

การวัดโฟกัสของอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือตามความ
แปรปรวนของ LAPLACIAN

FOCUS MEASUREMENT OF IN-LINE DIGITAL HOLOGRAMS
OF FINGERPRINTS BASED ON VARIANCE OF LAPLACIAN



ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)
ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FOCUS MEASUREMENT OF IN-LINE DIGITAL HOLOGRAMS OF FINGERPRINTS BASED ON VARIANCE OF LAPLACIAN



A SPECIAL PROBLEM SUBMITTED IN
PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (COMPUTER SCIENCE)
DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ การวัดโฟกัสของอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือตามความแปรปรวนของ Laplacian
Focus Measurement of In-line Digital Holograms of Fingerprints Based on Variance of Laplacian

ชื่อนักศึกษา นายเทพประสิทธิ์ พวงยอด รหัสนักศึกษา 61050948

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

ภาควิชา วิทยาการคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์สันธนะ อุ่อคุมยี่ง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิษณุ เต๋อวงศ์ไพชยนต์ ประธานกรรมการ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.กุลสวัสดิ์ จิตขจรวานิช กรรมการ	
อาจารย์สันธนะ อุ่อคุมยี่ง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ	การวัดโฟกัสของอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือตามความแปรปรวนของ Laplacian Focus Measurement of In-line Digital Holograms of Fingerprints Based on Variance of Laplacian
ชื่อนักศึกษา	นายเทพประสิทธิ์ พวงยอด รหัสนักศึกษา 61050948
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาการคอมพิวเตอร์)
ภาควิชา	วิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สันธนะ อุอดมยิ่ง

บทคัดย่อ

ภาพลายนิ้วมือสำหรับการระบุตัวตนของบุคคลที่ได้จากการสแกนที่เป็นภาพประเภทดิจิทัลฮอโลแกรม ในการนำไปใช้งานบางครั้งอาจพบกับปัญหาทางด้านคุณภาพของภาพ เช่น เส้นลายนิ้วมือไม่ชัดเจน ภาพไม่คมชัด เป็นต้น

ในโครงงานนี้ ผู้จัดทำศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพความคมชัดของฮอโลแกรมลายนิ้วมือที่สร้างขึ้นใหม่ เริ่มต้นด้วยการสร้างภาพต้นฉบับขึ้นใหม่จากชุดข้อมูล ภาพที่สร้างขึ้นใหม่แต่ละภาพมีคุณภาพแตกต่างกัน ผู้จัดทำได้ศึกษาสองวิธีในการวัดการกระจายความเข้มสีของพิกเซลภายในข้อมูลภาพ ทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพื้นหน้าและพื้นหลังและค่าความแปรปรวนของ Laplacian แล้วเลือกวิธีที่ดีที่สุด

สุดท้าย ภาพที่สร้างขึ้นใหม่ทุกภาพได้ถูกจัดเรียงตามค่าความแปรปรวนของขอบภายในภาพที่ได้จากการฟิลเตอร์ Laplacian โดยเรียงจากมากไปน้อยเพื่อตัดสินความคมชัดของภาพ และผลการตัดสินเปรียบเทียบในการทดลองคือภาพที่สร้างขึ้นใหม่ที่ระยะสร้างภาพใหม่เท่ากับ 0 ไมโครเมตร คมชัดที่สุดสำหรับทุกชุดภาพที่ทดลอง

คำสำคัญ : การสร้างภาพลายนิ้วมือใหม่ การวัดโฟกัสของภาพลายนิ้วมือ ความแปรปรวนของภาพ ความแปรปรวนของ Laplacian ฮอโลแกรมลายนิ้วมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Focus Measurement of In-line Digital Holograms of Fingerprints Based on Variance of Laplacian
Student	Mr. Theprasit Phuangyot Student ID 61050948
Degree	Bachelor of Science (Computer Science)
Department	Computer Science
School	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Aj. Suntana Oudomying

Abstract

The scanned fingerprint images for identification of persons are digital holographic images. In use, sometimes you may encounter image quality problems, such as unclear fingerprint ridge, blurry images, etc.

In this project, we studied the change of sharpness quality of reconstructed fingerprint holograms. Starting by reconstructing original images from the datasets, each reconstructed image has different quality. We applied two methods for measuring the spread of pixel colour intensity within image data both foreground-background standard deviation and variance of Laplacian and then select the best method.

Finally, every reconstructed image was ranked by the variance value of edge within image obtained by the Laplacian filtering method from maximum to minimum to determine the image sharpness. And the result of comparative judgment in the experimentation is reconstructed images at reconstruction distance equal to 0 micrometre are sharpest for all experimented image sets.

Keywords : Fingerprint image reconstruction, Focus measurement of fingerprint image, Variance of image, Variance of Laplacian, Fingerprint hologram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สันธนะ อุ๋อุ๋ดมยั้ง อาจารย์ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้ปัญหาพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.สุวรรณ พลายพิชิต อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรจน์ ที่ได้มอบชุดข้อมูลภาพตัวอย่างที่เป็นประโยชน์ต่อการทำการทดลองในปัญหาพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำปัญหาพิเศษฉบับนี้

ท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่เป็นผู้ให้กำลังใจและให้โอกาสการศึกษามีค่ายิ่ง

ผู้จัดทำปัญหาพิเศษขอขอบพระคุณทุกท่านอย่างสูงที่ให้ การสนับสนุน เอื้อเฟื้อและให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือ จนกระทั่งปัญหาพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เทพประสิทธิ์ พวงยอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม.....	4
2.1.2 การรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลขของอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม.....	7
2.1.2.1 การรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลข.....	7
2.1.2.2 ระยะเวลาโฟกัส.....	10
2.1.3 ความแปรปรวนและความคมชัดของภาพ.....	10
2.1.4 ภาพลายนิ้วมือ.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	16
3.1 การดำเนินการรีคอนสตรัคต์อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ	16
3.2 การดำเนินการศึกษาหาวิธีตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์	17
3.3 การดำเนินการตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์	18
บทที่ 4 ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผล	19
4.1 ผลการทดลองคำนวณค่า VOL ของภาพรีคอนสตรัคต์	19
4.2 การวิเคราะห์ผลการดำเนินการ	25
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	26
5.1 บทสรุป	26
5.2 ข้อเสนอแนะ	26
เอกสารอ้างอิง	28
ภาคผนวก	29
ภาคผนวก ก โคดของโปรแกรมรีคอนสตรัคต์รูปภาพ	30
ภาคผนวก ข โคดของโปรแกรมคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วนของภาพรีคอนสตรัคต์	32
ภาคผนวก ค โคดของโปรแกรมตัดสินเปรียบเทียบรูปภาพตามความแปรปรวนของ Laplacian	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 ตารางแสดงกราฟของค่า VOL ของภาพรีคอนสตรัคต์ที่ค่าระยะห่าง z ตั้งแต่ 0 ถึง 1,000 μm19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพอธิบายตัวอย่างสมมติระบบการทำงานอย่างง่ายของดิจิทัลฮอโลกราฟี.....	5
2.2 ภาพจำลองเพื่ออธิบายลักษณะของการจัดระบบแบบออฟแอกซิส.....	6
2.3 ภาพจำลองเพื่ออธิบายลักษณะของการจัดระบบแบบอินไลน์.....	6
2.4 ระบบพิกัดฉากของการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลฮอโลแกรม.....	7
2.5 ภาพอธิบายขั้นตอนย่อยของการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลฮอโลแกรม.....	9
2.6 ภาพอธิบายความแตกต่างของความคมชัดของภาพที่รีคอนสตรัคต์ที่ค่าระยะห่างต่างๆกัน.....	10
2.7 ตัวอย่างภาพต้นฉบับและภาพที่ผ่านฟิลเตอร์ Laplacian.....	12
2.8 ตัวอย่างดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ.....	13
2.9 ตัวอย่างการเปรียบเทียบส่วนของภาพลายนิ้วมือจากสองภาพรีคอนสตรัคชันที่กลุ่มพิกเซลตำแหน่งเดียวกันโดยใช้โปรแกรม IrfanView เวอร์ชัน 4.60.....	14
3.1 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือด้วยฮอโลกราฟี (ภาพ 603 ในชุดข้อมูล) และภาพรีคอนสตรัคต์ที่ค่า $z = 0 \mu\text{m}$ และ $z = 1 \mu\text{m}$	16
3.2 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วนของพื้นหน้าและพื้นหลังของภาพรีคอนสตรัคต์ที่ $z = [0,1000] \mu\text{m}$ จากภาพ 603 ในชุดข้อมูล.....	17
5.1 ตัวอย่างการออกแบบวินโดว์ย่อยสำหรับการวิเคราะห์หรือประมวลผลแบบเฉพาะส่วน.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ซม.	เซนติเมตร
ม.	เมตร
BS	Beam splitter
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
exp()	ค่าคงที่ของ Euler ยกกำลังจำนวนในวงเล็บ
FFT	Fast Fourier transform
IFFT	Inverse fast Fourier transform
Obj.	Object
Ref.	Reference
VOL	ความแปรปรวนของ Laplacian (Variance of Laplacian)
SD	Standard deviation
μm	ไมโครเมตร (Micrometre)
Σ	ผลรวม (Summation)
σ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
σ^2	ความแปรปรวน (Variance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการบันทึกภาพดิจิทัลฮอโลแกรม โดยการฉายแสงผ่านวัตถุหรือบริเวณที่ต้องการถ่าย เพื่อทำการบันทึก (Record) ภาพโดยที่ไม่ได้เลือกจุดของเลนส์ในระยะที่ทำให้มีการโฟกัส รูปภาพที่บันทึกได้อาจจะมีความคมชัดไม่เต็มที่ แต่เนื่องด้วยภาพฮอโลแกรมสามารถนำมารีคอนสตรัคต์ได้โดยไม่ต้องทำการถ่ายใหม่ (Re-capturing) เพราะมีการบันทึกทั้งข้อมูลแอมพลิจูด (Amplitude data) หรือความเข้ม (Intensity) ซึ่งความเข้มแปรผันตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูด และข้อมูลเฟส (Phase data) ต่างจากภาพถ่ายธรรมดา (Conventional photography) ที่บันทึกเฉพาะข้อมูลแอมพลิจูด ซึ่งข้อมูลเฟสเป็นข้อมูลที่ทำให้รีคอนสตรัคต์ได้ (Guest, 2003) และฮอโลแกรมสามารถทำการรีคอนสตรัคต์ให้ภาพชัดในภายหลังได้โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บางค่า เรียกว่าการรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลข (Numerical reconstruction)

