

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ดิจิทัลโฮโลกราฟีสำหรับการศึกษาออปติกส์ในระดับปริญญาตรี
Digital Holography for Optics Undergraduate student



ดร. ประธาน บุรณศิริ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จาก เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ดิจิทัลโฮโลกราฟีสำหรับการศึกษาออปติกส์ในระดับปริญญาตรี
Digital Holography for Optics Undergraduate student

ดร. ประธาน บุรณศิริ

b. 12527526
i.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จาก เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ดิจิตอลโฮโลกราฟีสำหรับการศึกษาอปกติสในระดับปริญญาตรี

แหล่งเงิน เงินรายได้ประเภททุนวิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตอุปกรณ์ฯ

ประจำปีงบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 300,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2557 ถึง กันยายน 2558

หัวหน้าโครงการ ดร.ประธาน บุรณศิริ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอเครื่องมือช่วยในการเรียนรู้เกี่ยวกับเรื่องดิจิตอลโฮโลกราฟี ซึ่งใช้ในการ เรียนการสอน ในรายวิชาปฏิบัติการทางทัศนศาสตร์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยี - พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อให้นักศึกษา ได้มีความเข้าใจใน หลักการและข้อดี รวมถึงการประยุกต์ใช้งานของดิจิตอลโฮโลกราฟี โดยการทดลองนั้นจะทำการติดตั้ง อุปกรณ์แบบโฮโลแกรมของกาเบอร์ โดยใช้วัตถุตัวอย่างวางที่ต่างระยะกัน จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อ เปรียบเทียบการโฟกัสโดยการใช้เลนส์และการโฟกัสโดยใช้เทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟี จากการทดลอง ทำให้นักศึกษาได้ทราบว่า การโฟกัสภาพที่มีหลายระนาบด้วยเทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟีนั้น จะใช้การบันทึกภาพ เพียงครั้งเดียว ในขณะที่การโฟกัสด้วยการใช้เลนส์นั้นจำนวนภาพที่ต้องบันทึกต้องเท่ากับจำนวน ระยะของ ภาพที่บันทึก และจากการทดลองพบว่าดิจิตอลโฮโลกราฟีสามารถช่วยในการตรวจสอบรอยตำหนิในขวด แก้วและวัดขนาดของเส้นผมได้ นอกจากนี้แล้วเครื่องมือดิจิตอลโฮโลกราฟีได้สร้างขึ้นมานี้ถูกออกแบบ ให้ มีขนาดที่สามารถพกพาได้สะดวกเพื่อให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายในการนำออกไปใช้สอนนอกสถานที่

คำสำคัญ : ดิจิตอลโฮโลกราฟี, การศึกษาทางทัศนศาสตร์

Research Title: Digital Holography for Optics Undergraduate student

Researcher: Prathan Buranasiri (Ph.D)

Faculty: Science **Department:** Physics

Researcher: Assoc.Prof.Kannachai Kanlayasiri (Ph.D)

Faculty: Engineer **Department:** Industrial Engineering

ABSTRACT

In this research, we discuss the digital holography (DH) experiment in our optical and communication laboratory course for undergraduate students at Physics department, KMITL. The purposes of DH experiment are presenting our students the meaning and advantage of DH and its applications. The Gabor configurations of in-line DH has been set up for recording a number of samples, which were placed on different distances, simultaneously. Then, the images of all objects have been numerical reconstructed by using computer. The students have been learned that all of reconstructed images have been got from only one time recording, while using the conventional recording technique, sharp images of different objects have been gotten from different recording time. The students also have been learned how to use DH technique for investigation some different kinds of samples on their own of interested such as a defect in glass bottle and hair. Moreover, our system has been developed to be a portable apparatus for easily showing to children in different areas.

Keywords: digital holography, optical education

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ประเภททุนวิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตอุปกรณ์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ดร. ประธาน บุรณศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญภาพ.....	vi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และการทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 โฮโลกราฟี.....	3
2.2 ดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	5
2.2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการสร้างขึ้นใหม่.....	7
2.2.1.1 การจำลองการเลี้ยวเบน.....	7
2.2.1.2 การสร้างภาพกลับ.....	9
2.2.2 Angular spectrum method(ASM).....	10
2.3 การแปลงฟูเรียร์.....	12
2.4 แก้ว.....	12
2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	20
3.1.1 การศึกษาหลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	20
3.1.2 การประยุกต์ใช้ดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 การหารอยตำหนิในขวดแก้ว.....	21
3.1.2.2 การวัดขนาดของเส้นผม.....	22
3.2 การออกแบบชุดทดลอง.....	22
3.3 คู่มือการทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	26
4.1 ภาพถ่ายโดยไม่มีการใช้เลนส์ช่วยโฟกัส.....	26
4.2 ภาพถ่ายโดยการใช้เลนส์ช่วยโฟกัส.....	26
4.3 ภาพถ่ายจากการใช้ดิจิตอลไฮโลกราฟีช่วยโฟกัส.....	28
4.4 ภาพถ่ายจากการประยุกต์ใช้ดิจิตอลไฮโลกราฟี.....	31
4.4.1 การหารอยตำหนิในขวดแก้ว.....	31
4.4.2 การวัดขนาดของเส้นผม.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	37
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	37
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	37
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	38
6.1 สรุปรายชื่อผลผลิตงานวิจัย.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	40
ภาคผนวก ก เอกสารผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	41
ภาคผนวก ข คู่มือการทดลอง.....	50
ภาคผนวก ค ภาพของชิ้นงานที่สร้างเสร็จ.....	59
ประวัตินักวิจัย.....	64

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การบันทึกภาพโฮโลแกรม.....	3
2.2 การอ่านภาพโฮโลแกรม.....	4
2.3 หลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	6
2.4 การจำลองการเลี้ยวเบนที่ระยะต่าง.....	7
2.5 ภาพจากการจำลองการเลี้ยวเบนที่ระยะต่าง.....	8
2.6 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบการสร้างภาพกลับที่ระยะต่างๆ.....	9
2.7 ภาพจากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการสร้างภาพกลับ.....	10
2.8 ระยะโฟกัสตามแนวแกน z.....	11
2.9 แก้วโซดาไลม์.....	14
2.10 แก้วบอโรซิลิเกต.....	14
2.11 แก้วตะกั่ว.....	15
2.12 แก้วลูมิโนซิลิเกต.....	15
2.13 กลาส เซรามิกส์.....	16
2.14 การผลิตขวดแบบ Blow and Blow process.....	17
2.15 การผลิตขวดแบบ Press and Blow process.....	18
3.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาหลักการดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	20
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้.....	21
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจหารอยตำหนิในเนื้อแก้ว.....	21
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความหนาของเส้นผม.....	22
3.5 ชุดอุปกรณ์การทดลองที่ได้ออกแบบไว้.....	23
3.5 หน้าจอโปรแกรมสำหรับ reconstruction.....	25
4.1 ภาพที่ถ่ายโดยไม่มีเลนส์ช่วยโฟกัส.....	26
4.2 ภาพจากการใช้เลนส์ช่วยโฟกัสวัตถุ O_1	27
4.3 ภาพจากการใช้เลนส์ช่วยโฟกัสวัตถุ O_2	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่	หน้า
4.4 ตัวอย่างการเปิดไฟล์ภาพผ่านโปรแกรม reconstruction.....	28
4.5 ภาพจากการปรับระยะโฟกัสที่ $z=200$ มิลลิเมตร.....	29
4.6 ภาพจากการปรับระยะโฟกัสที่ $z=400$ มิลลิเมตร.....	30
4.7 ขวดแก้วตัวอย่าง.....	31
4.8 รอยตำหนิบนขวดแก้วจากการถ่ายด้วยดิจิตอลโฮโลกราฟี.....	33
4.9 ภาพถ่ายเส้นผมโดยไม่มีเลนส์ช่วยโฟกัส.....	34
4.10 ภาพถ่ายเส้นผมหลังผ่านกระบวนการ reconstruction.....	35
4.11 การวัดขนาดของเส้นผม.....	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนพื้นฐาน ได้แก่ การกำหนดปัญหา การตั้งสมมติฐาน การตรวจสอบสมมติฐาน การแปรผลและการสรุปผล ซึ่งหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญคือการตรวจสอบสมมติฐาน ในขั้นตอนนี้จะมีมีการทดลอง และการเก็บผลการทดลอง ซึ่งในการเก็บผลการทดลองนั้นจะอยู่ในรูปของการบันทึกผลเป็นตาราง คำบรรยาย เสียง หรือรูปถ่ายก็ได้ สิ่งทีบันทึกผลได้ดีที่สุดคือการบันทึกภาพถ่าย เพราะสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบที่ดี มีหลักฐานของผลการทดลองชัดเจน

ในอดีตนั้นการถ่ายภาพจะบันทึกภาพลงบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งเป็นการถ่ายภาพแบบธรรมดาคือเก็บข้อมูลเพียงความเข้มของแสง ไม่สามารถเก็บรายละเอียดของความชัดลึกได้ จึงได้มีการคิดค้นการถ่ายภาพด้วยเทคนิคใหม่ที่สามารถเก็บรายละเอียดของภาพได้ทั้งความเข้มและความชัดลึก ซึ่งเรียกว่า “โฮโลแกรม” ซึ่งการถ่ายภาพโฮโลแกรมนี้จะใช้แสงสองลำ ลำหนึ่งเรียกว่าแสงอ้างอิง และอีกลำหนึ่งเรียกว่าแสงวัตถุซึ่งเกิดจากการสะท้อนวัตถุ จากนั้นแสงทั้งสองลำนี้จะมาแทรกสอดและถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์ม ข้อดีของการบันทึกภาพด้วยวิธีนี้คือ สามารถเก็บข้อมูลระยะชัดลึกของวัตถุได้ หรือสามารถบันทึกข้อมูลแบบ 3 มิติได้นั่นเอง อย่างไรก็ตามในการบันทึกภาพด้วยแผ่นฟิล์มนั้นเกิดความสิ้นเปลืองเป็นอย่างมาก จึงได้มีการคิดค้นการบันทึกภาพด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น กล้องดิจิตอล เป็นต้น ซึ่งกล้องดิจิตอลเหล่านี้สามารถนำมาพัฒนาให้บันทึกภาพแบบโฮโลกราฟีได้ โดยนำภาพถ่ายที่ได้เข้ามาประมวลผลใหม่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งการบันทึกภาพโฮโลแกรมลงบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ ต่อมาได้ถูกเรียกเทคนิคนี้ว่า “ดิจิตอลโฮโลกราฟี”

อย่างไรก็ตามการศึกษาทฤษฎีหลักการและการทดลองของดิจิตอลโฮโลกราฟีนั้น เป็นสิ่งที่ค่อนข้างยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างอุปกรณ์ช่วยในการบันทึกภาพถ่ายแบบโฮโลกราฟีในปฏิบัติการทัศนศาสตร์ของนักศึกษาของนักศึกษาปริญญาตรี เพื่อให้ง่ายต่อการบันทึกผลการทดลอง เก็บผลการทดลองในรูปแบบของภาพ 3 มิติ และนอกจากนี้ ยังสามารถฝึกฝนทักษะการทดลองตลอดจนการติดตั้งอุปกรณ์อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 1.2.2 เพื่อสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพที่สามารถเก็บความชัดลึกของภาพ มาใช้ช่วยในการเรียนการสอน และการบันทึกภาพของปฏิบัติการทางทัศนศาสตร์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี
- 1.2.3 เพื่อนำอุปกรณ์ที่ได้สร้างในข้อ 1.2.2 มาใช้ตรวจสอบหารอยตำหนิในขวดแก้ว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพแบบ 3 มิติ เพื่อมาใช้ช่วยในการเรียนรู้และบันทึกภาพของปฏิบัติการทางทัศนศาสตร์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี โดยจะทำการทดลองเพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างระหว่างการถ่ายภาพแบบธรรมดากับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟี หลังจากนั้นจะทำการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างเพื่อทำการวัดขนาดหรือรูปทรง และตรวจสอบรอยตำหนิในขวดแก้ว

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของการถ่ายภาพดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 1.4.2 ออกแบบการทดลอง ชุดอุปกรณ์ที่จะสร้างเพื่อนำไปใช้ช่วยในการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการทางทัศนศาสตร์
- 1.4.3 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบและสร้างไว้
- 1.4.4 ทำการถ่ายภาพวัตถุด้วยเทคนิคการถ่ายภาพแบบทั่วไป และแบบดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 1.4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพจากทั้งสองวิธี
- 1.4.6 ทำการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยเทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 1.4.7 จัดทำคู่มือการใช้งานของเครื่องมือดังกล่าว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้รับความรู้ความเข้าใจในการถ่ายภาพด้วยเทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 1.5.2 ได้เครื่องมือบันทึกภาพที่มีความชัดลึกมาช่วยในการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการทางทัศนศาสตร์
- 1.5.3 สามารถตรวจสอบรอยแตกร้าวในเนื้อแก้วของขวดแก้วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

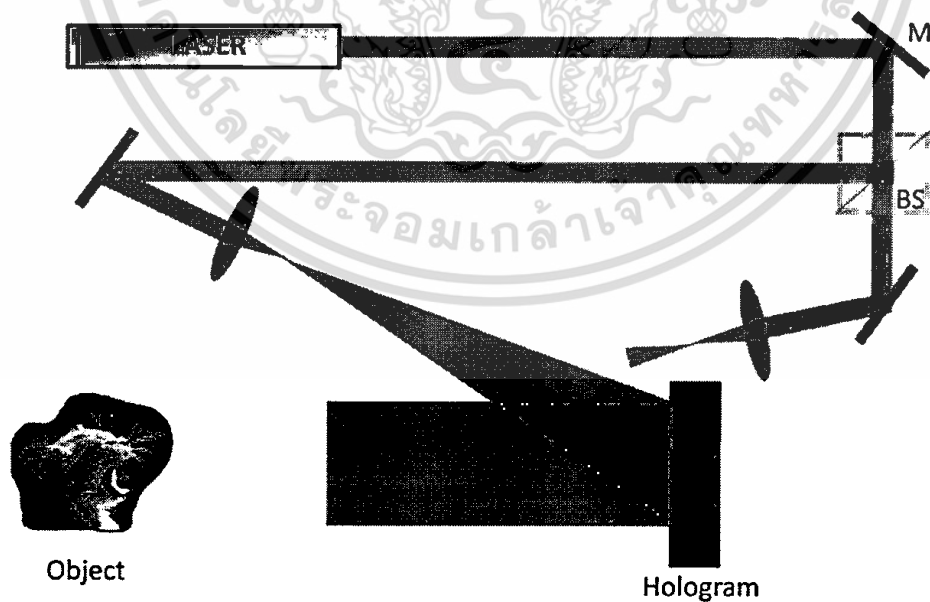
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และการทบทวนวรรณกรรม

2.1 โฮโลกราฟี

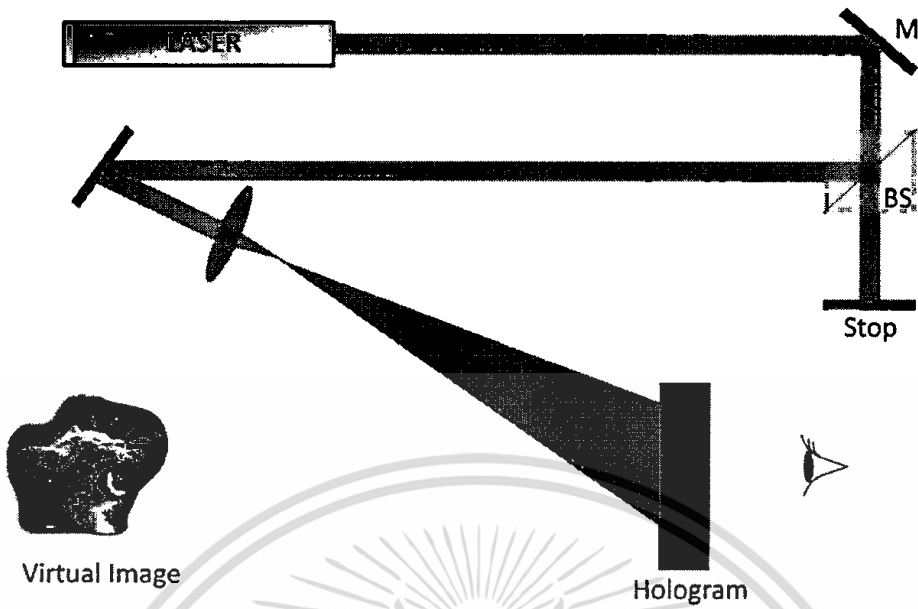
การถ่ายภาพโฮโลแกรมคือการถ่ายภาพที่มีการจัดอุปกรณ์ทางแสงโดยประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์(เลเซอร์) กระจกและเลนส์สำหรับการจัดลำแสง แผ่นฟิล์มสำหรับบันทึกภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 แสงอาพันธ์จากแหล่งกำเนิดถูกแยกเป็นสองลำแสงโดยบีมสปลิตเตอร์ ซึ่งลำแสงหนึ่งจะตกกระทบวัตถุ แล้วเกิดการกระเจิงและสะท้อนที่ผิวของวัตถุไปยังแผ่นบันทึกภาพ ส่วนอีกลำแสงหนึ่งเรียกว่าลำแสงอ้างอิง จะถูกบันทึกไปยังแผ่นบันทึกภาพโดยตรง ลำแสงทั้งสองลำจะเกิดการแทรกสอดกันที่แผ่นฟิล์มบันทึกภาพ เกิดเป็นริ้วการแทรกสอดขึ้นมา

ในการสร้างภาพโฮโลแกรมจะใช้ลำแสงอ้างอิงส่องไปที่แผ่นบันทึกภาพดังภาพที่ 2.2 ผู้สังเกตจะเห็นภาพเสมือนซึ่งไม่มีความแตกต่างจากวัตถุจริงทั้งทัศนียภาพและระยะชัดลึก



ภาพที่ 2.1 การบันทึกภาพโฮโลแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 การอ่านภาพโฮโลแกรม

กระบวนการถ่ายภาพโฮโลแกรมสามารถอธิบายได้ด้วยคณิตศาสตร์ของการรวมคลื่น โดยสนามไฟฟ้าของลำแสงวัตถุสามารถเขียนได้เป็น

$$E_o = a_o(x, y) \exp(i\varphi_o(x, y)) \quad (1)$$

และสนามไฟฟ้าของลำแสงอ้างอิงคือ

$$E_R = a_R(x, y) \exp(i\varphi_R(x, y)) \quad (2)$$

ซึ่งลำแสงทั้งสองลำจะเกิดการแทรกสอดกันที่ผิวของแผ่นบันทึกภาพ โดยสามารถคำนวณความเข้มแสงได้จาก

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_o(x, y) + E_R(x, y)|^2 \\ &= (E_o(x, y) + E_R(x, y))(E_o(x, y) + E_R(x, y))^* \\ &= E_R(x, y)E_R^*(x, y) + E_o(x, y)E_o^*(x, y) + E_o(x, y)E_R^*(x, y) + E_R(x, y)E_o^*(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งผ่านแอมพลิจูด $h(x,y)$ ของแผ่นบันทึกภาพจะเป็นสัดส่วนกับ $I(x,y)$ ดังนี้

$$h(x,y) = h_0 + \beta\tau I(x,y) \quad (4)$$

ในการสร้างภาพโฮโลแกรมนั้นการส่งผ่านแอมพลิจูดจะถูกคูณด้วยสนามไฟฟ้าของลำแสงอ้างอิง ดังสมการที่ 5

