



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

ปริญญา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง หลักวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพริ้วแสงสำหรับการสร้างภาพสามมิติ

Method of Image Enhancement and Analysis of Fringe Projection Display for
3D Reconstruction

نامผู้วิจัย นายศศิน เทียนดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จร เลิศสุดวิชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จันทร์จิรา สิ้นทนะ โยธิน, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภุชงค์ อุทโยภาส, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

หลักวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพริ้วแสงสำหรับการสร้างภาพสามมิติ

Method of Image Enhancement and Analysis of Fringe Projection Display for 3D Reconstruction

โดย

นายศติน เทียนดี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศศิน เทียนดี 2554: หลักวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพวีวส์แสงสำหรับการสร้างภาพสามมิติ
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชา
วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จร เลิศสุวิชัย, Ph.D.
91 หน้า

การฉายภาพวีวส์แสงดิจิทัลโดยใช้เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลวเป็นเทคนิคที่ใช้อย่างกว้างขวาง
สำหรับข้อมูลภาพสามมิติ ภาพวีวส์แสงถูกฉายด้วยเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว และใช้เทคนิควิธีการเลื่อนเฟส
เชิงตำแหน่งสำหรับวิเคราะห์วีวส์แสงซึ่งมีความสำคัญต่อการสร้างภาพสามมิติ งานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาและ
นำเสนอหลักวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพวีวส์แสงสำหรับการสร้างภาพสามมิติใน 2 ปัญหา คือ แก้ไขปัญหา
สกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์และแก้ไขปัญหาค่าความผิดพลาดของค่าเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องฉายภาพแบบผลึก
เหลว

ปัญหาแรก งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับเลนส์ให้อยู่ในจุดโฟกัส ซึ่งปรับได้ง่ายกว่าการทำการ
เลื่อนออกจากจุดโฟกัส โดยอาศัยการสังเกตเห็นลายตาข่ายของสกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์ที่ชัดเจน วิธีการนี้ภาพวีวส์แสง
จะมีความคมชัด และได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อแยกสัญญาณรบกวนลายตาข่ายออกด้วยการแปลงข้อมูลภาพ
ด้วยฟูเรียร์ พบว่ามีความยาก ซับซ้อนและใช้เวลานาน จึงได้นำเสนอเทคนิควิธีการแปลงเวฟเลตมาใช้สำหรับ
ปรับปรุงภาพวีวส์แสงซึ่งมีความรวดเร็วและง่ายกว่าการแปลงฟูเรียร์ อีกทั้งให้ภาพผลลัพธ์ที่ดีและสะดวกต่อการ
ประยุกต์ใช้งาน ปัญหาที่สอง เนื่องมาจากเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว ทำให้ภาพ
สามมิติมีพื้นผิวเป็นริ้วคลื่น งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการชดเชยค่าเฟส โดยอาศัยบริเวณพื้นหลังที่เป็น
ระนาบของข้อมูลภาพในแนวแกน y และภาพไม่มีการบิดเบือน ลำดับแรกนำค่าเฟสจริงเทียบกับค่าเฟสในอุดม
คติที่คำนวณจากสมการคณิตศาสตร์และสร้างเป็นตารางค้นหา ถัดมานำค่าความกว้างของค่าเฟสจริงมาค้นหาใน
ตารางค้นหาดังกล่าวทำให้ได้ค่าเฟสอุดมคติอย่างรวดเร็ว สุดท้ายหาค่าความต่างระหว่างค่าเฟสจริงกับค่าเฟส
อุดมคติและสร้างตารางค้นหาสำหรับใช้ชดเชย ได้ภาพสามมิติที่สมจริง วิธีการนี้ไม่ต้องปรับแต่งค่าเกมมาของ
เครื่องฉายภาพผลึกเหลว อีกทั้งเป็นการคำนวณแบบเวลาจริงและไม่ขึ้นกับเครื่องฉายภาพดิจิทัลหรือกล้อง
ดิจิทัล

ดังนั้นจากการแก้ปัญหาทั้งสองอย่างที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ การแก้ไขภาพวีวส์แสงที่ถูกแทรกซ้อน
ด้วยสกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์ได้ถูกลบออกไปจากข้อมูลภาพได้ดีซึ่งให้ค่า SNR ของภาพผลลัพธ์ที่ดีขึ้นกว่าภาพ
ต้นฉบับเกือบเท่าตัว และส่วนของการแก้ไขปัญหาค่าเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นนั้นทำให้ภาพวีวส์คลื่นหายไปและได้
ภาพสามมิติที่สมจริงพร้อมทั้งค่าช่วงที่บ่งชี้ความราบเรียบมีค่าลดลง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sasin Tiendee 2011: Method of Image Enhancement and Analysis of Fringe Projection Display for 3D Reconstruction. Master of Engineering (Computer Engineering), Major Field: Computer Engineering, Department of Computer Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Charay Lertsudwichai, Ph.D. 91 pages.

Digital fringe projection using a digital LCD (Liquid Crystal Display) projector is a technique used extensively for 3D surface reconstruction. Fringe pattern images which are projected by digital LCD projector and generated by spatial phase shifting are important procedures of the 3D surface reconstruction. Two major problems of LCD projector namely screen door effect and nonlinear gamma effect are addressed in this research.

First issue, this research proposed how to adjust the lens to the focal point. This could be easily achieved by moving out the focus until the screen door effect patterns are clearly observed. After this method was applied, fringe pattern image appeared to have high contrast. A preliminary experiment was conducted to isolate the net interference pattern by applying Fourier Transform to the image data which had disadvantages of difficulty and time consuming. Therefore, this work presented the technique which used wavelet transform to improve fringe pattern image. This proposed technique is faster and easier than the conversion Fourier Transform method. The result images are also better with the proposed method. Second issue, the problem of the nonlinear gamma effect that causes strips on 3D surface is studied. This research presented an algorithm to compensate phase based on background of the image plane along the y-axis, without image distortion. Firstly, the real phase was compared to the ideal phase which was calculated from the mathematical equations and created a look up table. Next, the width of the actual phase could be search from the table for matching the ideal phase value quickly. Then, the phase difference between the actual and the ideal phase was determined to create a search table for compensation. Finally, the results as 3D surface were shown. As the proposed method doesn't need to adjust the gamma, therefore the calculation is in real-time and does not depend on digital projectors or cameras.

In conclusion, two problems were solved in this study. The Screen Door Effect was removed from the image data as well as the image showed better results than the original image almost doubled. Also the problem of nonlinear gamma that caused the image stripe was disappeared and provided the realistic 3D images as well as the range that indicates the smoothing was reduced.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดี เพราะได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จเร เลิศสุตวิชัย อาจารย์ ดร. จันทร์จิรา สีนทะโยธิน และ อาจารย์ ดร. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาให้กับผู้วิจัย และคอยติดตาม สอบถามผลงานเป็นระยะมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหญิง ไทยนิมิต อาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับผู้วิจัยและได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติวรรณ ศรีนาค และอาจารย์ ดร. ดวงรัตน์ แก่นสวัสดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและความกรุณาในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวที่ได้ส่งเสริมให้ผู้วิจัยได้รับการศึกษาเล่าเรียนจนถึงระดับอุดมศึกษา พร้อมทั้งอบรมสั่งสอนให้บุตรเป็นบุคคลที่ดีของสังคม และคอยเป็นกำลังใจ เป็นที่ปรึกษาที่ดีให้กับผู้วิจัย รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมสั่งสอน ให้ความเอื้อเฟื้อแก่ผู้วิจัยจนกระทั่งได้สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

กราบขอบพระคุณ สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและทุนการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่นล (นลพรพร) พี่ริน (ศรินทร์) พี่ทิพย์ (กรรณทิพย์) และพี่ๆ ทุกท่าน ที่หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีภาพ (IMG) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และ พี่ๆ ทุกท่านของโครงการบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คอยให้กำลังใจ และอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และเป็นเพื่อนที่ดีแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ศศิน เทียนดี

มกราคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	53
ผล	53
วิจารณ์	77
สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุป	80
ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	91

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การตรวจแก้ค่าเฟสโดยการมอดูโลด้วยค่า 2π	13
2	การเปรียบเทียบวิธีการแก้ไขปัญหาคอมมาไม่เป็นเชิงเส้น	18
3	รายชื่อเวฟเลิตฟังก์ชันที่นิยม	31
4	เวฟเลิตฟังก์ชัน 10 อันดับแรกที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากน้อยไปมาก	34
5	การเปรียบเทียบกระบวนการระหว่างการแปลงฟูเรียร์และการแปลงเวฟเลิต	80
6	สรุปเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละขั้นตอน	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพรวมระบบเทคนิควิธีการรับรู้ภาพสามมิติ (Stereo Vision Technique)	7
2	ภาพรวมระบบเทคนิควิธีการกวาดวิเคราะห์เส้นเดี่ยว (Single Line Scanning Technique)	7
3	ภาพรวมระบบเทคนิควิธีไทม์ออฟไฟลท์ (Time of Flight Technique)	8
4	ภาพรวมระบบเทคนิควิธีเข้ารหัสโครงสร้างแสง (Encoded Structured Light Technique)	8
5	ภาพรวมระบบเทคนิควิธีฉายริ้วแสงรูปไซน์ (Sinusoidal Fringe Projection Technique)	9
6	ภาพรวมของขั้นตอนวิธีการสร้างภาพสามมิติโดยใช้เทคนิควิธีฉายริ้วแสงรูปไซน์	14
7	ตัวอย่างโมเดลพื้นปูนพลาสติกเตอร์ที่มีลักษณะลายตาข่ายสี่เหลี่ยมของปรากฏการณ์สกรีนดอร์เอฟเฟกต์ (Screen Door Effect) แทรกซ้อนอยู่	15
8	ลักษณะข้อมูลภาพ 4 ภาพที่มีค่าเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น	16
9	ลักษณะข้อมูลภาพ 4 ภาพที่มีค่าเกมมาเป็นเชิงเส้น	16
10	ข้อมูลภาพสามมิติเกิดรีเวิร์คขึ้นเนื่องมาจากเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น	16
11	วิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลต (Wavelet Decomposition)	19
12	ภาพผลลัพธ์ของการทำวิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลต (Wavelet Decomposition)	19
13	วิธีการสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟเลต (Wavelet Reconstruction)	20
14	ภาพรวมของขั้นตอนวิธีการสร้างภาพสามมิติและวิธีการที่นำเสนอ	23
15	ภาพรวมการจัดวางอุปกรณ์	24
16	การจัดวางอุปกรณ์ในห้องทดลอง	24
17	ภาพตารางที่ถูกบิดเบือนในลักษณะต่างๆ (ก) คือภาพตารางที่ไม่ถูกบิดเบือนภาพ (ข) คือความผิดรูปโป่งกลาง (Barrel Distortion) และ (ค) คือความผิดรูปคอดกลาง (Pincushion Distortion)	25
18	ตัวอย่างภาพที่ถูกบิดเบือน (ก) ภาพต้นฉบับ และ (ข) ภาพผลลัพธ์	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
19 ความถี่ของภาพริ้วแสง (ก) ความถี่ของภาพต้นฉบับที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบ และ (ข) ตัวกรองสำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว	27
20 การเปรียบเทียบภาพริ้วแสง (ก) ภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการปรับปรุง และ (ข) ภาพต้นฉบับ	27
21 ภาพตัวอย่างโมเดลพื้น	28
22 ภาพตัวอย่างส่วนผิวโค้ง	29
23 แผนภาพของเทคนิควิธีการแปลงเวฟเล็ดมาใช้สำหรับปรับปรุงภาพริ้วแสง	30
24 องค์ประกอบระดับที่ 1 จะสังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนอยู่ในตำแหน่งนี้	32
25 องค์ประกอบระดับที่ 2 จะไม่มีสัญญาณรบกวนหลงเหลืออยู่	32
26 ตัวอย่างภาพสัญญาณรบกวนที่ใช้สำหรับทดลองการเลือกใช้เวฟเล็ดฟังก์ชัน	33
27 ภาพรวมการทดลองสำหรับการแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์เอฟเฟกต์	35
28 การเลือกใช้ริ้วแสงให้เหมาะสมกับวัตถุ	36
29 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปแมว ขนาดภาพ 500 x 514 พิกเซล	37
30 ภาพสเปกตรัมของโมเดลปูนปลาสเตอร์รูปแมวที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบ	38
31 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปปลา ขนาดภาพ 500 x 475 พิกเซล	39
32 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปส่วนโค้ง ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล	40
33 โมเดลพื้นปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 1 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล	41
34 โมเดลพื้นปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 2 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล	42
35 โมเดลพื้นปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 3 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล	43
36 โมเดลพื้นปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 4 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล	44
37 โมเดลพื้นปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 5 ขนาดภาพ 660 x 586 พิกเซล	45
38 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปดอกไม้ ขนาดภาพ 500 x 395 พิกเซล	46
39 ผังงานของขั้นตอนวิธีการหาค่าเฟสที่มีผลกระทบจากเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น	49
40 ค่าเฟสที่ถูกห่อ (Wrapped Phase) ของเฟสในอุดมคติ	50
41 การเลือกเส้นกำหนดของค่าเฟสที่ถูกห่อ (Wrapped Phase) ที่เป็นค่าเฟสจริง (Real Phase)	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	การหาค่าความกว้างของริ้วแสง (Fringe Pitch) ด้วยการ Thresholding	50
43	การจับคู่ระหว่างค่าความกว้างริ้วแสงกับตารางค้นหาของค่าเฟสในอุดมคติ	51
44	การเปรียบเทียบหาความต่างระหว่างค่าเฟสจริงกับค่าเฟสในอุดมคติ	51
45	ข้อมูลภาพสามมิติที่ผ่านการแก้ไขเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น	52
46	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปแมว	53
47	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปแมว	54
48	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปแมว	54
49	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปแมว	55
50	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปปลา	55
51	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปปลา	56
52	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปปลา	56
53	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปปลา	57
54	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง	57
55	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง	58
56	การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพริ้วแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
70 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 4	65
71 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 4	66
72 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 4	66
73 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 4	67
74 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 5	67
75 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 5	68
76 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 5	68
77 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปพื้น ขึ้นที่ 5	69
78 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปดอกไม้	69
79 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปดอกไม้	70
80 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปดอกไม้	70
81 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสแกน รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปดอกไม้	71
82 ภาพสามมิติของโมเดลปูนปลาสเตอร์รูปแมว	72
83 ภาพสามมิติของโมเดลปูนปลาสเตอร์รูปปลา	72
84 ภาพสามมิติของโมเดลปูนปลาสเตอร์ส่วนโค้ง	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
85	โมเดลฟื้นฟูปนเปื้อนพลาสติก ขั้นที่ 1	73
86	โมเดลฟื้นฟูปนเปื้อนพลาสติก ขั้นที่ 2	74
87	โมเดลฟื้นฟูปนเปื้อนพลาสติก ขั้นที่ 3	74
88	โมเดลฟื้นฟูปนเปื้อนพลาสติก ขั้นที่ 4	75
89	โมเดลฟื้นฟูปนเปื้อนพลาสติก ขั้นที่ 5	75
90	โมเดลฟื้นฟูปนเปื้อนพลาสติก รูปดอกไม้	76
91	การเปรียบเทียบค่าช่วงระหว่างภาพสามมิติต้นฉบับและผลลัพธ์	76
92	การแยกองค์ประกอบข้อมูลภาพด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmey' 3 ระดับ	78
93	การแยกองค์ประกอบข้อมูลภาพด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'rbio3.3' 3 ระดับ	78
94	ภาพสเปกตรัมของข้อมูลภาพที่ผ่านเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmey' และ 'db15'	79
95	การเปรียบเทียบภาพสามมิติที่แก้ไขโดย (ก) การแปลงฟูเรียร์ (ข) การแปลงเวฟเลต	81
96	หน้าฉากตัวกรองความถี่เปลี่ยนไปตามความกว้างของริ้วแสง	82
97	ภาพสามมิติที่ได้จากค่าเฟสหลายระดับ (Multiresolution)	85
98	ภาพสามมิติในหลายมุมมอง	86

หลักวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพริ้วแสงสำหรับการสร้างภาพสามมิติ

Method of Image Enhancement and Analysis of Fringe Projection Display for 3D Reconstruction

คำนำ

การได้มาซึ่งข้อมูลภาพสามมิติของวัตถุโดยไม่สัมผัสมีเทคนิควิธีการที่หลากหลาย อาทิเช่น เทคนิควิธีการรับรู้ภาพสามมิติ (Stereo Vision Technique) คือการจำลองการมองเห็นของตามนุษย์ โดยใช้กล้อง 2 ตัวเก็บข้อมูลภาพ หาค่าตำแหน่งจุดที่มีความสัมพันธ์กันและคำนวณค่าความสูงของวัตถุ เทคนิควิธีการกวาดวิเคราะห์เส้นเดี่ยว (Single Line Scanning Technique) ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความคมชัดสูง เช่น แสงเลเซอร์ (Laser) เก็บภาพในมุมมองหนึ่งและคำนวณหาค่าความสูงด้วยทฤษฎีสามเหลี่ยม เทคนิควิธีไทม์ออฟไฟลท์ (Time of Flight Technique) ใช้หลักการส่งสัญญาณพัลส์ไปยังวัตถุที่สนใจ คำนวณเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณดังกล่าวและนำมาคำนวณหาค่าความลึกของวัตถุ เทคนิควิธีการเข้ารหัสโครงสร้างแสง (Encoded Structured Light Technique) เป็นการเข้ารหัสโครงสร้างแสงซึ่งเป็นสีหรือขาวดำก็ได้ โดยถอดรหัสโครงสร้างแสงที่ฉายไปยังวัตถุ หาค่าความสัมพันธ์ของตำแหน่งและคำนวณค่าความสูง และเทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์ (Sinusoidal Fringe Projection Technique) เป็นเทคนิคที่ใช้การสร้างริ้วแสงที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) และฉายไปยังวัตถุจากนั้นคำนวณเพื่อหาค่าเฟส (Phase Value) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการคำนวณหาค่าความสูงของวัตถุ เป็นต้น

งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้เทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการฉายแสดงผล (Projection Display-Based) เนื่องจากมีความรวดเร็วและความแม่นยำในการสร้างภาพสามมิติ โดยเลือกใช้เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว (LCD Projector) เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับฉายแสดงผลริ้วแสงที่สร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเลือกใช้เทคนิควิธีการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง (Spatial Phase Shifting Technique) สำหรับวิเคราะห์ริ้วแสง (Fringe Analysis) ซึ่งมีความสำคัญต่อการสร้างภาพสามมิติ

โดยปกติสำหรับเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว ขณะฉายแสดงผลภาพมักเกิดเหตุการณ์ที่เห็นภาพมีลักษณะเป็นลายตารางแทรกซ้อนอยู่หรือเรียกว่า “สกรีนดอร์เอฟเฟค (Screen Door Effect)” ซึ่งมีผลต่อการสร้างภาพสามมิติเพราะทำให้เกิดความผิดพลาดของภาพพื้นผิววัตถุสามมิติอย่างมีนัยสำคัญ ปัญหาของการเลือกใช้เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลวกับเทคนิควิธีการฉายวีวี่แสงรูปไซน์ที่ทำการวิเคราะห์วีวี่แสงด้วยเทคนิคการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นคือ ความผิดพลาดของคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) ที่ไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ เนื่องมาจากแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma) ของเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว ซึ่งส่งผลกระทบต่อแสดงผลภาพสามมิติของวัตถุที่เห็นเป็นริ้วคลื่นปรากฏอยู่ และความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง (Spatial Phase Shift Error) ซึ่งในประเด็นนี้เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลวทำงานได้ปกติดี

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและนำเสนอวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพวีวี่แสงสำหรับการสร้างภาพสามมิติเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นใน 2 ประเด็น คือ ปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟค (Screen Door Effect) และปัญหาความผิดพลาดของค่าแกมมาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว (Nonlinear Gamma)