ในการบันทึกภาพสแกนลายนิ้วมือด้วยเทคนิคฮอโลกราฟีนั้นประสบปัญหาเรื่องความคมชัดเช่นกัน เพราะว่า ความไม่ชัดที่เกิดจากการไม่มีเลนส์เพื่อรวมแสงขณะบันทึกภาพ อีกทั้งลายนิ้วมือนั้นก็ยังมีมิติ ความนูน ความลึก ทำให้ส่วนของภาพไม่มีระยะโฟกัส

โมเดลสำหรับการรีโฟกัสภาพรีคอนสตรัคชันของภาพฮอโลแกรมมีระยะโฟกัสเป็นพารามิเตอร์ ทำให้ภาพรีคอนสตรัคชันนั้นมีความชัดขึ้น อย่างไรก็ตามระยะห่างของนิ้วกับระนาบสแกนก็มีความหลากหลาย การรีคอนสตรัคชันด้วยระยะโฟกัสเดียวจึงเกิดคำถามว่าภาพที่ระยะโฟกัสเป็นเท่าไรจึงจะเป็นภาพที่มีความคมชัดที่สุด

ดังนั้นปัญหาพิเศษนี้จัดทำเพื่อศึกษาการเปลี่ยนคุณภาพของภาพรีคอนสตรัคชันโดยเฉพาะของภาพลายนิ้วมือ โดยการเปรียบเทียบความคมชัด (Sharpness) หรือความเบลอร์ (Blurriness) ของภาพ การพิจารณาคุณภาพของภาพทางด้านความคมชัดด้วยการใช้วิธีคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วน (Local standard deviation) และความแปรปรวนของ Laplacian (Variance of Laplacian) เพราะค่าเหล่านี้ใช้บ่งบอกการกระจายตัวของความเข้มสีในรูปภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาวิธีในการตัดสินใจว่าภาพฮอโลแกรมลายนิ้วมือที่รีคอนสตรัคต์มีความคมชัดขึ้น
- 2) เพื่อนำวิธีการวัดโฟกัสหรือความคมชัดของภาพมาประยุกต์ใช้กับภาพอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ

1.3 ขอบเขต

- 1) ขอบเขตทางด้านข้อมูลภาพ
 - อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ (นิ้วกลางและนิ้วนาง)
 - ขนาดภาพ 3456×2304
 - ขนาดพิกเซล 641×641 นาโนเมตร
 - ความยาวคลื่นขณะบันทึกภาพ 635 นาโนเมตร
- 2) ขอบเขตทางด้านการรีคอนสตรัคต์ภาพ
 - ไม่มีการลดหรือกำจัดจุดรบกวน (Noise)
 - ไม่มีการนำพื้นหลัง (บริเวณที่เป็นฉาก) ออกจากเบื้องหน้า (บริเวณที่เป็นลายนิ้วมือจริง)
 - ทำตามวิธีสเปกตรัมเชิงมุม (The angular spectrum method)
 - ภาพที่รีคอนสตรัคต์จะอยู่ในระบบสี Grayscale (8-bits)
- 3) ไม่ได้ใช้วินโดวส์ย่อยในการแบ่งภาพเป็นส่วนย่อยที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การอัตโนมัติของอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือให้มีความคมชัดขึ้นเพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์ต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

คอนทราสต์ (Contrast)	(คำนาม) ความต่างของความเข้มภายในภาพดิจิทัล
คอนโวลว (Convolve)	(คำนาม) การดำเนินการทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง
คอนโวลูชัน (Convolution)	(คำนาม) ผลลัพธ์จากการดำเนินการคอนโวลว
ครอบคลุม (Global)	(คำคุณศัพท์) พิกเซลทั้งหมด, โดยรวม, โดยทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะส่วน (Local)	(คำคุณศัพท์) กลุ่มของพิกเซลที่มีจำนวนสมาชิกมากกว่าหรือเท่ากับ 1 แต่ไม่เกินจำนวนพิกเซลทั้งหมดลบด้วย 1 หรือเรียกได้ว่าบางส่วนของภาพ
เบลอร์ (Blur)	(คำนาม) พร่ามัว, ไม่ชัด
แสงอาพันธ์ (Coherent light)	(คำนาม) แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (แหล่งกำเนิดที่ทำให้ความถี่เท่ากัน ความยาวคลื่นเท่ากัน อัตราเร็วเท่ากัน แอมพลิจูดเท่ากัน มีเฟสตรงกันหรือต่างกันคงที่)
รีคอนสตรัคต์ (Reconstruct)	(คำกริยา) สร้างฮอโลแกรมใหม่จากภาพเดิม
รีคอนสตรัคชัน (Reconstruction)	(คำนาม) การรีคอนสตรัคต์
รีโฟกัส (Refocus)	(คำกริยา) ปรับภาพให้ชัดใหม่
วินโดว์ (Window)	(คำนาม) ช่องสี่เหลี่ยมที่กำหนดขึ้นตามขนาดที่ต้องการเพื่อการวิเคราะห์ คำนวณหรือประมวลผลตามส่วนที่กำหนดนั้น
เฟส (Phase)	(คำนาม) ข้อมูลที่ทำให้ภาพฮอโลแกรมรีคอนสตรัคต์ได้โดยไม่ต้องถ่ายใหม่
ออโตโฟกัส (Autofocus)	(คำกริยา) ปรับภาพให้ชัดแบบอัตโนมัติ
อาร์เรย์ (Array)	(คำนาม) โครงสร้างข้อมูลที่ประกอบด้วยชุดของค่าหรือตัวแปร แต่ละรายการระบุโดยดัชนีของอาร์เรย์อย่างน้อยหนึ่งรายการ
อินไลน์ (In-line)	(คำนาม) การจัดลำแสงอ้างอิงและลำแสงวัตถุให้มีการทำมุมกันในระหว่างการแทรกสอดของคลื่นอ้างอิงและคลื่นวัตถุเป็นมุมที่มีค่าใกล้เคียงศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้อง

บทนี้อธิบายแนวคิด ทฤษฎีและผลงานที่เกี่ยวข้องเพื่อเชื่อมโยงไปสู่วิธีการแก้ปัญหาในบทถัดไป โดยเนื้อหาประกอบไปด้วย อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม การรีคอนสตรัคต์อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม ระยะรีโพกัส ความแปรปรวนและความคมชัดของภาพ ภาพลายนิ้วมือและผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม (In-line digital hologram)

ฮอโลแกรม (Hologram) หมายถึงภาพสามมิติที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอด (Interference) ของลำแสง (Beam) สองลำจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent light source) เช่น เลเซอร์ (Laser) เป็นต้น

ฮอโลกราฟี (Holography) หมายถึงการศึกษาเกี่ยวกับฮอโลแกรม รวมไปถึงกระบวนการผลิตฮอโลแกรม กล่าวคือเป็นศาสตร์วิชาแห่งฮอโลแกรม

