UVR.tif')));
% UVF
set.im{4} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\UVF.tif')));
% IRF
set.im{5} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\IRF.tif')));
% IRT
set.im{6} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\IRT.tif')));
% RAK
set.im{7} = im2double(imread(strcat(myFolder, '\RAK.tif')));

% Vignette correction
% VIS
set.im{1} = set.im{1}./VLUT_D850_24_VIS_RGB_16bit;
% IR
set.im{2} = set.im{2}./VLUT_D850_24_IR_RGB_16bit;
% UVR
set.im{3} = set.im{3}./VLUT_D850_24_UV_RGB_16bit;
% UVF
set.im{4} = set.im{4}./VLUT_D850_24_VIS_RGB_16bit;
% IRF
set.im{5} = set.im{5}./VLUT_D850_24_IR_RGB_16bit;
% IRT
set.im{6} = set.im{6}./VLUT_D850_24_IR_RGB_16bit;
% RAK
set.im{7} = set.im{7}./VLUT_D850_24_VIS_RGB_16bit;
```

```
% Distortion correction
% VIS
set.im{1} = undistortImage(set.im{1}, cameraParams_D850_24_VIS_Vertical);
% IR
set.im{2} = undistortImage(set.im{2}, cameraParams_D850_24_IR_Vertical);
% UVR
set.im{3} = undistortImage(set.im{3}, cameraParams_D850_24_UV_Vertical);
% UVF
set.im{4} = undistortImage(set.im{4}, cameraParams_D850_24_VIS_Vertical);
% IRF
set.im{5} = undistortImage(set.im{5}, cameraParams_D850_24_IR_Vertical);
% IRT
set.im{6} = undistortImage(set.im{6}, cameraParams_D850_24_IR_Vertical);
% RAK
set.im{7} = undistortImage(set.im{7}, cameraParams_D850_24_VIS_Vertical);


% Register images
set.imreg{1} = set.im{1};

% Detect SURF on VIS image
fixed = rgb2gray(set.im{1});
points_fixed = detectSURFFeatures(edge(fixed));
[f1,vpts1] = extractFeatures(fixed,points_fixed);

% Register other images
for i = 2:length(set.im)
    moving = rgb2gray(set.im{i});
    points_moving = detectSURFFeatures(edge(moving));
    [f2,vpts2] = extractFeatures(moving,points_moving);
    indexPairs = matchFeatures(f1,f2);
    matchedPoints_fixed = vpts1(indexPairs(:,1));
    matchedPoints_moving = vpts2(indexPairs(:,2));
    [tform,inlierpoints_moving,inlierpoints_fixed] = estimateGeometricTransform(matchedPoints_moving,matchedPoints_fixed,'affine'
    outputView = imref2d(size(set.im{1}));
    set.imreg{i} = imwarp(set.im{i},tform, 'OutputView' ,outputView);
    % view registed image
    figure, imshowpair(set.imreg{1},set.imreg{i})
end
```

```
% Create IRF image
IRFC = cat(3, set.imreg{2}(:,:,1), set.imreg{1}(:,:,1), set.imreg{1}(:,:,2));
figure, imshow(IRFC)

% Create IRF binary image
IRF_binary = imbinarize(set.imreg{5}(:,:,3), 253/255);
figure, imshow(IRF_binary)

% Export images
imwrite(set.imreg{1}, strcat(myFolder, '\regVIS.tif'))
imwrite(set.imreg{2}, strcat(myFolder, '\regIR.tif'))
imwrite(set.imreg{3}, strcat(myFolder, '\regUVR.tif'))
imwrite(set.imreg{4}, strcat(myFolder, '\regUVF.tif'))
imwrite(set.imreg{5}, strcat(myFolder, '\regIRF.tif'))
imwrite(set.imreg{6}, strcat(myFolder, '\regIRT.tif'))
imwrite(set.imreg{7}, strcat(myFolder, '\regRAK.tif'))
imwrite(IRFC, strcat(myFolder, '\regIRFC.tif'))
imwrite(IRF_binary, strcat(myFolder, '\regIRF_Binary.tif'))

```

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ จ.1 ชุดคำสั่งที่ใช้ประมวลผลภาพเพื่อทดสอบระบุสารสี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปกรณ์สิทธิ์ พ่วงโต
วัน เดือน ปี เกิด	9 เมษายน พ.ศ.2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
ที่อยู่ปัจจุบัน	60/342 ซ.ประเสริฐมนูกิจ 27 ถ.ประเสริฐมนูกิจ แขวงจรเข้บัว เขตลาดพร้าว กรุงเทพฯ 10230
ผลงานตีพิมพ์	P. Poungto, C. Koopipat, Development of dual camera system for technical photography, ICDIP 2021, 20-23 May 2021, Singapore. P. Poungto, S. Khampaeng, P. Punkhor, P. Katemake, S. Noppakundilograt, K. Tananuwong, T. Janjarasskul, Development of a Color Strip from Colorants in Grape for Alkali Indicator, ACA2019 Nagoya, 29 Nov-2 Dec 2019, Nagoya, Japan.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University