สำหรับการแก้ไขปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟค ผู้วิจัยนำเสนอวิธีการปรับเลนส์ให้อยู่ในจุดโฟกัส (Focus) ซึ่งสามารถปรับได้ง่ายกว่าการทำการเลื่อนออกจากจุดโฟกัส (Defocus) โดยอาศัยการสังเกตเห็นลายตาข่ายของสกรีนดอร์เอฟเฟคที่ชัดเจน วิธีการนี้ทำให้ภาพวีวี่แสงมีความคมชัดไม่เบลอ แต่ข้อมูลภาพวีวี่แสงที่บันทึกมาได้ยังคงมีลายตาข่ายแทรกซ้อนอยู่ จึงได้ทำการทดลองเบื้องต้นด้วยการแปลงข้อมูลภาพด้วยฟูเรียร์และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณรายคาบ ซึ่งวิธีการนี้มีความยากและซับซ้อนในการหาสัญญาณรบกวนและใช้เวลานาน จึงได้นำเสนอเทคนิควิธีการแปลงเวฟเลตมาใช้สำหรับปรับปรุงภาพวีวี่แสง เพราะเห็นว่าการแปลงเวฟเลตในสองมิตินี้จะแยกสัมประสิทธิ์ในแนวการตั้ง แนวการนอนและแนวทแยง ซึ่งตรงกับธรรมชาติของสัญญาณรบกวนรายคาบที่เกิดจากสกรีนดอร์เอฟเฟค มีความรวดเร็วและให้ภาพผลลัพธ์ที่ดีกว่าการแปลงฟูเรียร์ อีกทั้งยังสะดวกต่อการประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการแก้ไขปัญหาความผิดพลาดของค่าแกมมาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลวโดยเทคนิควิธีการชดเชยค่าเฟส (Phase Compensation) ผู้วิจัยนำเสนอขั้นตอนซึ่งอาศัยเทคนิคการเก็บข้อมูลภาพ กล่าวคือ ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพให้เก็บข้อมูลที่มีบริเวณของวัตถุที่สนใจและบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบ โดยมองว่าข้อมูลภาพเป็นภาพที่สมบูรณ์คือภาพไม่มีการบิดเบือน จากนั้นเลือกข้อมูลภาพของบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบในแนวแกน y ของภาพมาทำ

การคำนวณตามขั้นตอนวิธีที่ได้ออกแบบโดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฟสจริง (Real Phase) กับค่าเฟสในอุดมคติ (Ideal Phase) ซึ่งค่าเฟสจริงได้มาจากการเลือกพื้นที่สนใจ (Region of Interest) บนข้อมูลภาพที่ผ่านการแก้ค่าเฟสที่ถูกต้องแล้ว และนำค่าเหล่านั้นมาทำการคำนวณหาความกว้างของริ้วแสง และทำการเตรียมตารางค้นหา (Look-up Table) ของค่าเฟสในอุดมคติโดยคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์ นำค่าความกว้างของค่าเฟสจริงมาค้นหาในตารางค้นหาดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าเฟสในอุดมคติอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำมาหาค่าความต่างระหว่างค่าเฟสจริงและค่าเฟสในอุดมคติมาสร้างตารางค้นหาสำหรับใช้ชดเชยค่าเฟสอันเนื่องมาจากปัญหาเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น นำตารางที่ได้นี้ไปใช้ชดเชยกับค่าเฟสจริงจะได้ภาพสามมิติที่ไม่มีลูกคลื่นรบกวนและได้พื้นผิวภาพจริงกลับคืนมา การทดลองในงานวิจัยนี้ได้แสดงภาพสามมิติก่อนและหลังการแก้ไขด้วยวิธีดังกล่าว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ดี ทำให้ได้ภาพสามมิติที่สมจริงยิ่งขึ้น และได้ทำการพิสูจน์ความราบเรียบของพื้นผิวด้วยตัวกรองช่วง ค่าที่ได้สอดคล้องกับผลภาพที่มองเห็น ซึ่งวิธีการนี้ง่ายและสะดวกต่อการประยุกต์ใช้งานและยังไม่ต้องทำการปรับแต่งค่าเกมมาของเครื่องฉายภาพผลึกเหลว (LCD Projector) อีกทั้งวิธีการนี้ทำการคำนวณเป็นแบบออนไลน์ (Online Processing) และไม่ขึ้นกับเครื่องฉายภาพดิจิทัลและกล้องดิจิทัล

ดังนั้นจากการแก้ปัญหาทั้งสองอย่างที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ การแก้ไขภาพริ้วแสงที่ถูกแทรกซ้อนด้วยสกรีนคอร์เอฟเฟคได้ถูกลบออกไปจากข้อมูลภาพได้ดีซึ่งให้ค่า SNR ของภาพผลลัพธ์ที่ดีขึ้นกว่าภาพต้นฉบับเกือบเท่าตัว และส่วนของการแก้ไขปัญหเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นนั้นทำให้ภาพริ้วคลื่นหายไปและได้ภาพสามมิติที่สมจริงพร้อมทั้งค่าช่วงที่บ่งชี้ความราบเรียบมีค่าลดลง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและนำเสนอเทคนิควิธีการแปลงเวฟเลต (Wavelet Transform) สำหรับวิเคราะห์และปรับปรุงภาพการฉายแสดงผลของริ้วแสงที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนคาบ (Periodic Noise) ที่มีลักษณะเหมือนตาข่ายหรือ “สกรีนดอร์เอฟเฟกต์ (Screen Door Effect)” ซึ่งเกิดขึ้นจากคุณสมบัติของเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว (LCD Projector) ฉะนั้นเมื่อนำภาพริ้วแสงดังกล่าวมาทำการคำนวณเพื่อสร้างภาพสามมิติจะทำให้เกิดความผิดพลาดของการแสดงผลภาพพื้นผิวของวัตถุ

2. ศึกษาและนำเสนอเทคนิควิธีการชดเชยค่าเฟส (Phase Compensation) สำหรับวิเคราะห์และปรับปรุงภาพค่าเฟสที่คำนวณได้จากภาพริ้วแสงอันเนื่องมาจากปัญหาค่าแกมมาที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma) ของเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว ซึ่งส่งผลต่อการแสดงผลภาพสามมิติที่ผิดพลาด ทำให้มองเห็นพื้นผิววัตถุเป็นริ้วคลื่น

3. สร้างภาพสามมิติที่มีการแสดงผลภาพสามมิติที่ดีขึ้นและสมจริง

ข้อจำกัดและขอบเขต

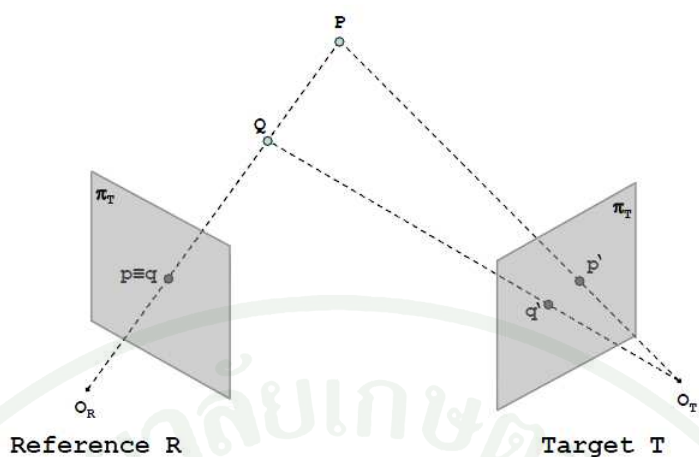
1. งานวิจัยชิ้นนี้สร้างภาพสามมิติจากการฉายแสงผลรีวแสงไปยังวัตถุในมุมมองด้านบน (Top View) และเก็บข้อมูลภาพรีวแสงในหนึ่งมุมมอง
2. งานวิจัยชิ้นนี้ทำการวิเคราะห์และปรับปรุงภาพเพื่อลดผลกระทบของปัญหาสกีนคอร์ดเอฟเฟกต์ (Screen Door Effect) และแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma) และทำให้การแสดงผลภาพสามมิติที่ดีขึ้นและสมจริง ซึ่งเป็นคนละประเด็นกับค่าความแม่นยำ (Accuracy) เพราะค่าความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับการเทียบมาตรฐาน (Calibration) ระหว่างเครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว (LCD Projector) และกล้องดิจิทัล (Digital Camera) ของระบบ
3. งานวิจัยนี้ไม่ได้เป็นการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์สำหรับสร้างภาพสามมิติ สนใจเฉพาะขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre-processing) ที่เกิดจากผลกระทบของการวิหวลไลเซชัน (Visualization) ดังนั้นการวัดผลจึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ได้ เพราะงานวิจัยอื่นๆ นั้นจะทำการวัดผลบนพื้นฐานของระบบฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบมาเฉพาะตนเอง
4. งานวิจัยชิ้นนี้ประยุกต์ใช้เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลวที่หาได้ในสถานที่ทำงานทั่วไป ซึ่งปรากฏปัญหาสกีนคอร์ดเอฟเฟกต์และแกมมาไม่เป็นเชิงเส้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น
5. งานวิจัยชิ้นนี้ไม่พิจารณาข้อมูลภาพที่เกิดการบิดเบือน (Distortion) ของเลนส์กล้องดิจิทัลและข้อมูลภาพที่เกิดความคลาดสี (Chromatic Aberration) กล่าวคือ ข้อมูลภาพที่ใช้มีความสมบูรณ์
6. งานวิจัยชิ้นนี้ทำการทดลองและเก็บข้อมูลภาพในห้องปฏิบัติการวิจัยที่ควบคุมแสง

การตรวจเอกสาร

หัวข้อนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อันได้แก่ วิธีการได้มาซึ่งข้อมูลภาพสามมิติของวัตถุโดยไม่สัมผัส การสร้างภาพสามมิติโดยใช้เทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์ ปราบกฏการณ์สกรีนดอร์เอฟเฟก (Screen Door Effect) แกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma) การแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต 2 มิติ (2D Discrete Wavelet Transform) ตัวกรองช่วง (Range Filtering) และงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

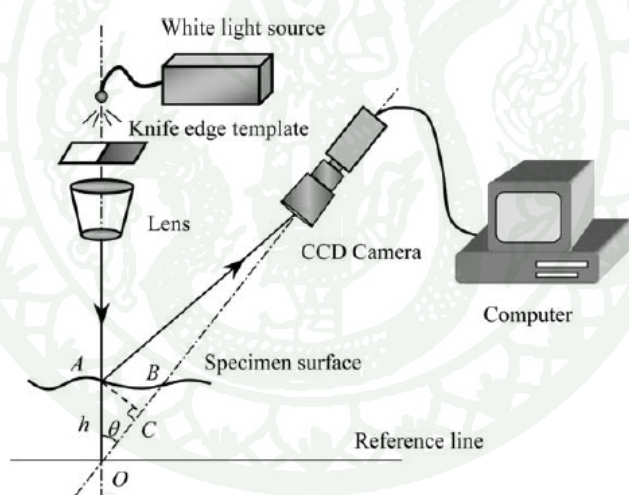
1. วิธีการได้มาซึ่งข้อมูลภาพสามมิติของวัตถุโดยไม่สัมผัส

วิธีการสร้างภาพสามมิติของวัตถุโดยไม่สัมผัสมีหลากหลายวิธี อาทิเช่น เทคนิควิธีการรับรู้ภาพสามมิติ (Stereo Vision Technique) (Mattoccia, 2010) คือการจำลองการมองเห็นของตามมนุษย์ โดยใช้กล้อง 2 ตัวเก็บข้อมูลภาพ หาค่าตำแหน่งจุดที่มีความสัมพันธ์กันและคำนวณค่าความสูงของวัตถุ ดังแสดงภาพรวมของระบบดังกล่าวในภาพที่ 1 เทคนิควิธีการกราดวิเคราะห์เส้นเดี่ยว (Single Line Scanning Technique) (ศศิณ และคณะ, 2549; Miao et al., 2005) ใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความคมชัดสูง เช่น แสงเลเซอร์ (Laser) เก็บภาพในมุมมองหนึ่งและคำนวณหาความสูงด้วยทฤษฎีสามเหลี่ยม ดังแสดงภาพรวมของระบบดังกล่าวในภาพที่ 2 เทคนิควิธีไทม์ออฟไฟลท์ (Time of Flight Technique) (Gokturk et al., 2004) ใช้หลักการส่งสัญญาณพัลส์ไปยังวัตถุที่สนใจ คำนวณเวลาการสะท้อนกลับของสัญญาณดังกล่าวและนำมาคำนวณหาความลึกของวัตถุ ดังแสดงภาพรวมของระบบดังกล่าวในภาพที่ 3 เทคนิควิธีการเข้ารหัสโครงสร้างแสง (Encoded Structured Light Technique) (Valkenburg and McIvor, 1998; Hsieh, 2001; Wu et al., 2006) เป็นการเข้ารหัสโครงสร้างแสงซึ่งจะเป็นสีหรือขาวดำก็ได้ โดยจะทำการถอดรหัสโครงสร้างแสงที่ฉายไปยังวัตถุ หาค่าความสัมพันธ์ของตำแหน่งและคำนวณค่าความสูง ดังแสดงภาพรวมของระบบดังกล่าวในภาพที่ 4 และเทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์ (Sinusoidal Fringe Projection Technique) (ศศิณ และคณะ, 2549; Quan et al., 2001; Yen et al., 2006; Schreiber and Bruning, 2007) เป็นเทคนิคที่ใช้การสร้างริ้วแสงที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) และฉายไปยังวัตถุจากนั้นคำนวณเพื่อหาค่าเฟส (Phase Value) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการคำนวณหาความสูงของวัตถุ ดังแสดงภาพรวมของระบบดังกล่าวในภาพที่ 5 เป็นต้น



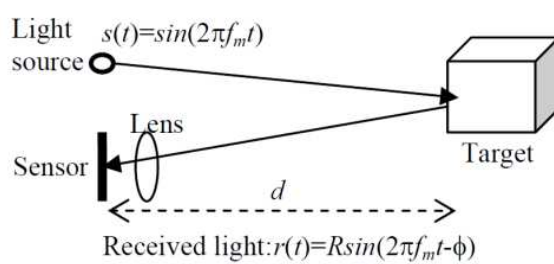
ภาพที่ 1 ภาพรวมระบบเทคนิควิธีการรับรู้ภาพสามมิติ (Stereo Vision Technique)

ที่มา: Mattoccia (2010)



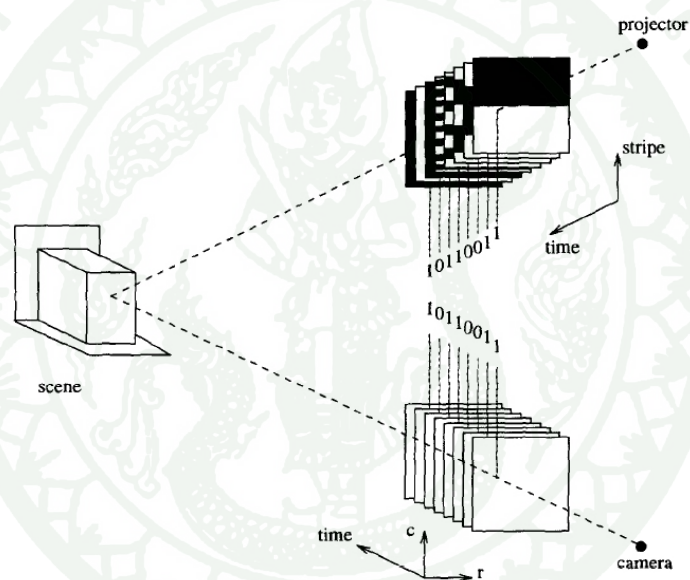
ภาพที่ 2 ภาพรวมระบบเทคนิควิธีการกราดวิเคราะห์เส้นเดียว (Single Line Scanning Technique)

ที่มา: Miao et al. (2005)



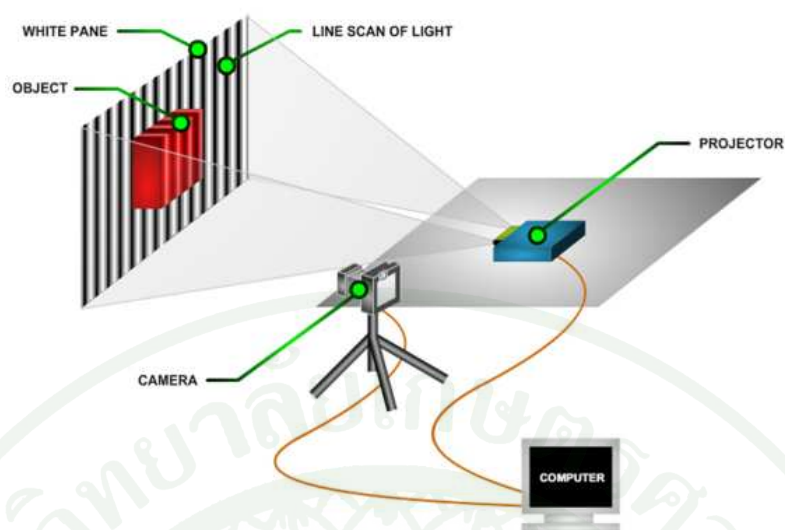
ภาพที่ 3 ภาพรวมระบบเทคนิควิธีใหม่้ออฟโฟลต์ (Time of Flight Technique)

ที่มา: Gokturk et al. (2004)



ภาพที่ 4 ภาพรวมระบบเทคนิควิธีเข้ารหัสโครงสร้างแสง (Encoded Structured Light Technique)

ที่มา: Valkenburg and McIvor (1998)



ภาพที่ 5 ภาพรวมระบบเทคนิคฉายริ้วแสงรูปไซน์ (Sinusoidal Fringe Projection Technique)

ที่มา: ศศิน และคณะ (2549)

งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้เทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการฉายแสดงผล (Projection Display-Based) เนื่องจากมีความรวดเร็วและความแม่นยำในการสร้างภาพสามมิติ เทคนิควิธีนี้จะทำการคำนวณค่าเฟสจากข้อมูลภาพพิกเซลต่อพิกเซล ถ้าเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าเทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าและง่ายต่อการนำมาใช้งาน กล่าวคือ เทคนิควิธีการรับรู้ภาพสามมิติ (Stereo Vision Technique) จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดที่ได้จากกล้อง 2 ตัว จึงทำให้ใช้เวลาในการคำนวณนานและจะเกิดการผิดพลาดของตำแหน่งจุดที่สัมพันธ์กันได้ง่าย เทคนิควิธีการกราดวิเคราะห์เส้นเดี่ยว (Single Line Scanning Technique) จะเห็นได้ว่าใช้แสงเส้นเดี่ยวในการกราดวิเคราะห์จะทำให้ใช้เวลาการคำนวณนาน เทคนิควิธีไทม์ออฟไฟลท์ (Time of Flight Technique) วิธีการนี้ต้องออกแบบอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณพร้อมทั้งต้องมีการคำนวณระยะเวลาที่แม่นยำซึ่งจะเป็นจุดที่มีความยากต่อการคำนวณและพัฒนาระบบ เทคนิควิธีการเข้ารหัสโครงสร้างแสง (Encoded Structured Light Technique) ใช้ข้อมูลภาพในการเข้ารหัสอย่างน้อย 8 ภาพเพื่อใช้ในการเข้ารหัส 8 บิต ด้วยเหตุนี้จึงใช้เวลาในการคำนวณสูงและมีความซับซ้อนในการถอดรหัส

งานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้เทคนิควิธีการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง (Spatial Phase Shifting Technique) สำหรับวิเคราะห์ริ้วแสง (Fringe Analysis) ซึ่งมีความสำคัญต่อการสร้างภาพสามมิติ เพราะมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนจึงทำให้ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่นๆ การวิเคราะห์ริ้วแสงมีหลายเทคนิควิธี (Quan et al., 2010) อาทิเช่น การวัดข้อมูลการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform Profilometry) การแปลงเวฟเลตแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform) และการแปลงฟูเรียร์เวลาสั้นสองมิติ (2D Short-Time Fourier Transform) เป็นต้น เทคนิควิธีดังกล่าวจะอาศัยการทำงานบนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ซึ่งมีการคำนวณที่ซับซ้อนยุ่งยากและถ้าคำนวณไม่ดีสามารถเกิดผลกระทบลักษณะวงแหวน (Ringing Effect) บนข้อมูลภาพได้อีกด้วย และได้เลือกใช้เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว (LCD Projector) เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับฉายแสดงผลริ้วแสงที่สร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ข้อดีของอุปกรณ์ชิ้นนี้ คือ เป็นอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานและสามารถทำการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่งได้ดี อีกทั้งสะดวกในการใช้งานและหาได้ตามสถานที่ทำงานทั่วไป

2. ขั้นตอนวิธีการสร้างภาพสามมิติโดยใช้เทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์

การสร้างภาพสามมิติโดยใช้เทคนิควิธีการฉายริ้วแสงรูปไซน์ ภาพรวมแสดงดังภาพที่ 6 และมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้ (Schreiber and Bruning, 2007)