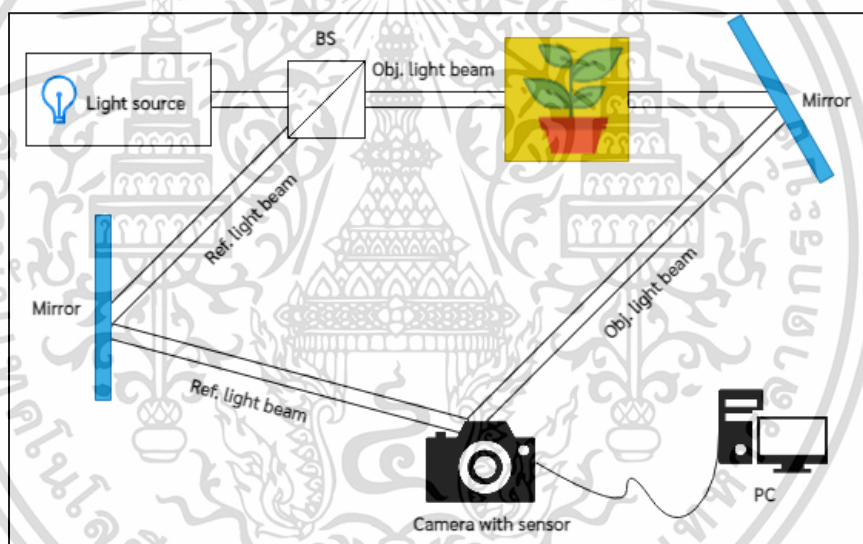
ดิจิทัลฮอโลแกรม (Digital hologram) คือข้อมูลภาพที่ได้มาจากเทคนิคหรือกระบวนการการบันทึกภาพในทางดิจิทัลฮอโลกราฟี (Digital holography) ซึ่งเป็นฮอโลกราฟีที่ใช้ระบบดิจิทัลเข้ามาช่วยกระบวนการบันทึกภาพในทางดิจิทัลฮอโลกราฟีเริ่มจากการจัดเตรียมและติดตั้งสิ่งดังต่อไปนี้

- (1) สื่อบันทึก (Recording medium) เช่น กล้องดิจิทัล (Digital camera) พร้อมเซนเซอร์ (Sensor)
- (2) วัตถุ (Object) ที่ต้องการบันทึกภาพ
- (3) แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent light source) เช่น Laser diode
- (4) ตัวแยกลำแสง (Beam splitter) เพื่อแยกแสงให้เป็นสองลำแสงประกอบไปด้วย
 - ลำแสงอ้างอิง (Reference beam) ลำแสงที่ไม่กระทบกับผิวของวัตถุ
 - ลำแสงวัตถุ (Object beam) ลำแสงที่กระทบกับผิวของวัตถุ
- (5) กระจก (Mirror) เพื่อทำให้แสงเกิดการเลี้ยวเบนไปอีกทิศทาง
- (6) เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากติดตั้งสิ่ง (วัสดุอุปกรณ์) ดังกล่าวแล้วจึงทำการบันทึกภาพโดยสั่งการจากซอฟต์แวร์ในเครื่องคอมพิวเตอร์ หลักการทำงานคือทำให้ลำแสงทั้งสองลำเกิดการแทรกสอดกัน ซึ่งเซนเซอร์จะทำการรับรู้ข้อมูลรูปแบบของการแทรกสอด (Interference pattern) ของหน้าคลื่น (Wavefront) ของทั้งสองลำแสงแล้วเปลี่ยนแปลงให้เป็นรูปภาพดิจิทัล (Digital image) ขั้นตอนมีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงส่องแสง ลำแสงเดินทาง
2. ตัวแยกลำแสงทำการแยกลำแสงเป็นสองลำโดยที่ลำแสงอ้างอิงไปอีกทางหนึ่งและลำแสงวัตถุไปอีกทางหนึ่ง (ไปกระทบกับวัตถุ) อาจมีการใช้กระจกเพื่อเปลี่ยนทิศทางของแสง
4. หน้าคลื่นของลำแสงทั้งสองแทรกสอดกัน
5. Sensor ทำการรับรู้รูปแบบการแทรกสอดแล้วแปลงให้เป็นรูปภาพดิจิทัล



รูปที่ 2.1 ภาพอธิบายตัวอย่างสมมติระบบการทำงานอย่างง่ายของดิจิทัลฮอโลกราฟี

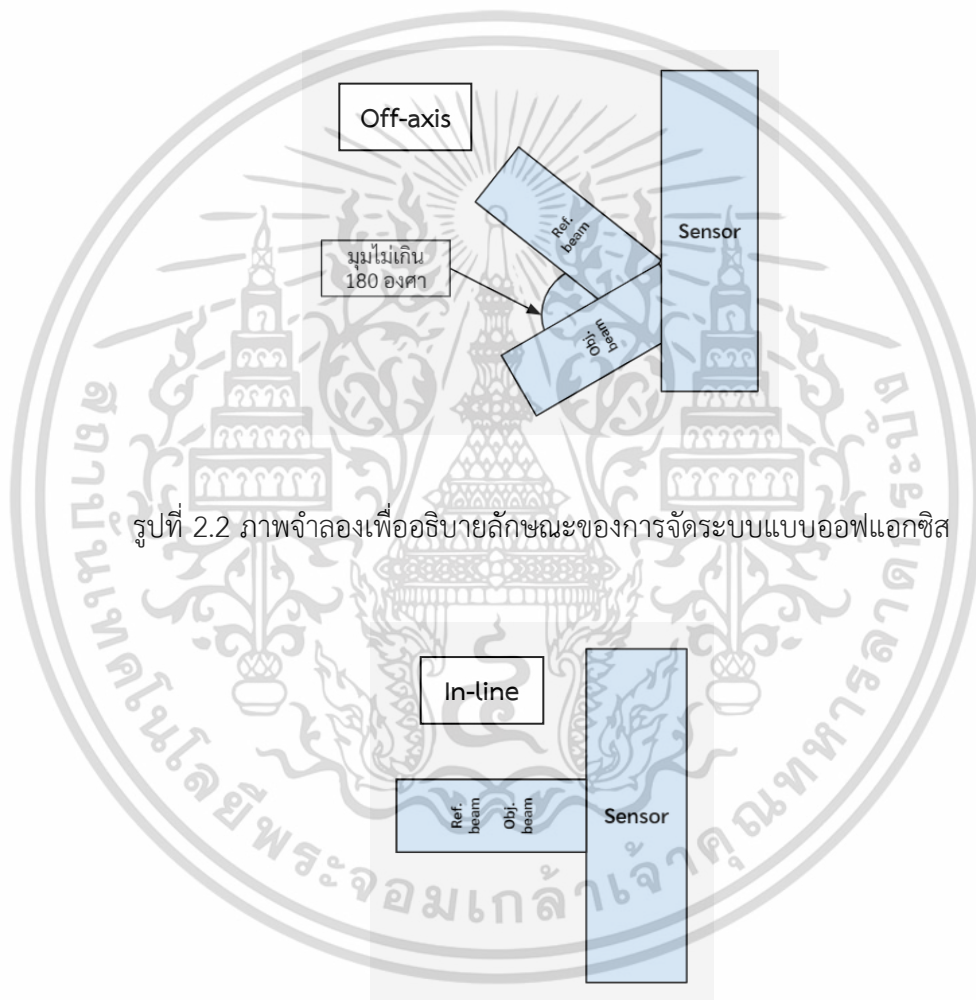
ฮอโลกราฟีสามารถจำแนกออกได้เป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับวิธีการติดตั้งหรือตั้งค่าที่ใช้ในการบันทึกภาพ เช่น ออฟแอกซิสฮอโลกราฟี อินไลน์ฮอโลกราฟี เป็นต้น

ฮอโลกราฟีแบบออฟแอกซิส (Off-axis holography) เป็นภาพที่ได้จากฮอโลกราฟีที่มีการจัดลำแสงอ้างอิงและลำแสงวัตถุให้มีการทำมุมกันในระหว่างการแทรกสอดของคลื่นอ้างอิง (Reference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

wave) และคลื่นวัตถุ (Object wave) โดยมีค่ามากที่สุดที่เป็นไปได้ไม่เกิน 180 องศา ภาพที่ได้จากการบันทึกด้วยเทคนิคนี้เรียกว่าออฟแอกซิสฮอโลแกรม (Off-axis hologram)

ฮอโลกราฟีแบบ On-axis หรือ In-line (On-axis or In-line holography) นั้นต่างจากแบบ Off-axis ตรงที่มุมมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ภาพที่ได้จากการบันทึกด้วยเทคนิคนี้เรียกว่า อินไลน์ฮอโลแกรม (In-line hologram) หรือออนแอกซิสฮอโลแกรม (On-axis hologram)



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองเพื่ออธิบายลักษณะของการจัดระบบแบบออฟแอกซิส