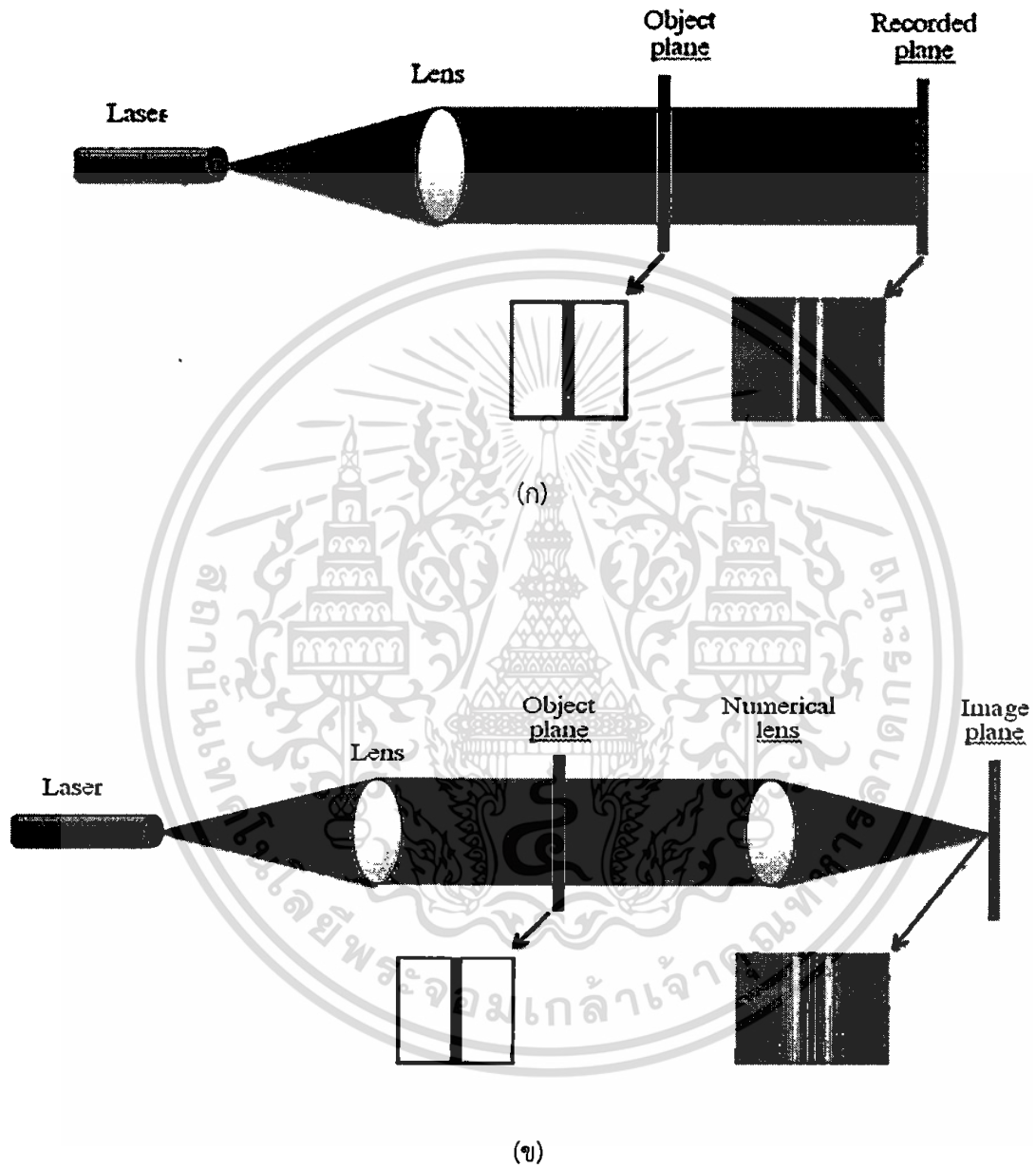
$$E_R(x,y)h(x,y) = [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)] E_R(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_O(x,y) + \beta\tau E_R^2(x,y)E_O^*(x,y) \quad (5)$$

พบว่าด้านขวาของสมการจะประกอบด้วยสนามไฟฟ้าสามเทอม เทอมแรกคือสนามไฟฟ้าของลำแสงอ้างอิง เทอมที่สองคือสนามไฟฟ้าของภาพเสมือน และเทอมสุดท้ายคือสนามไฟฟ้าของภาพจริงที่ผิดรูป ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ภาพจริงเกิดการผิดรูปคือความแปรปรวนของสนามไฟฟ้าโดยตำแหน่ง $E_R^2(x,y)$ ที่ผสมเข้ามากับสนามไฟฟ้าของภาพจริง อย่างไรก็ตามภาพจริงที่ผิดรูปนี้สามารถแก้ได้โดยใช้แสงคอนจูเกตในการสร้างภาพโฮโลแกรม ดังสมการที่ 6

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = [h_0 + \beta\tau(a_R^2 + a_O^2)] E_R^*(x,y) + \beta\tau a_R^2 E_O^*(x,y) + \beta\tau E_R^2(x,y)E_O(x,y) \quad (6)$$

2.2 ดิจิตอลโฮโลกราฟี [1]

ดิจิตอลโฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่บันทึกเฟสและแอมพลิจูดของรูปบนเซนเซอร์ภาพอิเล็กทรอนิกส์ เช่น CCD หรือ CMOS แทนการบันทึกบนแผ่นฟิล์ม หลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี คือ ใช้การกระจายของแสงผ่านวัตถุและ บันทึกบนแผ่นบันทึก ภาพที่บันทึกบนแผ่นจะไม่ชัดเจน ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงตามระยะทางที่ได้เคลื่อนที่ไป ดังแสดงในภาพที่ 2.3(ก) หลังจากที่ได้ใส่เลนส์จำลองที่ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แทนแผ่นบันทึก ภาพจะชัดเจนมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3(ข) ซึ่งการใส่เลนส์เข้าไปแทรกฉากภาพ จะทำให้ภาพถูกโฟกัส เรียกว่า กระบวนการสร้างขึ้นใหม่ (reconstruction)



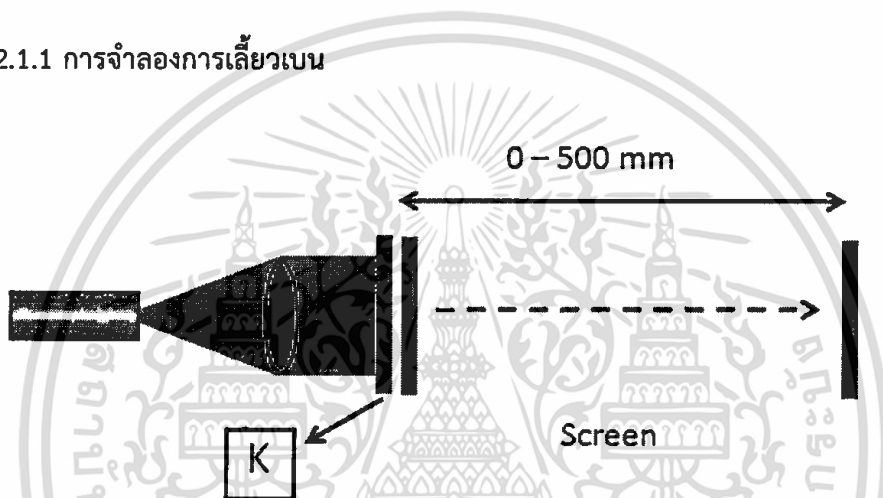
ภาพที่ 2.3 หลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างขึ้นใหม่โดยทั่วไปมีสองวิธี คือ HCM (Huygens convolution method) และ ASM (Angular spectrum method) เนื่องจาก HCM มีข้อจำกัดในการบันทึกแบบระยะใกล้ ดังนั้น ASM จึงถูกใช้ในการสร้างภาพดิจิทัลโฮโลกราฟีในงานนี้เพราะมีความสะดวก และง่ายต่อการใช้งาน

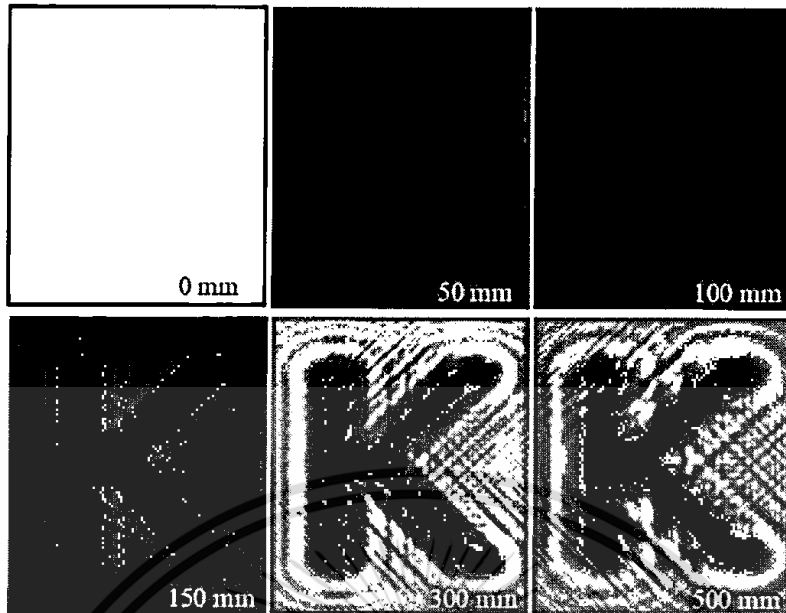
2.2.1 การเปรียบเทียบกระบวนการสร้างขึ้นใหม่

2.2.1.1 การจำลองการเลี้ยวเบน

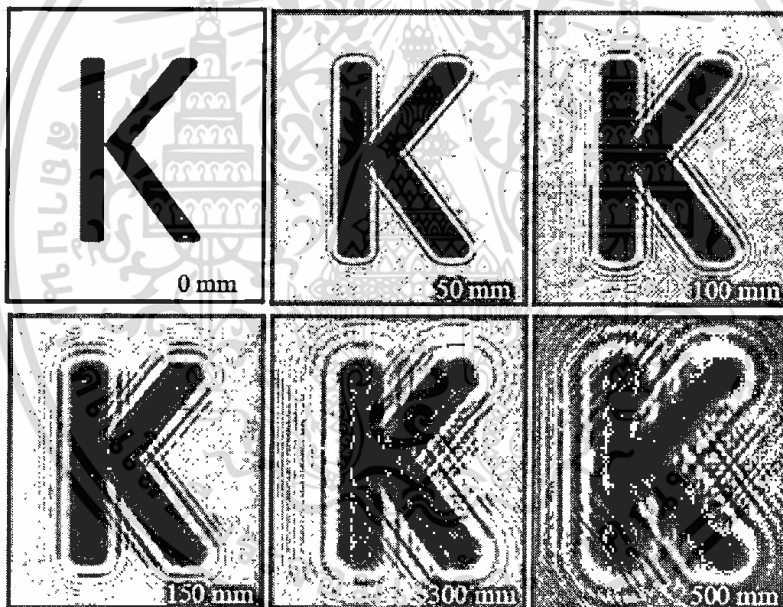


ภาพที่ 2.4 การจำลองการเลี้ยวเบนที่ระยะต่างๆ

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความต่างของทั้งสองวิธีที่ใช้ในการสร้างภาพใหม่ จะเริ่มจากการเทียบการจำลองการเลี้ยวเบนของแสงทั้งสองวิธี โดยจะจำลองให้มีแสงส่องผ่านวัตถุ ตัวอักษร “K” แล้วทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของแสงผ่านตัวอักษรที่ระยะต่างๆ ได้แก่ 0, 50, 100, 150, 300 และ 500 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2.4 โดยจากการจำลองการเลี้ยวเบนพบว่าวิธี Huygens convolution นั้น จะไม่สามารถจำลองการเลี้ยวเบนที่ระยะใกล้ๆได้ ในที่นี้คือระยะที่ต่ำกว่า 150 มิลลิเมตร แต่ในส่วนของการจำลองด้วยวิธี Angular spectrum นั้น สามารถจำลองการเลี้ยวเบนได้ทุกระยะ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



(ก)



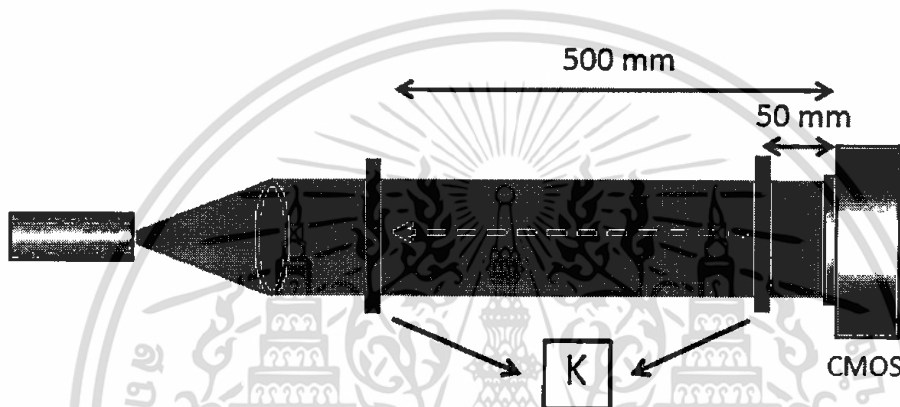
(ข)

ภาพที่ 2.5 ภาพจากการจำลองการเลี้ยวเบนที่ระยะต่างๆของ (ก) วิธี HCM และ (ข) วิธี (ASM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 การสร้างภาพกลับ (reconstruction)

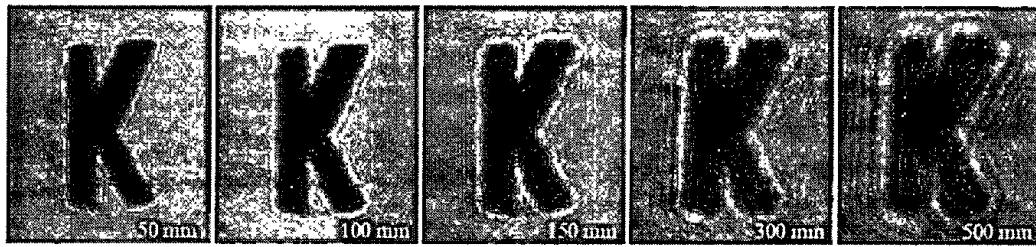
ในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการสร้างภาพกลับของทั้งสองวิธี โดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 2.6 ให้แสงขนานผ่านวัตถุตัวอักษร “K” แล้วทำการบันทึกด้วยกล้อง ซึ่งวัตถุนี้จะวางห่างจากกล้องเป็นระยะ 50 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจะทำการเปลี่ยนเป็นระยะต่างๆคือ 100, 150, 300 และ 500 มิลลิเมตร



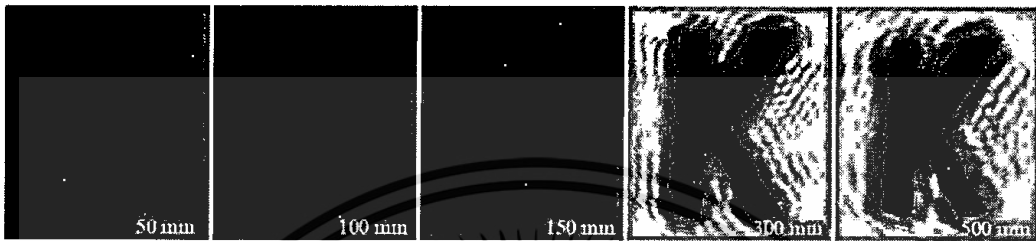
ภาพที่ 2.6 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบการสร้างภาพกลับที่ระยะต่างๆ

หลังจากที่ได้บันทึกภาพระยะต่างแล้ว จะทำการนำภาพมาผ่านกระบวนการสร้างภาพกลับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธี HCM นั้นจะไม่สามารถสร้างภาพกลับได้ที่ระยะวัตถุใกล้ๆกับกล้อง คือระยะที่น้อยกว่า 150 มิลลิเมตร แต่ในส่วนของวิธี ASM นั้น สามารถสร้างภาพกลับได้ทุกระยะ ดังแสดงในภาพที่ 2.7

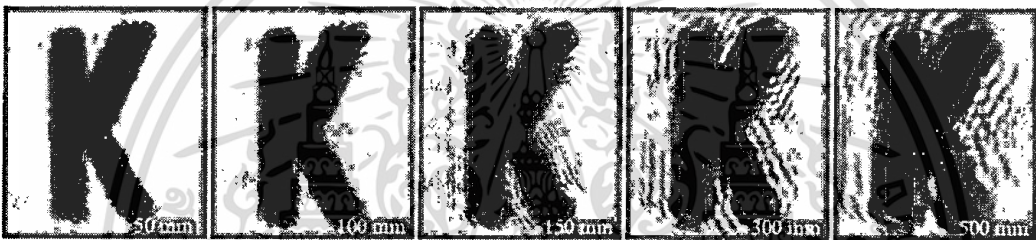
เพื่อที่จะไม่ให้เกิดปัญหาในการสร้างภาพกลับที่ระยะใกล้ๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี ASM ในการนำไปใช้สร้างภาพกลับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.7 ภาพจากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการสร้างภาพกลับ (ก) ภาพที่บันทึก (ข) ภาพจากวิธี HCM และ (ค) ภาพจากวิธี ASM

2.2.2 Angular spectrum method (ASM)

ให้ $h(x, y, 0)$ คือระนาบหรือระนาบโฮโลแกรมที่บันทึกบนกล้อง และ $R(\xi', \eta', z)$ คือระนาบของจุดโฟกัส หรือระนาบของภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ แสดงในภาพที่ 2.8 สัญญาณภาพที่ระนาบการอ่านโฮโลแกรม $R(\xi', \eta', z)$ สามารถเขียนในรูป การแปลงฟูเรียร์แบบผกผันของการแปลงฟูเรียร์ในสนามโฮโลแกรม

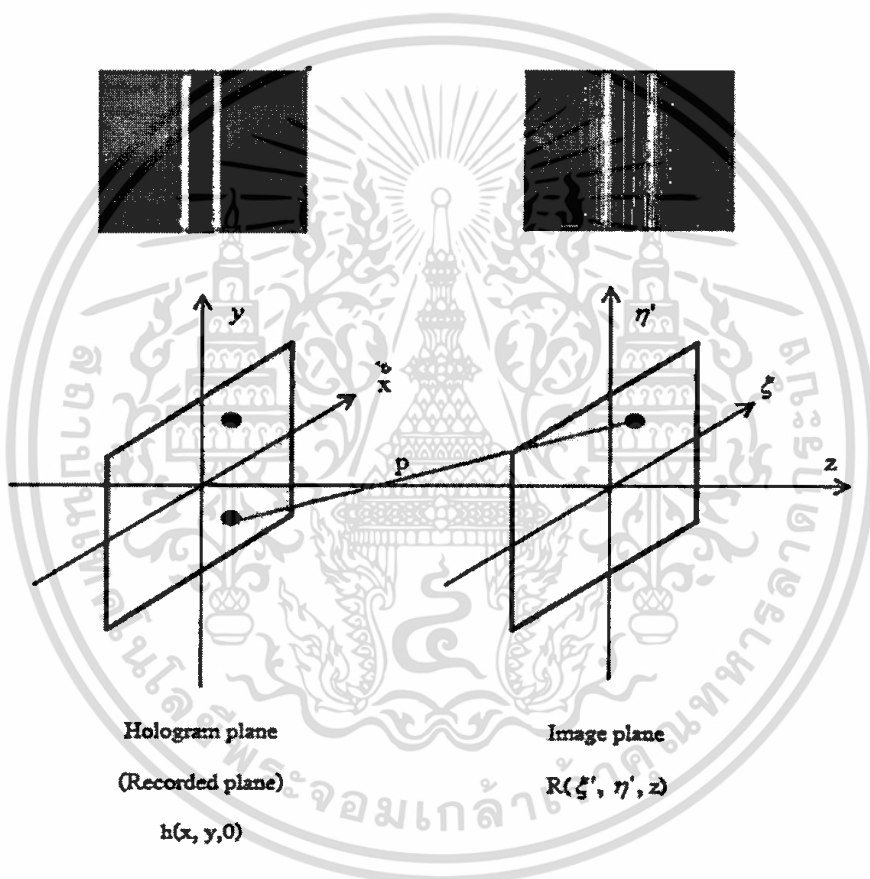
$$R(\xi', \eta', z) = F^{-1} \left\{ F \{ h(x, y, 0) \} \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z \right) \right\} \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ z คือระยะของการสร้างภาพใหม่ λ คือ ความยาวคลื่น และ γ คือ ส่วนประกอบของความถี่ ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการ

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda x}{M \Delta p_x} \right)^2 - \left(\frac{\lambda y}{N \Delta p_y} \right)^2} \quad (8)$$

เมื่อ M เป็นจำนวนพิกเซลแกน y และ N เป็นจำนวนพิกเซลแกน x และ Δp_x และ Δp_y เป็นขนาดของแต่ละพิกเซล



ภาพที่ 2.8 ระยะโฟกัสตามแนวแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การแปลงฟูเรียร์

โดยในระบบภาพ 2 มิติ เราสามารถใช้การแปลงฟูเรียร์ ในการแยกองค์ประกอบของรูปภาพ เพื่อตัดองค์ประกอบที่เราไม่ต้องการออกหรือเพิ่มองค์ประกอบที่เราต้องการเข้าไปในรูปภาพนั้น ดังสมการที่ (9)

$$F\{f\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (9)$$

จากนั้นนำองค์ประกอบที่ประมวลผลได้ใหม่ โดยทำการแปลงฟูเรียร์แบบผกผันทำให้ได้ภาพใหม่ตามที่เรต้องการ โดยใช้สมการ (10)

$$F^{-1}\{F\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(f_x, f_y) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (10)$$

2.4 แก้ว

2.4.1 วัตถุดิบที่ใช้ ในการผลิตแก้ว

- 1) ทราย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า “ซิลิกา” จะต้องมีปริมาณของ SiO_2 อย่างน้อย 99.5% และมีปริมาณของ Fe_2O_3 น้อยกว่า 0.04%
- 2) โซดาแอช คือ Na_2CO_3 ในธรรมชาติอยู่ในรูปของ Na_2CO_3 , NaHCO_3 , $2\text{H}_2\text{O}$
- 3) หินปูน คือ CaO และ หินโดโลไมต์ เป็นสารที่ประกอบด้วย CaO และ MgO
- 4) หินฟอสเฟต เป็นสารที่ประกอบด้วย SiO_2 และยังมีปริมาณ Al_2O_3 ถึงเกือบ 20%
- 5) เศษแก้ว เป็นวัตถุดิบที่ช่วยประหยัดพลังงานในการหลอม

นอกจากนี้ยังมีวัตถุดิบอื่นๆ ซึ่งช่วยในการหลอม การปรับแต่งสีของขวดแก้ว รวมทั้งปรับแต่งคุณสมบัติของ Oxides ต่างๆที่ประกอบอยู่ในแก้ว

- 1) SiO_2 แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้การหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง และขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง

2) CaO และ MgO จะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัว (set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

3) K₂O ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

4) Na₂O แก้วที่มีปริมาณ Na₂O สูงจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เพราะแตกง่าย และไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ Na₂O สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้

5) B₂O₃ แก้วที่มีสารประกอบพวก Boron เป็นองค์ประกอบ (Borosilicate) จะมีความคงทนต่อกรด-ด่าง และทนต่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้