2.1 การสร้างภาพริ้วแสงด้วยสมการพื้นฐานของการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง

$$I(x, y, t) = I' + I'' \cos[\phi(x, y) + \delta(t)] \quad (1)$$

โดยที่ $I(x, y, t)$ คือ ค่าความเข้มของแสง ณ จุด (x, y) และที่เวลา t

I' คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสง ในที่นี้ให้ค่าเท่ากับ $\frac{255}{2}$

I'' คือ ค่าการมอดูเลตเชิงความเข้ม ในที่นี้ให้ค่าเท่ากับ $\frac{255}{2}$

$\phi(x, y)$ มีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{T}$ เมื่อ T คือ คาบและ t คือ เวลา

$\delta(t)$ คือ ค่าเฟสที่ทำการเลื่อนไปครั้งละ $\frac{\pi}{2}$

จากสมการที่ (1) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_1(x, y) = \frac{255}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{T_x}\right) \right] \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = \frac{255}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{T_x} + \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

$$I_3(x, y) = \frac{255}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{T_x} + \pi\right) \right] \quad (4)$$

$$I_4(x, y) = \frac{255}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{T_x} + \frac{3\pi}{2}\right) \right] \quad (5)$$

โดยที่ $I(x, y)$ คือ ค่าความเข้มของแสง ณ จุด (x, y) ของภาพ
 x คือ ค่าตำแหน่งพิกเซลในแนวแกน x ของภาพ
 T_x คือ ค่าคาบของริ้วแสง โดยอ้างอิงตามแนวแกน x ของภาพ

2.2 การวิเคราะห์ภาพริ้วแสงด้วยเทคนิควิธีการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง ซึ่งจะทำกรนำภาพริ้วแสงมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าเฟสกลับคืน (Phase Retrieval) จากสมการที่ (2) ถึง (5) ตามคุณสมบัติทางตรีโกณมิติ สามารถเปลี่ยนรูปได้ ดังนี้

$$I_1 = I' + I'' \cos[\phi(x, y)] \quad (6)$$

$$I_2 = I' - I'' \sin[\phi(x, y)] \quad (7)$$

$$I_3 = I' - I'' \cos[\phi(x, y)] \quad (8)$$

$$I_4 = I' + I'' \sin[\phi(x, y)] \quad (9)$$

นำสมการที่ (9) – (7) จะได้

$$I_4 - I_2 = 2I''(x, y) \sin[\phi(x, y)] \quad (10)$$

นำสมการที่ (6) – (8) จะได้

$$I_1 - I_3 = 2I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (11)$$

นำสมการที่ (10)/(11) จะได้

$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{2I''(x, y) \sin[\phi(x, y)]}{2I''(x, y) \cos[\phi(x, y)]} \quad (12)$$

$$\tan[\phi(x, y)] = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) นำมาทำการอินเวอร์ส (Inverse) จะได้ค่าเฟสกลับคืน (Phase Retrieval) ดังสมการที่ (14)

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (14)$$

2.3 การนำค่าเฟสกลับคืนที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 4 มาทำการตรวจแก้ค่าเฟส (Phase Correction) เพราะค่าเฟสกลับคืนที่คำนวณได้ถูกจำกัดอยู่ในช่วง $-\frac{\pi}{2}$ ถึง $\frac{\pi}{2}$ ซึ่งเหตุการณ์นี้อาจจะจำกัดการสร้างภาพสามมิติที่มีช่วงยาวกว่า $\frac{\pi}{2}$ จึงต้องทำการปรับแก้ไขหรือขยายช่วงค่าเฟสให้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 2π โดยใช้วิธีการดังตารางที่ 1

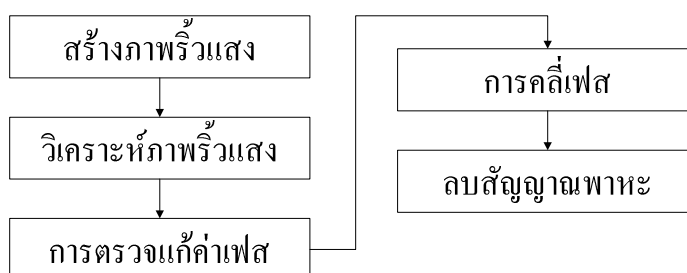
2.4 การคลี่เฟส (Phase Unwrapping) เป็นขั้นตอนเพื่อทำการลบความไม่ต่อเนื่องของค่าเฟสกลับคืนที่ผ่านขั้นตอนที่ 3 มาแล้วโดยการตรวจสอบค่าเฟสของพิกเซลก่อนหน้าเทียบกับปัจจุบัน ถ้ามีค่ามากกว่า π จะทำการเพิ่มค่าเฟสเข้าไป 2π ดังสมการที่ (15)

$$\phi(x, y) = \begin{cases} \phi(x, y) + 2\pi & ; \phi(x-1, y) - \phi(x, y) > \pi \\ \phi(x, y) & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

2.5 การลบสัญญาณพาหะ (Carrier Removal) คือการนำข้อมูลค่าเฟสกลับคืนของระนาบอ้างอิง (Reference Plane) มาลบกับข้อมูลค่าเฟสกลับคืนของวัตถุที่สนใจ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นภาพสามมิติ (3D Image) ของวัตถุที่สนใจ

ตารางที่ 1 การตรวจแก้ค่าเฟสโดยการมอดูโลด้วยค่า 2π

ค่าไซน์ (Sine)	ค่าโคไซน์ (Cosine)	ค่าเฟสที่ถูกต้อง (Corrected Phase)	ค่าช่วงเฟส (Phase Range)
0	+	0	0
+	+	$\phi(x, y)$	$[0, \frac{\pi}{2}]$
+	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
+	-	$\phi(x, y) + \pi$	$[\frac{\pi}{2}, \pi]$
0	-	π	π
-	-	$\phi(x, y) + \pi$	$[\pi, \frac{3\pi}{2}]$
-	0	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{2}$
-	+	$\phi(x, y) + 2\pi$	$[\frac{3\pi}{2}, 2\pi]$



ภาพที่ 6 ภาพรวมของขั้นตอนวิธีการสร้างภาพสามมิติโดยใช้เทคนิควิธีการฉายรีเวิร์สรูปไซน์

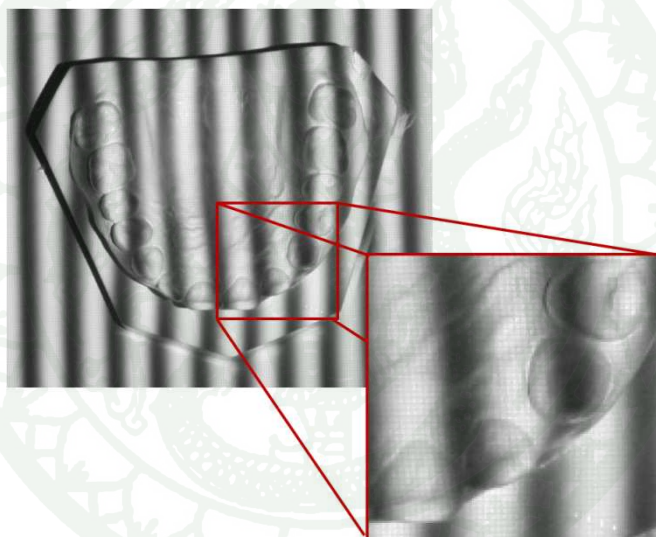
3. ปรากฏการณ์สกรีนดอร์เอฟเฟกต์ (Screen Door Effect)

สกรีนดอร์เอฟเฟกต์ (Screen Door Effect) (Baker et al., 2005) คือ ปรากฏการณ์การเกิดลักษณะลายตาข่ายที่เหลื่อมขณะทำการฉายแสดงผลของเครื่องฉายภาพดิจิทัล (Digital Projector) ซึ่งจะทำให้เห็นข้อมูลที่ถูกลายมีลักษณะเป็นลายตารางแทรกซ้อนอยู่ สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังภาพที่ 7 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากการออกแบบภายในเชิงเทคนิคของเครื่องฉายภาพดิจิทัล (Digital Projector) ทั่วไป ทำให้ค่าระดับสีต่างๆ ของข้อมูลภาพรีเวิร์สที่ถูกบันทึกขาดความต่อเนื่อง การแก้ไขปัญหานี้โดยทั่วไป (Zhang and Shree, 2006; Kreiser and Jingyi, 2008) จะทำการปรับเลนส์ของเครื่องฉายแสดงผลให้เลื่อนออกจากจุดโฟกัส (Defocus) ในทางปฏิบัติการปรับเลนส์เลื่อนออกจากจุดโฟกัส นี้จะต้องทำการปรับเลนส์ให้อยู่ในจุดโฟกัส (Focus) ก่อนและจึงทำการเลื่อนออกจากจุดโฟกัส ซึ่งจะต้องใช้ทักษะส่วนบุคคลและไม่สามารถบอกได้ว่าปรับการเลื่อนออกจากจุดโฟกัส ไปเท่าไรถึงจะพอดีหรือลดการเกิดสกรีนดอร์เอฟเฟกต์ได้เหมาะสม

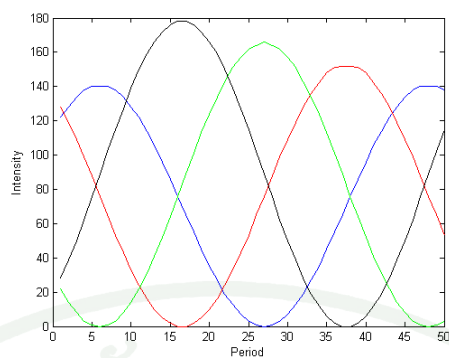
ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเสนอวิธีการปรับเลนส์ให้อยู่ในจุดโฟกัส ซึ่งปรับได้ง่ายกว่าการทำการเลื่อนออกจากจุดโฟกัส โดยอาศัยการสังเกตเห็นลายตาข่ายของสกรีนดอร์เอฟเฟกต์ที่ชัดเจน วิธีการนี้จะทำให้ภาพรีเวิร์สมีความคมชัดไม่เบลอ แต่ข้อมูลภาพรีเวิร์สที่บันทึกมาได้จะมีลายตาข่ายแทรกซ้อนอยู่ จึงได้นำเสนอเทคนิควิธีการแปลงเวฟเล็ทมาใช้สำหรับปรับปรุงภาพรีเวิร์สรวมด้วยซึ่งจะกล่าวต่อไป

4. แกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma)

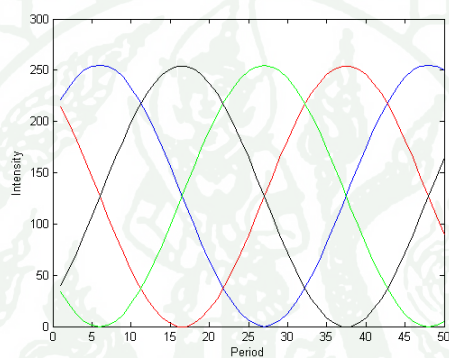
การเก็บข้อมูลภาพรีวส์แสงที่ได้จากการฉายแสดงผลของเครื่องฉายภาพดิจิทัล (Digital Projector) จะเกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่า “แกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma)” (Baker et al., 2005) ซึ่งเป็นความผิดพลาดทางเทคนิคอีกอย่างหนึ่งของเครื่องฉายภาพดิจิทัล กล่าวคือ ในการเก็บข้อมูลภาพรีวส์แสงแต่ละภาพจะมีค่าแกมมาที่ต่างกันหรือไม่คงที่นั่นเอง วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลภาพรีวส์แสง 4 ภาพเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณของเทคนิควิธีการเลื่อนเฟสเชิงตำแหน่ง ภาพที่ 8 แสดงดังตัวอย่างกราฟแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแตกต่างจากกราฟแกมมาที่มีลักษณะเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 9 ผลกระทบของแกมมาไม่เป็นเชิงเส้นนี้คือทำให้ข้อมูลภาพสามมิติเกิดรีวส์คลื่นขึ้นหรือเกิดความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญในการแสดงผล ดังภาพที่ 10



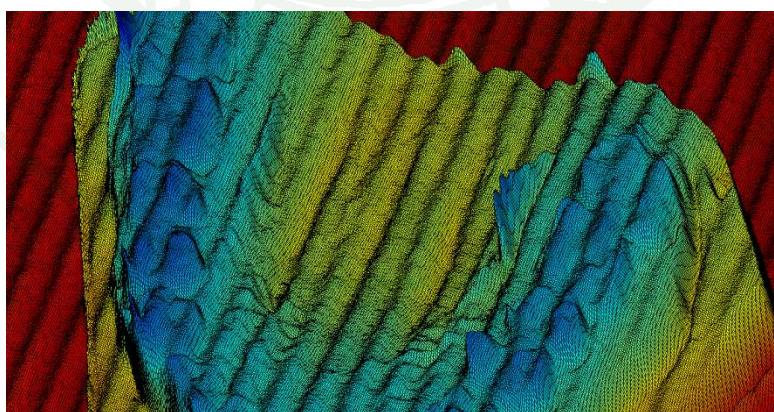
ภาพที่ 7 ตัวอย่างโมเดลฟันปูนพลาสติกที่มีลักษณะลายตาข่ายสี่เหลี่ยมของปรากฏการณ์สกรีน-ดอร์เอฟเฟค (Screen Door Effect) แทรกซ้อนอยู่



ภาพที่ 8 ลักษณะข้อมูลภาพ 4 ภาพที่มีค่าแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 9 ลักษณะข้อมูลภาพ 4 ภาพที่มีค่าแกมมาเป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 10 ข้อมูลภาพสามมิติเกิดรีวกคลื่นขึ้นเนื่องจากแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น

การแก้ไขปัญหานี้ได้ถูกนำเสนอโดย Guo et al. (2004) ซึ่งใช้วิธีการคำนวณหาค่าเกมมาฟังก์ชันที่เหมาะสมซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์จากค่าสถิติของข้อมูลภาพรีวแสง เทคนิควิธีนี้สามารถลดทอนความผิดพลาดจากเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นได้ แต่อย่างไรก็ตามการหาค่าเกมมาฟังก์ชันที่เหมาะสมนั้นมีความยุ่งยากซับซ้อน Skocaj and Leonardis (2000) ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีเพื่อชดเชยเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากเครื่องฉายภาพดิจิทัลสำหรับการหาช่วงของภาพวัตถุ (Range Image) ซึ่งขั้นตอนวิธีนี้สามารถทำงานได้ดีแต่ก็จะเสียเวลาในการปรับแต่ง (Calibrate) ฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้น Baker et al. (2008) ได้นำเสนอการขจัดเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยหลักวิธีการวัดข้อมูลค่าเฟส (Phase Measuring Profilometry) ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนในการปรับแต่งอุปกรณ์และพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ Zhang and Huang (2005) นำเสนอหลักการปรับแต่งค่าเกมมาของเครื่องฉายภาพดิจิทัลก่อนทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของค่าเฟสและบรรจุลงในโครงสร้างข้อมูลตารางค้นหา (Look-up Table) ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการชดเชยความผิดพลาดต่อไป วิธีวิธีนี้จะเสียเวลาในการปรับแต่งเครื่องฉายภาพดิจิทัล จากนั้น Zhang and Yau (2007) ได้นำเสนอโดยการฉายภาพรีวแสงไปยังฉากรับภาพที่เป็นระนาบที่ไม่มีวัตถุและนำข้อมูลภาพที่จุดศูนย์กลางภาพมาทำการคำนวณวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของค่าเฟสและบรรจุลงในโครงสร้างข้อมูลตารางค้นหา (Look-up Table) เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลทั่วไปในการชดเชยความผิดพลาดของค่าเฟสต่อไป การได้มาซึ่งชุดข้อมูลทั่วไปจะต้องทำการคำนวณการตรวจแก้ค่าความผิดพลาดของเฟส (Phase Error Correction) ก่อน ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อนและทั้งหมดนี้จะทำก่อนการคำนวณของระบบ (Offline Processing) และอีกทั้งเมื่อทำการเปลี่ยนเครื่องฉายภาพดิจิทัลหรือกล้องดิจิทัลก็จะต้องมาคำนวณวิธีการดังกล่าวอีกครั้งก็จะทำให้เสียเวลาในการปรับแต่งระบบเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2 สรุปการเปรียบเทียบวิธีการแก้ไขปัญหเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น

งานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเสนอขั้นตอนวิธีซึ่งอาศัยเทคนิคการเก็บข้อมูลภาพ กล่าวคือ ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพให้เก็บข้อมูลที่มีบริเวณของวัตถุที่สนใจและบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบ โดยมองว่าข้อมูลภาพเป็นภาพที่สมบูรณ์คือภาพไม่มีการบิดเบือน จากนั้นเลือกข้อมูลภาพของบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบในแนวแกน y ของภาพมาทำการคำนวณตามขั้นตอนวิธีที่ได้ออกแบบ โดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฟสจริงที่ได้จากการถ่ายภาพในห้องทดลองกับค่าเฟสในอุดมคติที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี เพื่อให้ได้มาซึ่งชุดข้อมูลของค่าความต่างของค่าเฟสของข้อมูลชุดนั้นๆ จากนั้นนำไปใช้ในการชดเชยค่าความต่างของค่าเฟสของข้อมูลชุดดังกล่าว ซึ่งการคำนวณเป็นแบบออนไลน์ (Online Processing) และไม่ขึ้นกับเครื่องฉายภาพดิจิทัลและกล้องดิจิทัลที่ใช้งาน

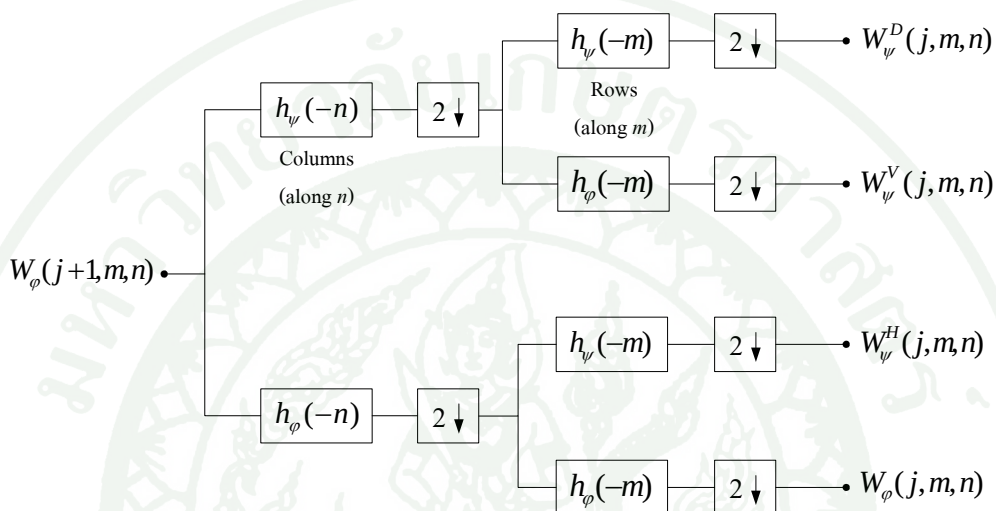
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบวิธีการแก้ไขปัญหาค่าเกมที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ชื่อผู้นำเสนอ	วิธีการที่นำเสนอ
Skocaj'00	หาฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยบริบทของการหาค่าช่วงของภาพวัตถุ
Guo'04	คำนวณค่าเกมมาจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของภาพวีวส์
Zhang'05	หลักการปรับแต่งค่าเกมมาของเครื่องฉายภาพผลึกเหลว
Zhang'07	คำนวณค่าความต่างเฟสระหว่างเฟสจริงและเฟสอุดมคติและนำไปทำให้เป็นค่าทั่วไป (Generalized) และเก็บไว้ในโครงสร้างข้อมูลตารางค้นหา (LUT)
Baker'08	อาศัยหลักวิธีการวัดข้อมูลค่าเฟส (Phase Measuring Profilometry)
งานวิจัยชิ้นนี้	ขั้นตอนวิธีสำหรับคำนวณค่าเฟสจริงและอุดมคติที่รวดเร็วและอัตโนมัติ โดยอาศัยเทคนิคทางการภาพเพื่อลดการคำนวณ และเก็บใน LUT สำหรับใช้ซ้ำ

5. การแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต 2 มิติ (2D Discrete Wavelet Transform)