รูปที่ 2.3 ภาพจำลองเพื่ออธิบายลักษณะของการจัดระบบแบบอินไลน์

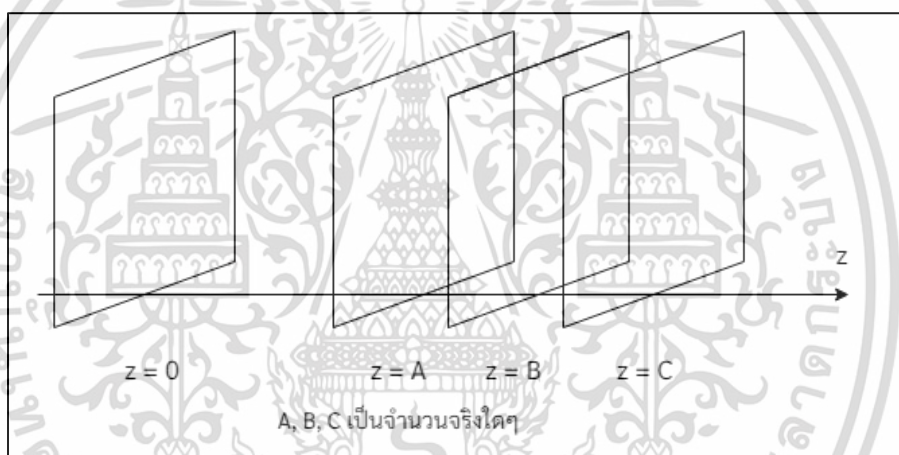
อินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม (In-line digital hologram) คือภาพที่ได้มาจากการบันทึกภาพของวัตถุโดยใช้เทคนิคดิจิทัลฮอโลกราฟีและตั้งค่าการบันทึกแบบอินไลน์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลขของดิจิทัลโฮโลแกรม (Numerical reconstruction of digital hologram)

2.1.2.1 การรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลขด้วยวิธี Angular Spectrum

การรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลข (Numerical reconstruction) มี 2 แนวทางได้แก่ Huygens Convolution method (HCM) และ Angular Spectrum Method (ASM) โดยทั่วไปใช้การคำนวณแบบ ASM

การสร้างภาพโฮโลแกรมใหม่หรือการรีคอนสตรัคต์สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (ระนาบโฮโลแกรมกับระนาบรีคอนสตรัคชัน) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบพิกัดฉากของการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลโฮโลแกรม

จากรูปที่ 2.4 ภาพที่ $z = 0$ หน่วยความยาว คือภาพโฮโลแกรมต้นฉบับ ภาพที่ $z = A$ หน่วยความยาว ภาพที่ $z = B$ หน่วยความยาว และภาพที่ $z = C$ หน่วยความยาว คือภาพรีคอนสตรัคต์

ค่าระยะห่าง z (z -distance) ในระบบพิกัดฉากข้างต้นคือระยะห่างระหว่างระนาบโฮโลแกรมและระนาบรีคอนสตรัคชัน ถ้าเป็นขั้นตอนการบันทึกจะหมายถึงระยะห่างระหว่างวัตถุและเซนเซอร์ของกล้องที่ถ่าย ตัวอย่างเช่น ถ้าหากรีคอนสตรัคต์ภาพต้นฉบับที่ระยะห่าง 2 ซม. จะได้ภาพที่ดูเหมือนหรือคล้ายภาพที่ถ่ายใหม่อีกครั้งที่ระยะห่าง 2 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหนึ่งที่สามารถใช้ในการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลฮอโลแกรมคือวิธีการสเปกตรัมเชิงมุม (The angular spectrum method) วิธีการนี้ใช้ในการอธิบายสนามคลื่นที่ซับซ้อนให้เป็นผลรวมของคลื่นระนาบจำนวนอนันต์ (Goodman, 1996) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการรีคอนสตรัคต์เชิงตัวเลขของดิจิทัลฮอโลแกรม สนามแสงของระนาบปริคอนสตรัคชันหรือฟังก์ชันของภาพที่รีคอนสตรัคต์ที่ระยะรีคอนสตรัคต์ z สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Wang et al., 2015)

$$R(\zeta', \eta', z) = F^{-1} [F\{h(x, y, 0)\} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - (\frac{\lambda x}{M \Delta p_x})^2 - (\frac{\lambda y}{N \Delta p_y})^2})]$$

สมการที่ 2.1 สมการการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลฮอโลแกรมด้วยวิธี Angular Spectrum

โดยที่ (x, y) คือพิกเซลของภาพต้นฉบับ

(ζ', η') คือพิกเซลภาพรีคอนสตรัคต์

F และ F^{-1} แทนการแปลง Fourier (Fast Fourier transform: FFT) และอินเวอร์สของการแปลง Fourier (Inverse fast Fourier transform: IFFT) ตามลำดับ

$h(x, y, 0)$ คือฟังก์ชันของฮอโลแกรม (เก็บค่าความเข้มหรือแอมพลิจูด)

j เท่ากับ $\sqrt{-1}$

λ คือความยาวคลื่น

M และ N คือจำนวนของพิกเซล

Δp_x และ Δp_y คือขนาดของพิกเซล

F และ F^{-1} สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y, 0) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy]$$

$$F^{-1} = \iint_{-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y]$$

โค้ดสำหรับคำนวณตามสมการที่ 2.1 อยู่ในภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลโฮโลแกรม

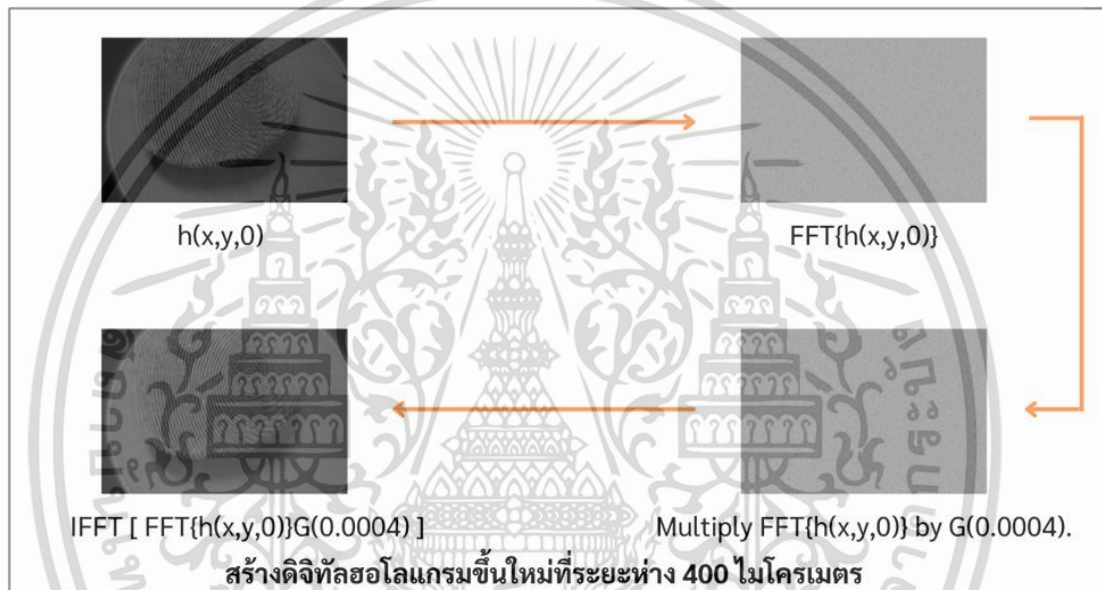
พารามิเตอร์ในการทดลองบันทึกภาพ

$z = 0.0004$ ม.

$\lambda = 635 \times 10^{-9}$ ม.

$M = 3456$ พิกเซล $N = 2304$ พิกเซล

$\Delta p_x = 6.41 \times 10^{-6}$ ม. $\Delta p_y = 6.41 \times 10^{-6}$ ม.



รูปที่ 2.5 ภาพอธิบายขั้นตอนย่อยของการรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลโฮโลแกรม

จากรูปที่ 2.5 การรีคอนสตรัคต์ดิจิทัลโฮโลแกรมตามวิธีสเปกตรัมเชิงมุมในที่นี้แบ่งเป็นขั้นตอนย่อยได้แก่