6) Al₂O₃ แก้วที่มีปริมาณ Al₂O₃ สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น

7) Fe₂O₃ ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในขณะที่หลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนข้างเขียว

8) PbO แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead glass) เนื้อแก้วใสวาวเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูงมีความอ่อน (soft) ไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียรระโน เวลาเคาะมีเสียงกังวาน

9) ออกไซด์ อื่นๆ หากต้องการให้แก้ว หรือกระจกมีสีอื่นต่างๆ สามารถเติมสารนอกเหนือจากส่วนผสมข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว

2.4.2 ชนิดโดยทั่วไปของแก้ว มีดังนี้

1) แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass)

ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ทราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป มีราคาถูกได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก เป็นต้น สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป



ภาพที่ 2.9 แก้วโซดาไลม์

2) แก้วที่บอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) หรือ Pyrex

เป็นแก้วที่มีการเติมบอริก-ออกไซด์ ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนได้ แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

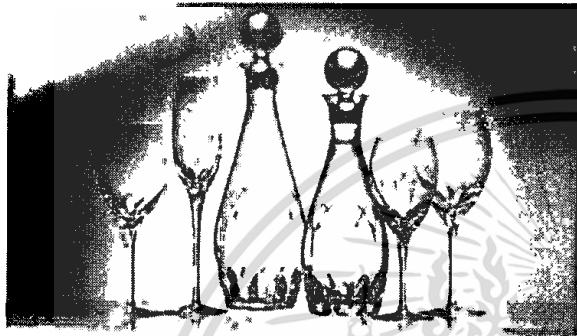


ภาพที่ 2.10 แก้วบอโรซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล

เป็นแก้วที่มีสารผสมของตะกั่วออกไซด์ อยู่มากกว่า 24% โดยน้ำหนัก จะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงาม และแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆ ได้ ใช้ทำเครื่องแก้วที่มีราคาแพง เช่นเครื่องประดับ โคมไฟระย้า เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 แก้วตะกั่ว

4) แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass)

มีอลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (softening point) สูง พอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2.12 แก้วอลูมิโนซิลิเกต

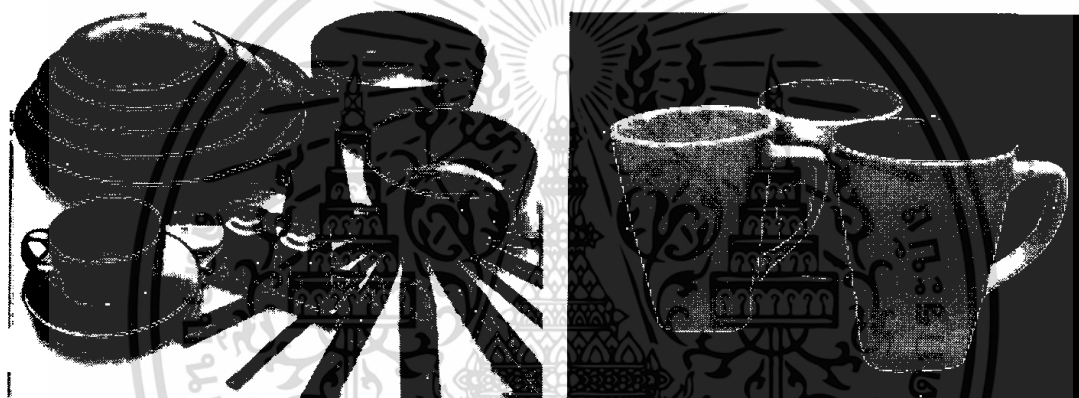
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (alkaline-earth alumino silicate)

มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ หรือเบเรียมออกไซด์ ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อกรดและด่าง มากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

6) กลาส-เซรามิกส์ (glass-ceramics)

เป็นแก้วประเภทลิเธียมอลูมิโนซิลิเกตที่มี TiO_2 หรือ ZrO_2 ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะก่อให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งใส ขึ้นกับชนิดของผลึก กลาส-เซรามิกส์จะทนทาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้ม หรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้



ภาพที่ 2.13 กลาส เซรามิกส์

7) แก้วบริสุทธิ์ (Fused silica glass) ใช้ทรายบริสุทธิ์ 100 % ใช้สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับยานอวกาศ

2.4.3 กระบวนการผลิตแก้ว

1) เตรียมวัตถุดิบทั้งหมด นำมาผสมให้เข้ากัน(ในขั้นนี้เราจะใส่เศษแก้วลงไปด้วยเป็นการช่วยรักษาทรัพยากรธรรมชาติและเศษแก้วที่ผ่านการหลอมมาแล้วเมื่อมีการหลอมใหม่จะทำให้หลอมได้ง่ายขึ้น) เติมน้ำให้กับแก้วในขั้นตอนนี้ได้เลย

2) นำเข้าเตาหลอมใช้อุณหภูมิประมาณ $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$

3) นำแก้วที่ผ่านการหลอมออกจากเตาหลอมจะให้อุณหภูมิของแก้วลดลงมากจากนั้นนำไปเข้าเครื่องขึ้นรูปแก้ว จะได้แก้วรูปร่างต่างๆออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) อบอ่อน เพื่อให้แก้วสามารถทนอุณหภูมิต่างๆได้ดี

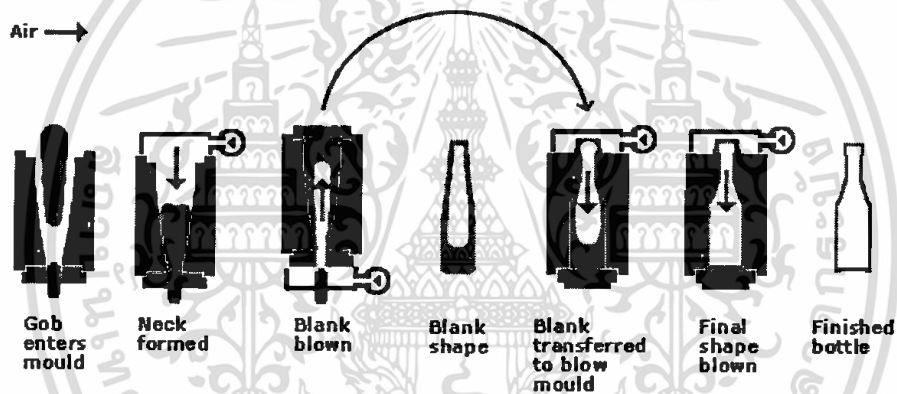
5) ตกแต่ง ตามแบบที่ต้องการ

2.4.4 กระบวนการผลิตขวด มี 2 แบบ

1) Blow and Blow process ใช้ผลิตขวดปากแคบ

- แม่พิมพ์ที่ 1 เริ่มจากนำ Gob เข้ามาใน แม่พิมพ์จากนั้นจะมีแรงดันดันGobให้ติดกับแม่พิมพ์เมื่อติดแล้วจะมีลมเป่าเข้ามาในGob ทำให้เกิดช่องว่างด้านในเรียกว่า Blank shape

- แม่พิมพ์ที่ 2 นำ Blank shape ที่ได้เข้าแม่พิมพ์ตัวที่ 2 เพื่อเข้าขั้นตอนการเป่าลมเข้าไปอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้ผนังของขวดแก้วที่บางตามต้องการ



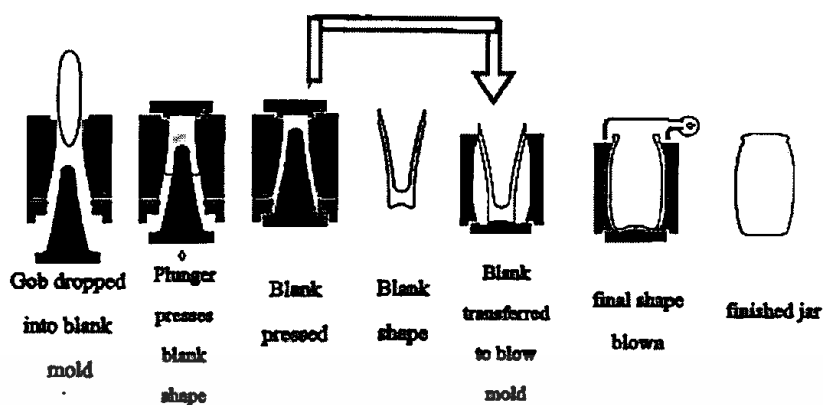
ภาพที่ 2.14 การผลิตขวดแบบ Blow and Blow process

2) Press and Blow process ใช้ผลิตขวดปากกว้าง

- แม่พิมพ์ที่ 1 เริ่มจากนำ Gob เข้ามาในแม่พิมพ์จากนั้นแม่พิมพ์จะถูกดันขึ้นไปติด Gob ทำให้มีลักษณะเป็นช่องว่างได้ลักษณะที่เรียกว่า Blank shape

- แม่พิมพ์ที่ 2 นำ Blank shape ที่ได้เข้าแม่พิมพ์ตัวที่ 2 เพื่อเข้าขั้นตอนการเป่าลมเข้าไปอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้ได้ผนังของขวดแก้วที่บางตามต้องการ ลักษณะกระบวนการขั้นนี้เหมือนกับแม่พิมพ์ตัวที่ 2 ของ Blow and Blow process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 การผลิตขวดแบบ Press and Blow process

ที่มา : <http://www.packingsiam.com/index.php?lay=show&ac=article&id=538991021&Ntype=7>

2.5 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

โฮโลกราฟีถูกคิดค้นขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1948 โดย Denis Gabor ซึ่งเป็นการบันทึกและอ่านภาพที่ประกอบด้วยเฟสและแอมพลิจูด [2-4] อย่างไรก็ตามการทดลองของ Gabor นั้นต้องใช้ลำแสงที่ขนานกันในการบันทึกภาพ ต่อมา Leith และ Upatnieks ได้ใช้วิธีบันทึกโดยแสงทั้ง 2 ลำไม่ขนานกัน [5-6] โฮโลกราฟีได้ถูกนำมาใช้ตรวจสอบการเคลื่อนไหวที่เปลี่ยนแปลงในระดับไมโครเมตร เทคนิคที่นำมาใช้ตรวจสอบนี้เรียกว่า Holographic Interferometry ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย Stetson, Powell [7-8]

หลังจากที่คอมพิวเตอร์ถูกสร้างขึ้น โฮโลแกรมได้ถูกนำมาบันทึกและสร้างภาพขึ้นในคอมพิวเตอร์โดยใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้ชื่อว่า Computer Generated Holography (CGH) ซึ่งเทคนิคการใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ในการสร้างภาพนี้ถูกริเริ่มโดย Goodman และ Lawrence [9] และ Yaroslavskii *et al.* [10] ต่อมา Onural และ Scott ได้ปรับปรุงระเบียบวิธีการสร้างภาพเพื่อให้สามารถใช้วัดขนาดอนุภาคได้ [11-13] หลังจากนั้น Haddad *et al.* ได้อธิบายการถ่ายโฮโลแกรมด้วยกล้องจุลทรรศน์ [14]

นับตั้งแต่เซนเซอร์รับภาพชนิด CCD และ CMOS ถูกคิดค้นขึ้น การถ่ายภาพโฮโลแกรมได้ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เพราะไม่ต้องเสียเวลาในการบันทึกภาพลงแผ่นฟิล์ม และขั้นตอนการล้างฟิล์ม การ

บันทึกภาพผ่านเซนเซอร์ไปยังคอมพิวเตอร์นี้ Schanrs และ Juptner เรียกว่า direct holography [15, 16] ต่อมาวิธีดังกล่าวได้ถูกยอมรับในชื่อ ดิจิตอลโฮโลกราฟี (Digital Holography)

ดิจิตอลโฮโลกราฟีได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้หลายๆด้านดังนี้

ใช้ในการตรวจสอบรูปร่างและความผิดปกติ

ดิจิตอลโฮโลกราฟีได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมคุณภาพและการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ โดยไม่ทำลายพื้นผิวของชิ้นงาน เช่นงานในด้าน Reverse engineering ที่เป็นการค้นหาโครงสร้าง ฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแยกชิ้นส่วนของอุปกรณ์ออกจากกัน เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างรวมถึงข้อบกพร่องในแต่ละส่วน [17] โดยเทคนิค Digital holography เป็นเทคนิคที่มีข้อเด่น คือนอกจากความเข้มและสีที่ได้รับแล้ว ยังสามารถบันทึกเฟส (phase) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ทำให้สามารถสร้างกลับหน้าคลื่นของแสง ทำให้เหมือนหรือคล้ายกับที่สะท้อนออกจากวัตถุมาเข้าตาเราโดยตรง ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ [18]

เนื่องจากดิจิตอลโฮโลกราฟีมีประโยชน์อย่างมากในหลายๆด้าน แต่ยากต่อการศึกษาและเรียนรู้ Victor V. Dyomin และคณะจึงได้มีการคิดค้นชุดการทดลองเพื่อให้ง่ายแก่การศึกษาในเรื่องดิจิตอลโฮโลกราฟี [19]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

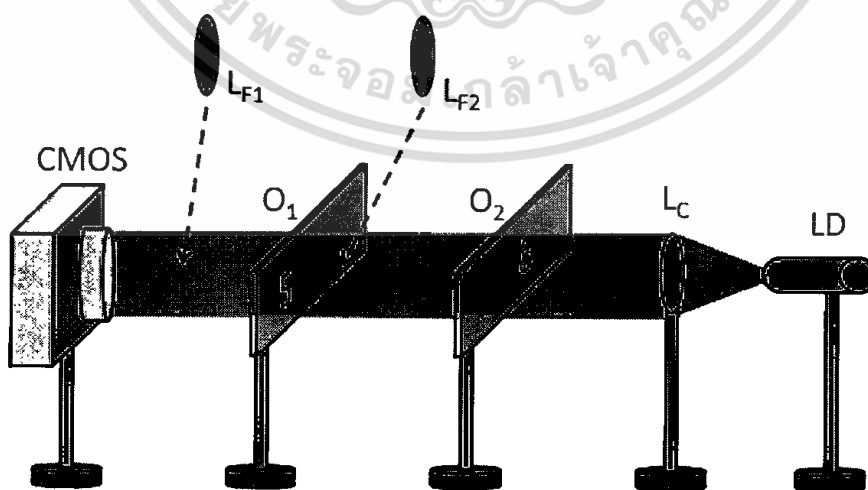
3.1 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อสร้างชุดทดลองดิจิทัลโฮโลกราฟีเพื่อนำไปใช้ช่วยในการเก็บผลการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการทดลองไว้หลักๆไว้สองการทดลอง คือการเรียนรู้ เกี่ยวกับหลักการของดิจิทัลโฮโลกราฟี และการนำดิจิทัลโฮโลกราฟีไปใช้งาน

3.1.1 การศึกษาหลักการของดิจิทัลโฮโลกราฟี

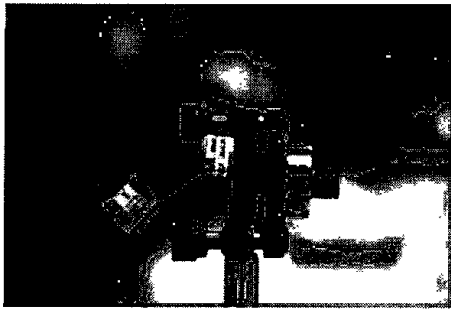
เพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ที่สร้างสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกในงานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้เลเซอร์ไดโอด (LD) เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกนำมาขยายให้เป็นแสงขนานด้วยเลนส์ (L_C) จากนั้นจึงนำแสงขนานที่ได้ นี้ส่องผ่านไปยังวัตถุ ซึ่งเป็นแก้วใสและแปะสติ๊กเกอร์เป็นตัวเลขไว้ (O_1 และ O_2) โดยในการทดลองจะใช้วัตถุดังกล่าวจำนวนสองแผ่น วางห่างจากเซนเซอร์บันทึกภาพ (Complementary Metal Oxide Semiconductor : CMOS) ต่างระยะกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.1

หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบความสามารถในการโฟกัสภาพด้วยการใช้เลนส์ และการใช้เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี ซึ่งรายละเอียดการทดลองจะกล่าวในหัวข้อ 3.3 (คู่มือการทดลอง)



ภาพที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาหลักการดิจิทัลโฮโลกราฟี

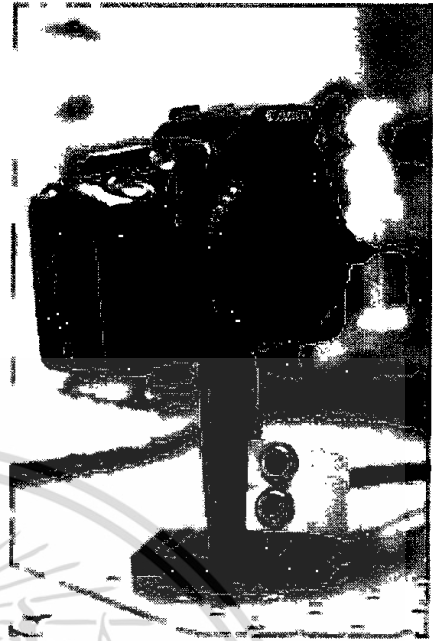
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



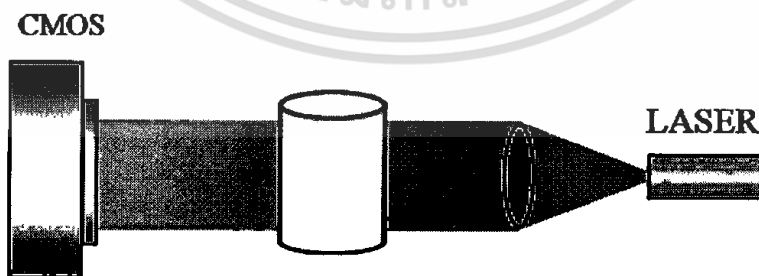
(ค)

ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้; (ก) เลเซอร์ไดโอด, (ข) แผ่นแก้ว และ, (ค) กล้อง CMOS

3.1.2 การประยุกต์ใช้ดิจิทัลโฮโลกราฟี

3.1.2.1 การหารอยตำหนิในขวดแก้ว

ในส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้นั้น จะใช้การตรวจสอบหารอยตำหนิในวัสดุโปร่งใส เช่น ขวดแก้ว [20] โดยการติดตั้งอุปกรณ์จะแสดงดังภาพที่ 3.3 จากนั้นทำการจัดให้ได้ตำแหน่งของรอยตำหนิ บนขวดแก้วอยู่ในกรอบของ CMOS sensor แล้ว จึงทำการบันทึกภาพ

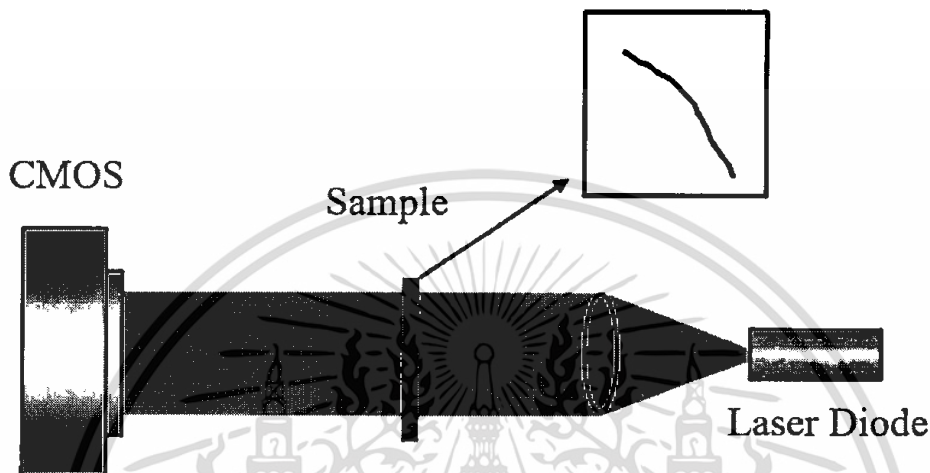


ภาพที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจสอบหารอยตำหนิในเนื้อแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.1 การวัดขนาดของเส้นผม

ในการวัดขนาดของเส้นผมนั้นจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.4 โดยจัดแสงจากเลเซอร์ไดโอดให้เป็นแสงขนาน แล้วทำการฉายผ่านแผ่นแก้วซึ่งมีเส้นผมติดอยู่ เมื่อได้ตำแหน่งของเส้นผมอยู่ในกรอบของ CMOS sensor แล้ว จึงทำการบันทึกภาพ