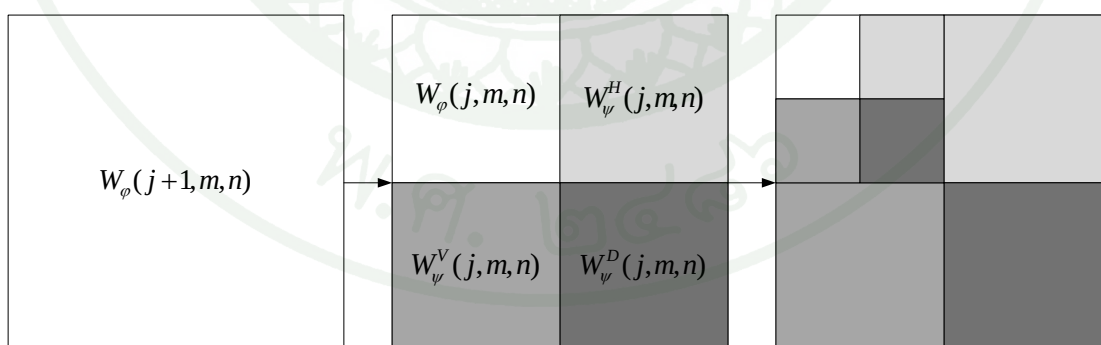
วิธีการแปลงเวฟเลตแบบดิสครีต 2 มิติ เป็นการแปลงเวฟเลตของข้อมูลภาพ (Gonzalez and Woods, 2002) โดยใช้หลักการแยกองค์ประกอบภาพออกเป็นแถบความถี่ย่อย (Subband Decomposition) ซึ่งวิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลต (Wavelet Decomposition) แสดงดังภาพที่ 11 โดยกำหนดให้ $W_\varphi(j+1, m, n)$ คือภาพต้นฉบับ $h_\varphi(-n)$ และ $h_\varphi(-m)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตสำหรับการแยกองค์ประกอบหรือคือตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูงของแนวกอถัมภ์ของภาพตามลำดับ จากนั้นนำความถี่แนวกอถัมภ์มาทำการลดการชักตัวอย่าง (Down-Sampling) และนำผลที่ได้มาผ่านตัวกรอง $h_\varphi(-m)$ และ $h_\varphi(-n)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตสำหรับการแยกองค์ประกอบหรือคือตัวกรองความถี่ต่ำและตัวกรองความถี่สูงของแนวแถวของภาพตามลำดับ และทำการลดการชักตัวอย่าง (Down-Sampling) ก็จะได้ข้อมูลภาพผลลัพธ์ แสดงดังภาพที่ 12 โดยที่ $W_\varphi(j, m, n)$ คือ ข้อมูลภาพที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำทั้งแนวและกอถัมภ์ $W_\varphi^D(j, m, n)$ คือ ข้อมูลภาพที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงทั้งแนวและกอถัมภ์ $W_\varphi^V(j, m, n)$ คือ ข้อมูลภาพที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงในแต่ละแถวและผ่านความถี่ต่ำในแต่ละกอถัมภ์ จะสังเกตเห็นได้ว่าองค์ประกอบภาพที่เป็นแนวตั้งจะปรากฏชัดเจน $W_\varphi^H(j, m, n)$ คือ ข้อมูลภาพที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำในแต่ละแถวและผ่านความถี่สูงในแต่ละกอถัมภ์ จะสังเกตเห็นได้ว่าองค์ประกอบภาพที่เป็นแนวนอนจะปรากฏชัดเจน เมื่อผ่านการทำวิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลต (Wavelet Decomposition) เรียบร้อยแล้วก็จะสามารถเลือกใช้ข้อมูลภาพที่อยู่ในความถี่ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานต่อไปได้ และจากนั้นสามารถสร้างข้อมูลกลับได้ด้วยวิธีการสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟ

เล็ด (Wavelet Reconstruction) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 13 โดยใช้วิธีการแปลงย้อนกลับของวิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ด (Wavelet Decomposition) ก็จะได้ข้อมูลภาพที่มีขนาดเท่ากับข้อมูลภาพขาเข้า (Input) และฟังก์ชันเวฟเล็ดมิให้เลือกใช้หลายรูปแบบซึ่งนั่นจะทำให้มีค่า $h_\psi(-m)$ และ $h_\phi(-n)$ ตามลักษณะของฟังก์ชันเวฟเล็ดนั้นๆ ไปด้วย ดังนั้นจึงต้องเลือกฟังก์ชันเวฟเล็ดให้เหมาะสมกับงาน



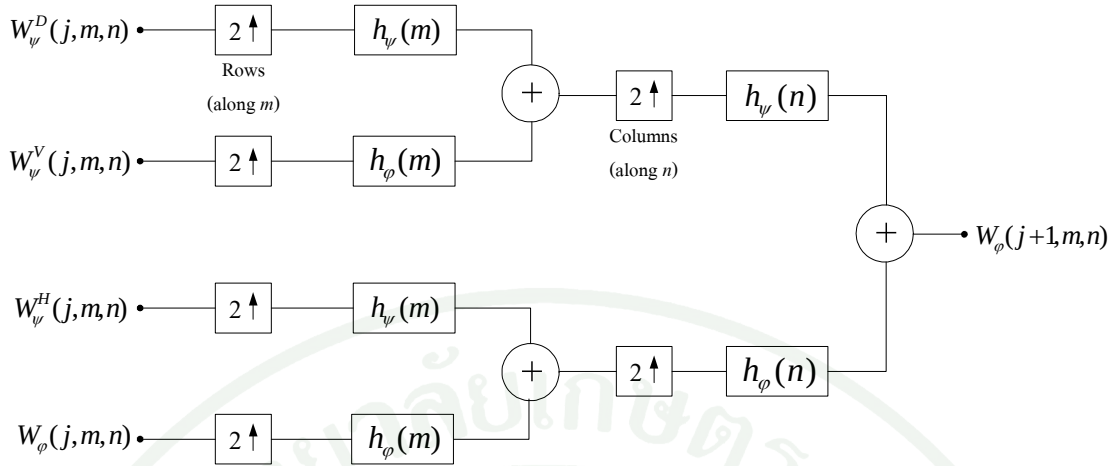
ภาพที่ 11 วิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ด (Wavelet Decomposition)

ที่มา: Gonzalez and Woods (2002)



ภาพที่ 12 ภาพผลลัพธ์ของการทำวิธีการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ด (Wavelet Decomposition)

ที่มา: Gonzalez and Woods (2002)



ภาพที่ 13 วิธีการสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟเลต (Wavelet Reconstruction)

ที่มา: Gonzalez and Woods (2002)

6. อัตราระหว่างกำลังของสัญญาณเทียบกับสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR)

ค่า SNR ใช้เป็นค่าบ่งชี้ถึงคุณภาพของข้อมูลภาพ ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยของสัญญาณเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวน (Gonzalez and Woods, 2002) โดยที่ถ้าค่ายิ่งสูงแสดงว่าข้อมูลภาพมีคุณภาพสูงหรือดีนั่นเอง ในทางกลับกันถ้าค่ายิ่งน้อยแสดงว่าข้อมูลภาพมีคุณภาพต่ำ สามารถเขียนเป็นสมการที่ (16)

$$SNR = 20 \log \left(\frac{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^M \sum_{y=0}^N f_s}{\sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^M \sum_{y=0}^N (f_n - \bar{f}_n)^2}} \right) \quad (16)$$

โดย f_s คือข้อมูลภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการปรับปรุง f_n คือข้อมูลภาพของสัญญาณรบกวน $\bar{f}_n$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลภาพสัญญาณรบกวน M และ N คือขนาดกว้างและยาวของข้อมูลภาพ ค่า SNR นี้มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

7. ตัวกรองช่วง (Range Filtering)

Range Filter หรือตัวกรองช่วงในการวิเคราะห์พื้นผิว (The MathWorks, Inc, 2010) ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งบอกค่าความราบเรียบหรือความขรุขระของพื้นผิวภาพค่าเฟสที่ถูกคลี่ (Phase Unwrapped) โดยใช้หน้ากากของตัวกรองเฉลี่ย w ขนาด $m \times n$ พิกเซลกระทำลงบนภาพค่าเฟสดังกล่าว สามารถเขียนได้ดังสมการ (17)

$$g(x,y) = \max_{\substack{-a \leq s \leq a \\ -b \leq t \leq b}} (w(s,t) f(x+s, y+t)) - \min_{\substack{-a \leq s \leq a \\ -b \leq t \leq b}} (w(s,t) f(x+s, y+t)) \quad (17)$$

โดย $g(x,y)$ คือภาพผลลัพธ์, $a = (m-1)/2$, $b = (n-1)/2$ ซึ่งเป็นค่าจำนวนเต็มบวก และ $w(s,t) = 1$ สมการนี้จะต้องใช้ $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$ และ $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ และจะทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าสีของภาพผลลัพธ์ $g(x,y)$ และนำค่าที่ได้มาใช้เป็นตัวชี้วัดลักษณะของพื้นผิว โดยค่าตัวเลขยิ่งน้อยจะหมายถึงพื้นผิวที่มีความราบเรียบมาก ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าตัวเลขยิ่งมากแสดงว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากเช่นกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ฮาร์ดแวร์ระบบ

1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer) มีรายละเอียดดังนี้

Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU P7450 @ 2.13 GHz, 2.96 GB of RAM

1.2 เครื่องฉายภาพแบบผลึกเหลว (LCD Projector) รุ่น EPSON-EMP1700

1.3 กล้องดิจิทัล (Digital Camera) รุ่น Canon 450D

2. ซอฟต์แวร์ระบบ

2.1 ระบบปฏิบัติการวินโดวส์

2.2 MATLAB® และ Scilab

2.3 Borland C++ Builder™

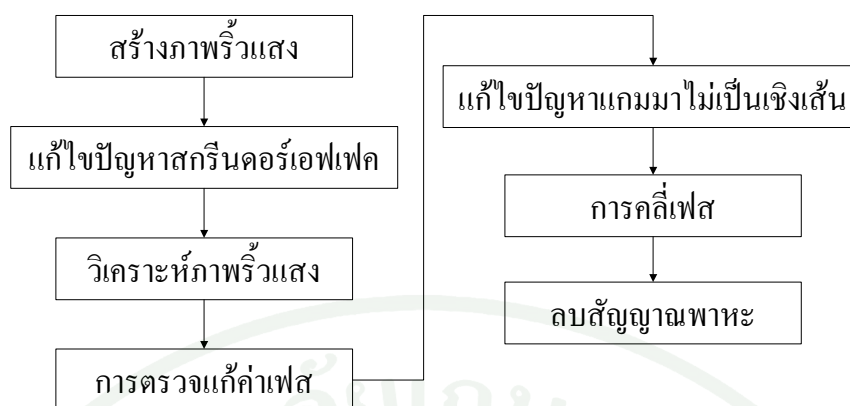
2.4 Canon Digital Camera SDKs

วิธีการ

กล่าวถึงภาพรวมขั้นตอนวิธีการสร้างภาพ 3 มิติ การจัดวางอุปกรณ์และวิธีการที่นำเสนอ แบ่งตามปัญหาที่ต้องการแก้ไข ดังนี้

1. ภาพรวมขั้นตอนวิธีการสร้างภาพ 3 มิติ

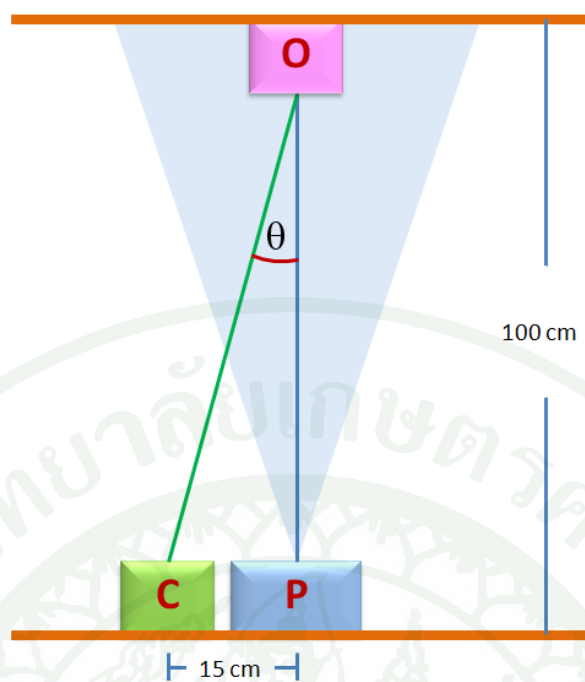
ภาพรวมขั้นตอนวิธีการสร้างภาพ 3 มิติ แสดงดังภาพที่ 14 เริ่มต้นด้วยการสร้างภาพรีแอสซึ่งถูกฉายด้วยเครื่องฉายภาพผลึกเหลวแลบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัล จากนั้นทำการแก้ไขสกรีนคอร์ดเอฟเฟค ลำดับต่อมาทำการวิเคราะห์ภาพรีแอส ตรวจสอบแก้ไขค่าเฟส แก้ไขแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น และทำการคลีเฟส สุดท้ายทำการลบสัญญาณพหุ โดยที่กล้องสีเขียวเป็นส่วนที่ได้ทำการนำเสนอ และเพิ่มเข้าไปในขั้นตอนวิธีการสร้างภาพ 3 มิติ



ภาพที่ 14 ภาพรวมของขั้นตอนวิธีการสร้างภาพสามมิติและวิธีการที่นำเสนอ

1. การจัดวางอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องฉายภาพผลึกเหลว (LCD Projector) รุ่น EPSON-EMP1700 สำหรับฉายภาพรีวแสง และกล้องดิจิทัล รุ่น Canon 450D สำหรับเก็บข้อมูลภาพรีวแสง ในการจัดวางอุปกรณ์ได้ทำการวางกล้องดิจิทัลและเครื่องฉายภาพผลึกเหลวอยู่ในระนาบเดียวกันและมีระยะห่างระหว่างกันประมาณ 15 เซนติเมตร ส่วนระยะห่างระหว่างระนาบที่มีวัตถุและระนาบที่วางอุปกรณ์มีระยะประมาณ 100 เซนติเมตร เมื่อนำมาคำนวณหาค่ามุมได้ประมาณ 8.5313 องศา ซึ่งเป็นมุมเล็กๆ เทียบได้กับการถ่ายภาพในมุมมองด้านบน (Top View) ตามที่กล่าวไว้ในส่วนของขอบเขตและข้อจำกัด ภาพรวมการจัดวางอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 15 และการจัดวางอุปกรณ์ในห้องทดลองแสดงดังภาพที่ 16

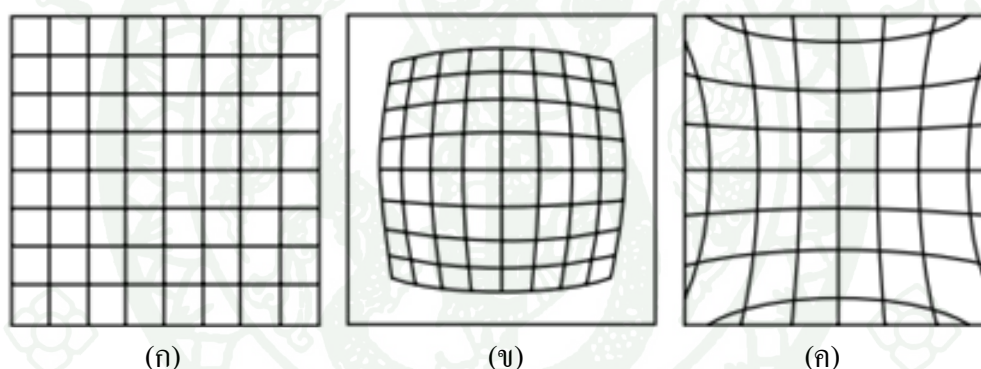


ภาพที่ 15 ภาพรวมการจัดวางอุปกรณ์



ภาพที่ 16 การจัดวางอุปกรณ์ในห้องทดลอง

ในบางกรณีถ้าเลือกใช้กล้องสำหรับเก็บข้อมูลภาพวีวส์แสงราคาถูกลงหรือใช้กล้องเว็บแคมจะทำให้เกิดภาพบิดเบือน (Image Distortion) ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของเลนส์กล้อง ซึ่งลักษณะของการบิดเบือน แสดงดังภาพที่ 17 การแก้ปัญหของภาพบิดเบือนสามารถแก้ปัญหได้ด้วยการใช้ไลบรารีที่มีชื่อว่า OpenCV ซึ่งมีฟังก์ชันการทำงานสำหรับแก้ไขภาพบิดเบือนอยู่พร้อมแล้วและมีการใช้งานที่ง่าย (Bradski, Gary and Adrian Kaehler, 2008) เริ่มต้นจากการใช้ภาพตารางหมากรุก (Checkerboard) เพื่อทำการเทียบมาตรฐาน (Calibration) ด้วยฟังก์ชัน `cvCalibrateCamera2()` เมื่อผ่านฟังก์ชันนี้แล้วจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การบิดเบือน (Distortion Coefficient) ซึ่งค่านี้จะนำมาใช้กับฟังก์ชัน `cvUndistortImage2()` ในฟังก์ชันนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ `cvInitUndistortMap()` สำหรับสร้างแผนที่การบิดเบือนและ `cvRemap()` เป็นการนำแผนที่การบิดเบือนมาใช้กับข้อมูลภาพที่ต้องการแก้ไข ตัวอย่างภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการแก้ไขแสดงดังภาพที่ 18 การแก้ไขภาพบิดเบือนต้องทำการก่อนการแก้ไขสกรีนคอร์ดเอฟเฟค



ภาพที่ 17 ภาพตารางที่ถูกบิดเบือนในลักษณะต่างๆ (ก) คือภาพตารางที่ไม่ถูกบิดเบือน ภาพ (ข) คือความผิดรูปโป่งกลาง (Barrel Distortion) และ (ค) คือความผิดรูปคอดกลาง (Pincushion Distortion)

ที่มา: Vass, Gergely and Tamás Perlaki (2003)



(ก)

(ข)

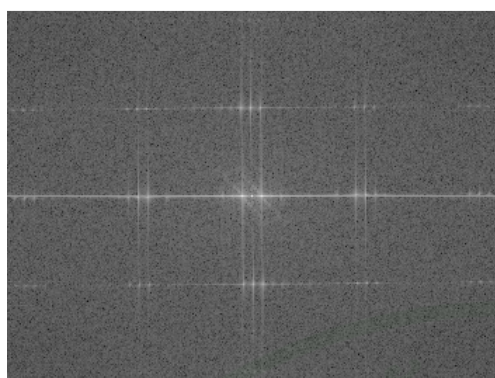
ภาพที่ 18 ตัวอย่างภาพที่ถูกบิดเบือน (ก) ภาพต้นฉบับ และ (ข) ภาพผลลัพธ์

ที่มา: Bradski, Gary and Adrian Kaehler (2008)

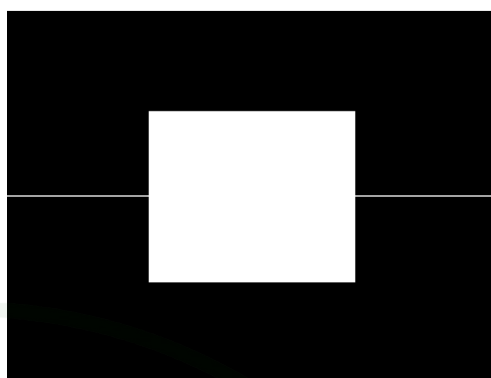
2. ปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟค (Screen Door Effect)

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอวิธีการปรับเลนส์ให้อยู่ในจุดโฟกัส (Focus) ซึ่งปรับได้ง่ายกว่าการทำการเลื่อนออกจากจุดโฟกัส (Defocus) โดยอาศัยการสังเกตเห็นลายตาข่ายของสกรีนดอร์เอฟเฟคที่ชัดเจน วิธีการนี้จะทำให้ภาพรีวีสแตงมีความคมชัดไม่เบลอ แต่ข้อมูลภาพรีวีสแตงที่บันทึกมาได้จะมีลายตาข่ายแทรกซ้อนอยู่