1. โหลดฟังก์ชันโฮโลแกรม

2. คำนวณ FFT ของฟังก์ชันโฮโลแกรม

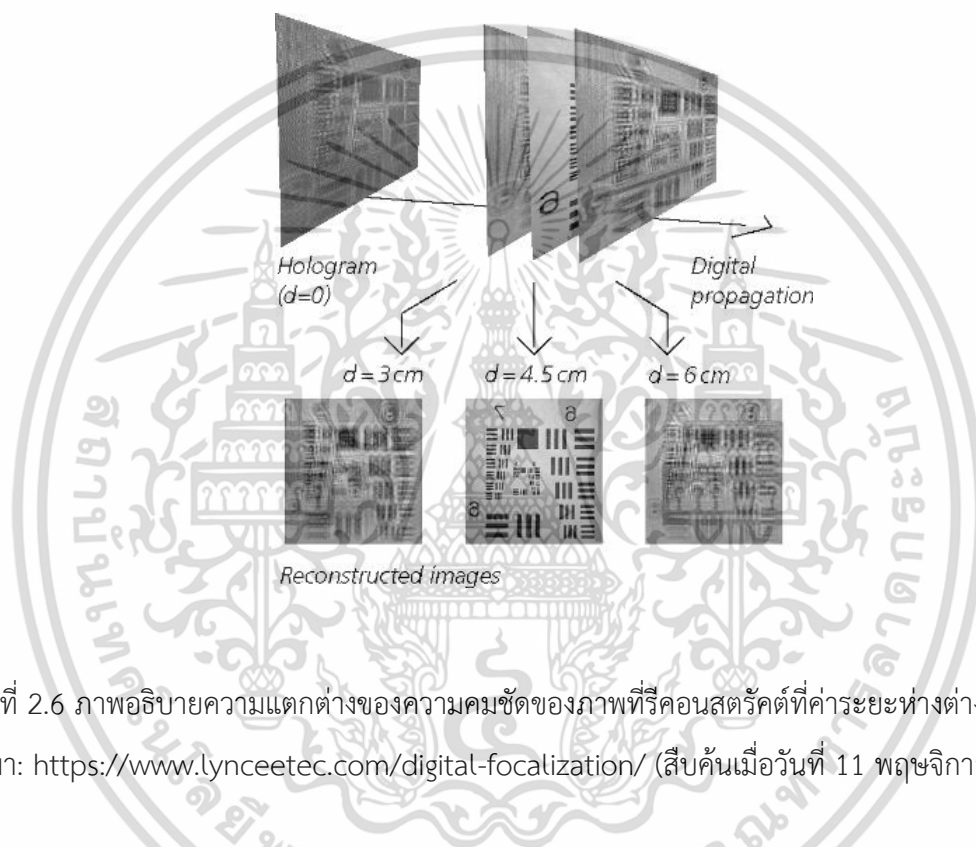
3. คูณฟังก์ชันใหม่ที่ได้ด้วยพจน์ $\exp(-j \frac{2\pi}{0.00000641} 0.0004 \sqrt{1 - (\frac{0.000000635x}{3456(0.00000641)})^2 - (\frac{0.000000635y}{2304(0.00000641)})^2})$

4. คำนวณ IFFT ของผลคูณแล้วจะได้ฟังก์ชันของรูปภาพรีคอนสตรัคต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 ระยะรีโฟกัส (Refocus distance)

ระยะรีโฟกัสคือระยะห่างหรือระยะรีคอนสตรัคต์ที่ทำให้ภาพมีความคมชัดสูงที่สุดหรือมีการโฟกัสมากที่สุด จากรูปที่ 2.6 แสดงภาพที่รีคอนสตรัคต์ที่ระยะห่าง 3 ซม. 4.5 ซม. และ 6 ซม. จะเห็นได้ว่าภาพที่รีคอนสตรัคต์ที่ระยะห่าง 4.5 ซม. มีความคมชัดที่สุดในกลุ่ม จึงตัดสินใจว่า 4.5 ซม.คือระยะรีโฟกัส



รูปที่ 2.6 ภาพอธิบายความแตกต่างของความคมชัดของภาพที่รีคอนสตรัคต์ที่ค่าระยะห่างต่างกัน
ที่มา: <https://www.lynceotec.com/digital-focalization/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม 2565)

2.1.3 ความแปรปรวนและความคมชัดของภาพ (Variance and sharpness of image)

การวัดความคมชัด (Sharpness measure) หรือการวัดโฟกัส (Focus measure) โดยการสังเกตจากบริเวณขอบภายในรูปภาพ วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ก็คือทำการหาขอบภาพ (Edge detection) แล้วหาค่าความแปรปรวน (Variance) ของบริเวณขอบที่หา เช่น ความแปรปรวนของ Laplacian เป็นต้น

ข้อมูลภาพดิจิทัลจัดเก็บเป็นอาร์เรย์ 2 มิติ (หรือเมทริกซ์) ที่มีสมาชิกเป็นค่าความเข้มสีทำให้สามารถนำมาคำนวณเป็นตัวเลขหรือทางคณิตศาสตร์ได้ เช่น ค่าความเข้มเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแปรปรวน การดำเนินการ Arithmetic (เช่น การนำภาพสองภาพมาดำเนินการลบกันเพื่อแสดงความต่าง) เป็นต้น

ในการถ่ายภาพ (Photography) ความคมชัดคือระดับความชัดเจนของรายละเอียดของรูปภาพ และความคมชัดจัดเป็นคุณลักษณะหนึ่งของคุณภาพของภาพ (Image quality) ข้อสังเกตประการหนึ่งคือภาพที่คมชัดกว่ามักจะมีส่วนขอบภายในรูปภาพ (Edge within image) ที่คม (Sharp) กว่าภาพที่เบลอร์

ในทางสถิติ ความแปรปรวน (Variance) คือค่าที่บ่งบอกว่ากลุ่มของข้อมูลมีการกระจายตัวออกไปอย่างไรจากค่าเฉลี่ย (Mean or average) ความแปรปรวนคำนวณได้จากกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ^2) (Fisher, 1919)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) มีสูตรคำนวณดังนี้ (Cuemath, 2022)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

ความแปรปรวน (σ^2) คำนวณได้จากค่า σ ยกกำลังสอง

$$\sigma^2 = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

โดยที่ x_i คือข้อมูลที่ i ในชุดข้อมูล x

\bar{x} คือค่าเฉลี่ย

n คือจำนวนของข้อมูล

ในการประมวลผลภาพ ความแปรปรวนของภาพบ่งบอกว่ากลุ่มของพิกเซลมีการกระจายตัวออกไปอย่างไรจากค่าความเข้มเฉลี่ย หากภาพยังมีความแปรปรวนมาก รายละเอียดของรูปภาพก็จะยิ่งมาก อาจหมายถึงความคมชัดที่สูงขึ้น (Apple Inc., 2022)

เนื่องจากขอบภาพเป็นส่วนประกอบที่สามารถสังเกตการไล่ระดับสีได้ง่าย จึงทำการคำนวณค่าความแปรปรวนของเฉพาะขอบภาพ (Edge variance) เพื่อวัดความคมชัดของภาพ แทนที่จะหาความแปรปรวนแบบครอบคลุม (Global variance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความแปรปรวนของขอบ ทำได้ด้วยการหาขอบภาพด้วยอัลกอริทึมในการหาขอบภาพ (เช่น ฟิลาเตอร์ Laplacian) แล้วคำนวณความแปรปรวนเฉพาะพิกเซลที่เป็นบริเวณขอบ

ความแปรปรวนของ Laplacian (Variance of Laplacian: VOL) เป็นการนำฟังก์ชันเมทริกซ์ของรูปภาพมาแก้ไขด้วยฟิลเตอร์ Laplacian เพื่อหาขอบ แล้วจึงหาความแปรปรวนของขอบที่ได้จากการฟิลเตอร์ Laplacian

การวัดความคมชัดด้วย VOL สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. ให้ f แทนฟังก์ชันเมทริกซ์ของรูปภาพและ g แทนฟังก์ชัน Laplacian kernel ดังนี้

$$g = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2. ฟังก์ชันภาพคอนโวลูชัน $f * g$ คำนวณได้ดังนี้

$$f * g = \sum_{dx=-a}^a \sum_{dy=-b}^b g(dx, dy) f(x - dx, y - dy)$$

3. หลังจากผ่านคอนโวลูชันแล้วจะได้ตำแหน่งที่เป็นขอบภาพ (Edge location)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างภาพต้นฉบับและภาพที่ผ่านฟิลเตอร์ Laplacian

หมายเหตุ: หากทำการคอนโวลูชันแล้วสังเกตขอบภายในฮิสโตแกรมลายนิ้วมือด้วยตาเปล่าไม่สะดวก แนะนำให้ปรับคอนทราสต์ (Contrast) และ/หรือความสว่าง (Brightness) ของภาพคอนโวลูชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำภาพ $f * g$ มาคำนวณค่า σ^2 จะได้ค่า VOL
5. หาค่า VOL ของภาพทั้งหมดที่ต้องการเปรียบเทียบ ภาพที่มีค่า VOL มากที่สุดอาจจะคมชัดที่สุด

2.1.4 ภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint image)

ลายนิ้วมือ (Fingerprint) คือลวดลายบนผิวหนังของบริเวณด้านหน้าของปลายนิ้วมือ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญสองประการได้แก่เส้นลายนิ้วมือ (Fingerprint ridge) และร่องลายนิ้วมือ (Fingerprint valley)

ภาพลายนิ้วมือเป็นข้อมูลภาพชนิดหนึ่งและสามารถบันทึกภาพของวัตถุนี้ได้ด้วยเทคนิคฮอโลกราฟีเช่นกัน



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ

ปัญหาที่สำคัญของเรื่องคุณภาพของภาพลายนิ้วมื่อดังรูปที่ 2.8 เช่น

- (1) มีจตุรบกวน (Noise) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการรีคอนสตรัคต์หรือการประมวลผลโดยไม่มีการลดหรือกำจัดจตุรบกวน