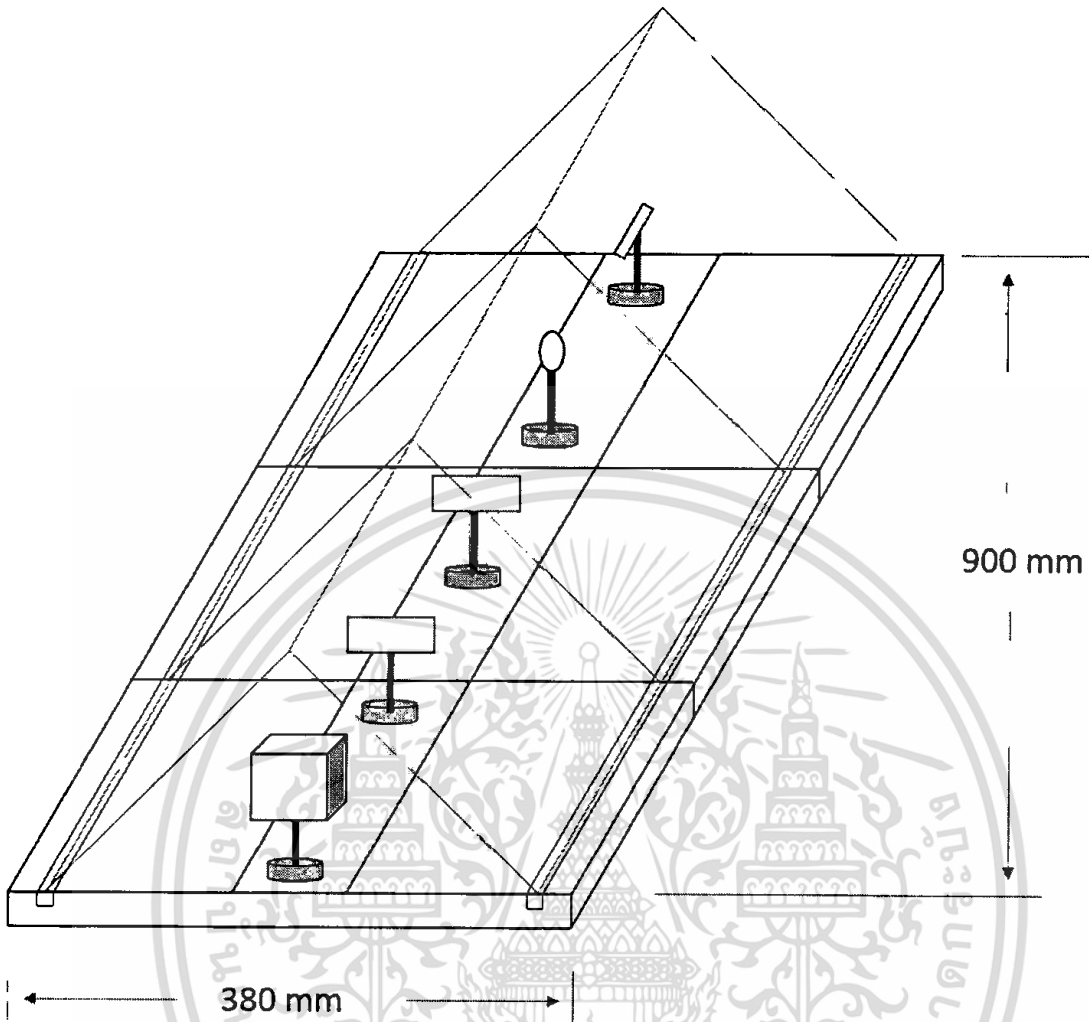


ภาพที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความหนาของเส้นผม

3.2 การออกแบบชุดทดลอง

เมื่อทำการออกแบบการทดลองในขั้นตอนที่ 3.1 เรียบร้อยแล้ว จะทำให้ทราบขนาดพื้นที่ที่ใช้สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ โดยขนาดและรูปทรงของชุดทดลองที่ทำการออกแบบจะแสดงดังภาพที่ 3.5

ชุดทดลองนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน สามารถพับและแยกออกจากกันได้ เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และที่ฐานของอุปกรณ์นั้นทำมาจากโลหะเพื่อให้สามารถยึดติดกับฐานของอุปกรณ์ทางแสงที่ทำจากแม่เหล็กได้



ภาพที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์การทดลองที่ได้ออกแบบไว้

3.3 คู่มือการทดลอง

ในส่วนของคู่มือการทดลองนั้นจะมีการทดลองอยู่ 3 ตอน [21] ดังนี้

ตอนที่ 1 การโฟกัสภาพโดยใช้เลนส์

- 1) ทำการติดตั้งและจัดอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.1
- 2) ปรับตำแหน่งเลนส์ L_c เพื่อจัดลำแสงให้เป็นแสงขนาน
- 3) วางวัตถุ (แผ่นแก้ว) ทั้งสองให้ห่างกัน 200 มิลลิเมตร และลำแสงเลเซอร์ต้องผ่านตัวเลขที่ติดอยู่บนแผ่นแก้วทั้งสอง
- 4) ติดตั้งกล้อง CMOS ให้ห่างจากวัตถุ O_1 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร
- 5) ปรับตำแหน่งกล้อง CMOS เพื่อให้ได้ภาพของวัตถุทั้งสองอยู่ที่กึ่งกลางเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

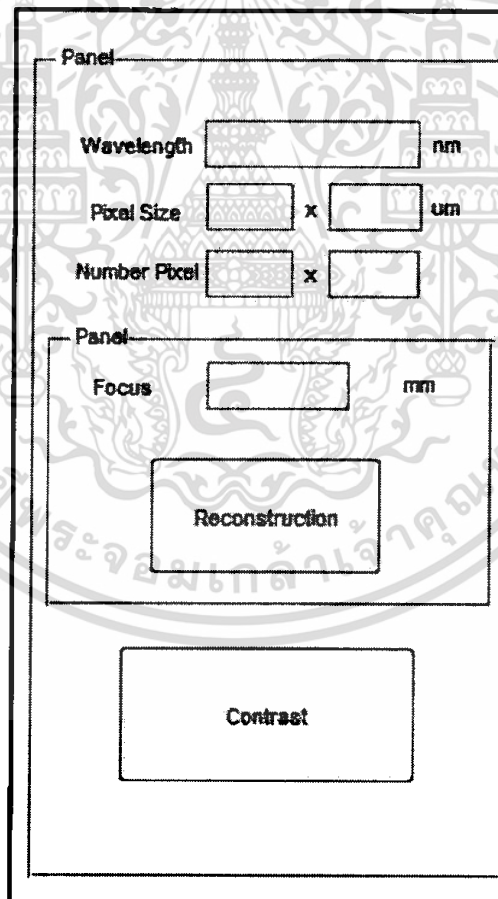
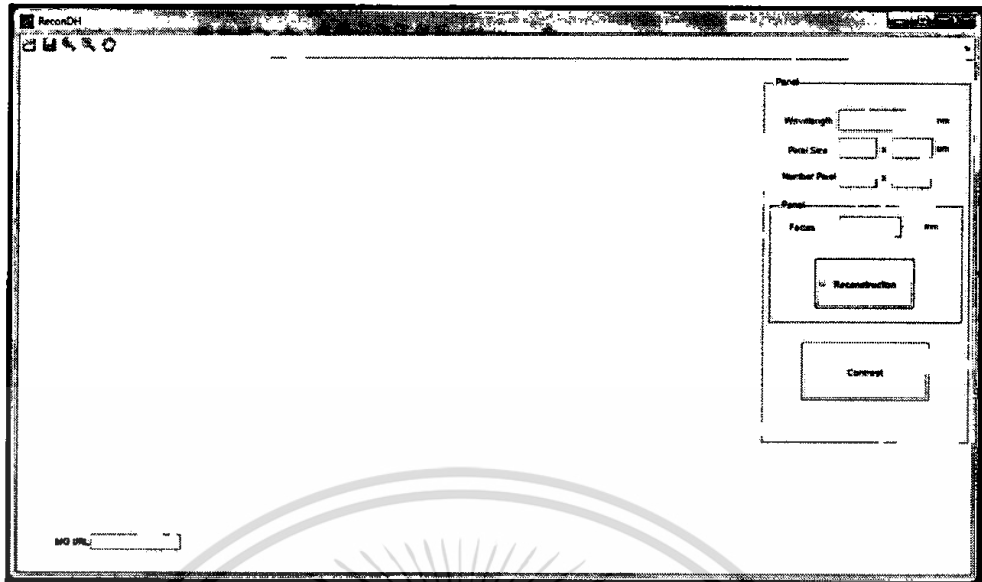
- 6) ทำการถ่ายภาพ และจัดซื้อภาพที่แสดงในกล่องไว้
- 7) ใส่เลนส์ L_{F1} ระหว่างวัตถุ O_1 และกล่อง CMOS (ดังภาพที่ 3.1) เพื่อโฟกัสภาพ และทำการปรับตำแหน่ง เลนส์จนกว่าจะได้ภาพที่ก๊ส (ชัดเจนนที่สุด) จากนั้นทำการถ่ายภาพ
- 8) ใส่เลนส์ L_{F2} ระหว่างวัตถุ O_2 และกล่อง CMOS (ดังภาพที่ 3.1) เพื่อโฟกัสภาพ และทำการปรับตำแหน่ง เลนส์จนกว่าจะได้ภาพที่ก๊ส (ชัดเจนนที่สุด) จากนั้นทำการถ่ายภาพ

ตอนที่ 2 การโฟกัสด้วยดิจิทัลโฮโลกราฟี

- 1) เปิดโปรแกรมสำหรับปรับโฟกัสภาพ (reconstruction) จากนั้นเปิดไฟล์ภาพที่ได้บันทึกโดยไม่ได้ใช้เลนส์ช่วยโฟกัส (ภาพจากตอนที่ 1 ข้อที่ 6)
- 2) ใส่ค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้บันทึก จำนวนพิกเซลของภาพ ระยะที่ใช้โฟกัสภาพ จากนั้นกดปุ่ม "Reconstruction" (ดูภาพที่ 3.6 ประกอบ)
- 3) เปลี่ยนค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งได้ภาพของวัตถุ O_1 ที่ชัดเจนน จากนั้นบันทึกภาพ
- 4) เปลี่ยนค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งได้ภาพของวัตถุ O_2 ที่ชัดเจนน จากนั้นบันทึกภาพ
- 5) เปรียบเทียบภาพที่ได้ในตอนที่ 2 กับตอนที่ 1

ตอนที่ 3 การประยุกต์ใช้

- 1) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.3
- 2) ทดการทดลองเหมือนตอนที่ 2 ปรับค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งพบรอยตำหนิบนขวดแก้วที่ชัดเจนน จากนั้นบันทึกภาพ
- 3) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.4
- 4) ทดการทดลองเหมือนตอนที่ 2 ปรับค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งเห็นภาพของเส้นผมชัดเจนนชัดเจนน จากนั้นบันทึกภาพ
- 5) ทำการวัดความหนาของเส้นผมด้วยโปรแกรม imageJ



ภาพที่ 3.6 หน้าจอโปรแกรมสำหรับ reconstruction

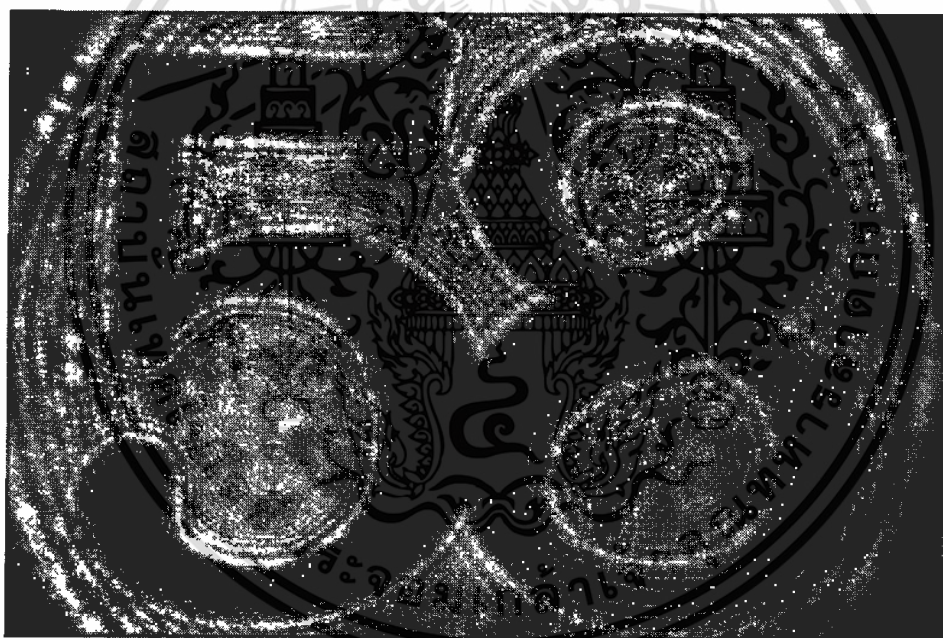
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ภาพถ่ายโดยไม่มีการใช้เลนส์ช่วยโฟกัส

จากการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.1 ได้ทำการบันทึกภาพวัตถุที่วางซ้อนกันสองชิ้น โดยไม่มีการใช้เลนส์ช่วยในการโฟกัสภาพ จะพบว่าภาพจากวัตถุทั้งสองระยะนั้นจะมีความไม่คมชัดทั้งคู่ โดยภาพที่เกิดจากวัตถุที่วางห่างจาก กล้องเป็นระยะที่มากกว่า จะให้ความไม่ชัดที่มากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ภาพที่ถ่ายโดยไม่มีเลนส์ช่วยโฟกัส

4.2 ภาพจากการใช้เลนส์ช่วยโฟกัส

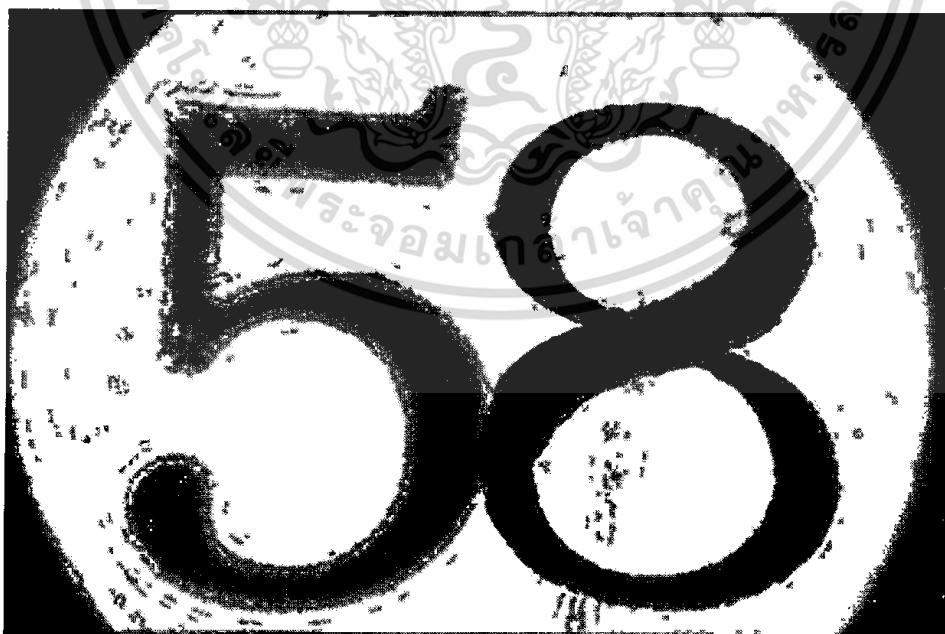
เมื่อทำการใส่เลนส์เข้าไประหว่างกล้อง CMOS และวัตถุ O_1 (หมายเลข 5) จะพบว่าภาพของวัตถุ O_1 จะมีความ คมชัด ส่วนภาพของวัตถุ O_2 จะไม่ชัด ดังแสดงในภาพที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 ภาพจากการใช้เลนส์ช่วยโฟกัสวัตถุ O_1

เมื่อทำการใส่เลนส์เข้าไประหว่างกล้อง CMOS และวัตถุ O_2 (หมายเลข 8) จะพบว่าภาพของวัตถุ O_2 จะมีความคมชัด ส่วนภาพของวัตถุ O_1 จะไม่ชัด ดังแสดงในภาพที่ 4.3

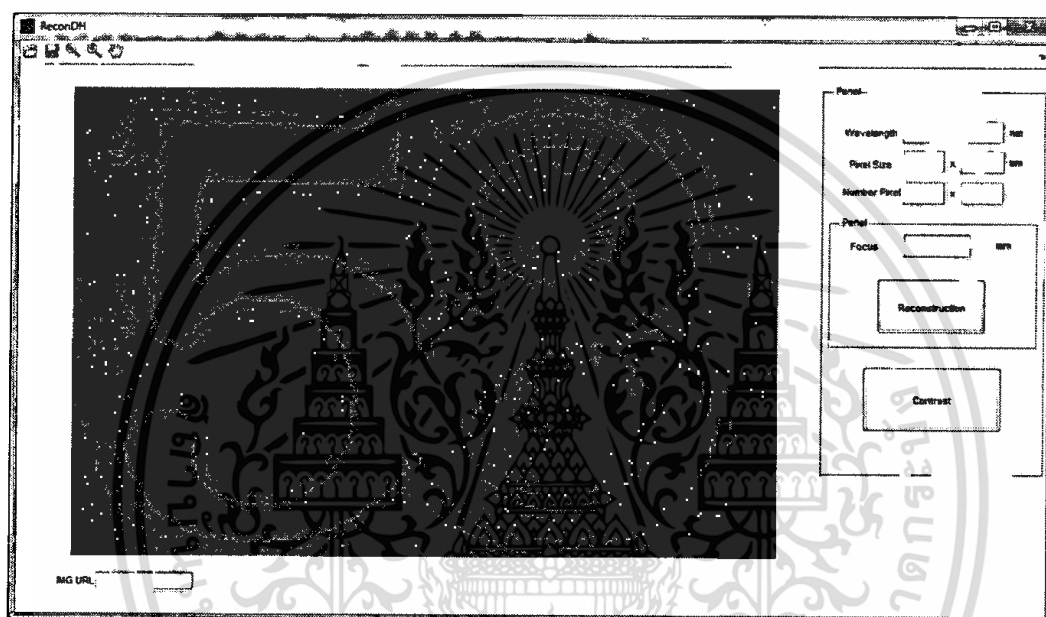


ภาพที่ 4.3 ภาพจากการใช้เลนส์ช่วยโฟกัสวัตถุ O_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ภาพจากการใช้ดิจิทัลโฮโลกราฟีช่วยโฟกัส

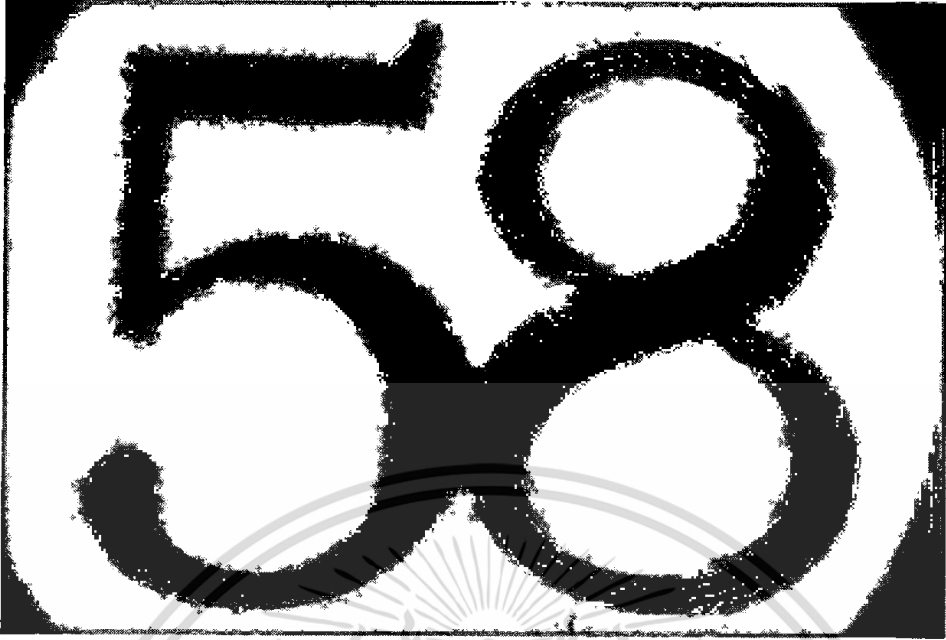
เมื่อทำการเปิดไฟล์ภาพด้วยโปรแกรมสำหรับ reconstruction จะได้ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นภาพที่บันทึกโดยไม่มีการใช้เลนส์ช่วยโฟกัส



ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างการเปิดไฟล์ภาพผ่านโปรแกรม reconstruction

เมื่อทำการใส่ค่าตัวแปรต่างๆ และค่าระยะการโฟกัสคือ 200 มิลลิเมตร (ระยะห่างระหว่างกล้อง CMOS กับวัตถุ O_1) พบว่าภาพของวัตถุ O_1 มีความคมชัดขึ้น ส่วนภาพของวัตถุ O_2 จะไม่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.5

เมื่อทำการใส่ค่าตัวแปรต่างๆ และค่าระยะการโฟกัสคือ 400 มิลลิเมตร (ระยะห่างระหว่างกล้อง CMOS กับวัตถุ O_2) พบว่าภาพของวัตถุ O_2 มีความคมชัดขึ้น ส่วนภาพของวัตถุ O_1 จะไม่ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.6



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.5 ภาพจากการปรับระยะโฟกัสที่ $z=200$ มิลลิเมตร (ก) ภาพปกติ

(ข) ภาพที่ขยายเฉพาะส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.6 ภาพจากการปรับระยะโฟกัสที่ $z=400$ มิลลิเมตร (ก) ภาพปกติ (ข) ภาพที่ขยายเฉพาะส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ภาพจากการประยุกต์ใช้ดิจิทัลโฮโลกราฟี

4.4.1 การหารอยตำหนิในขวดแก้ว

จากการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.3 เพื่อหารอยตำหนิบนตัวอย่างขวดแก้ว 1 และขวดแก้ว 2 ดังแสดงในภาพที่ 4.7(ก) 4.7(ข) และ 4.7(ค) 4.7(ง) ตามลำดับ พบว่าเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีช่วยในการสังเกตรอยตำหนิได้ชัดเจนขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)