การทดลองเบื้องต้นในส่วนของการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพที่ถูกรบกวนด้วยปรากฏการณ์สกรีนดอร์เอฟเฟคโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) (ศศิณ และคณะ, 2553ก) แปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในโดเมนความถี่และออกแบบตัวกรองแถบความถี่ (Band Reject Filtering) แสดงดังภาพที่ 19 ต่อมาทำการเกลี่ยรายละเอียดของสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองเฉลี่ย (Average Filtering) ดังภาพที่ 20 และแสดงผลข้อมูลภาพ 3 มิติเปรียบเทียบระหว่างภาพต้นฉบับที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงกับภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ดังภาพที่ 21 และ 22 จะเห็นว่าภาพ 3 มิติมีลักษณะถูกคลื่นปรากฏขึ้นซึ่งเกิดมาจากแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น และจากการทดลองพบว่าการออกแบบตัวกรองแถบความถี่ด้วยหลักวิธีการของการแปลงฟูเรียร์นี้ มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการหาสัมประสิทธิ์ของสัญญาณรบกวน งานวิจัยชิ้นจึงได้นำเสนอวิธีการของการแปลงเวฟเล็ตแทนการแปลงฟูเรียร์



(ก)



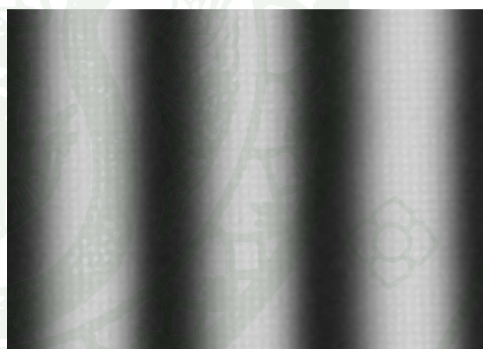
(ข)

ภาพที่ 19 ความถี่ของภาพรีวแสง (ก) ความถี่ของภาพต้นฉบับที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบ และ (ข) ตัวกรองสำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าว

ที่มา: ศศิน และคณะ (2553ก)



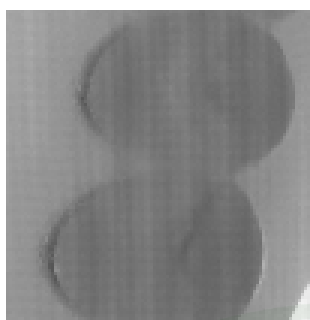
(ก)



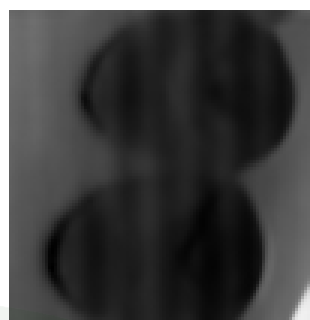
(ข)

ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบภาพรีวแสง (ก) ภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการปรับปรุง และ (ข) ภาพต้นฉบับ

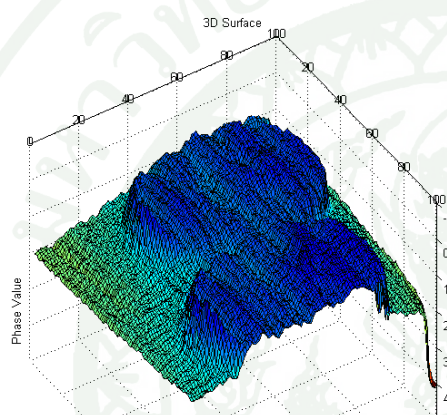
ที่มา: ศศิน และคณะ (2553ก)



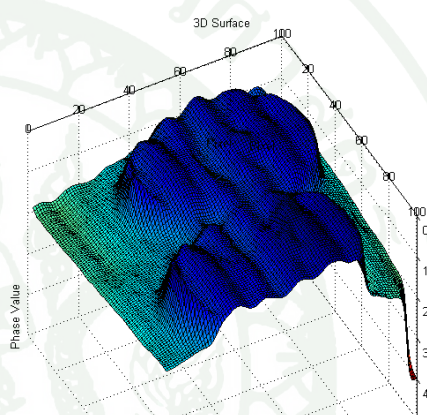
(ก) ภาพค่าเฟสดันจับ



(ข) ภาพค่าเฟสผลลัพธ์



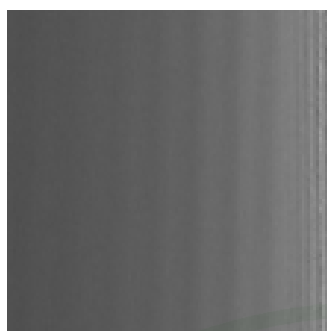
(ค) ภาพ 3 มิติดันจับ



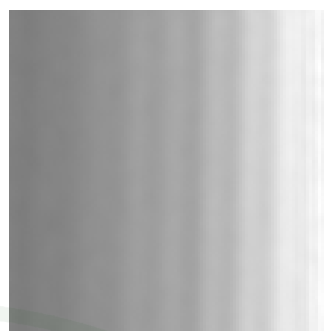
(ง) ภาพ 3 มิติผลลัพธ์

ภาพที่ 21 ภาพตัวอย่างโมเดลพื้น

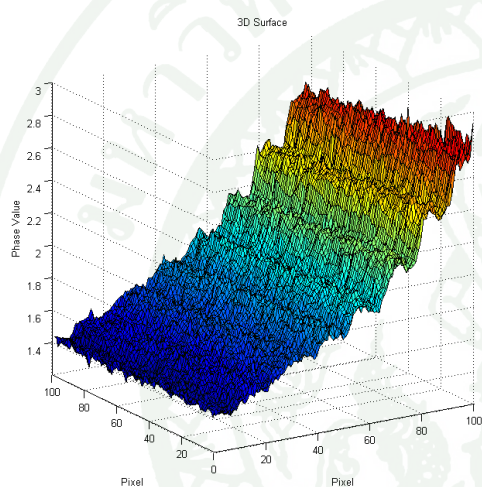
ที่มา: ศศิน และคณะ (2553ก)



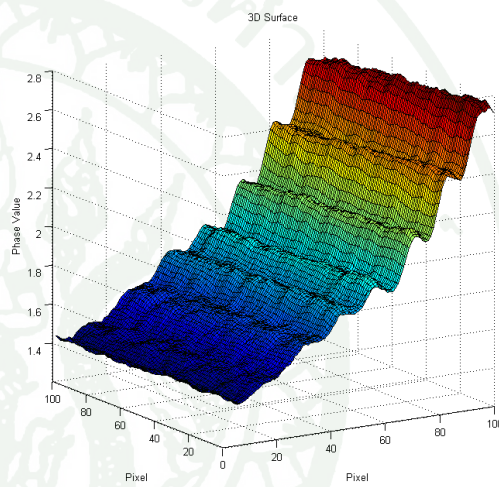
(ก) ภาพค่าเฟสต้นฉบับ



(ข) ภาพค่าเฟสผลลัพธ์



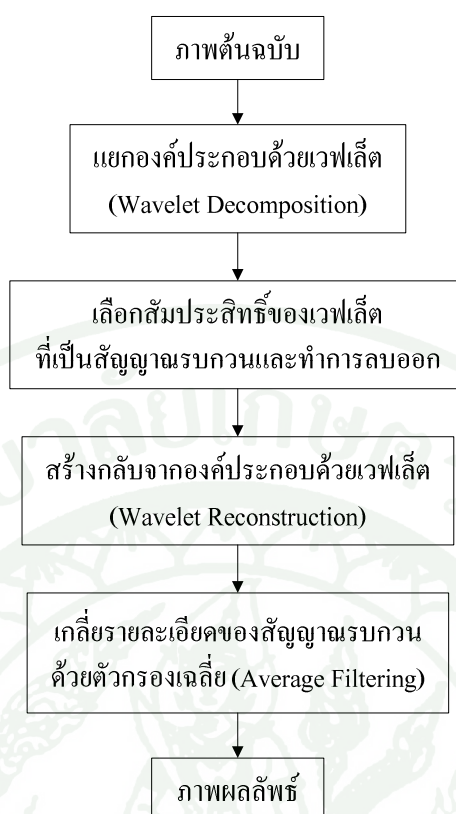
(ค) ภาพ 3 มิติต้นฉบับ



(ง) ภาพ 3 มิติผลลัพธ์

ภาพที่ 22 ภาพตัวอย่างส่วนผิวโค้ง

ที่มา: ศศิน และคณะ (2553ก)



ภาพที่ 23 แผนภาพของเทคนิควิธีการแปลงเวฟเลตมาใช้สำหรับปรับปรุงภาพวีวแสง

สมมติฐานของการแก้ปัญหานี้ คือ เนื่องจากสัญญาณรบกวนรายคาบ (Periodic Noise) มีลักษณะเป็นลายตาข่าย และเห็นว่าการทำ Wavelet Decomposition ของข้อมูลภาพจะทำให้แยกสัญญาณที่มีลักษณะแนวตั้ง แนวนอน และสัญญาณเฉลี่ยได้ จึงคาดว่าลายตาข่ายที่เกิดขึ้นนี้จะถูกลบออกจากภาพได้โดยการทำ Wavelet Decomposition ด้วย Wavelet Function แบบต่างๆจึงได้นำเสนอเทคนิควิธีการแปลงเวฟเลตมาใช้สำหรับปรับปรุงภาพวีวแสงร่วมด้วย แสดงดังภาพที่ 23

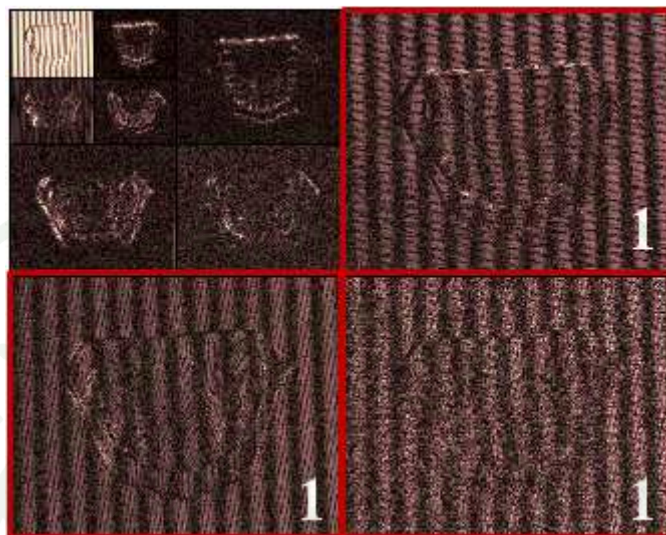
วิธีการนี้จะนำข้อมูลภาพที่มีปัญหาดังกล่าวมาทำการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน โดยเลือกใช้เวฟเลตฟังก์ชันตามต้องการ ซึ่งเวฟเลตฟังก์ชันที่นิยมใช้กัน มีดังนี้ Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, Reverse Biorthogonal และ "Discrete" Meyer เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 3 และทำการเลือกสัมประสิทธิ์ของเวฟเลตที่เป็นสัญญาณรบกวนออกไปจากข้อมูลภาพลำดับต่อไปก็ทำการสร้างกลับจากองค์ประกอบด้วยเวฟเลต จะได้ภาพผลลัพธ์ที่ไม่มีปัญหาดังกล่าวปรากฏอยู่ ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการเกลี่ยรายละเอียดของสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองเฉลี่ย (Average Filtering) ด้วยขนาดหน้ากาก (Mask) 3 x 3 พิกเซล ภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการเกลี่ยรายละเอียดของสัญญาณรบกวน

ตารางที่ 3 รายชื่อเวฟเล็ตฟังก์ชันที่นิยม

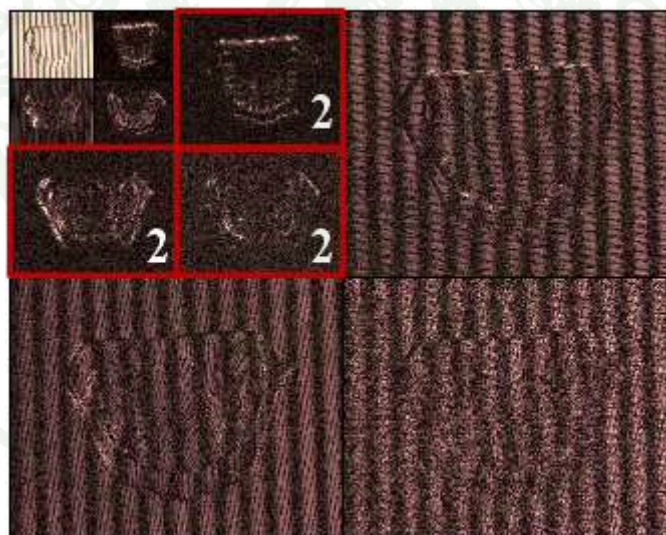
ตระกูลเวฟเล็ต (Wavelet Families)	เวฟเล็ตฟังก์ชัน (Wavelets)
Daubechies	'db1' or 'haar', 'db2', 'db3', 'db4', 'db5', 'db6', ... , 'db20'
Coiflets	'coif1', 'coif2', 'coif3', 'coif4', 'coif5'
Symlets	'sym2', 'sym3', 'sym4', 'sym5', 'sym6', ... , 'sym12', ... , 'sym20'
Discrete Meyer	'dmey'
Biorthogonal	'bior1.1', 'bior1.3', 'bior1.5', 'bior2.2', 'bior2.4', 'bior2.6', 'bior2.8', 'bior3.1', 'bior3.3', 'bior3.5', 'bior3.7', 'bior3.9', 'bior4.4', 'bior5.5', 'bior6.8'
Reverse Biorthogonal	'rbio1.1', 'rbio1.3', 'rbio1.5', 'rbio2.2', 'rbio2.4', 'rbio2.6', 'rbio2.8', 'rbio3.1', 'rbio3.3', 'rbio3.5', 'rbio3.7', 'rbio3.9', 'rbio4.4', 'rbio5.5', 'rbio6.8'

งานวิจัยนี้ (ศศิณ และคณะ, 2553ข; Tiendee, Sasin et al., 2010a) ทำการแยกองค์ประกอบเวฟเล็ตออกเป็น 3 ระดับด้วย 'dmey' แสดงดังภาพที่ 24 ซึ่งมีสมมติฐานในการทดลองเลือกเวฟเล็ตฟังก์ชันดังกล่าว คือ คิดว่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันนี้ น่าจะมากพอและสามารถที่จะแยกสัญญาณรบกวนรายคาบออกไปได้ อีกทั้งในตระกูลนี้มีให้เลือกใช้เพียงตัวเดียว ทำให้เลือกใช้ได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับตระกูลอื่นๆ ที่มีหลากหลาย จากการทดลองดังกล่าว จะสังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนรายคาบจะอยู่ในตำแหน่งของระดับที่ 1 แสดงดังภาพที่ 24 และถ้าเวฟเล็ตฟังก์ชันที่เลือกใช้นั้นสามารถแยกสัญญาณรบกวนออกไปได้ จะสังเกตเห็นว่าข้อมูลในระดับที่ 2 นั้นจะไม่มีสัญญาณรบกวนรายคาบหลงเหลืออยู่ แสดงดังภาพที่ 25 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าตำแหน่งที่ไม่มีสัญญาณรายคาบหลงเหลืออยู่คือตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีสัญญาณรายคาบนั่นเอง ฉะนั้นจากการทดลองนี้จะพบว่าสามารถทำการแยกองค์ประกอบเพียง 2 ระดับก็ได้เช่นกัน เพื่อลดการคำนวณลง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเลือกใช้เวฟเล็ตฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณรบกวนรายคาบที่เกิดจากผลกระทบสกรีนดอร์เอฟเฟค ดังนั้นในการเลือกใช้เวฟเล็ตฟังก์ชันจะต้องเลือกใช้ฟังก์ชันที่มีสัญญาณในระดับถัดไปจากสัญญาณรบกวนรายคาบที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยๆ ในทางตรงกันข้ามถ้าเวฟเล็ตฟังก์ชันนั้นๆ ไม่สามารถแยกสัญญาณรบกวนรายคาบออกไปได้ก็จะทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระดับนี้มีค่าสูง จึงไม่ควรเลือกใช้เวฟเล็ตฟังก์ชันดังกล่าว และจากผลเบื้องต้นเห็นว่าเวฟเล็ตฟังก์ชัน 'dmey' มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมา แต่กระนั้นเพื่อความชัดเจน

ยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในส่วนของการเลือกใช้เวฟเล็ดฟังก์ชันโดยอาศัยหลักวิธีและการพิจารณาข้างต้น

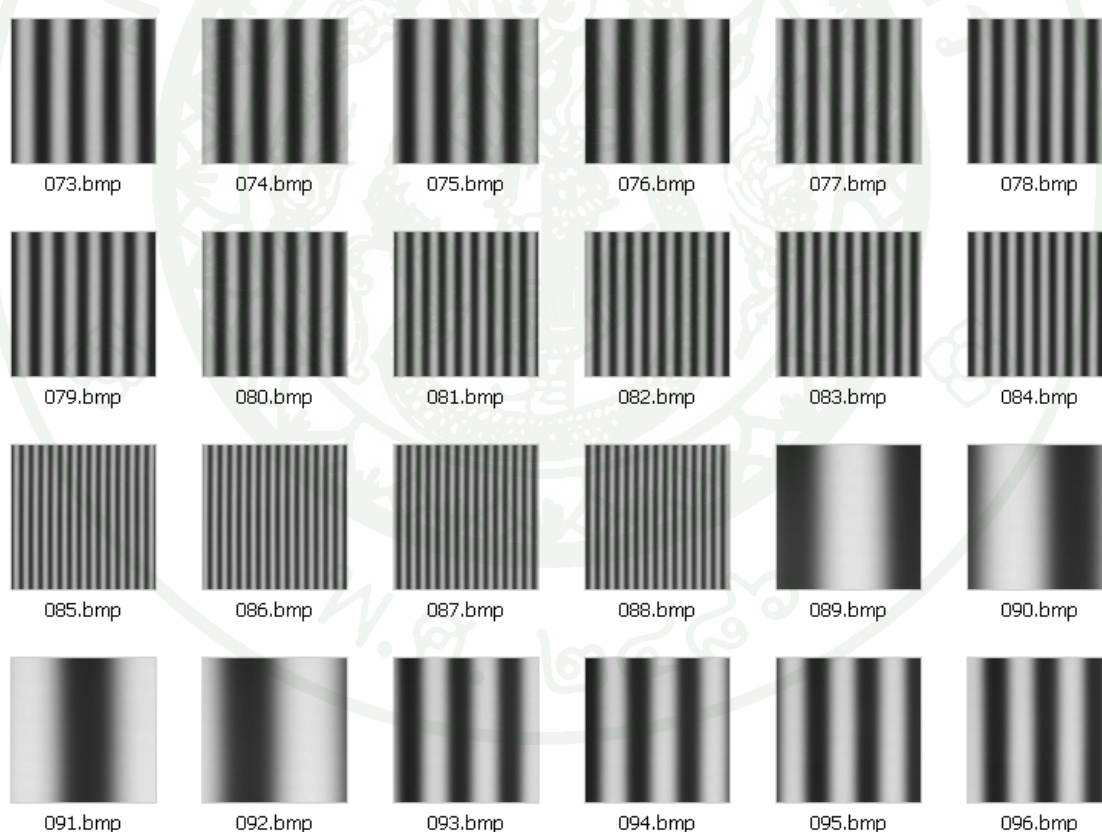


ภาพที่ 24 องค์ประกอบระดับที่ 1 จะสังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนอยู่ในตำแหน่งนี้



ภาพที่ 25 องค์ประกอบระดับที่ 2 จะไม่มีสัญญาณรบกวนหลงเหลืออยู่

การเลือกใช้เวฟเลตฟังก์ชัน งานวิจัยชิ้นนี้ ได้ทำการนำข้อมูลภาพวีวส์แองจ์ที่ไม่มีวัตถุซึ่งถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนดังกล่าว จำนวน 160 ภาพ มีขนาด 500 x 500 พิกเซล แสดงดังภาพที่ 26 โดยนำมาคำนวณและพิจารณาตามหลักวิธีดังกล่าวด้วยการใช้เวฟเลตฟังก์ชันตามตารางที่ 3 รวมทั้งหมด 75 ฟังก์ชัน และคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในชั้นถัดไปจากชั้นของสัญญาณรบกวนรายการ นำข้อมูลที่ได้มาเรียงลำดับฟังก์ชันเวฟเลตที่ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากน้อยไปมาก ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาเวฟเลตฟังก์ชัน 10 อันดับแรก แสดงดังตารางที่ 4 และพบว่าใน 10 อันดับแรกนี้มีเวฟเลตฟังก์ชัน ‘dmey’ อยู่ในอันดับที่ 4 ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้การแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์เอฟเฟกต์ด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน ‘dmey’ นอกจากนี้ผลการทดลองของการเลือกใช้เวฟเลตฟังก์ชันนี้ยังทำให้ทราบถึงฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์เอฟเฟกต์ และสามารถศึกษาคุณสมบัติของฟังก์ชันเหล่านี้เพื่อไปทำการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่มีความยืดหยุ่นต่อระบบและเหมาะสมต่อไป