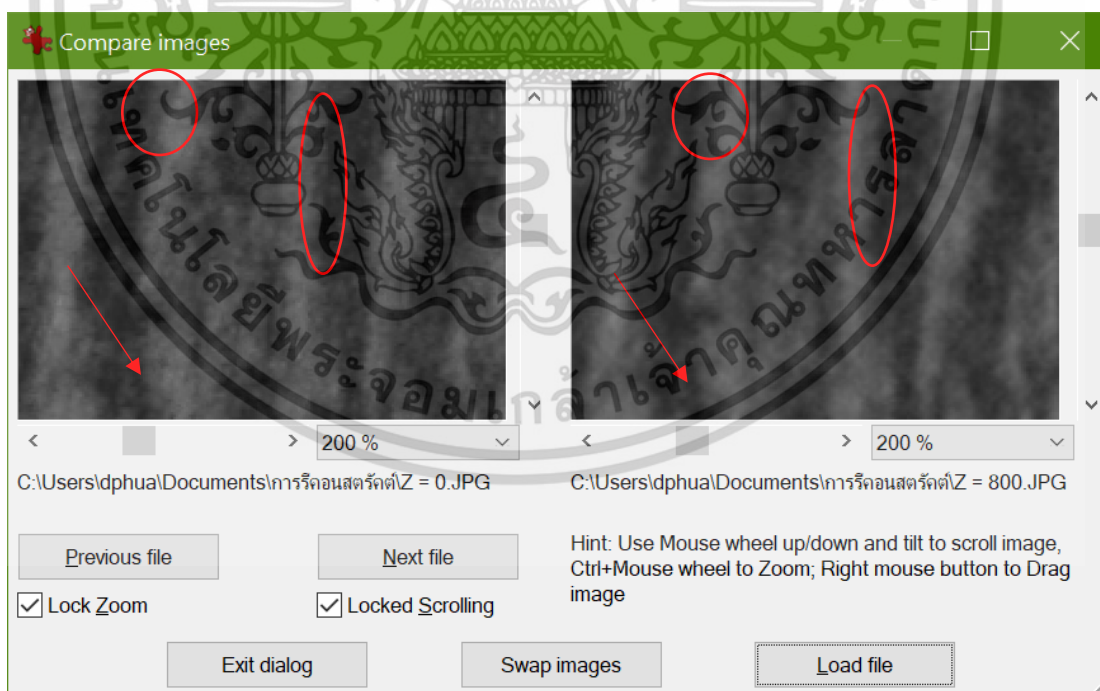
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) คอนทราสต์ต่ำ (Low contrast) ซึ่งสามารถทำการปรับ (Adjust) ได้
- (3) เส้นลายนิ้วมือบางส่วนไม่ค่อยมีความชัดเจน (Clarity)

สำหรับการแก้ปัญหาทางด้านคุณภาพของภาพลายนิ้วมือที่สแกนด้วยเทคนิคดิจิทัลฮอโลกราฟี อาจแก้ปัญหาได้ด้วยการรีคอนสตรัคต์เพื่อปรับเลื่อนระยะโฟกัส

ในทางดิจิทัลฮอโลกราฟี ปัญหาที่พบคือเมื่อทำการรีคอนสตรัคต์ฮอโลแกรมลายนิ้วมือด้วยระยะห่างที่ต่าง ๆ กันแล้ว ภาพมีความแตกต่างกันก็จริงแต่สังเกตด้วยตาเปล่าได้ยาก เนื่องจากแต่ละภาพต่างกันเพียงเล็กน้อย (ค่าระยะห่าง z เล็กมาก) ยากต่อการสังเกตหรือพิจารณาเพื่อตัดสินว่าภาพใดมีความคมชัดกว่ากัน แต่ถ้าต้องการภาพที่มีคุณภาพสูงที่สุด ควรหาวิธีหรือเครื่องมืออย่างเช่นโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยตัดสิน

ความคมชัดของภาพลายนิ้วมือ อาจพิจารณาได้จากส่วนขอบภายในรูปภาพเช่นกัน เช่นขอบของบริเวณเส้นลายนิ้วมือ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.9 ภาพรีคอนสตรัคต์ที่ระยะห่าง $0 \mu\text{m}$ มีความชัดเจนกว่าภาพรีคอนสตรัคต์ที่ระยะห่าง $800 \mu\text{m}$ โดยยังไม่คำนวณความแปรปรวนของขอบภาพ



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการเปรียบเทียบส่วนของภาพลายนิ้วมือจากสองภาพรีคอนสตรัคชันที่กลุ่มพิกเซล

ตำแหน่งเดียวกันโดยใช้โปรแกรม IrfanView เวอร์ชัน 4.60 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลงานที่เกี่ยวข้อง

มงคล คงศักดิ์ ได้พัฒนาโปรแกรมภาษา Python สำหรับวีคอนสตรัคต์ออนไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรม ในส่วนหนึ่งของงานวิจัยหนึ่ง (มงคล, 2562) ปัญหาพิเศษนี้ได้้นำโค้ดต้นฉบับมาแก้ไขตัดแปลงเพื่อ แก้ปัญหาตามวัตถุประสงค์

ปัญหาพิเศษนี้เป็นการศึกษาว่าแต่ละระยะวีคอนสตรัคชัน คุณภาพของภาพด้านความคมชัด เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร บทที่ 3 ถัดไปจะเป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการในการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

การดำเนินการเพื่อศึกษาความคมชัดของภาพรีคอนสตรัคต์ของอินไลน์ดิิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ มีการดำเนินการดังนี้

- 1) การดำเนินการรีคอนสตรัคต์อินไลน์ดิิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ
- 2) การดำเนินการศึกษาหาวิธีตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์
 - ทดลองหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วนของบางรูปภาพ
 - ทดลองหาค่าความแปรปรวนของ Laplacian (VOL) ของบางรูปภาพ
 - เลือกวิธีที่เหมาะสม โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองของชุดภาพรีคอนสตรัคต์
- 3) การดำเนินการตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์

3.1 การดำเนินการรีคอนสตรัคต์อินไลน์ดิิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือ

- ชุดข้อมูลภาพที่ดำเนินการมีจำนวนรวม 21 รูป ประกอบด้วย นิ้วกลาง 12 รูปและนิ้วนาง 9 รูป
- ลักษณะที่สำคัญของภาพลายนิ้วมือ: เส้นลายนิ้วมือสีสว่าง (Light) ร่องลายนิ้วมือสีเข้ม (Dark) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.8 ในบทที่ 2
- ทำการรีคอนสตรัคต์โดยใช้วิธีสเปกตรัมเชิงมุมที่ระยะห่าง z ตั้งแต่ 0 ถึง 1000 μm โดยเพิ่มทีละ 1 μm



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือด้วยฮอโลกราฟี (ภาพ 603 ในชุดข้อมูล) และภาพรีคอนสตรัคต์ที่ค่า $z = 0 \mu\text{m}$ และ $z = 1 \mu\text{m}$

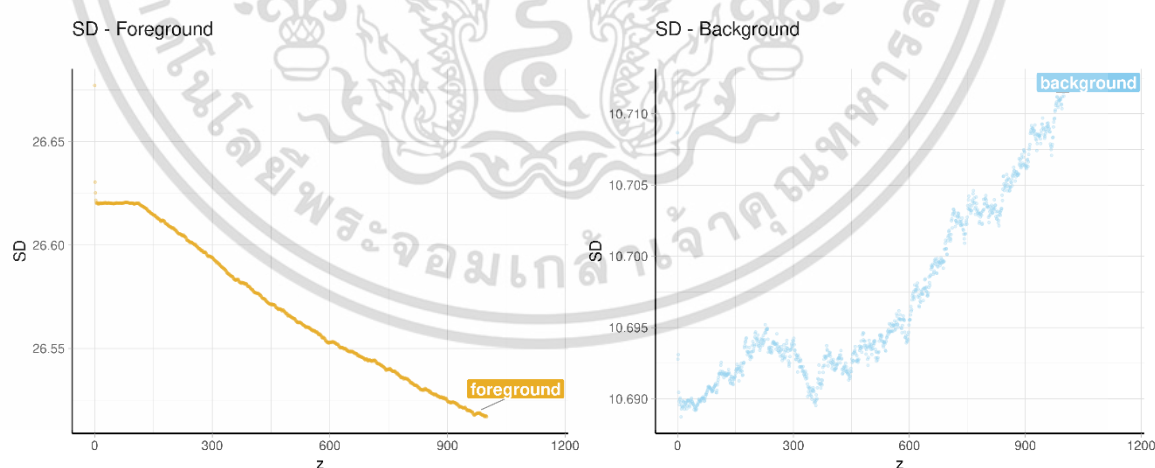
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การดำเนินการศึกษาหาวิธีตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์

ช่วงแรกผู้จัดทำปัญหาพิเศษได้ใช้วิธีการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วน (Local standard deviation) กับบางรูปภาพในชุดข้อมูล