(ค)

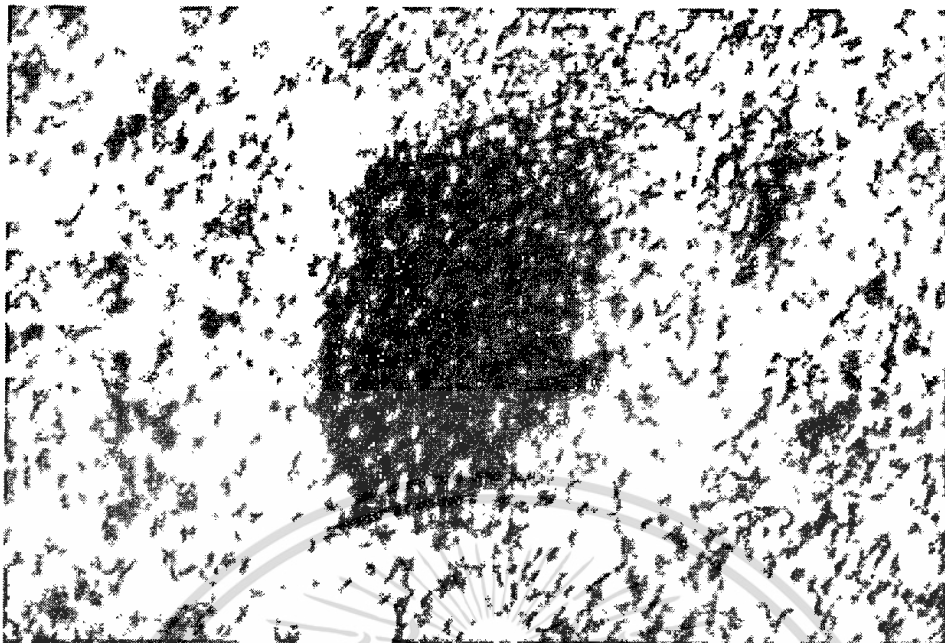


(ง)

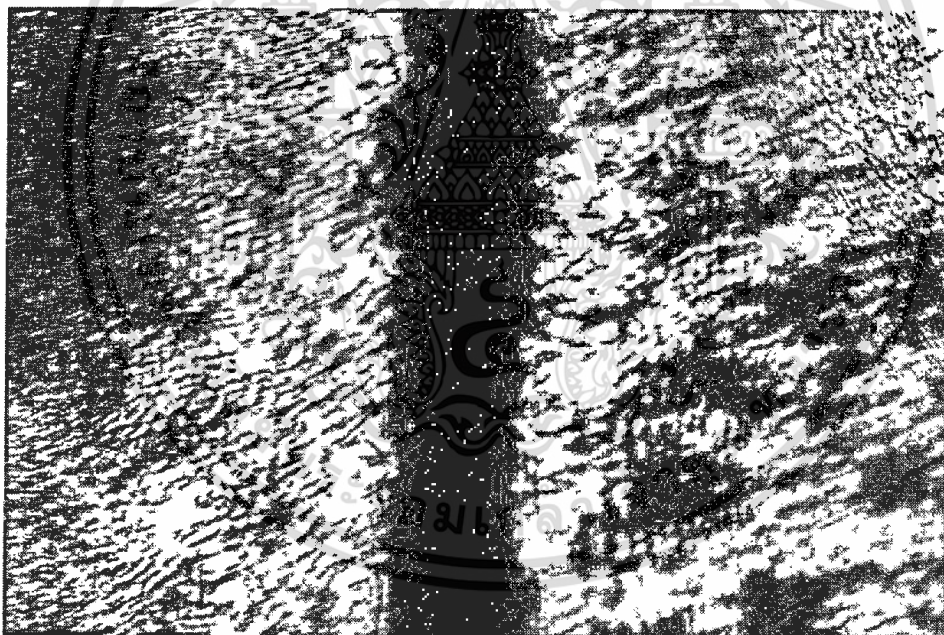
ภาพที่ 4.7 ขวดแก้วตัวอย่าง (ก) ขวดแก้วตัวอย่างที่ 1 (ข) ภาพขยายรอยตำหนิของขวดแก้วตัวอย่างที่ 1

(ค) ขวดแก้วตัวอย่างที่ 2 (ง) ภาพขยายรอยตำหนิของขวดแก้วตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



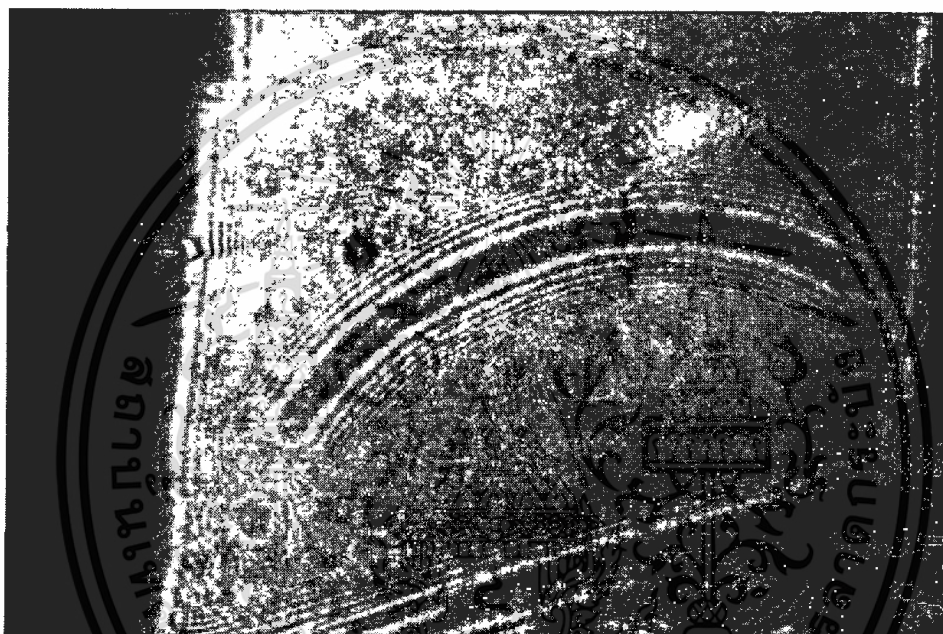
(ข)

ภาพที่ 4.8 รอยตำหนิบนขวดแก้วจากการถ่ายด้วยดิจิตอลโฮโลกราฟี (ก) ขวดแก้วตัวอย่างที่ 1
(ข) ขวดแก้วตัวอย่างที่ 2

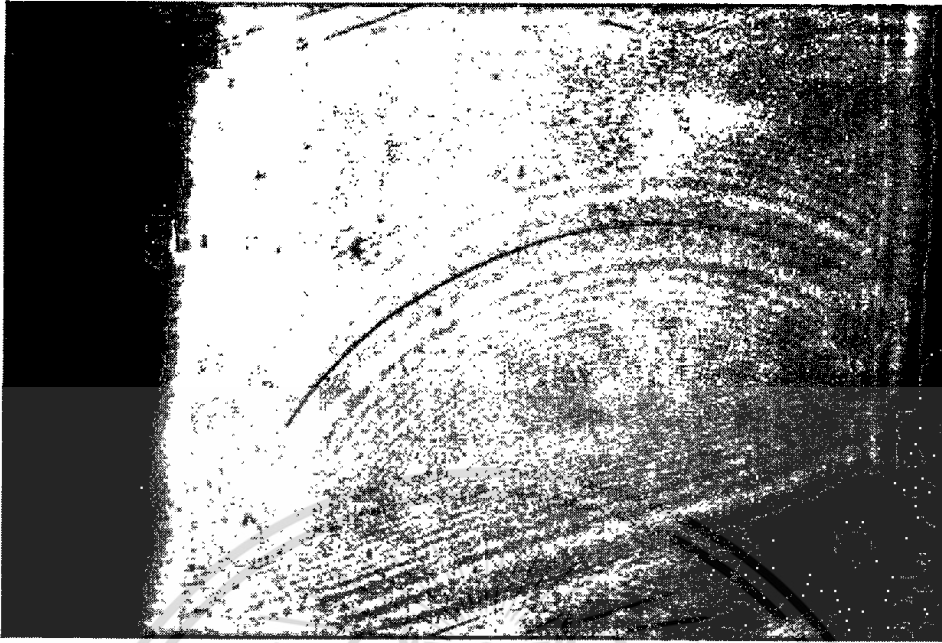
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การวัดขนาดของเส้นผม

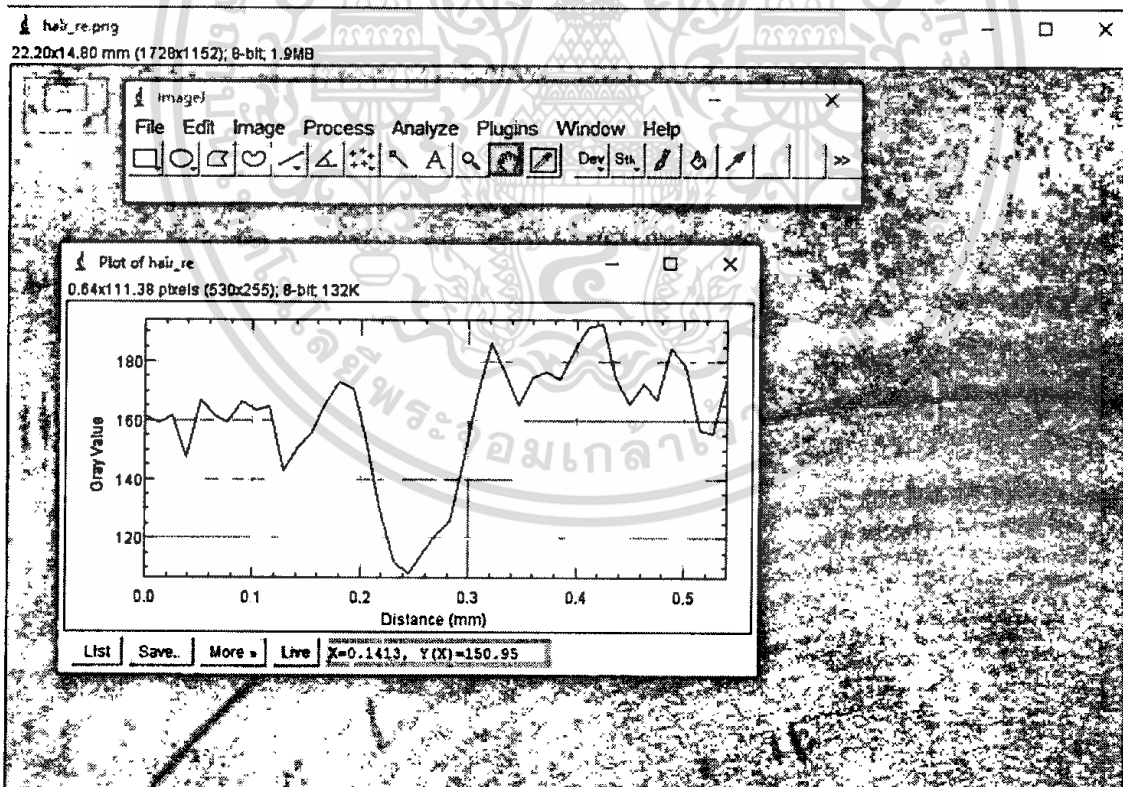
จากการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.4 เพื่อวัดขนาดของเส้นผม พบว่าภาพที่บันทึกนั้นจะยังมี ความไม่คมชัดดังแสดงในภาพที่ 4.8 หลังจากใช้กระบวนการสร้างภาพกลับ พบว่าภาพของเส้นผม มีความคมชัด ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และพบว่าขนาดของเส้นผมที่วัดได้จากโปรแกรม imageJ คือ 78 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ซึ่งอยู่ในช่วง ขนาดของเส้นผมของมนุษย์



ภาพที่ 4.9 ภาพถ่ายเส้นผมโดยไม่ใช้เลนส์

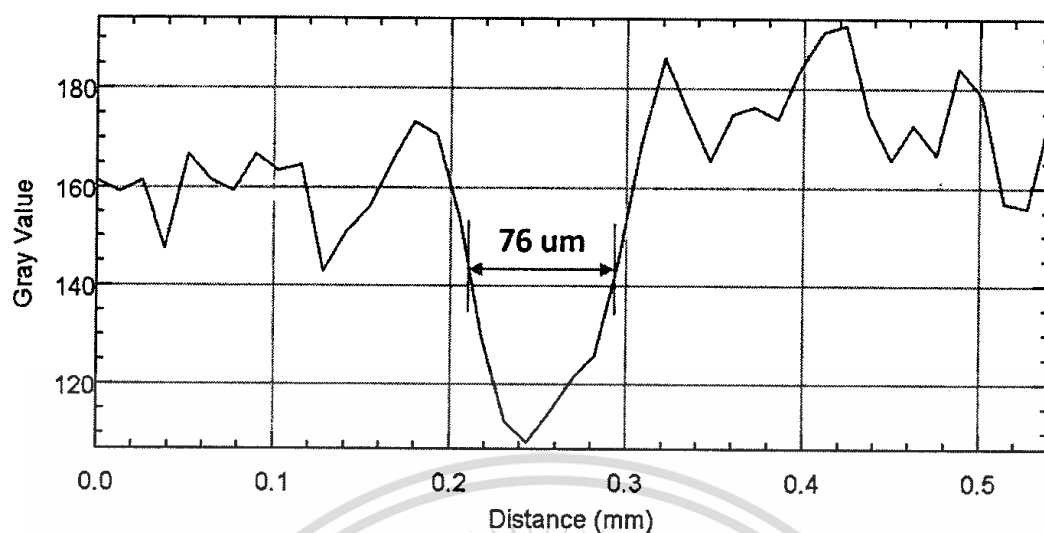


ภาพที่ 4.10 ภาพถ่ายเส้นผมหลังผ่านกระบวนการ reconstruction



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

ภาพที่ 4.11 การวัดขนาดของเส้นผม (ก) ภาพการวัดด้วยโปรแกรม imageJ

(ข) พล็อตความกว้างของเส้นผม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการผลการทดลองพบว่าในการถ่ายภาพโดยไม่ใช้เลนส์ช่วยโฟกัสภาพนั้น ภาพที่ได้จะไม่มีคมชัด แต่เมื่อใช้เลนส์ช่วยโฟกัสนั้นจะได้ภาพที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามหากต้องการได้ ภาพที่ชัดทุกระยะ จะต้องถ่ายภาพหลายครั้งเพื่อให้ได้ภาพมีความชัดทุกระยะดังผลการทดลองตอนที่ 4.2

ในส่วนของการโฟกัสภาพด้วยเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีหรือเรียกว่าการ reconstruction นั้นจะอาศัยการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว และหลังจากนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการโฟกัสภาพใหม่ ให้ได้ความชัดตามที่ต้องการในแต่ละระยะ ซึ่งเป็นข้อดีของเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟี เมื่อเทียบกับ การถ่ายภาพด้วยวิธีปกติ

ในส่วนของการประยุกต์ใช้งานนั้น เมื่อทราบระยะที่ต้องใช้โฟกัส จะทำให้สามารถง่ายต่อการตรวจจ็บรอยตำหนิต่างๆบนวัตถุ เช่นรอยตำหนิบนขวดแก้ว ดังผลการทดลองตอนที่ 4.4

นอกจากนี้แล้วระบบดิจิทัลโฮโลกราฟีในงานวิจัยนี้นั้นไม่เพียงแต่ช่วยเก็บภาพที่มีความชัดลึก แต่ยังสามารถใช้สอนเพื่อให้เข้าใจหลักการของดิจิทัลโฮโลกราฟีและทั้งยังฝึกฝนทักษะการทดลองทางทัศนศาสตร์ได้แก่ การจัดอุปกรณ์ และการจัดเรียงลำแสงอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในขั้นตอนการโฟกัสด้วยเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟีนั้นจะต้องทำการบันทึกภาพลงบนการ์ดหน่วยความจำ ซึ่งเกิดความล่าช้าในการสาธิตการสอน ดังนั้นการพัฒนาต่อยอดเพื่อให้สามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ (Real time) จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะพัฒนาต่อยอดของงานวิจัยนี้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

6.1 สรุปรายชื่อผลผลิตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ถูกนำเสนอในงานประชุมวิชาการ International Conference on Photonics Solutions 2015 และได้ถูกนำไปตีพิมพ์วารสารวิชาการชื่อ Proceeding of SPIE ซึ่งเนื้อหาบทความสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุวรรณ พลายพิชิต. “ดิจิตอลโฮโลกราฟีสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย”. ปรัชญาฯ ภูเก็ต. เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [2] Gabor D, “A new microscopic principle,” *Nature* 161, 777-778 (1948).
- [3] Gabor D, “Microscopy by reconstruction wavefronts,” *Proc. Roy. Soc.* 197, 454-487 (1949).
- [4] Gabor D, “Microscopy by reconstruction wavefronts: 2,” *Proc. Phys. Soc.* 64, 449-469 (1951).
- [5] Leith EN, Upatnieks J, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *Jour. Opt. Soc. Amer.* 52, 112-1130 (1962).
- [6] Leith EN, Upatnieks J, "Wavefront reconstruction with diffused illumination and threedimensional objects," *Jour. Opt. Soc. Amer.* 54, 1295-1301 (1964).
- [7] Powell RL, Stetson KA, "Interferometric Vibration Analysis by Wavefront reconstructions," *J. Opt. Soc. Amer.* 55, 1593-1598 (1965).
- [8] Stetson KA, Powel RL, "Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffuse objects," *J. Opt. Soc. Amer.* 55, 1694-1695 (1965).
- [9] Goodman JW, Lawrence RW, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* 11, 77-79 (1967).
- [10] Kronrod MA, Merzlyakov NS, Yaroslavski LP, “Reconstruction of holograms with a computer,” *Sov. Phys-Tech. Phys. USA* 17(2), 333-334(1972).
- [11] Onural L, Scott PD, "Digital decoding of in-line holograms," *Opt. Eng.* 26(11), 1124-1132 (1987).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Liu G, Scott PD, "Phase retrieval and twin-image elimination for in-line Fresnel holograms," J. Opt. Soc. Am A4(1), 159-165 (1987).
- [13] Onural L, Ozgen MT, "Extraction of three-dimensional object-location information directly from in-line holograms using Wigner analysis," J. Opt. Soc. Amer. A 9(2), 252-260 (1992).
- [14] Haddad W, Cullen D, Solem J, Longworth J, McPherson A, Boyer K, Rhodes K, "Fourier-transform holographic microscope," Appl. Opt. 31(24), 1687-1689 (1992).
- [15] Schnars U, Juptner W, "Principles of direct holography for interferometry," Proc. 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Akademie, Berlin, pp 115-120 (1993).
- [16] Schnars U, Juptner W, "Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction," Applied Optics 33(2), 179-181(1994).
- [17] I.Yamaguchi, J. Kato, and H.Matsuzaki, "Measurement of surface shape and deformation by phase-shifting image digital holography," Opt. Eng. 42, 1267-1271(2003).
- [18] Y.Morimoto, T.Nomura, M .Fjigaki, S.Yoneyama, and I.Takahashi, "Deformation measurement by phase shifting digital holography," Exp.Mech.45,65-70(2005).
- [19] V.V. Dyomin, I.G.Polovtsev, and A.S. Olshukov, "Holography as a tool for advanced learning of optics and photonics," Proc.SPIE.ETOP 2009(2009).
- [20] P.Buranasiri, S.Plaipichit, "Glass bottle inspection by using digital in-line holography," PROC.SPIE.InterferometryXVII(2014).
- [21] P.Buranasiri, S.Plaipichit, W.Yindeesuk, and k.Yoshimori, "Digital holography system for undergraduate student laboratory," PROC.SPIE.ICPS2015(2015).



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Digital holography system for undergraduate student laboratory

P. Buranasiri^{*a}, S. Plaipichit^b, W. Yindeesuk^a, and K. Yoshimori^c

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520

^bDepartment of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand, 10110

^cDepartment of Electrical Engineering and Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka city, Iwate Pref 020-8551, Japan

ABSTRACT

In this paper, we discuss the digital holography (DH) experiment in our optical and communication laboratory course for undergraduate students at Physics department, KMITL. The purposes of DH experiment are presenting our students the meaning and advantage of DH and its applications. The Gabor configurations of in-line DH has been set up for recording a number of samples, which were placed on different distances, simultaneously. Then, the images of all objects have been numerical reconstructed by using computer. The students have been learned that all of reconstructed images have been got from only one time recording, while using the conventional recording technique, sharp images of different objects have been gotten from different recording time. The students also have been learned how to use DH technique for investigation some different kinds of samples on their own of interested such as a human hair or a fingerprint. In our future work, our DH system will be developed to be a portable apparatus for easily showing to children in different areas.

Keywords: Digital holography, optical education

1. INTRODUCTION

DH is a powerful technique in optical nondestructive investigation. Instead of using a film on the image plane as conventional holography, a CCD camera has been put to record the image and then using numerical technique by computer to reconstruct the image. By using DH technique, a number of measurement applications have been improved¹. Due to its importance above, recently, Victor V. Dyomin *et. al.* invented optical learning kits for investigating holography and DH². By using an optical learning kit, it is easy to learn and understand concept of holography and digital holography, however, the students will not learn and improve their skill for doing alignment optical apparatus. In our point of view, for the people who would like to be in optics professional career, not only the knowledge of digital holography is important but the skill of optical alignment is also important too. Hence, in this paper we present digital holography system for undergraduate teaching laboratory which the students have been asked to setup their own experiment on optical breadboard. In our laboratory objective, students will learn the difference between conventional imaging using lens and imaging using numerical digital holography technique. After working on this experiment, the students will understand the concept of digital holography and will get optical alignment skill simultaneously.