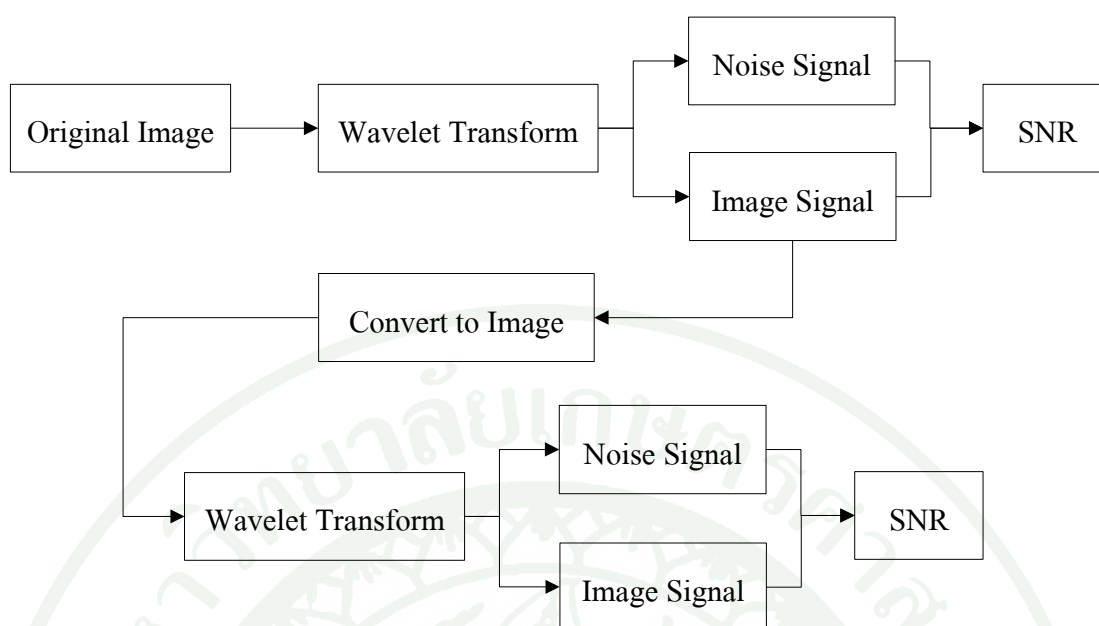


ภาพที่ 26 ตัวอย่างภาพสัญญาณรบกวนที่ใช้สำหรับทดลองการเลือกใช้เวฟเลตฟังก์ชัน

ตารางที่ 4 เวฟเลตฟังก์ชัน 10 อันดับแรกที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากน้อยไปมาก

ชื่อเวฟเลตฟังก์ชัน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
'db17'	1.169766
'db19'	1.182460
'sym16'	1.187655
'dmey'	1.211469
'sym19'	1.231700
'db15'	1.238862
'db20'	1.241497
'db13'	1.260485
'sym13'	1.261056
'sym20'	1.272298

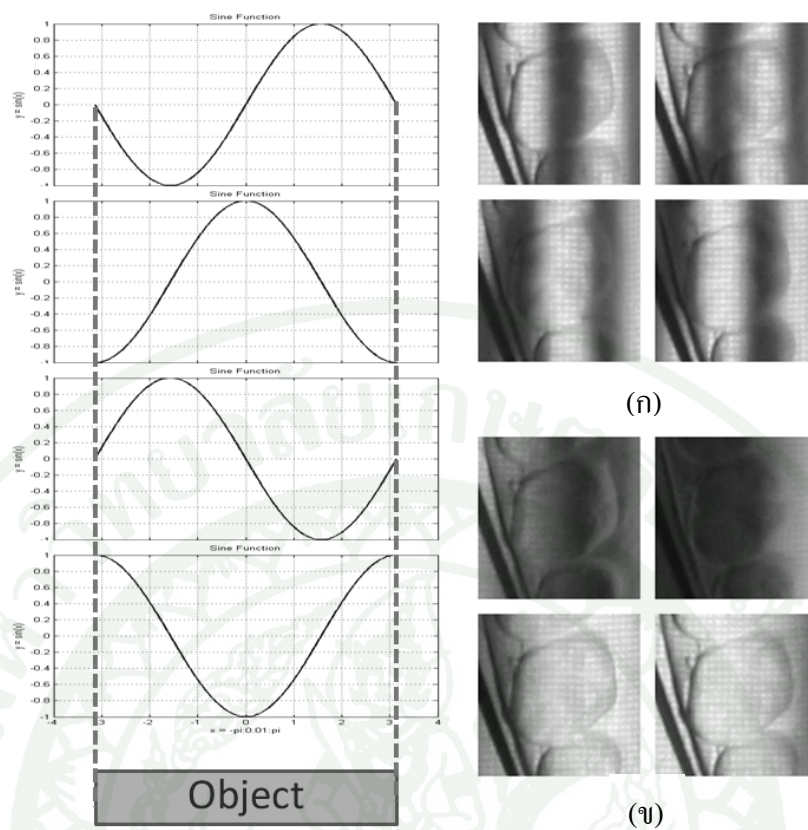
กระบวนการทดลองของงานวิจัยนี้ มีภาพรวมของการทดลองแสดงดังภาพที่ 27 เริ่มต้นด้วยการเก็บข้อมูลภาพโมเดลปูนปลาสเตอร์ 9 ชิ้น ซึ่งถูกฉายด้วยริ้วแสง 4 รูปแบบ ฉะนั้นจะได้ข้อมูลภาพจำนวน 36 ข้อมูลภาพ และภาพตัวอย่างสเปกตรัมของข้อมูลภาพเพื่อแสดงถึงสัญญาณรบกวนรายคาบ แสดงดังภาพที่ 29 ถึง 38 ตามลำดับ และทำการลบสัญญาณรบกวนสกรีนคอร์เอฟเฟคออกจากข้อมูลภาพดังกล่าว โดยนำข้อมูลภาพต้นฉบับที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบมาทำการแปลงเวฟเลตซึ่งเลือกใช้เวฟเลตฟังก์ชัน 'dmey' และแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลตเพียง 1 ระดับ เพราะสัญญาณรบกวนอยู่ในระดับนั้น ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนการแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเลตแล้วจะทำให้ได้ข้อมูล 2 ส่วนคือ ข้อมูลภาพและข้อมูลของสัญญาณรบกวน จะนำข้อมูลดังกล่าวนี้ไปทำการคำนวณหาอัตราระหว่างกำลังของสัญญาณเทียบกับสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ซึ่งค่าอัตรานี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของข้อมูลภาพ ค่า SNR ที่คำนวณได้ในลำดับนี้คือค่าบ่งชี้คุณภาพของภาพต้นฉบับ จากนั้นนำข้อมูลภาพที่ผ่านการแยกสัญญาณรบกวนมาแล้ว ทำการแปลงด้วยเวฟเลตอีกครั้งเพื่อแยกสัญญาณข้อมูลภาพและสัญญาณรบกวนออก และนำค่าเหล่านั้นมาทำการคำนวณค่า SNR ซึ่งจะเป็นค่าบ่งชี้คุณภาพของภาพผลลัพธ์และนำเวฟเลตฟังก์ชันจากตารางที่ 4 ตัวอื่นๆ มาทำการทดลองตามข้างต้นและบันทึกผลเปรียบเทียบ



ภาพที่ 27 ภาพรวมการทดลองสำหรับการแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์ดออฟเฟค

การเลือกใช้รั้วแสงให้เหมาะสมกับวัตถุนั้น ควรเลือกให้ขนาดวัตถุมีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากับความกว้างของรั้วแสงหรือค่าคาบของคลื่นรูปไซน์ แสดงดังภาพที่ 28 ส่วนของภาพ (ก) เป็นการเลือกใช้ขนาดรั้วแสงที่เหมาะสม กล่าวคือ ส่วนของบริเวณพื้นมีการพาดผ่านของรั้วแสงที่เต็มจำนวนคาบของคลื่นรูปไซน์ ก็จะทำให้เมื่อนำไปคำนวณสร้างเป็นภาพ 3 มิติจะได้รายละเอียดที่ดีและชัดเจน ส่วนภาพ (ข) เป็นการเลือกใช้ขนาดรั้วแสงที่ไม่เหมาะสม กล่าวคือ รั้วแสงที่พาดผ่านบริเวณพื้นไม่ครบเต็มลูกคลื่น ซึ่งจะทำให้มีปัญหาในการคลีเฟสเพราะการคลีเฟสจะต้องได้รั้วแสงที่ครบเต็มลูกคลื่นและถ้าสามารถคลีเฟสได้ก็จะไม่ได้รายละเอียดของภาพที่ชัดเจน นอกจากนั้นอาจจะเลือกใช้ความกว้างรั้วแสงที่มีขนาดเล็กกว่าวัตถุก็ได้ แต่การเลือกขนาดความกว้างรั้วแสงที่เกินขนาดวัตถุจะทำให้มีปัญหาดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

งานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้ภาพรั้วแสงที่มีขนาดความกว้างรั้วแสงที่มีขนาดใหญ่กับโมเดลรูปแมวและโมเดลรูปปลา เพราะโมเดลทั้งสองอันนี้ไม่ค่อยมีรายละเอียดของพื้นผิวมากนัก และในส่วนของโมเดลรูปพื้นทั้ง 5 ชั้นและโมเดลรูปดอกไม้ เลือกใช้รั้วแสงที่มีขนาดเล็กเพื่อเก็บรายละเอียด เพราะโมเดลมีรายละเอียดค่อนข้างมาก ส่วนโมเดลรูปส่วนโค้งได้ทำการเลือกกลุ่มความกว้างของรั้วแสงและขนาดของโมเดลโดยรวมแล้วมีขนาดไม่ใหญ่มากประมาณ 10 x 15 เซนติเมตร



ภาพที่ 28 การเลือกใช้ริ้วแสงให้เหมาะสมกับวัตถุ



(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2

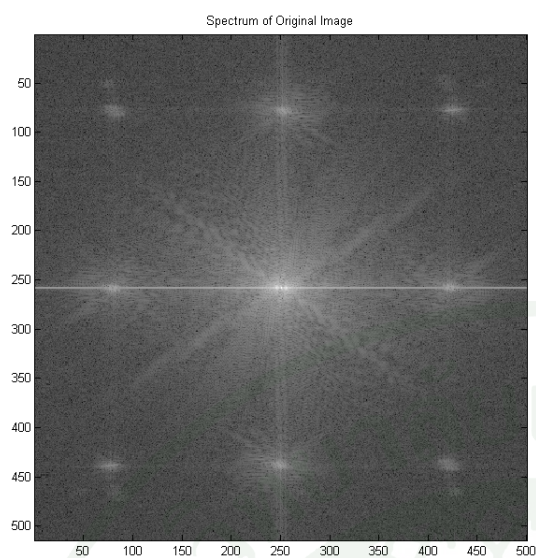


(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3

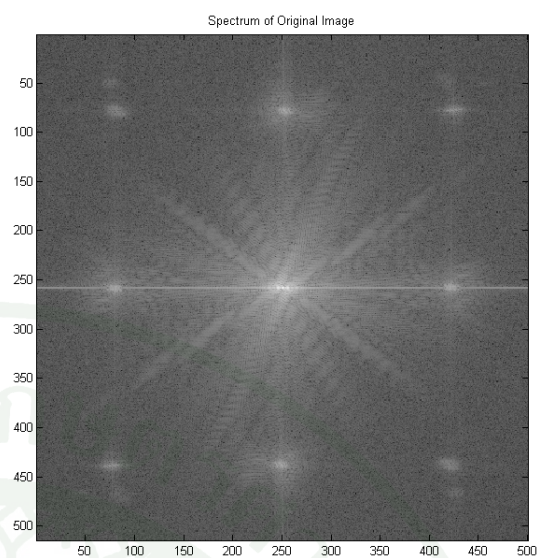


(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

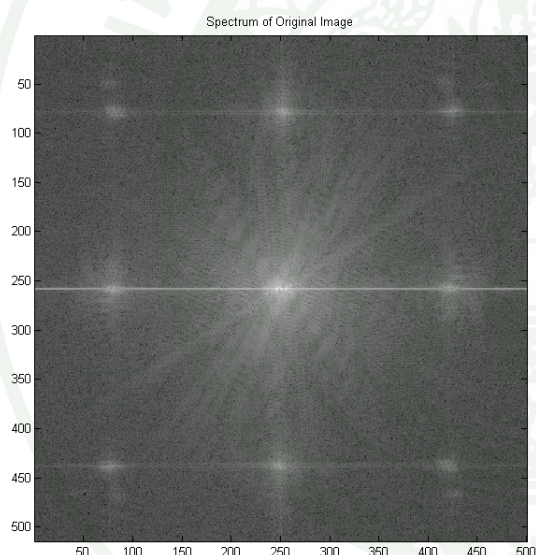
ภาพที่ 29 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปแมว ขนาดภาพ 500 x 514 พิกเซล



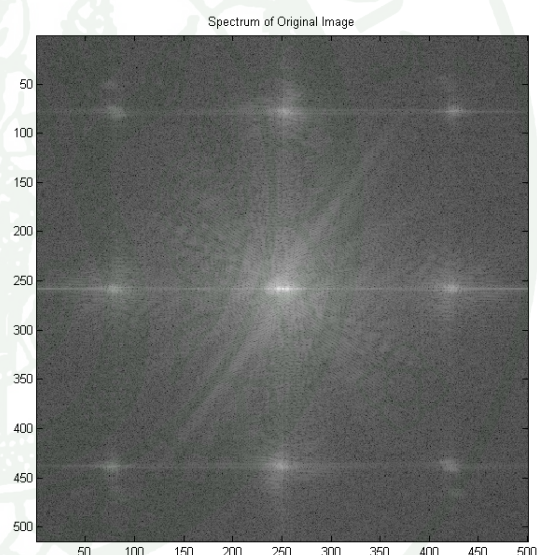
(ก) ภาพสเปกตรัมของภาพรีแอสรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพสเปกตรัมของภาพรีแอสรูปแบบที่ 2

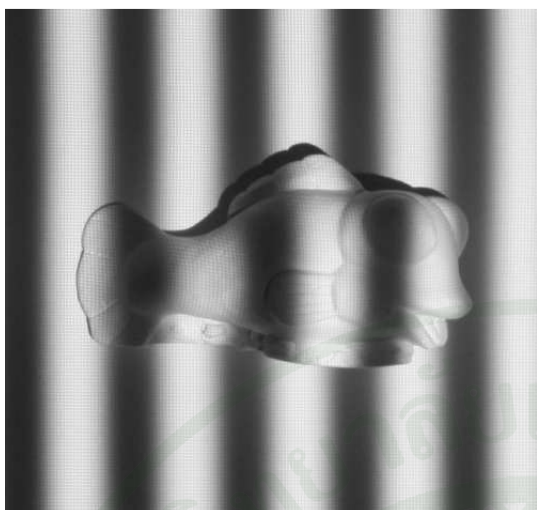


(ค) ภาพสเปกตรัมของภาพรีแอสรูปแบบที่ 3

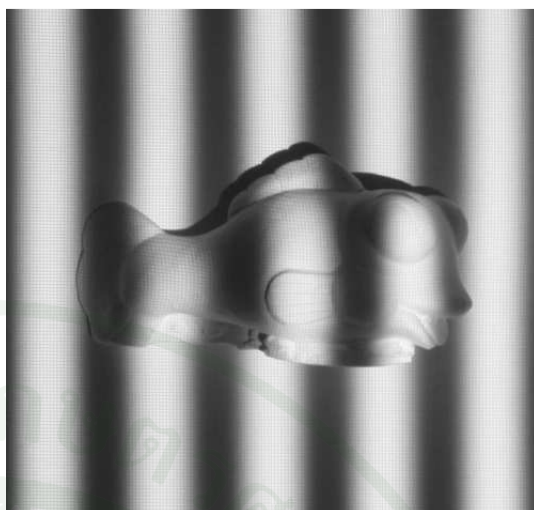


(ง) ภาพสเปกตรัมของภาพรีแอสรูปแบบที่ 4

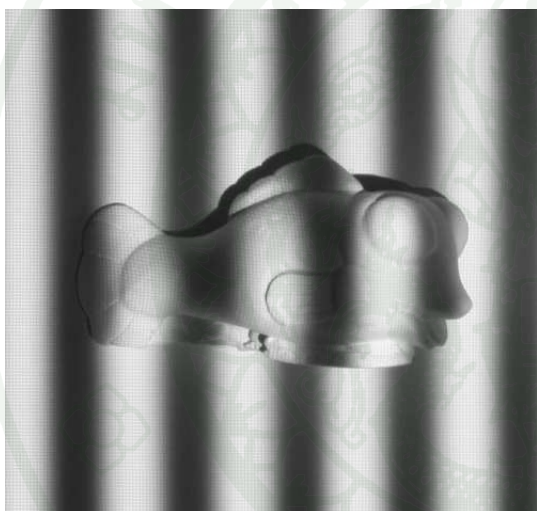
ภาพที่ 30 ภาพสเปกตรัมของโมเดลปูนปลาสเตอร์รูปแมวที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบ



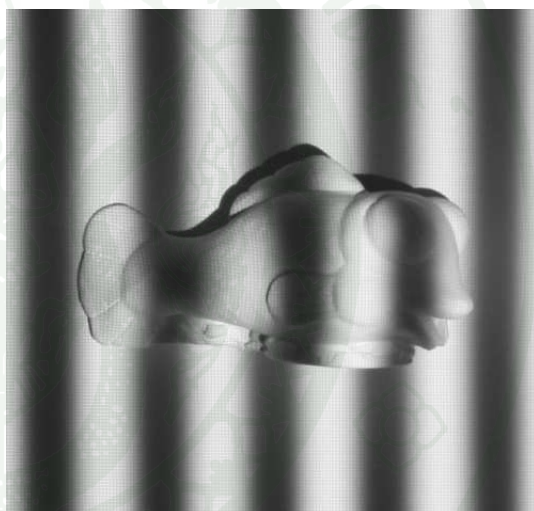
(ก) ภาพรีแอสแตงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีแอสแตงรูปแบบที่ 2

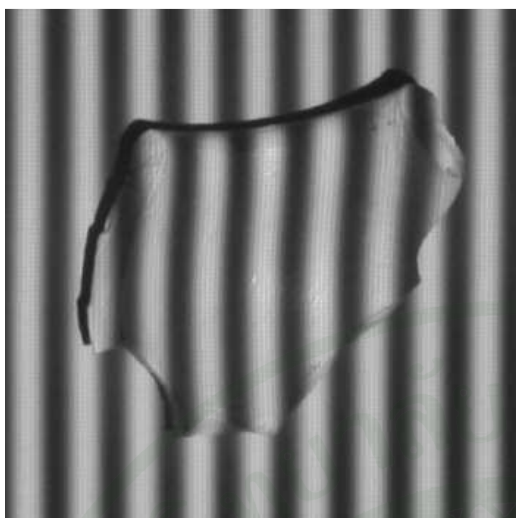


(ค) ภาพรีแอสแตงรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีแอสแตงรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 31 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปปลา ขนาดภาพ 500 x 475 พิกเซล



(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2

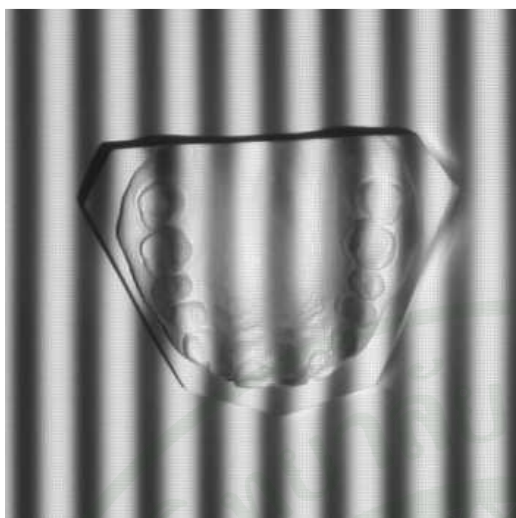


(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 32 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปส่วนโค้ง ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล



(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2

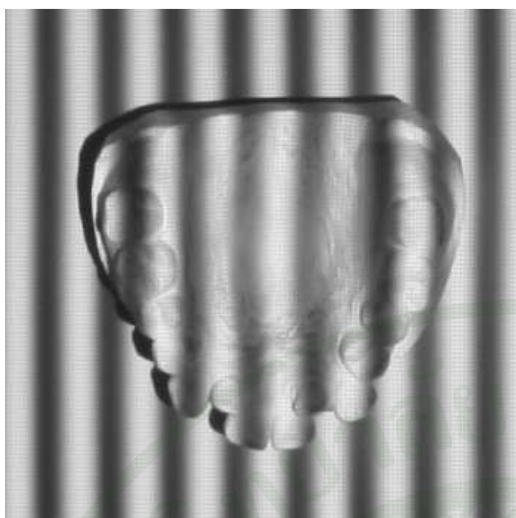


(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

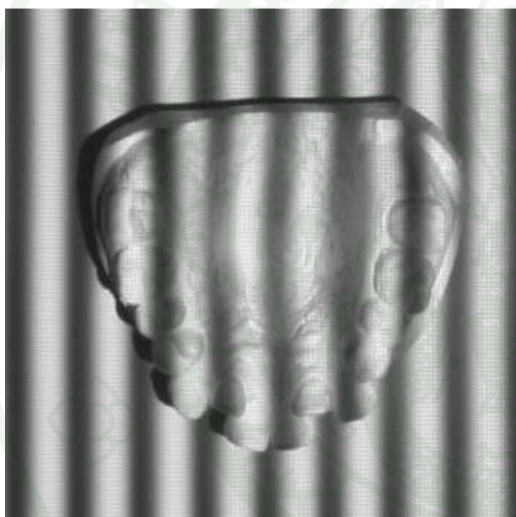
ภาพที่ 33 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 1 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล



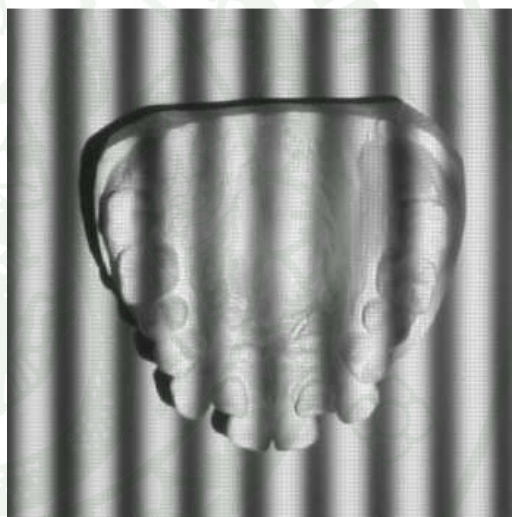
(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2



(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 34 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 2 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล



(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2

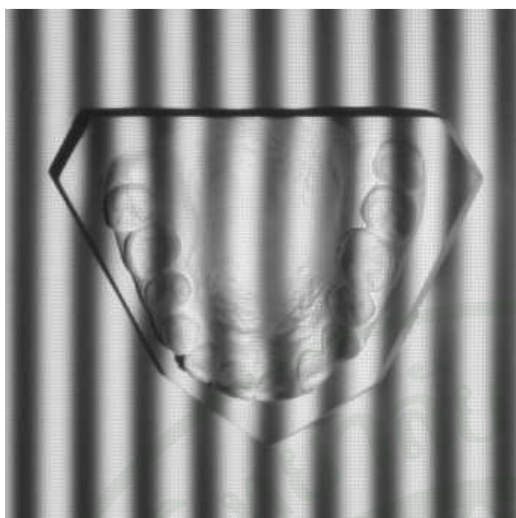


(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3

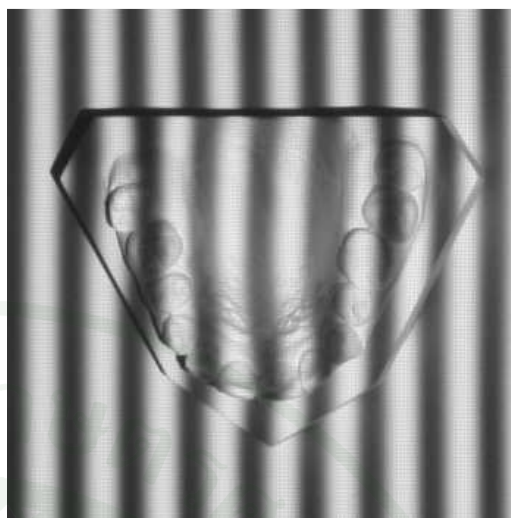


(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 35 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 3 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล



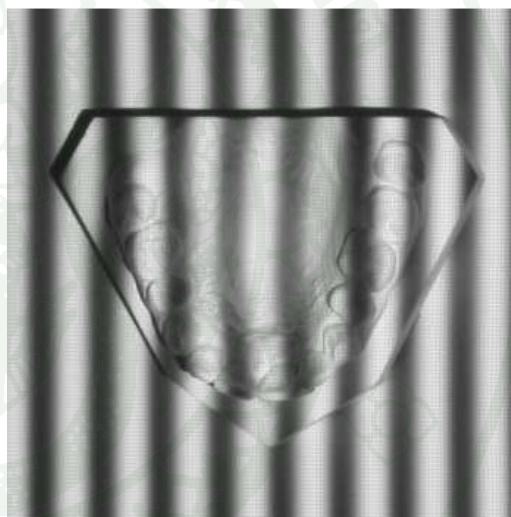
(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2



(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

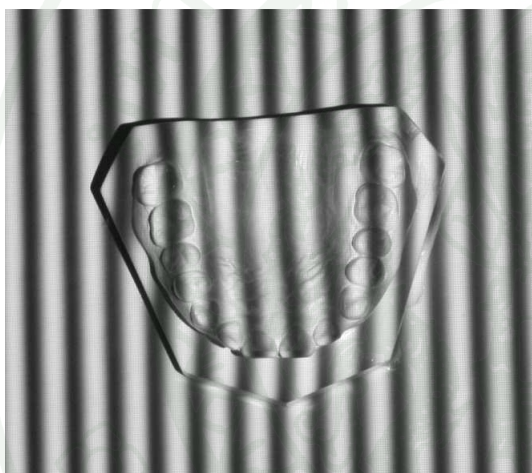
ภาพที่ 36 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 4 ขนาดภาพ 350 x 350 พิกเซล



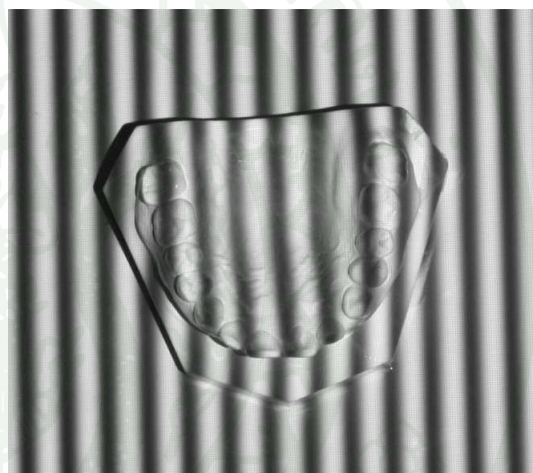
(ก) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 2



(ค) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีวแสงรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 37 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 5 ขนาดภาพ 660 x 586 พิกเซล



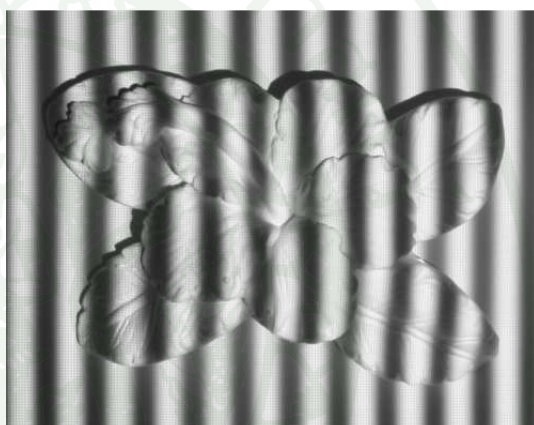
(ก) ภาพรีแอสรูปแบบที่ 1



(ข) ภาพรีแอสรูปแบบที่ 2



(ค) ภาพรีแอสรูปแบบที่ 3



(ง) ภาพรีแอสรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 38 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปดอกไม้ ขนาดภาพ 500 x 395 พิกเซล

3. ปัญหาเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น

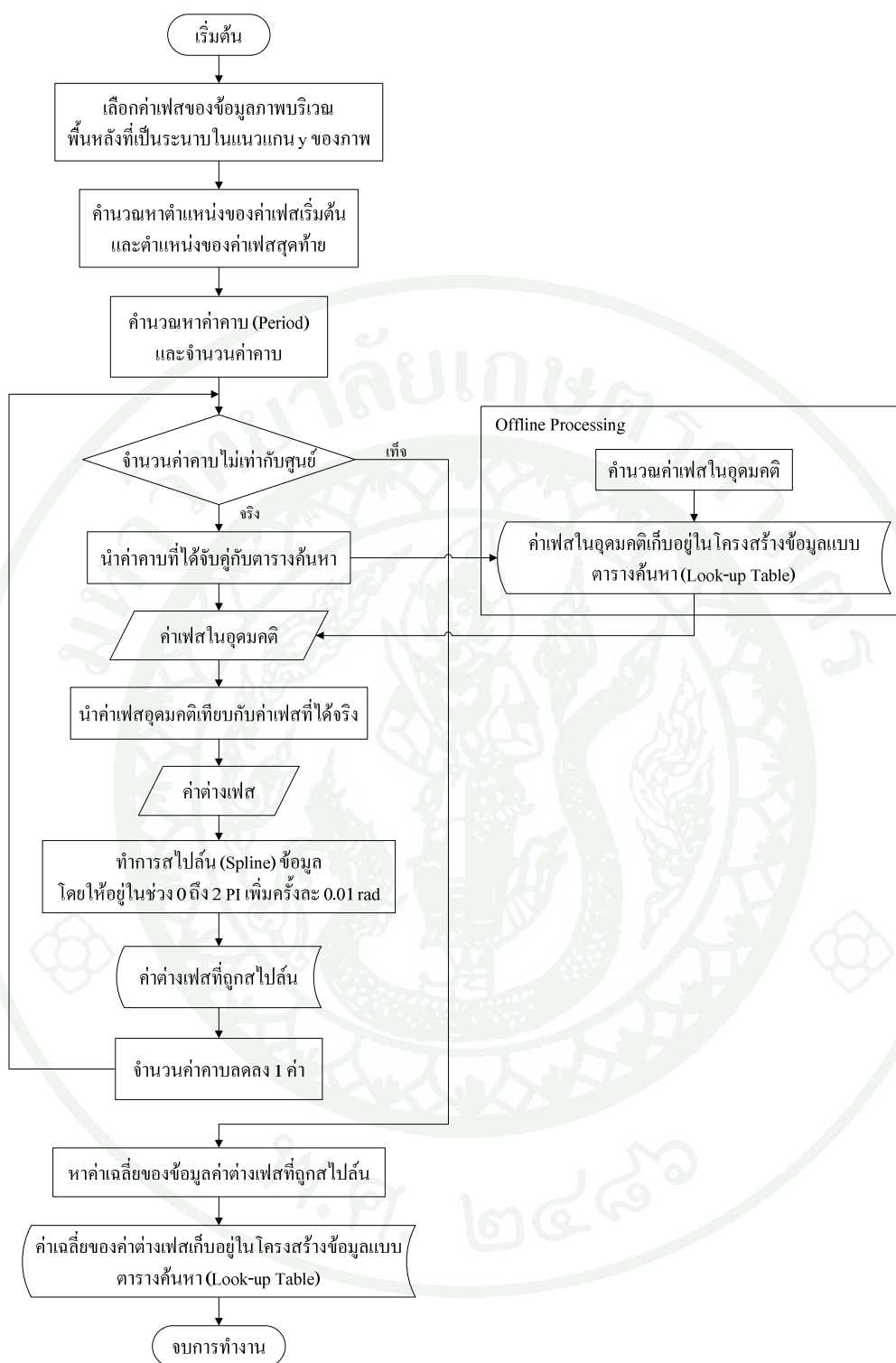
สมมติฐานของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ จากการพิจารณาปัญหาของเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma) ในขั้นตอนการห่อเฟส (Phase Wrapping) จะสังเกตว่าค่าเฟสมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นต่างกับค่าเฟสในอุดมคติซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง จึงคาดว่าถ้านำค่าเฟสในอุดมคติกับค่าเฟสจริงที่ได้จากการทดลองมาทำการหาความต่างและนำผลที่ได้ไปชดเชยข้อมูลค่าเฟสจริงดังกล่าว อาจจะทำให้ข้อมูลภาพสามมิติมีความผิดพลาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญและมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยชิ้นนี้ (Tiendee, Sasin et al., 2010b) นำเสนอขั้นตอนวิธีการโดยอาศัยเทคนิคการเก็บข้อมูลภาพ กล่าวคือในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพให้เก็บข้อมูลที่มีบริเวณของวัตถุที่สนใจและบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบ โดยมองว่าข้อมูลภาพเป็นภาพที่สมบูรณ์คือไม่มีการบิดเบือน จากนั้นเลือกข้อมูลภาพของบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบที่ผ่านการคำนวณหาค่าเฟสกลับคืน (Phase Retrieval) แล้วโดยเลือกข้อมูลในแนวแกน y ของภาพมาทำการคำนวณตามขั้นตอนวิธีที่ได้ออกแบบ แสดงดังภาพที่ 39 โดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฟสจริงที่ได้จากห้องทดลองกับค่าเฟสในอุดมคติที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี เพื่อให้ได้มาซึ่งชุดข้อมูลของค่าความผิดพลาดของค่าเฟสของข้อมูลชุดนั้นๆ จากนั้นนำไปใช้ในการชดเชยค่าความผิดพลาดของค่าเฟสของข้อมูลชุดดังกล่าว

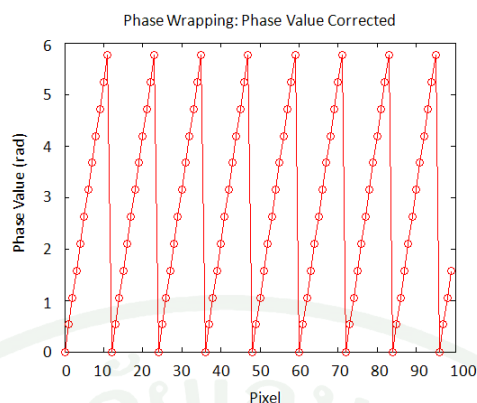
วิธีการนี้จะทำการชดเชยค่าเฟสอันเนื่องมาจากเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นเป็นขั้นตอนหลังจากการตรวจแก้ค่าเฟส เริ่มแรกทำการสร้างโครงสร้างข้อมูลแบบตารางค้นหา (Look-up Table) ของค่าเฟสในอุดมคติซึ่งมีความกว้าง (Fringe Pitch) ขนาดต่างๆ โดยทำการสร้างภาพริ้วแสงจำนวน 4 รูปแบบ ในสัญญาณ 1 มิติ และทำการคำนวณหาค่าเฟสกลับคืน ซึ่งค่าเฟสกลับคืนนี้จะถูกห่อ (Wrapped Phase) อยู่ในช่วง 0 ถึง 2π เรเดียน (Radian, rad) ค่าเฟสที่ถูกห่อดังกล่าวจะถูกนำมาคำนวณเพื่อใช้ชดเชยค่าเฟส แสดงดังภาพที่ 40 จะเลือกใช้ค่าเฟสที่ถูกห่อ 1 รายการ ที่มีค่าความกว้างระหว่างริ้วแสง (Fringe Pitch) ต่างๆ กัน เริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 256 พิกเซล โดยเพิ่มทีละ 1 พิกเซล ขั้นตอนต่อมาทำการกำหนดเลือกเส้น (Defined Lines Selection) เป็นการเลือกค่าเฟสของข้อมูลภาพบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบในแนวแกน y ของส่วนบนหรือล่างของภาพ แสดงดังภาพที่ 41 ข้อมูลเหล่านั้นจะถูกเขียนลงอะเรย์ (Array) ในลำดับต่อมาคำนวณหาความกว้างของริ้วแสงและค่าความต่างเฟส ข้อมูลในอะเรย์จากขั้นตอนที่แล้ว จะนำมาทำการค้นหาหาความกว้างระหว่างริ้วแสง โดยทำการคำนวณด้วยการหาค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (Thresholding) ในอะเรย์ดังกล่าวจากตำแหน่งที่ i ถึง N เมื่อ i คือตำแหน่งเริ่มต้น มีค่าเป็น 0 และ N คือข้อมูลแนวแกน x ของข้อมูลภาพ

และบันทึกตำแหน่งของค่าที่เกินค่าขีดเริ่มเปลี่ยนไว้ในอะเรย์ 1 (Array 1) ส่วนในอะเรย์ 2 (Array 2) จะเก็บค่าผลต่างระหว่างตำแหน่งที่ i กับ $i+1$ ของอะเรย์ 1 ซึ่งก็คือค่าความกว้างของริ้วแสง แสดงดังภาพที่ 42 ถัดมานำข้อมูลในอะเรย์ 2 มาทำการจับคู่ (Matching) กับตารางค้นหาของค่าเฟสในอุดมคติ (Ideal Phase LUT) จะได้ผลลัพธ์เป็นค่าเฟสในอุดมคติที่สอดคล้องกับค่าความกว้างริ้วแสงในอะเรย์ 2 แสดงดังภาพที่ 43 เมื่อได้ค่าเฟสในอุดมคติเรียบร้อยแล้วจะนำมาเปรียบเทียบหรือหาความต่างกับค่าเฟสจริง (Real Phase) ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความต่างเฟส (Different Phase) นำค่าเหล่านั้นไปทำการสไปลีนข้อมูลด้วยสไปลีนเทคนิค (Spline Technique) โดยให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 2π เรเดียน (Radian, rad) เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 เรเดียน (Radian, rad) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการเฉลี่ยข้อมูลซึ่งเก็บอยู่ในโครงสร้างข้อมูลแบบตารางค้นหา (Look-up Table) แสดงดังภาพที่ 44

กระบวนการทดลองของงานวิจัยนี้ เก็บข้อมูลภาพริ้วแสงของโมเดล 9 ชิ้น โดยแต่ละโมเดลจะถูกฉายด้วยริ้วแสง 4 รูปแบบ และนำข้อมูลภาพริ้วแสงเหล่านั้นมาทำการคำนวณหาค่าเฟสกลับคืนและทำการตรวจแก้ค่าเฟสจากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวทำการคำนวณหาตารางค้นหา (Look-up Table) สำหรับ เพื่อใช้ในการชดเชยค่าเฟสอันเนื่องมาจากเกมมาไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลภาพริ้วแสงชุดนั้นๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะเป็นข้อมูลภาพสามมิติที่ไม่มีริ้วคลื่น แสดงดังภาพที่ 45 จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลภาพสามมิติก่อนการแก้ไขและภาพสามมิติที่ผ่านการแก้ไขแล้ว และทำการวัดและประเมินผลโดยนำข้อมูลภาพสามมิติที่ได้มาทำการคำนวณด้วยตัวกรองช่วง (Range Filtering) ซึ่งค่าของตัวกรองช่วงสูงๆ จะหมายความว่ามีความแตกต่างของพื้นผิววัตถุมาก หรือพื้นผิวขรุขระนั่นเอง ในทางตรงข้ามถ้าค่าของตัวกรองช่วงมีค่าน้อยๆ หมายความว่าพื้นผิวของภาพสามมิติมีความราบเรียบสมจริงขึ้น

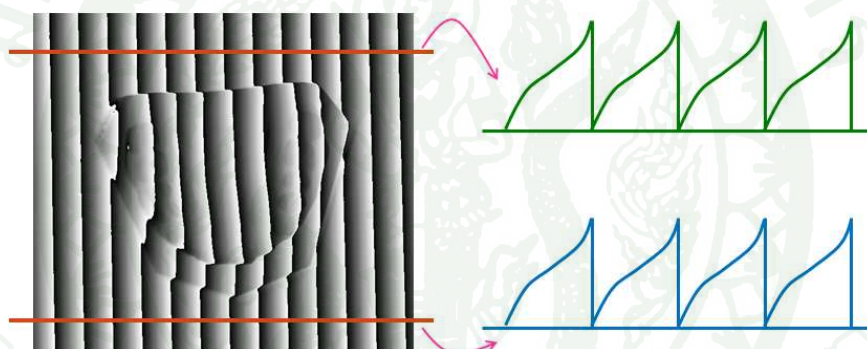


ภาพที่ 39 ฟังงานของขั้นตอนวิธีการหาค่าเฟสที่มีผลกระทบจากแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น