ขั้นตอนการหาค่า σ เฉพาะส่วนในที่นี้เริ่มจากการแยกพื้นหน้า (Foreground) และพื้นหลัง (Background) ออกจากกันโดยใช้วิธีของ Otsu (Otsu, 1979) ซึ่งวิธีนี้เป็นการเลือกค่า Threshold สำหรับแยกโดยอัตโนมัติว่าพิกเซลระดับสีใดเป็นพื้นหน้าและระดับสีใดเป็นพื้นหลัง หลังจากทำการ Otsu's thresholding แล้วจึงคำนวณค่า σ ของพื้นหน้าและพื้นหลัง

ในกรณีนี้ (ภาพที่ใช้ในงานนี้) ค่า σ เฉพาะส่วนอาจไม่สามารถบ่งบอกความคมชัดครอบคลุมหรือความคมชัดโดยรวม (Global sharpness) ได้ดีเท่ากับค่า VOL อาจเป็นเพราะค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนพื้นหน้า (เส้นลายนิ้วมือและพื้นหลังที่เป็นสีเทา) ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของส่วนพื้นหลัง (ร่องลายนิ้วมือและพื้นหลังที่เป็นสีดำ) กล่าวคือการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วน (พื้นหน้าและพื้นหลัง) ไม่สามารถสรุปตัดสินได้เหมือนค่า VOL (ตัดสินจากบริเวณขอบอย่างเดียว) สำหรับภาพในชุดข้อมูลที่ใช้ทดลองในปัญหาพิเศษนี้



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วนของพื้นหน้าและพื้นหลังของภาพรีคอนสตรัคต์ที่ $z = [0,1000] \mu\text{m}$ จากภาพ 603 ในชุดข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 เส้นกราฟส่วน Foreground ที่มีแนวโน้มค่าลดลง เส้นกราฟส่วน Background ที่มีแนวโน้มค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึง ภาพฮอโลแกรมลายนิ้วมือเหล่านี้เป็นภาพสามมิติที่มีความนูนของเส้นลายนิ้วมือ (Ridge) และความลึกของร่องลายนิ้วมือ (Valley) ที่ระยะโฟกัสเดียวกัน ว่าคุณภาพทั้งสองส่วนนี้ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน (Valley อยู่ลึกกว่า Ridge หลาย μm พอสมควร)

ดังนั้น สำหรับการวัดความคมชัดแบบครอบคลุม (Global sharpness) ควรคำนวณการกระจายตัว (เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความแปรปรวน) จากบริเวณส่วนขอบเพื่อตัดสิน แทนที่จะคำนวณการกระจายตัวจาก Foreground และ Background

3.3 การดำเนินการตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์

หลังจากดำเนินการศึกษาวิธีตัดสินเปรียบเทียบภาพรีคอนสตรัคต์ในหัวข้อที่ 3.2 แล้ว ผู้จัดทำได้ตัดสินใจเลือกใช้ค่าความแปรปรวนของ Laplacian (Variance of Laplacian: VOL) โดยทำการทดลองคำนวณค่า VOL ของแต่ละภาพรีคอนสตรัคต์ 1,001 ภาพจากภาพต้นฉบับ แล้วเรียงลำดับจากมากไปน้อยและเลือกค่า z ที่มี VOL สูงที่สุดให้เป็นระยะโฟกัส ผู้จัดทำไม่ได้ประมวลผลด้วยการทำวินโดวส์ย่อยด้วยเหตุผล 2 ประการ ได้แก่ 1) การคำนวณแบบ Global ได้ผลลัพธ์ที่ดีพอจะนำไปประเมินคุณภาพได้ และ 2) การวัด Local sharpness ที่ดีอาจไม่ใช่การคำนวณจากรูปร่างสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangle) เสมอไป ซึ่งอาจต้องใช้พื้นฐานความรู้นอกเหนือจากขอบเขตงาน เช่น Compressive holography

บทที่ 4

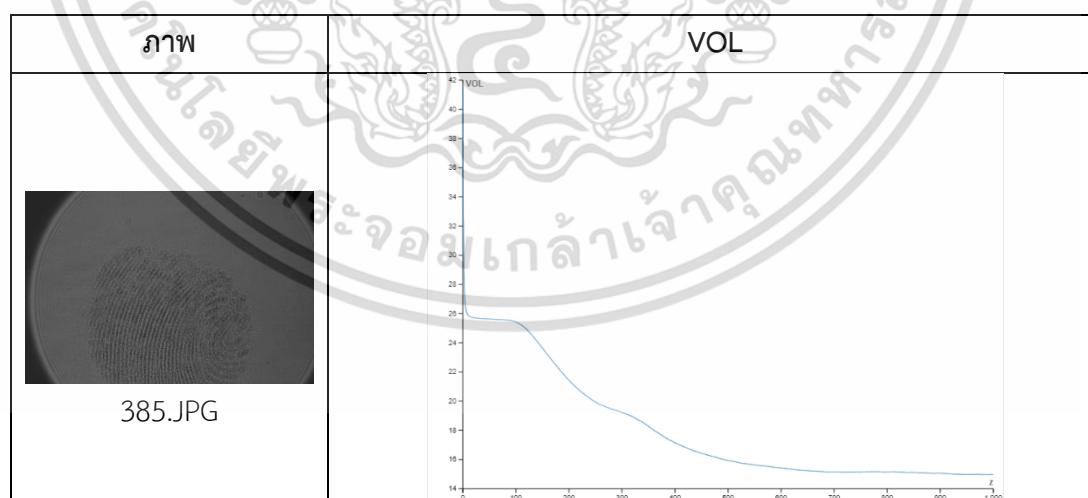
ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผล

บทนี้แสดงผลการดำเนินการจากบทที่ 3 และทำการวิเคราะห์สรุปผลที่แสดง

4.1 ผลการทดลองคำนวณค่า VOL ของภาพรีคอนสตรัคต์

การ Setup การประมวลผลของโครงงานนี้ เริ่มจากการแก้ไขโค้ดต้นฉบับของโปรแกรมรีคอนสตรัคชันให้สามารถใช้รีคอนสตรัคต์ภาพฮอโลแกรมแบบวนลูบซ้ำ 0-1000 μm และ Export เป็นไฟล์ภาพ “Z = z.JPG” \rightarrow เขียนโค้ดสำหรับคำนวณ VOL (ในภาคผนวก ค) โดยกำหนดให้อ่านไฟล์ภาพที่ Export จากโปรแกรมรีคอนสตรัคชัน วนลูบเพื่ออ่านไฟล์ภาพและหา Laplacian filter ต่อด้วย Variance จะได้ค่า VOL พอจบลูบแล้วก็นำค่า VOL ที่เก็บใส่อาร์เรย์มาทำการ Return ดัชนีที่มีค่า VOL มากที่สุด และได้มีการนำข้อมูลค่า z และ ค่า VOL ของทุกภาพรีคอนสตรัคต์ไปทำเป็นกราฟแบบเส้นโดยใช้เว็บแอปพลิเคชัน <https://app.rawgraphs.io/> กับชุดภาพรีคอนสตรัคต์ของภาพนี้วงกลาง 12 ภาพ นี้วง 9 ภาพ ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงกราฟของค่า VOL ของภาพรีคอนสตรัคต์ที่ค่าระยะห่าง z ตั้งแต่ 0 ถึง 1,000 μm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์ผลการดำเนินการ

จากตาราง 4.1 ค่า VOL ของทั้ง 21 ชุดภาพรีคอนสตรัคต์ มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน คือแต่ละชุดมีค่าความแปรปรวนของขอบภาพที่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่กลุ่มของภาพที่ค่า z ช่วงท้ายๆ ไม่ได้เป็นไปตามรูปแบบดังกล่าว (แต่ค่า VOL ของภาพเหล่านี้ไม่มากกว่าช่วงต้นๆ)

ค่า VOL ที่มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 900 เศษ (ยกเว้นภาพ 700 ของนิวกลางอยู่ที่ประมาณ 800 เศษ) สรุปได้ว่าระยะห่างที่น้อยกว่าภาพจะมีแนวโน้มคมชัดกว่า

จากผลการทดลองคำนวณค่า VOL จากภาพรีคอนสตรัคต์ของฮอโลแกรมลายนิ้วมือในหัวข้อที่ 3.3 พบว่าภาพรีคอนสตรัคต์ที่ $z = 0 \mu\text{m}$ มีค่ามากที่สุดทุกกรณี และมากกว่าภาพรีคอนสตรัคต์ที่ z อื่นๆ (1 ถึง $1,000 \mu\text{m}$) อย่างโดดเด่น

ตัดสินใจได้ว่าภาพที่ $z = 0 \mu\text{m}$ เป็นภาพที่คมชัดที่สุดหรือเบลอร์น้อยที่สุดในกลุ่มภาพรีคอนสตรัคต์ที่ $z = [0, 1000] \mu\text{m}$ เมื่อ z เป็นจำนวนเต็มใดๆที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการดำเนินการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของภาพรีคอนสตรัคชัน มีข้อสรุปดังนี้