2. DIGITAL HOLOGRAPHY

Digital holography is the technique that record both phase and amplitude of image on an electronic image sensor, i.e. CCD or CMOS. The concept of digital holography is the changing of recorded plane into numerical lens as illustrated in figure 1. The image that incident on recorded plane has blur pattern like the image without focusing as shown in figure 1(a). After insert numerical lens instead of recorded plane, image will be focused as shown in figure 1(b). The insertion of numerical lens to focus an image is called reconstructed process.

*kbpratha@kmitl.ac.th.

International Conference on Photonics Solutions 2015, edited by N. Chattham, A. Pattanaporkratana, S. Chiangga, S. Sumriddetchkajorn, Proc. of SPIE Vol. 9659, 96590Z · © 2015 SPIE
CCC code: 0277-786X/15/\$18 · doi: 10.1117/12.2196159

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนที่ Proc. of SPIE Vol. 9659 96590Z-1 นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

loaded From: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/> on 08/05/2015 Terms of Use: <http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx> มีการนำไปใช้

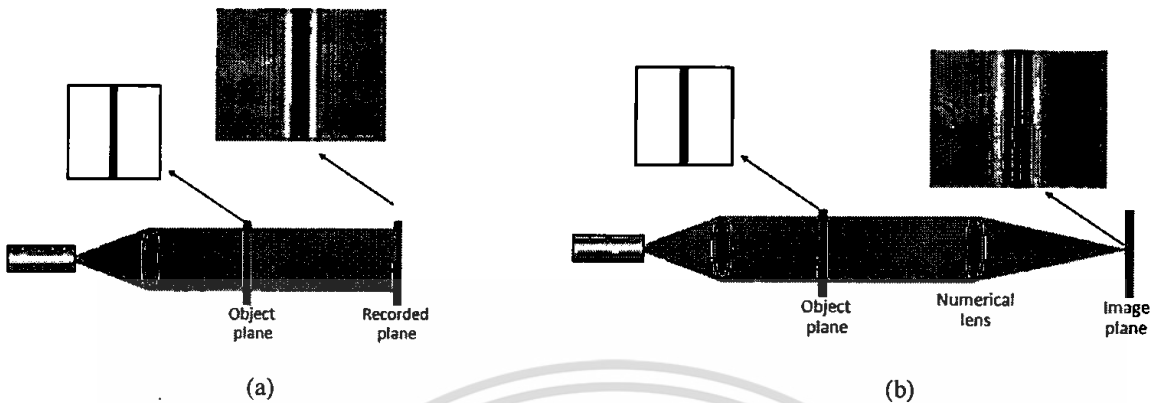


Figure 1. Concept of digital holography; (a) recorded process and (b) reconstructed process.

There are two main methods of reconstruction; Huygens convolution method (HCM) and angular spectrum method (ASM). Due to HCM has limitation when reconstruct at near distance³, ASM has been used to reconstruct digital hologram in our work. Suppose $h(x, y, 0)$ is recorded plane or hologram plane and $R(\xi', \eta', z)$ is focused plane or reconstructed plane as shown in figure 2. The optical field $R(\xi', \eta', z)$ can be written in inverse Fourier transform of Fourier transform of hologram field⁴

$$R(\xi', \eta', z) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \{ h(x, y, 0) \} \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z \right) \right\} \quad (1)$$

where z is the reconstruction distance, λ is the wavelength, and γ is the component of spatial frequency which given by

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda x}{M \Delta p_x} \right)^2 - \left(\frac{\lambda y}{N \Delta p_y} \right)^2} \quad (2)$$

where M and N are the number of pixels in the horizontal and vertical direction and Δp_x and Δp_y are the pixels size of an individual pixels.

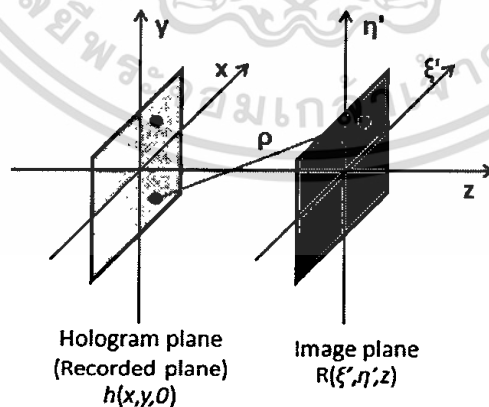


Figure 2. Coordinating system for numerical reconstruction.

3. SYSTEM AND METHODOLOGICAL INSTRUCTION

System and reconstructed tools

The schematic of digital holography system for undergraduate student is shown in figure 3. Laser diode (LDM115G/633/1, 1 mW, 635 nm) shown in figure 4(a) has been used as the light source. The beam is expanded and collimated by collimated lens, L_c , with focal length of 200 mm. Then, the light propagates through two objects placed far from each other for 200 mm. These objects were produced by pasting different number stickers on different glass slides as shown in figure 4(b). The digital hologram was recorded on CMOS camera (Canon EOS 350D, 3456x2304 pixels, 6.41 μm pixel pitch) which shown in figure 4(c). The camera placed a distance, i.e. 200 mm, from object, O_1 . Focusing lens, L_{F1} (50 mm) and L_{F2} (100 mm), were used for showing difference between common photography that need a focusing lens and digital holographic photography that don't need a lens. The detail of experimental setup will be described in next section.

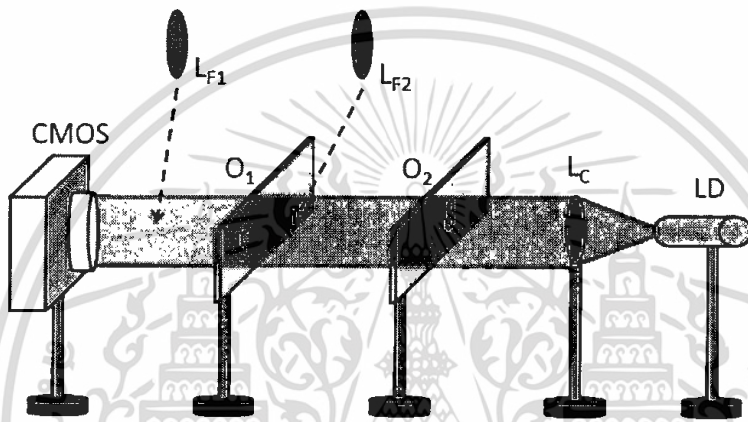


Figure 3. Schematic of digital holography system for undergraduate student.

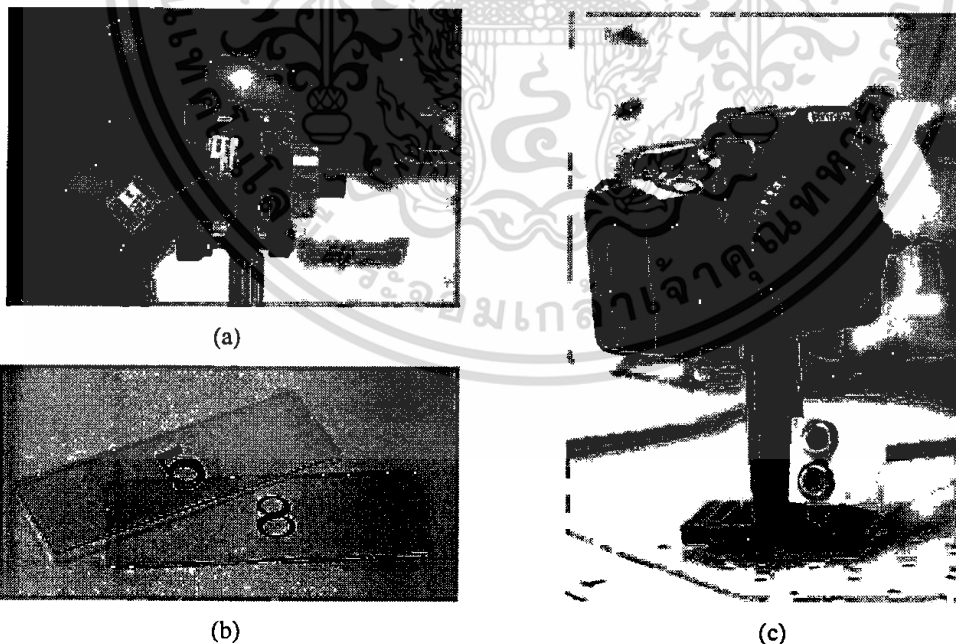


Figure 4. Devices used in digital holography system; (a) laser diode, (b) glass slides, and (c) CMOS camera.

The Graphic User Interface has been shown in figure 5. We developed reconstructed tool by using MATLAB®. The interface of our tool is shown in figure 5(a). Graphical interface panel is easy to use by input the value of wavelength, pixel size, number of image pixel, and reconstructed distance or focusing distance as illustrated in figure 5(b).

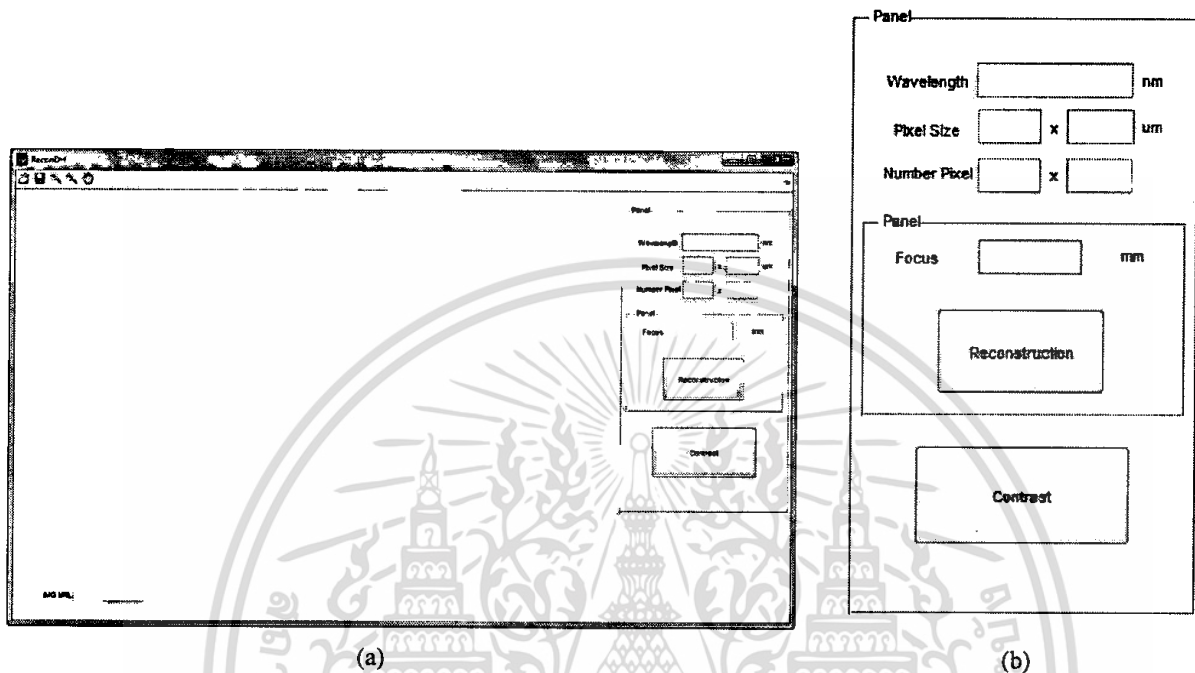


Figure 5. (a) Graphical interface of reconstructed tool and (b) magnified panel of (a).

Methodological instruction

Due to the main purpose of this research is to describe what DH is and how difference with common photography and its application, the experimental instruction can be separated to three parts. In the first two parts, the students will learn the difference between conventional photography and DH, and the third part, student will apply DH system to observe their own interested objects or systems. For the first part, the instructions in our laboratory manual are written below:

- 1) Make the experimental setup as shown in figure 3.
- 2) Make the collimated beam by placing a collimated lens, L_C , in front of the laser diode and then make alignment.
- 3) Place two objects far from each other for 200 mm. The number on glass slide must be in the path of the collimated beam.
- 4) Place CMOS camera far from the object, O_1 , for 200 mm as illustrated in figure 3.
- 5) Align the CMOS camera with both objects until the image is at the center of recorded plane.
- 6) Capture the image by using shutter release. Then write down the image name which shown in camera into the data notebook.
- 7) Insert focusing lens, L_{F1} , between object, O_1 , and CMOS camera. Then align the lens until image (O_1) is focused. After that capture the image and write the image name into the data notebook.
- 8) Insert focusing lens, L_{F2} , between object, O_2 , and CMOS camera. Then align the lens until image (O_2) is focused. After that capture the image and write the image name into the data notebook.

For the second part, the instructions in our laboratory manual are written below:

- 1) Open the image file that captured without focusing lens from the first part by reconstructed tool via MATLAB®
- 2) Input the value of wavelength, pixel size, number of pixel, and focusing distance. Then press “Reconstruction” button. For example, wavelength = 635 nm, pixel size = 6.41 x 6.41 μm, number pixel = 3456 x 2304 and focusing distance = 200 mm. (note: the value is depend on equipment and configuration)
- 3) Change the value of focusing distance until the first image (object, O_1) is focused. Then save the image.
- 4) Change the value of focusing distance again until the second image (object, O_2) is focus. Then save the image.
- 5) Compare the images, which were focused by lens and digital holography.

The instruction in the third part is written below.

- 1) Select the sample objects that you would like to observe by using DH technique
- 2) Follow the instruction in the first part by using your own objects instead of glass slide.

4. RESULTS

The recorded image without any focusing lens is shown in figure 6(a). Due to the number “8” was placed farther from CMOS camera than number “5”, number “8” has more diffracted pattern than the diffraction pattern of number “5”. Hence, number “8” image has more blur than number “5” image. After insert focusing lens, L_{F1} , between object, O_1 , and CMOS camera, number “5” image will be focused as shown in figure 6(b). In the same manner as insertion of L_{F1} , insertion of L_{F2} will focus number “8” as illustrated in figure 6(c).

After using numerical reconstruction, figure 6(a) at distance 200 mm and 400, number “5” and “8” will be focused as illustrated in figure 6(d) and 6(e), respectively. By using digital holography method, the objects placed on difference plane can be recorded simultaneously in one image and then the objects can be focused using reconstructed process. When compare with common photography that need one capture for one focus, digital holography is easier and faster. This is the advantage of digital holography that student had learnt.

In the last section, students have used DH technique in the first part to observe different kinds of samples base on their own interested.

5. CONCLUSION

In this paper, we have proposed a digital holographic system for undergraduate students in teaching optical laboratory. The system is easy to learn and make understand the concept of digital holography. From the results, conventional photography has to record one image for one object by using a lens. On the other hand, digital holography need only one image for multi planes of different objects. The images can be reconstructed by using numerical technique. Graphic inter face tools have been provided for convenience to do reconstructed image. Moreover, our approach not only explores the concept of digital holography but also trains the student skill of the alignment of light and equipment.



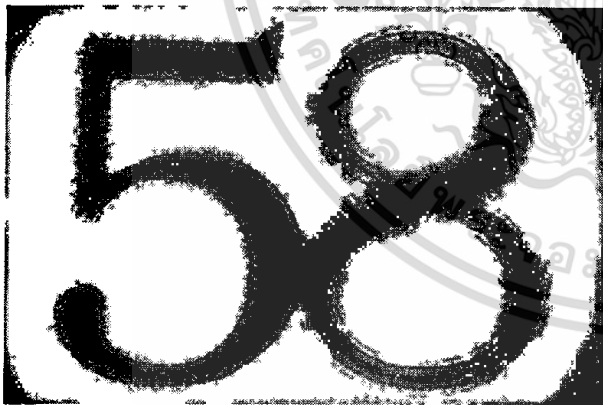
(a)



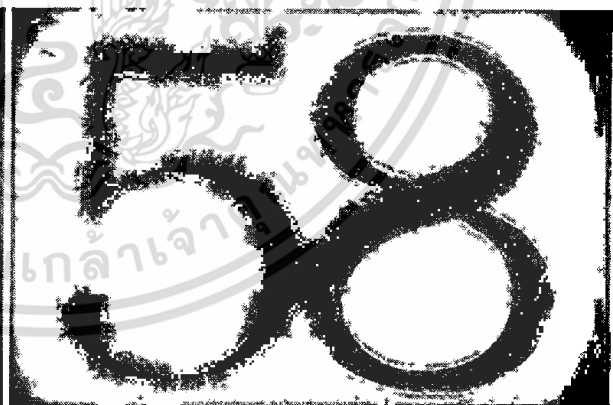
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 6. Figure captions are indented 5 spaces and justified. If you are familiar with Word styles, you can insert a field code called Seq figure which automatically numbers your figures.

REFERENCES

- [1] Schnars, U., Falldorf, C., Watson, J., Juptner, W., [Digital Holography and Wavefront Sensing, Principles, Techniques and Applications] 2nd, Springer, New York, 2015.
- [2] Jones, C. J., Director, Miscellaneous Optics Corporation, interview, Sept. 23 2011 Dyomin, V. V., Polovtsev, I. G. and Olshukov, A. S., "Holography as a tool for advanced learning of optics and photonics," Proc. ETOP 2009, (2009).
- [3] Kim, M. K., [Digital holographic Microscopy – Principles, Techniques, and Applications], Springer, New York, 49-53 (2011).
- [4] Poon, T. C. and Liu, J. P., [Introduction to Modern Digital Holography with MATLAB], Cambridge University Press, New York, 95 - 96 (2014).





ภาคผนวก ข.

คู่มือการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอลโฮโลกราฟี Digital Holography

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 2) เพื่ออธิบายความแตกต่างระหว่างการถ่ายภาพด้วยเทคนิคทั่วไป (ใช้เลนส์โฟกัส) กับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคดิจิตอลโฮโลกราฟี
- 3) เพื่อนำดิจิตอลโฮโลกราฟีไปใช้ประยุกต์เพื่อถ่ายภาพวัตถุรูปทรงต่างๆ

ทฤษฎี

เนื่องจากแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อพิจารณาแสงเคลื่อนที่ในสุญญากาศ จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell equation)

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ \vec{E} คือสนามไฟฟ้า, c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ และ ∇^2 คือลาปลาซโอเปอเรเตอร์ซึ่งนิยามคือ

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2)$$

เพื่อลดความซับซ้อนในการแก้สมการ จะพิจารณาแสงเป็นโพลาไรเซชัน ให้สนามไฟฟ้า E เป็นปริมาณ สเกลาร์ของสนามไฟฟ้า สมการที่ 1 จะเขียนได้เป็นสมการคลื่นสเกลาร์

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

และผลเฉลยของสมการคลื่นในสมการที่ 3 คือ

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= \exp[j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{R})] \\ &= \exp[j(\omega t - \alpha x - \beta y - \gamma z)] \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f$, $\vec{R} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$, และ $\vec{k} = \alpha\hat{x} + \beta\hat{y} + \gamma\hat{z}$ คือความถี่เชิงมุม, เวกเตอร์ตำแหน่ง, และคลื่น เวกเตอร์ ตามลำดับ อัตราส่วนของ k คือเลขคลื่น ซึ่งนิยามได้คือ

$$|\vec{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2-5)$$

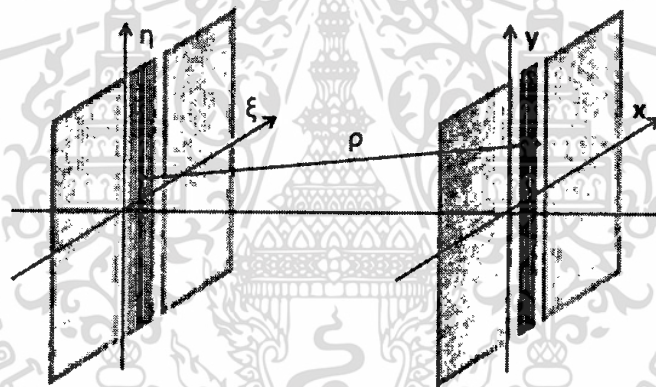
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลี้ยวเบนของแสง

เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคหรือสลิตหรือรูเล็กๆ แสงจะเกิดการเลี้ยวเบน และหลังจากนั้นจะเกิดการแทรกสอดกับหน้าคลื่นของแสงอื่นๆจะทำให้เกิดริ้วการแทรกสอดขึ้นดังภาพที่ 1 แสงเคลื่อนที่ไปตามทิศทาง แกน z ผ่านระนาบ (ξ, η) ซึ่งผลเฉลยของสมการคลื่นที่เคลื่อนผ่านระนาบดังกล่าวบนระนาบ (x, y) สามารถ เขียนได้เป็น

$$E_{diff}(x, y, z, t) = \frac{1}{j\lambda} \iint E_{trans}(\xi, \eta) \frac{\exp(jk\rho)}{\rho} dx dy \quad (5)$$

เมื่อ $E_{trans}(\xi, \eta)$ สนามไฟฟ้าที่ระนาบ (ξ, η) ρ ระยะระหว่างจุดที่พิจารณาบน (ξ, η) ถึงจุดที่พิจารณาบนระนาบ (x, y) ซึ่งตัวอย่างของระนาบ (x, y) นี้ได้แก่ระนาบของโฮโลแกรม หรือระนาบที่บันทึกภาพ