- 1) การตัดสีภาพตามความแปรปรวนของ Laplacian อาจเหมาะกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วน
- 2) ค่าระยะห่างที่ทำให้รีคอนสตรัคต์ภาพลายนิ้วมือได้ชัดที่สุดหรือเบลอร์น้อยที่สุด สำหรับระยะห่าง z ที่ $0, 1, 2, \dots, 1000 \mu\text{m}$ คือ $0 \mu\text{m}$

บทสรุปของการจัดทำโครงการการวัดโฟกัสของอินไลน์ดิจิทัลสไลด์แกรมของลายนิ้วมือนี้ ได้แก่

- 1) ได้ศึกษาการวัดโฟกัสของภาพในชุดข้อมูลจากผลการคำนวณการกระจายตัวของความเข้มสี โดยใช้วิธีการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Foreground และ Background ซึ่งปัญหาทางด้านมิติของภาพ (Ridge นูน และ Valley ลึก) ทำให้หา Global sharpness ได้ยาก จึงเปลี่ยนมาใช้วิธีการหาค่าความแปรปรวนของภาพแทน แล้วอนุมาน Global sharpness จาก Edge sharpness (โดยใช้ Laplacian filter) สรุปคือค่าความแปรปรวนของ Laplacian บ่งบอกความคมชัดแบบครอบคลุมได้ดีกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นหน้า-พื้นหลัง
- 2) รูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความแปรปรวนของขอบ (Edge variance) ของภาพรีคอนสตรัคต์เฉพาะกรณีชุดข้อมูลนี้ คือ ที่ $z = 0 \mu\text{m}$ จะมากที่สุดและมากเกิน $z =$ ค่าอื่น อย่างโดดเด่น และ z อื่นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ แต่ z ที่ช่วงท้ายๆ มีแนวโน้มต่างออกไป แต่มีค่าความแปรปรวนของขอบไม่มากกว่าช่วงเริ่มต้น สรุปคือระยะรีโฟกัส (ระยะห่างที่ทำให้รีคอนสตรัคต์ภาพลายนิ้วมือได้ชัดที่สุดหรือเบลอร์น้อยที่สุด) คือ $0 \mu\text{m}$ สำหรับระยะห่าง z ที่ $0, 1, 2, \dots, 1000 \mu\text{m}$

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัญหาพิเศษฉบับนี้ ยังมีข้อจำกัดหลายประการ

- 1) จุตรบวกรวมอาจมีผลต่อคุณภาพของภาพอยู่แล้วประเด็นหนึ่งและจุตรบวกรวมอาจมีผลต่อการวัดความคมชัดได้ถ้าหากอัลกอริธึมที่ใช้มีความอ่อนไหว (Sensitive) ต่อจุตรบวกรวม ถ้าหากมีการกำจัดจุตรบวกรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้มีผู้เผยแพร่เห็นเป็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจทำให้ได้ภาพรีคอนสตรัคต์และผลการเปรียบเทียบที่ดีกว่านี้ หรืออาจเลือกใช้อัลกอริธึมที่อ่อนไหวต่อจุดรบกวนน้อยก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

2) ระยะห่างในการรีคอนสตรัคต์ ควรมีการกำหนดให้ละเอียดกว่านี้ เช่นเพิ่มครั้งละ $0.1 \mu\text{m}$

3) อาจทดสอบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลเทียบกับ การแบ่งภาพให้เป็นวินโดว์ย่อยๆ (Sub-windows) กล่าวคือไม่ได้วัดความคมชัดแบบเฉพาะส่วน (Local sharpness)



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการออกแบบวินโดว์ย่อยสำหรับการวิเคราะห์หรือประมวลผลแบบเฉพาะส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

มงคล คงศักดิ์. 2562. การพัฒนาดีจิตอลโฮโลกราฟีโดยใช้ภาษาโปรแกรมไพธอนสำหรับวัดมุมสัมพันธ์ของสารเชื่อมประสาน. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Apple Inc. 2022. Finding the Sharpest Image in a Sequence of Captured Images | Apple Developer Documentation. [Online].
https://developer.apple.com/documentation/accelerate/finding_the_sharpest_image_in_a_sequence_of_captured_images.

Cuemath. 2022. Standard Deviation - Formula, Definition, Methods, Examples. [Online]. <https://www.cuemath.com/data/standard-deviation/>.

Fisher, R. 1919. XV.—The Correlation between Relatives on the Supposition of Mendelian Inheritance. 399-433. in Transactions of the Royal Society of Edinburgh. City is unknown.

Goodman, J. 1996. Introduction to Fourier Optics. New York. McGRALL-HILL.

Guest, C. 2003. Holography. In Encyclopedia of Physical Science and Technology. Third Edition. City is unknown. Academic Press.

Otsu, N. 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. 62-66. in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. City is unknown.

Wang, Z., Qu, W., Yang, F., Wen, Y., and Anand, A. 2015. A new autofocus method based on angular spectrum method in digital holography. in Proceedings of SPIE - The International Conference on Photonics and Optical Engineering. Xi'an.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โค้ดของโปรแกรมรีคอนสตรัคต์รูปภาพ (ภาษาเขียนโปรแกรม Python)

#Original source code: Mongkol Kongsak. (2019). In-line Digital Holography with Python Programming Language for Observing Solder Paste Contact Angle (Bachelor's special project). Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

```
import numpy as np
from numpy.fft import fft2, fftshift, ifft2
import cv2

##### parameter of Image and hologram (depend on experiment) #####
lambda_wave = 635e-9 #wavelength unit: m
deltax = 6.41e-6 #size pixel unit: m
deltay = 6.41e-6 #size pixel unit: m
M = 3456
N = 2304

#Start loop
for z in np.arange(0, 1e-3, 1e-6, dtype = np.double):
    deltafx = 1/(M*deltax)
    deltafy = 1/(N*deltay)
    k = 2*np.pi/lambda_wave
    x = np.linspace(1,M,M)
    y = np.linspace(1,N,N)
    X,Y = np.meshgrid(x,y)
    M1 = (M/2)-1
    N1 = (N/2)-1
    X1 = lambda_wave*deltafx
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Y1 = lambda_wave*deltafy
position_x = np.subtract(X,M1)
position_y = np.subtract(Y,N1)
axis_x = np.power(np.multiply(position_x,X1),2)
axis_y = np.power(np.multiply(position_y,Y1),2)
gamma = np.power(np.subtract(1,np.subtract(axis_x,axis_y)),0.5)
Fz = np.exp(-1j*z*k*gamma)
img = cv2.imread('filename.JPG', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
FFT = fftshift(fft2(fftshift(img)))
IFFT = fftshift(iff2(fftshift(FFT*Fz)))
IFFT = np.abs(IFFT)
IFFT = np.asarray(IFFT,dtype=np.uint8)
d = round(z*1000000); d_toString = str(d) # Unit conversion (convert from metre
to micrometre)
cv2.imwrite('Z = '+d_toString+'.JPG', IFFT)
print('Reconstructed at z = '+d_toString)
#End loop

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โค้ดของโปรแกรมคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉพาะส่วนของภาพรีคอนสตรัคต์ (ภาษาเขียนโปรแกรม Python)

```
import skimage.io
import skimage.color
import skimage.filters
import numpy
import numpy as np

arraySD_FG = np.arange(0, 1001, 1, dtype = np.double)
arraySD_BG = np.arange(0, 1001, 1, dtype = np.double)

for z_index in np.arange(0, 1001, 1):
    z_index_toString = str(z_index)
    img1 = 'Z = '+z_index_toString+'.JPG'; img2 = str(img1)
    img3 = skimage.io.imread(img2)
    t = skimage.filters.threshold_otsu(img3)
    binary_mask = img3 > t; selectFG = img3.copy(); selectFG[~binary_mask] = 0
    binary_mask = img3 <= t; selectBG = img3.copy(); selectBG[~binary_mask] = 0

    arraySD_FG[z_index] = selectFG.std()
    arraySD_BG[z_index] = selectBG.std()

    arraySD_FG_toString = str(arraySD_FG[z_index])
    arraySD_BG_toString = str(arraySD_BG[z_index])
    print(z_index_toString+', '+arraySD_FG_toString+', '+arraySD_BG_toString)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มปัญหาพิเศษ

วันที่ 30 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2565

ข้าพเจ้า นายเทพประสิทธิ์ พวงยอด รหัสประจำตัว 61050948

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ขอรับรองว่า
ปัญหาพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การวัดโฟกัสของอินไลน์ดิจิทัลฮอโลแกรมของลายนิ้วมือตามความแปรปรวนของ Laplacian

ชื่อภาษาอังกฤษ Focus Measurement of In-line Digital Holograms of Fingerprints Based on Variance of
Laplacian

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานทางวิชาการที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว
และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มปัญหาพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.67%

ลงชื่อ.....เทพประสิทธิ์.....

(นายเทพประสิทธิ์ พวงยอด)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า อ.สันธนะ อุ่อตมยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ ได้ตรวจสอบปัญหาพิเศษของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอ
รับรองว่าเป็นผลงานทางวิชาการของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้