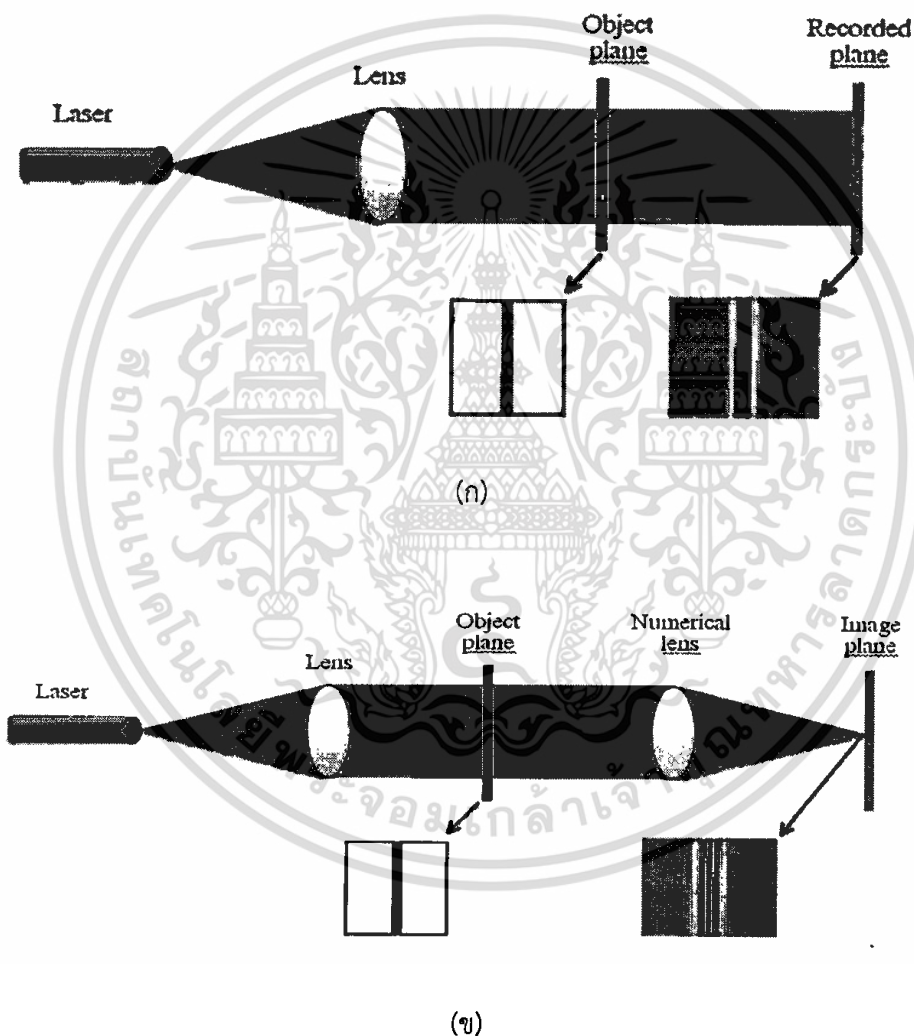


ภาพที่ 1 Geometry of diffraction from 2D aperture.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอลโฮโลกราฟี

ดิจิตอลโฮโลกราฟี เป็นเทคนิคที่บันทึกเฟสและแอมพลิจูดของรูปบนเซนเซอร์ภาพอิเล็กทรอนิกส์ เช่น CCD หรือ CMOS แทนการบันทึกบนแผ่นฟิล์ม หลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี คือ ใช้การกระจายของแสงผ่านวัตถุและ บันทึกบนแผ่นบันทึก ภาพที่บันทึกบนแผ่นจะไม่ชัดเจน ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงตามระยะทางที่ได้เคลื่อนที่ไป ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) หลังจากที่ได้ใส่เลนส์จำลองที่ถูกสร้างขึ้นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์แทนแผ่นบันทึก ภาพจะชัดเจนมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2(ข) ซึ่งการใส่เลนส์เข้าไปแทรกฉากภาพ จะทำให้ภาพถูกโฟกัส เรียกว่า กระบวนการสร้างขึ้นมาใหม่ (reconstruction)



ภาพที่ 2 หลักการของดิจิตอลโฮโลกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

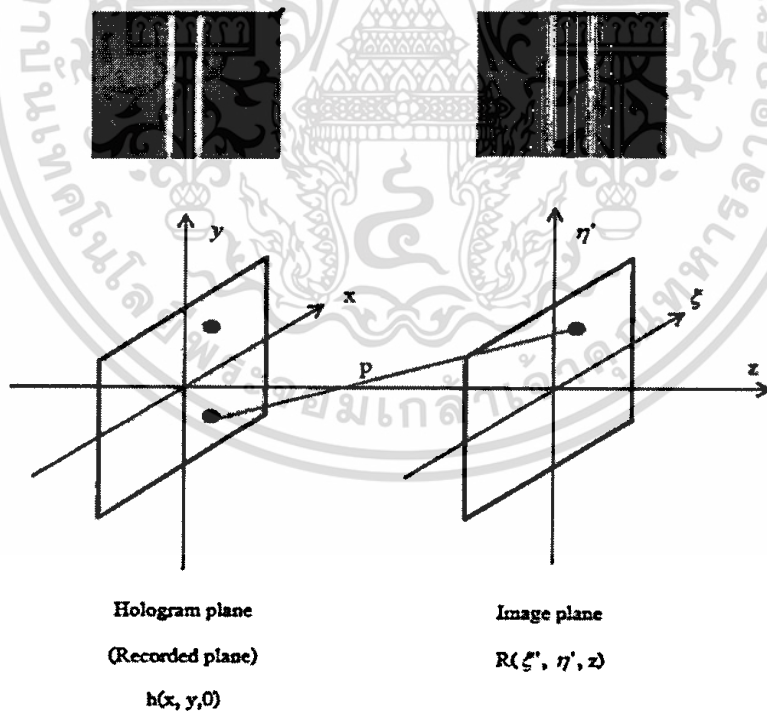
ให้ $h(x, y, 0)$ คือระนาบหรือระนาบโฮโลแกรมที่บันทึกบนกล้อง และ $R(\xi', \eta', z)$ คือระนาบของจุดโฟกัส หรือระนาบของภาพที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ แสดงในภาพที่ 3 สัญญาณภาพที่ระนาบการอ่านโฮโลแกรม $R(\xi', \eta', z)$ สามารถเขียนในรูป การแปลงฟูเรียร์แบบผกผันของการแปลงฟูเรียร์ในสนามโฮโลแกรม

$$R(\xi', \eta', z) = F^{-1} \left\{ F\{h(x, y, 0)\} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z\right) \right\} \quad (6)$$

เมื่อ z คือระยะของการสร้างภาพใหม่ λ คือ ความยาวคลื่น และ γ คือ ส่วนประกอบของความถี่ ซึ่งอธิบายได้ดังสมการ

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda x}{M\Delta p_x}\right)^2 - \left(\frac{\lambda y}{N\Delta p_y}\right)^2} \quad (7)$$

เมื่อ M เป็นจำนวนพิกเซลแกน y และ N เป็นจำนวนพิกเซลแกน x และ Δp_x และ Δp_y เป็นขนาดของแต่ละพิกเซล



ภาพที่ 3 ระยะโฟกัสตามแนวแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 6 และ 7 ที่ใช้เพื่อ reconstruction สามารถเขียนผัง flow chart ของการเขียนโปรแกรมเพื่อ reconstruction ได้ดังภาพที่ 4 ซึ่งมีขั้นตอนประมวลผลหลักๆ 3 ขั้นตอนคือ

- 1) แยกองค์ประกอบของภาพโดยการใช้ฟังก์ชัน Fast Furrier Transformin (FFT) ในโปรแกรม MATLAB®
- 2) ทำการคูณผลการแปลงฟูเรียร์ด้วยฟังก์ชัน $g(z) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \gamma z\right)$
- 3) ทำการแปลงฟูเรียร์ผกผัน (Inverse Fast Fourier Transformation (IFFT))

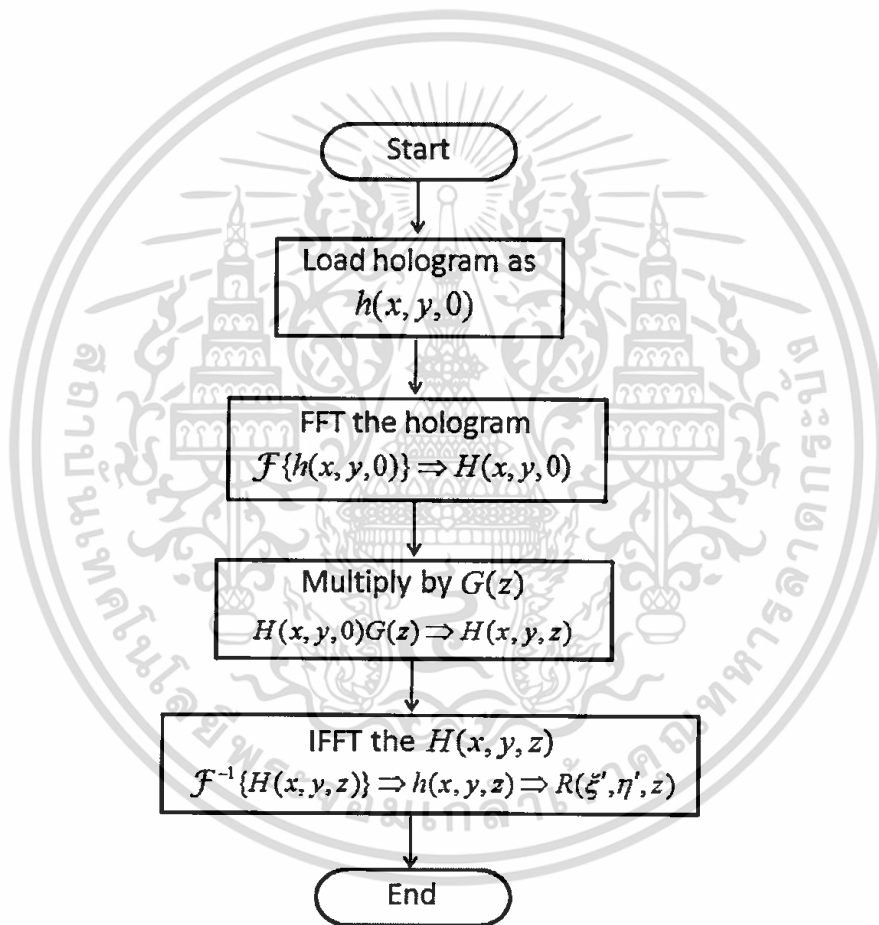
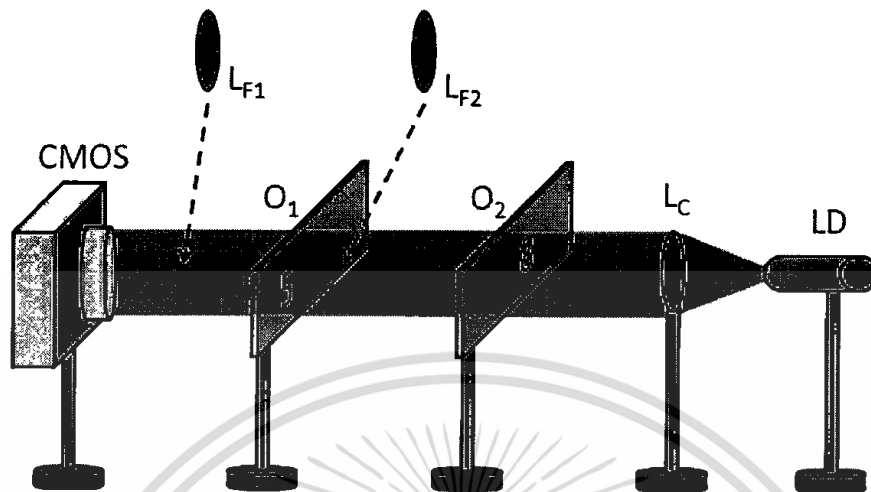


Figure 4 The flow chart of reconstruction algorithm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาหลักการดิจิทัลโฮโลกราฟี

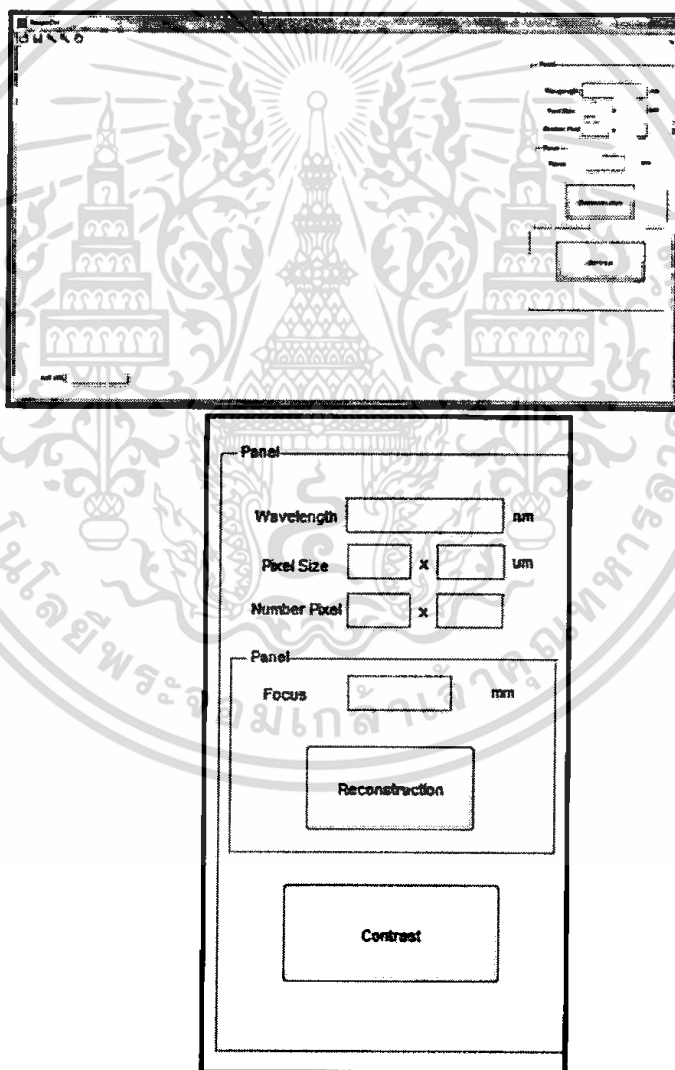
ตอนที่ 1 การโฟกัสภาพโดยใช้เลนส์

- 1) ทำการติดตั้งและจัดอุปกรณ์ดังภาพที่ 4
- 2) ปรับตำแหน่งเลนส์ L_c เพื่อจัดลำแสงให้เป็นแสงขนาน
- 3) วางวัตถุ (แผ่นแก้ว) ทั้งสองให้ห่างกัน 200 มิลลิเมตร และลำแสงเลเซอร์ต้องผ่านตัวเลขที่ติดอยู่บนแผ่นแก้วทั้งสอง
- 4) ติดตั้งกล้อง CMOS ให้ห่างจากวัตถุ O_1 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร
- 5) ปรับตำแหน่งกล้อง CMOS เพื่อให้ได้ภาพของวัตถุทั้งสองอยู่กึ่งกลางเซนเซอร์
- 6) ทำการถ่ายภาพ และจัดซื้อภาพที่แสดงในกล้องไว้
- 7) ใส่เลนส์ L_{F1} ระหว่างวัตถุ O_1 และกล้อง CMOS (ดังภาพที่ 3) เพื่อโฟกัสภาพ และทำการปรับตำแหน่ง เลนส์จนกว่าจะได้ภาพที่กัส (ชัดเจนนที่สุด) จากนั้นทำการถ่ายภาพ
- 8) ใส่เลนส์ L_{F2} ระหว่างวัตถุ O_2 และกล้อง CMOS (ดังภาพที่ 3) เพื่อโฟกัสภาพ และทำการปรับตำแหน่ง เลนส์จนกว่าจะได้ภาพที่กัส (ชัดเจนนที่สุด) จากนั้นทำการถ่ายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การโฟกัสด้วยดิจิทัลโฮโลกราฟี

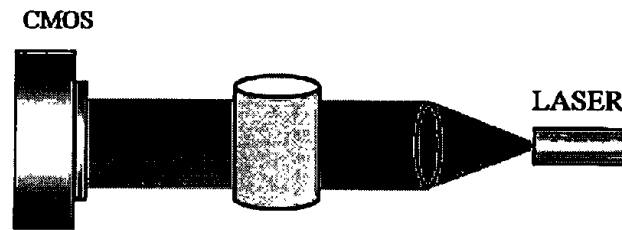
- 1) เปิดโปรแกรมสำหรับปรับโฟกัสภาพ (reconstruction) จากนั้นเปิดไฟล์ภาพที่ได้บันทึกโดยไม่ได้ใช้เลนส์ช่วยโฟกัส (ภาพจากตอนที่ 1 ข้อที่ 6)
- 2) ใส่ค่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้บันทึก จำนวนพิกเซลของภาพ ระยะที่ใช้โฟกัสภาพ จากนั้นกดปุ่ม "Reconstruction" (ดูภาพที่ 5 ประกอบ)
- 3) เปลี่ยนค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งได้ภาพของวัตถุ O_1 ที่ชัดเจน จากนั้นบันทึกภาพ
- 4) เปลี่ยนค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งได้ภาพของวัตถุ O_2 ที่ชัดเจน จากนั้นบันทึกภาพ
- 5) เปรียบเทียบภาพที่ได้ในตอนที่ 2 กับตอนที่ 1



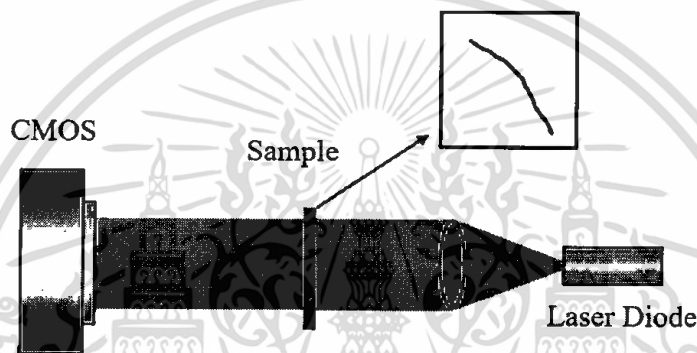
ภาพที่ 5 หน้าจอโปรแกรมสำหรับ reconstruction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การประยุกต์ใช้



ภาพที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจหารอยตำหนิในเนื้อแก้ว



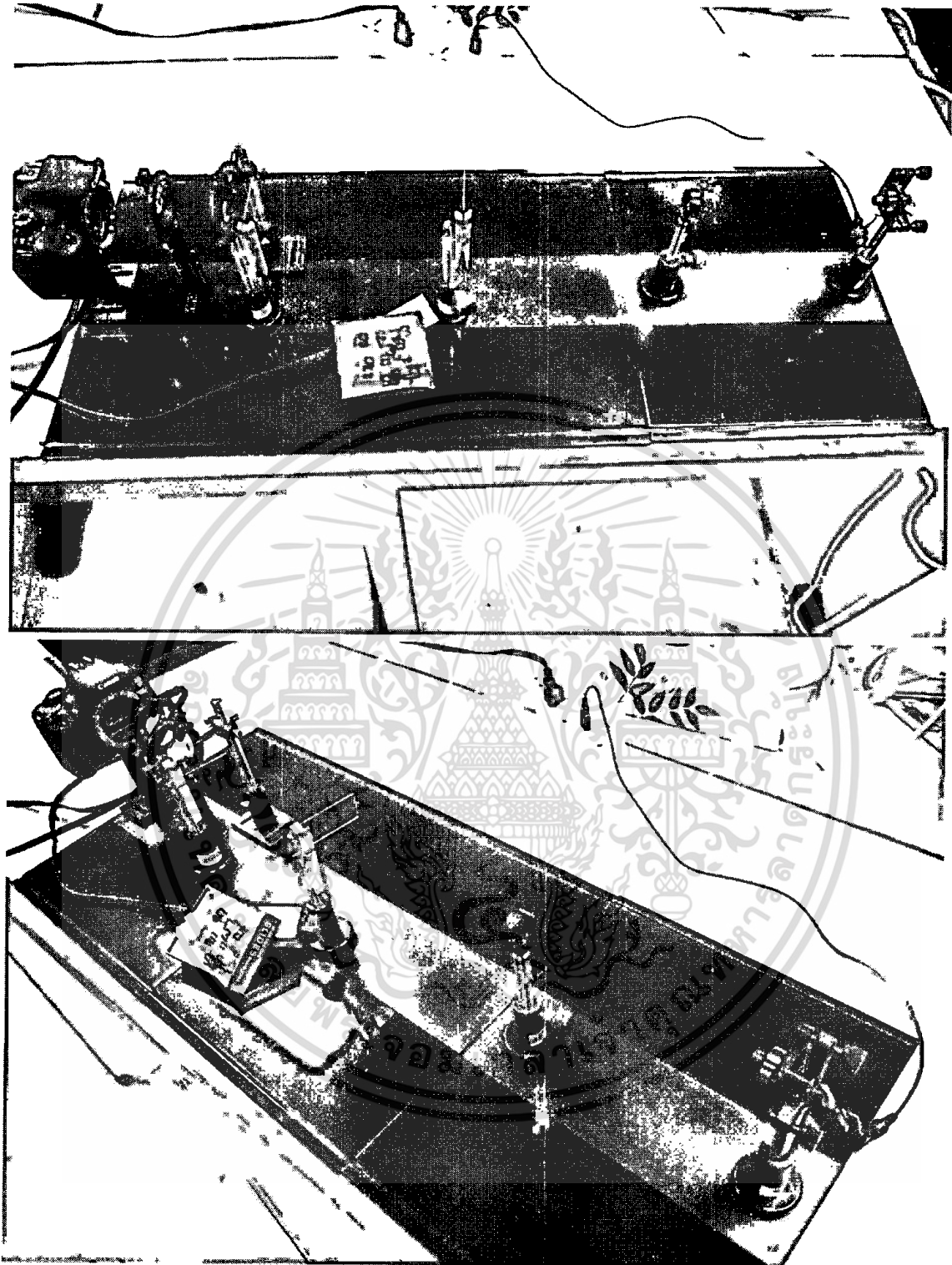
ภาพที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดความหนาของเส้นผม

- 1) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 6
- 2) ทดการทดลองเหมือนตอนที่ 2 ปรับค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งพบรอยตำหนิบนขวดแก้วที่ชัดเจน จากนั้นบันทึกภาพ
- 3) ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 7
- 4) ทดการทดลองเหมือนตอนที่ 2 ปรับค่าระยะโฟกัสจนกระทั่งเห็นภาพของเส้นผมชัดเจนชัดเจน จากนั้นบันทึกภาพ
- 5) ทำการวัดความหนาของเส้นผมด้วยโปรแกรม imageJ

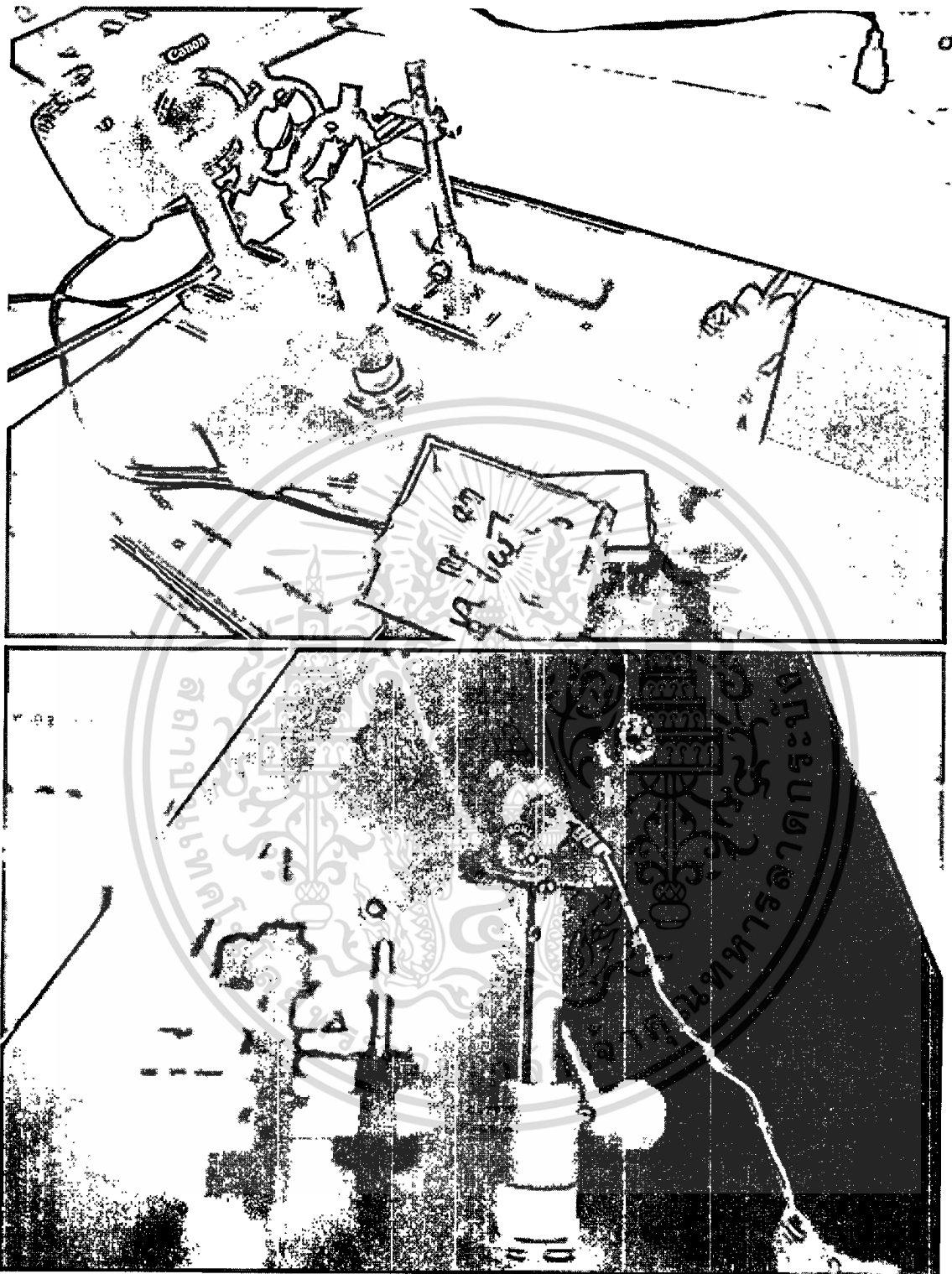
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



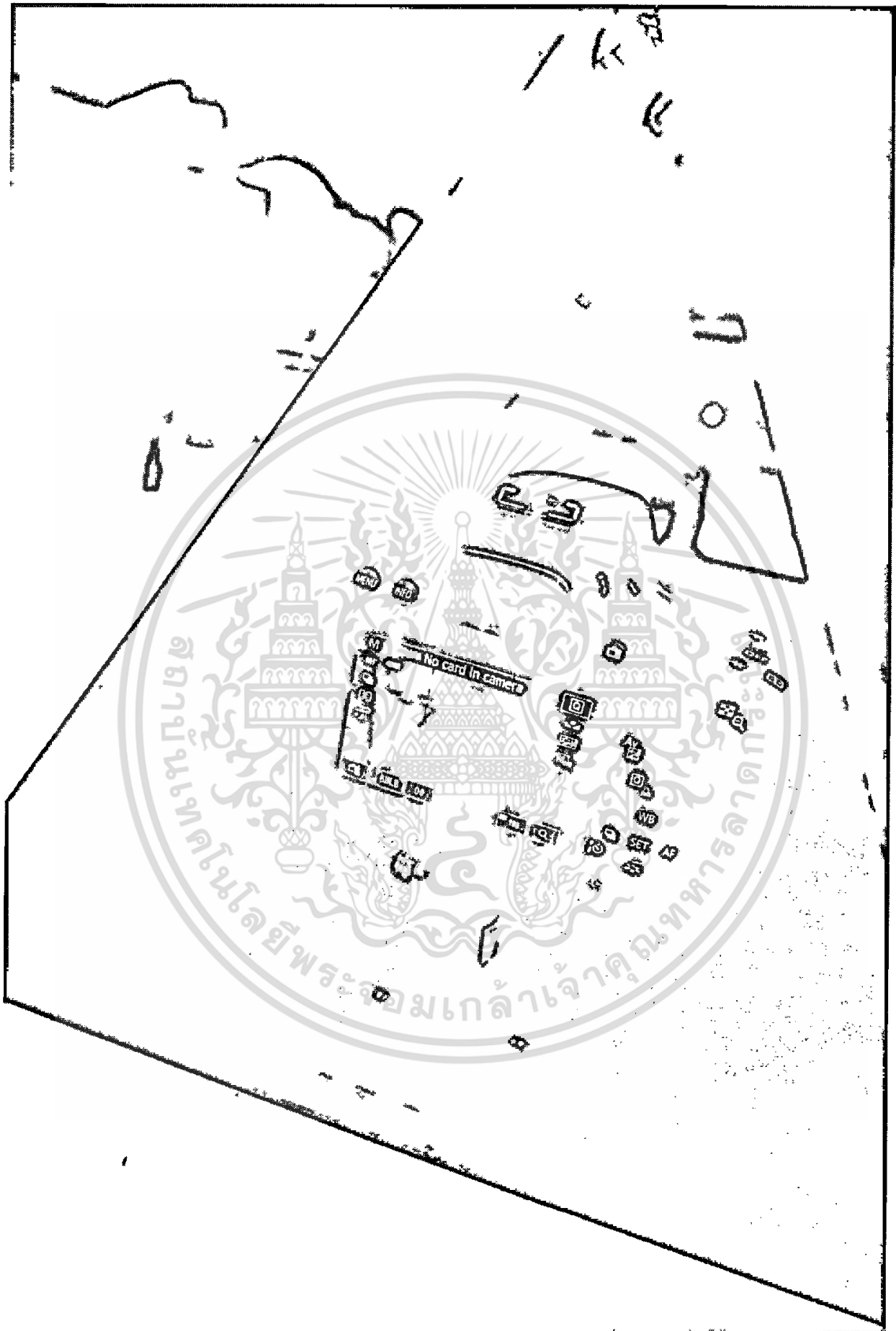
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



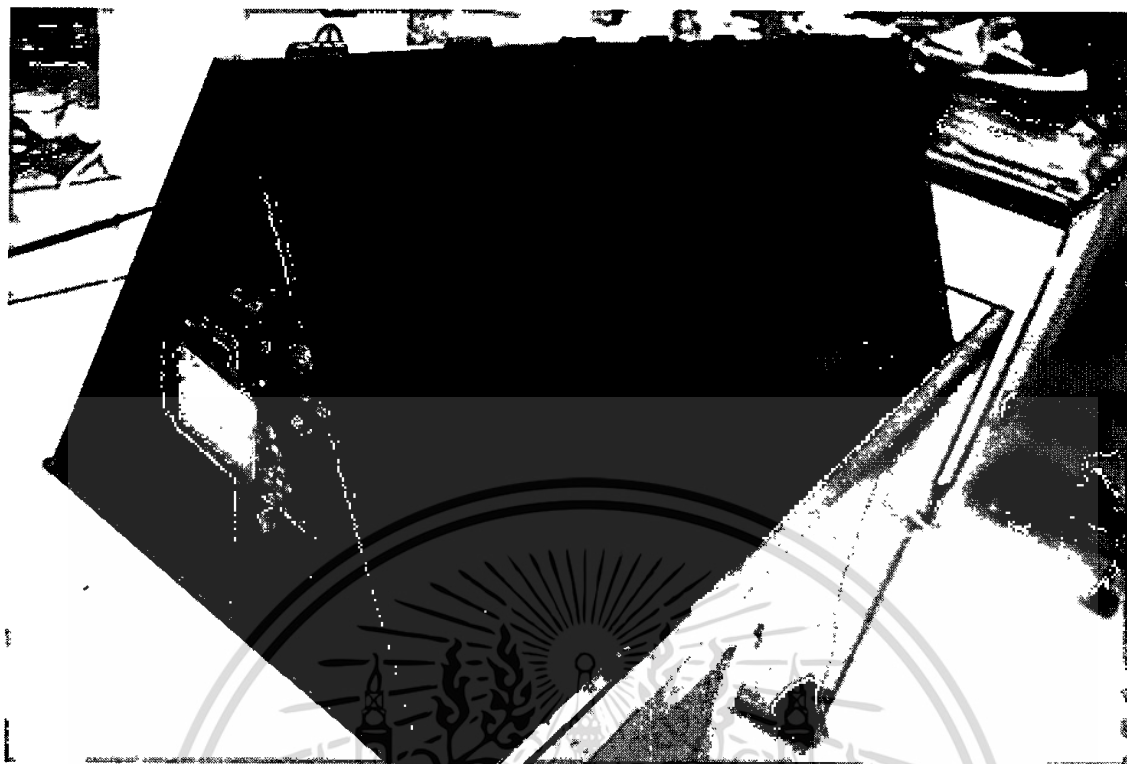
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Prathan Buranasiri



Lecturer

Physics, Faculty of Science,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520.

Mobile: 083-815-4829, 084-071-0279

Tel: 02-326-4339 ext. 324, 02-737-3000 ext 6202

Fax: 02-326-4413

Email: maygal@gmail.com

EDUCATION

- **Ph.D.** Electrical and Computer Engineering, Major Electro-Optics, University of Dayton, Dayton, Ohio, U.S.A. 2006.
Thesis: Optical Correlation Using Isotropic and Anisotropic Self-Diffraction in Photorefractive material.
Advisor: Dr. Partha. P. Banerjee
- **M.S.** Physics, Major Optics, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama, U.S.A. 2000.
Thesis: Coherent and Incoherent Self Imaging Using Photorefractive Barium Titanate Crystal.
Advisor: Dr. Partha. P. Banerjee
- **B.S.** Physics, Minor Mathematics, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand. 1993.

RELATED COURSEWORK

- **Physics Courses:** Classical Mechanics, Statistical Mechanics, Mathematical Methods for Physics, Classical Electrodynamics, Quantum Mechanics, Bose-Einstein Condensation.
- **Electrical Engineering Courses:** Electronics, Random Signal and Noises
- **Optics Courses:** Geometrical Optics, Physical Optics, Linear Systems and Fourier Optics, Lasers, Optical Testing, Optical Testing Lab, Polarization of Light, Guided Wave Optics, Fiber Optics Lab, Optical Communications, Electro-optical Devices and Systems, Nonlinear Optics, Quantum Electronics, Semiconductor Lasers, Accousto-Optics, Ultrafast Optics.

EXPERIENCE

03/06-present and 04/96-05/97

Lecturer, Applied Physics Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

- Research areas: Semiconductor Lasers, Nonlinear optics, Photonic Crystals, Optical Communication, Computational Electromagnetics, Optical tweezers Terahertz optics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Teaching areas: Fundamental Physics, Fundamental Physics Laboratory in Thai and English, Intermediate Physics Laboratory, Physical and Quantum Electronics, Lasers Physics, Physical Optics, Computational Fluid Dynamics, Polarized Light.

04/08-07/08

Visiting Scholar, Center for Biophotonics and Laser Science, Physics Department, School of Physical Sciences, University of Queensland, Brisbane, Qld 4072 Australia.

- Investigate an optical tweezers system for measurement some parameters transfer between the laser and the particle in liquids.
- Building a cheap optical tweezers system for using in undergraduate laboratory.

11/07-03/08

Adjunct Lecturer, School of Architecture and Designs, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

- Teaching Fundamentals Physics in English for Architect, Interior Architect and Industrial Design Students

01/00-02/06

Research Assistant, Optical Information Processing Lab, University of Dayton, Dayton, Ohio, U.S.A.

- Built optical systems to study incoherent diffraction of acousto-optic cells
- Built optical systems to study pattern formation by photorefractive crystals
- Set up the experiments for undergraduate optic class and high school outreach program

04/95-03/96

Research Assistant, Energy Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

- To be the secretary of nuclear energy and hydrogen energy projects.
- To collect the data for electricity outage cost project.

08/93-03/95

Computer Laboratory Staff, Assumption University, Bangkok, Thailand.

- Assisted students to use microcomputer.
- Operated IBM mainframe computer and IBM AS 400 minicomputer.

PROFESSIONAL SOCIETY ACTIVITIES

Staff, University of Dayton Booth, SPIE annual meeting, San Diego, 2005.

- Promoted the Electro-optics Program and Electrical and Computer Engineering Department, University of Dayton.

Memberships

- Optical Society of America (student) (2002-2005)
- SPIE (student) (2004-2005)
- IEEE LEOS (student) (2003-2005)
- SPIE (2007-present)

Frequent volunteer, SPIE student chapter, University of Dayton

- Showed and explained optic phenomena for local elementary, middle, and high school students.

AWARDS AND HONORS

- Thailand Research Fund for New Faculty Member (2008)
- Royal Thai Government Fellowship for Exchanging Faculty (2007)
- Quatman Scholarship (ECE Department, University of Dayton (Winter 2006)
- Research Excellent Award (SPIE Annual Meeting 2005)
- University of Dayton Summer Fellowship (2005)
- Royal Thai Government Scholarship (1997-2003)

PUBLICATIONS

- P. P. Banerjee, P. Buranasiri, N. V. Kukhtarev, T. V. Kukhtareva, V. I. Polejaev, and M. F. Gunther, "Self-pumped phase conjugation, higher order diffraction and image correlation using barium titanate", Proc. SPIE 4803, 74-78 (2002).
- P. Buranasiri, P. P. Banerjee, V. Polejaev, and C. C. Sun, "Image correlation using isotropic and anisotropic higher order generation, and mutually pumped phaseconjugation in photorefractive barium titanate", Proc. SPIE 5206, 215-228 (2003).
- P. Buranasiri, and P. P. Banerjee, "Bragg and non-Bragg diffraction from single beam writing and readout in photorefractive barium titanate," Proc. SPIE 5911, 35-41 (2005).
- P. Buranasiri, and P. P. Banerjee, "Single beam holography using anisotropic self-diffraction," Proc. SPIE 6314, (2006).
- P. P. Banerjee; G. Nehmetallah; R. Aylo; P. Buranasiri, "Dispersion relations for negative index materials and slow light," Proc. SPIE 6698, (2007).
- S. Suttirak, P. Buranasiri, P. P. Banerjee, N. Witthayakorn, W. Neeyakorn, "Photorefractive effect in Pb-based relaxor ferroelectric materials," Proc SPIE 6793 (2008).
- S. Suttirak, P. Buranasiri, P. Puttanarakul, N. Witthayakorn, "A study of photorefractive effect in Pb-based relaxor ferroelectric crystals using P-scan technique," Thai Journal of Physics, 5, 325 (2010).
- S. Wicharn, P. Buranasiri, W. Yindeesuk, C. E. Sunny, A. M. Sarangan, and J. W. Haus, "Metallo-dielectric photonic band gap structure simulation using transfer matrix method and Bloch functions," Thai Journal of Physics, 5, 55 (2010).
- S. Wicharn, P. Buranasiri, and J. W. Haus "The defect state of metallo-dielectric photonic band gap structure and its application in optoelectronic devices" will be publish in Thai Journal of Physics, 6, (2011)

- S. Plaipichit, T Taengtung, S. Kamoldilok, and P. Buranasiri, “Adjustable high voltage direct current power supply for CO₂ laser controlled by digital system,” will be publish in Thai Journal of Physics, 6, (2011).

PRESENTATIONS

- “Bragg and non-Bragg diffraction from single beam writing and readout in photorefractive barium titanate” SPIE annual meeting, San Diego, California, 2005.
- “Phase conjugation, isotropic and anisotropic higher order diffraction generation, and image correlation using photorefractive barium titanate” APS joint spring meeting Ohio section, Dayton, 2005. (poster)

STUDENT MASTER THESIS

- S. Wicharn, “Metallo-dielectric photonic band gap structure simulation using transfer matrix method,” King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2010.
- S. Plaipichit, “Adjustable high voltage direct current power supply for CO₂ laser,” King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2010
- S. Suttirak, “Study of Photorefractive Effect in PMN-PT using P-SCAN Technique,” King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2009.

REFERENCES

- Dr. Partha P. Banerjee, Professor, Electrical and Computer Engineering Department, and Electro-Optics Program, University of Dayton, Dayton, OH 45469 U.S.A.
- Dr. Joseph W. Haus, Professor, Electro-Optics Program, University of Dayton, OH 45469 U.S.A.
- Dr. Andrew M. Sarangan, Associate Professor, Electro-Optics Program, University of Dayton, OH 45469, U.S.A.
- Dr. Dean R. Evans, Photorefractive Team Leader/Physicist, Air Force Research Laboratory, Wright Patterson Airforce Base, Dayton, OH, U.S.A.

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

Education

B.Eng (2nd Class Honors) Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

M.Eng Industrial Engineering, Lehigh University, USA

Ph.D. Industrial Engineering with a Minor in Materials Science, Oregon State University, USA

Publications

Kanlayasiri, K., Sukpimai, K. 2016. "Effects of indium on the intermetallic layer between low-Ag SAC0307-xIn lead-free solders and Cu substrate", *Journal of Alloys and Compounds*, 668, pp. 169-175.

Kanlayasiri, K., Ariga, T. 2015. "Physical properties of Sn58Bi-xNi lead-free solder and its interfacial reaction with copper substrate", *Materials & Design*, 86, pp. 371-378.

Kanlayasiri, K., Jattakul, P. 2013. "Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDMed K460 tool steel", *Precision Engineering*, 37, pp. 556-561.

Mookam, N., Kanlayasiri, K. 2012. "Evolution of the intermetallic compounds found between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver, lead-free solder and Cu substrate during thermal aging", *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), pp. 53-59.

Mookam, N., Kanlayasiri, K. 2011. "Effect of soldering condition on formation of intermetallic phases developed between Sn-0.3Ag-0.7Cu low-silver lead-free solder and Cu substrate", *Journal of Alloys and Compounds*, 509, pp. 6276-6279.

Kanlayasiri K., Ariga T. 2010. Influence of thermal aging on microhardness and microstructure of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solders. *Journal of Alloys and Compounds*, 504: L5-L9.

Kanlayasiri K., Ariga T. 2010. Influence of thermal aging on microhardness and microstructure of Sn-0.3Ag-0.7Cu-xIn lead-free solders. *Journal of Alloys and Compounds*, 504: L5-L9.

Kanlayasiri K., Boonmung S. 2007. Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 459-464.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Boonmung S, Chomtee B, Kanlayasiri K. 2006. Evaluation of artificial neural networks for pineapple grading. *Journal of Texture Studies*. 37: 568-579.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้