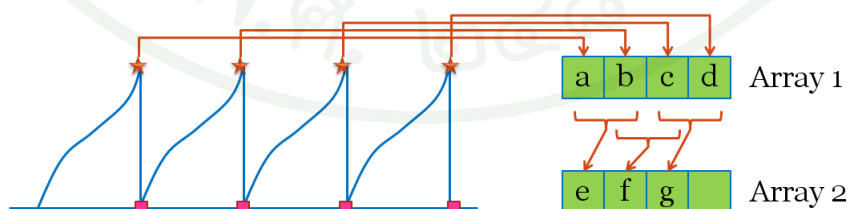
ภาพที่ 40 ค่าเฟสที่ถูกห่อ (Wrapped Phase) ของเฟสในอุดมคติ

ที่มา: Tiendee, Sasin et al. (2010b)



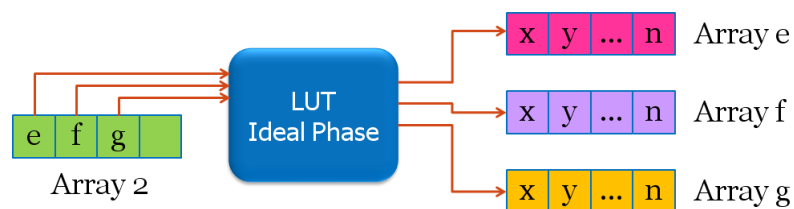
ภาพที่ 41 การเลือกเส้นกำหนดของค่าเฟสที่ถูกห่อ (Wrapped Phase) ที่เป็นค่าเฟสจริง (Real Phase)

ที่มา: Tiendee, Sasin et al. (2010b)



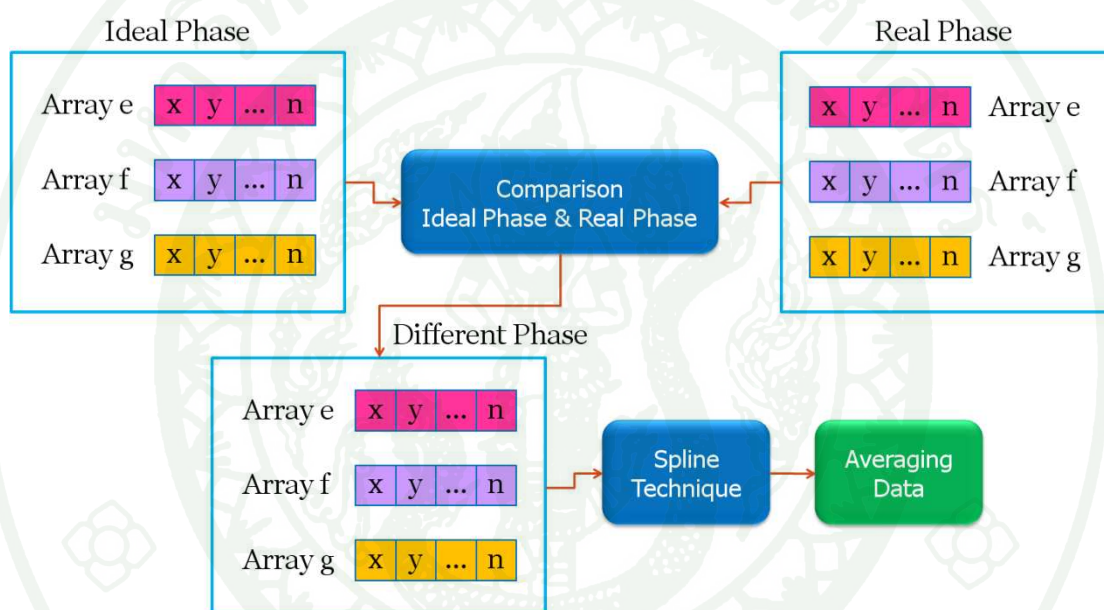
ภาพที่ 42 การหาค่าความกว้างของริ้วแสง (Fringe Pitch) ด้วยการ Thresholding

ที่มา: Tiendee, Sasin et al. (2010b)



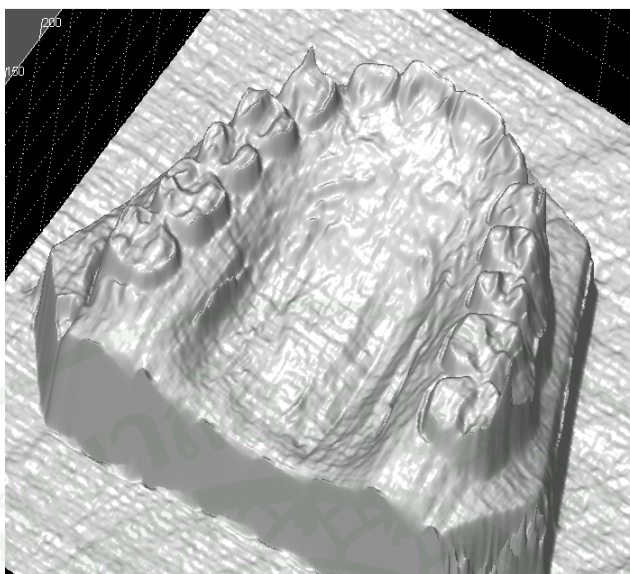
ภาพที่ 43 การจับคู่ระหว่างค่าความกว้างรั้วแสงกับตารางค้นหาของค่าเฟสในอุดมคติ

ที่มา: Tiendee, Sasin et al. (2010b)



ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบหาความต่างระหว่างค่าเฟสจริงกับค่าเฟสในอุดมคติ

ที่มา: Tiendee, Sasin et al. (2010b)



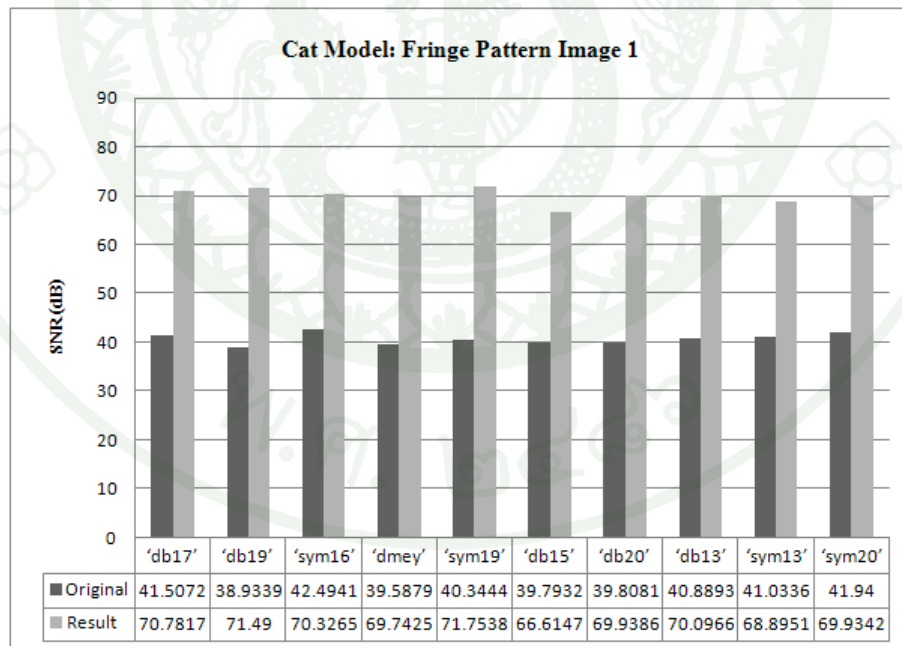
ภาพที่ 45 ข้อมูลภาพสามมิติที่ผ่านการแก้ไขเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น

ผลและวิจารณ์

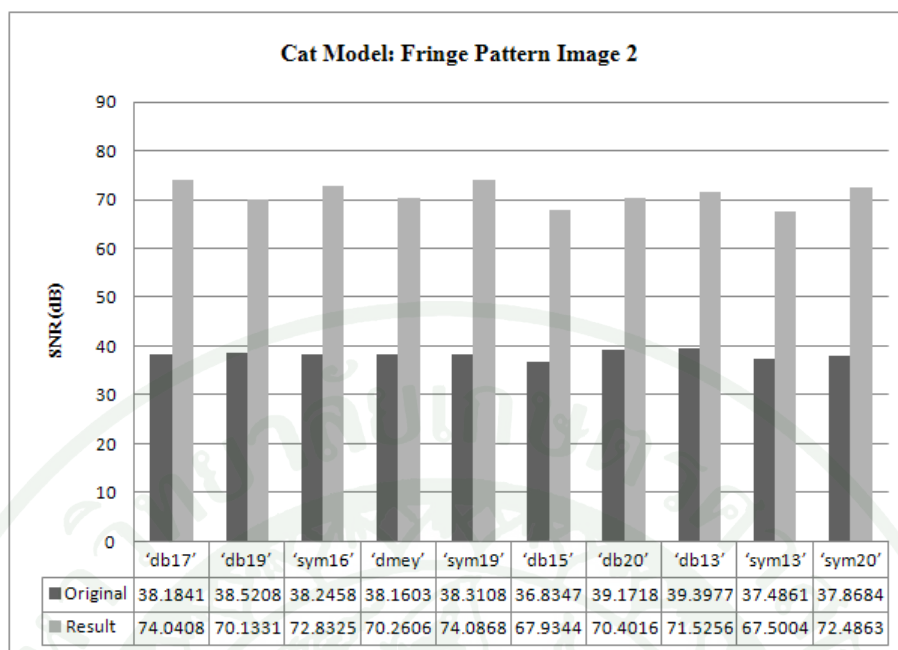
ผล

1. ผลการแก้ไขปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟกต์ (Screen Door Effect)

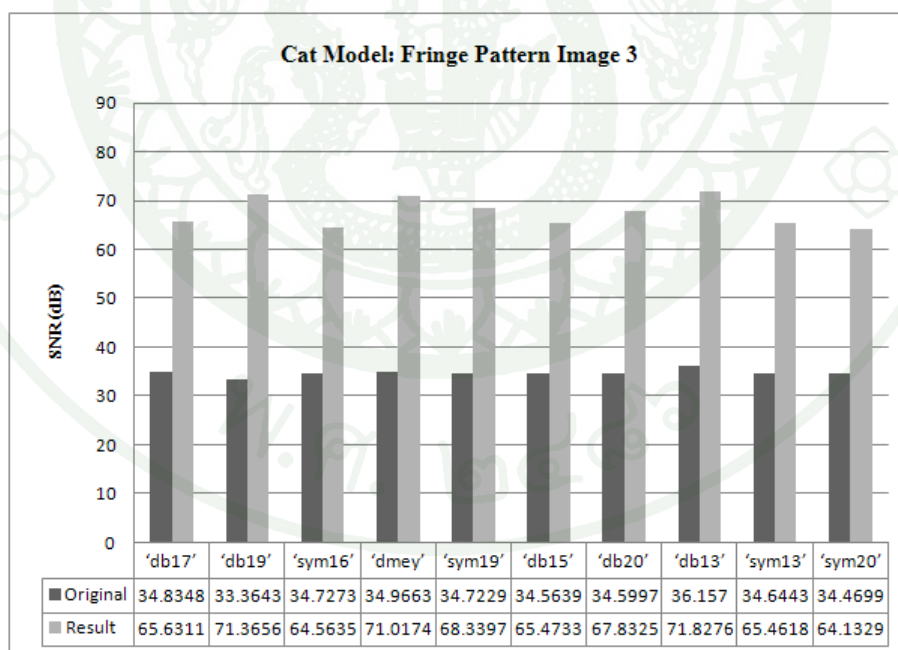
ผลการทดลองของการแก้ไขปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟกต์ โดยใช้โมเดลพูนพลาสติกเตอร์จำนวน 9 ชั้น ซึ่งทำการลบสัญญาณรบกวนดังกล่าวด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmey' และเวฟเลตฟังก์ชันอื่นๆ ตามตารางที่ 4 มีค่าอัตราระหว่างกำลังของสัญญาณเทียบกับสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ของภาพรีวีสของแต่ละโมเดลทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน แสดงดังภาพที่ 46 ถึง 81 เมื่อพิจารณาแต่ละภาพรีวีสพบว่าข้อมูลภาพต้นฉบับที่ยังไม่ได้ผ่านการแก้ไขปัญหานี้จะมีค่า SNR ที่ต่ำกว่าข้อมูลภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการแก้ไขแล้วเกือบหนึ่งเท่าตัว และค่า SNR ของภาพต้นฉบับของแต่ละเวฟเลตฟังก์ชันนั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า SNR ของภาพผลลัพธ์ที่แก้ไขด้วยแต่ละเวฟเลตฟังก์ชันดังกล่าวก็ให้ค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน



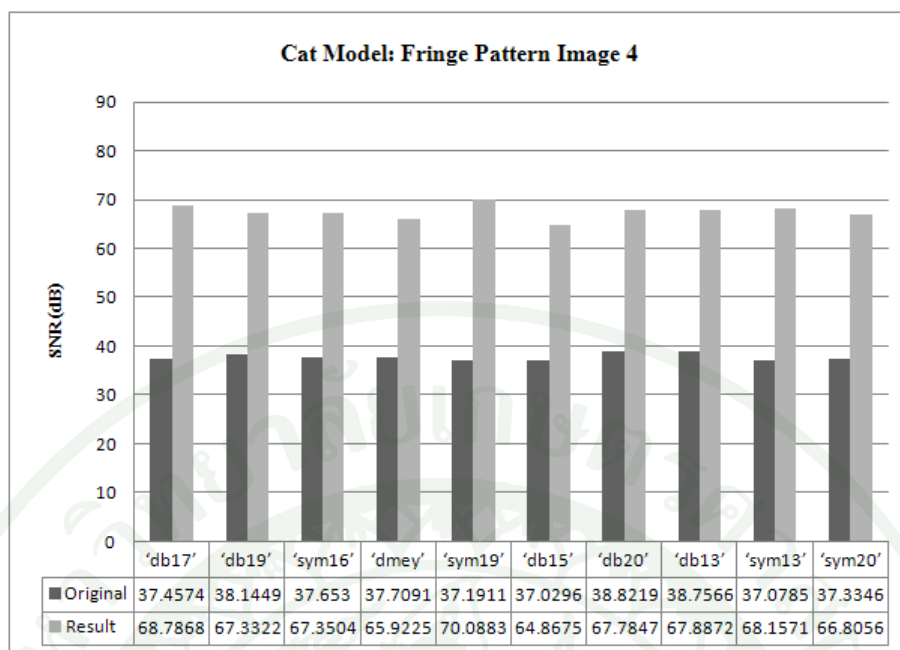
ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวีสของรูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปแมว



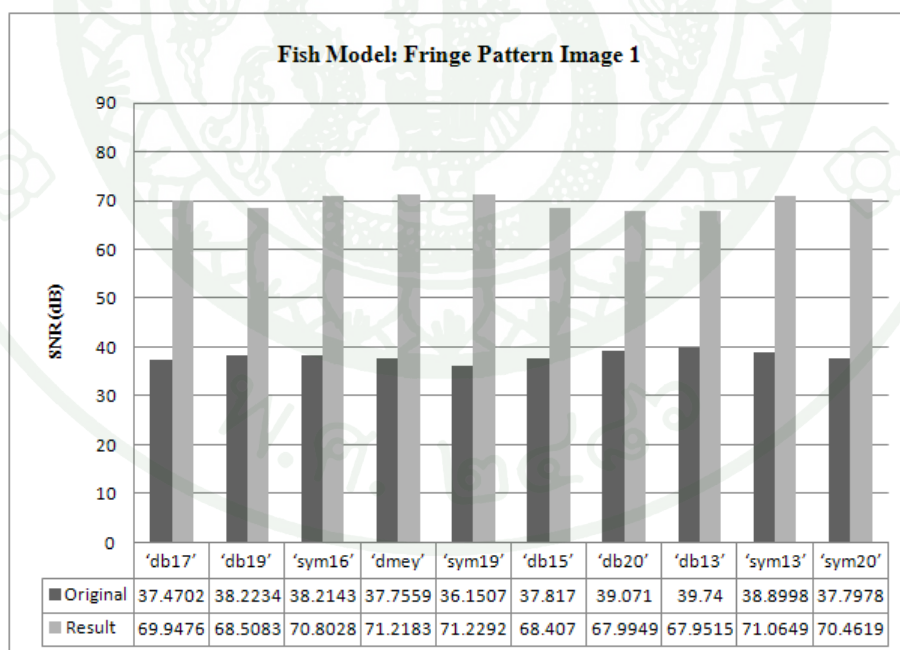
ภาพที่ 47 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปแมว



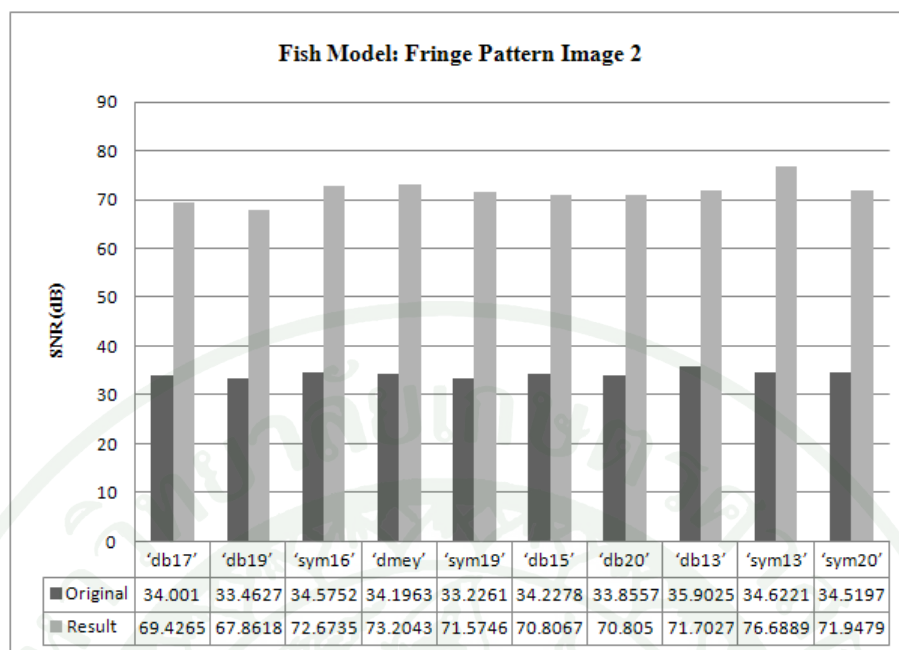
ภาพที่ 48 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปแมว



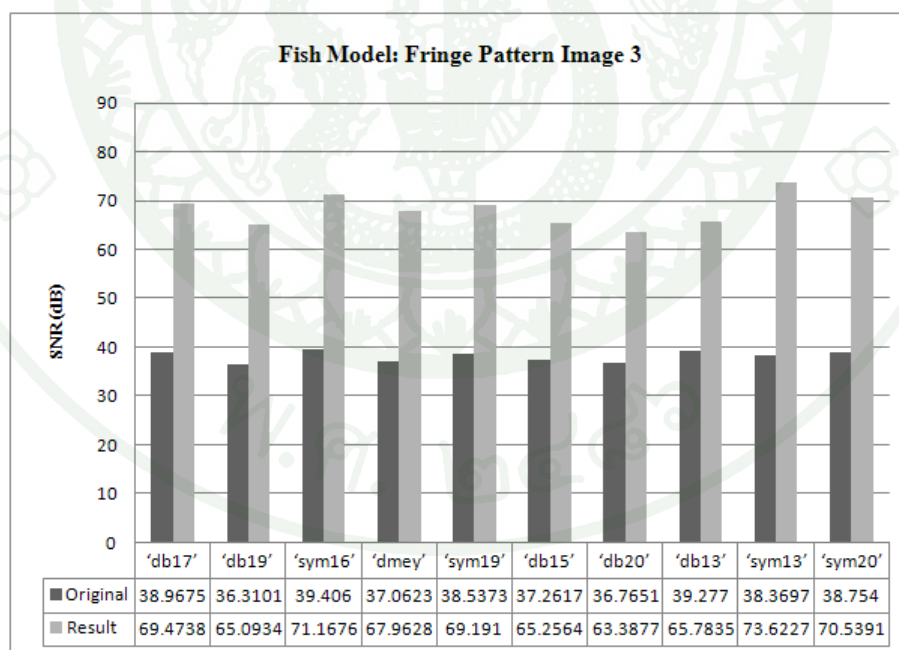
ภาพที่ 49 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปแมว



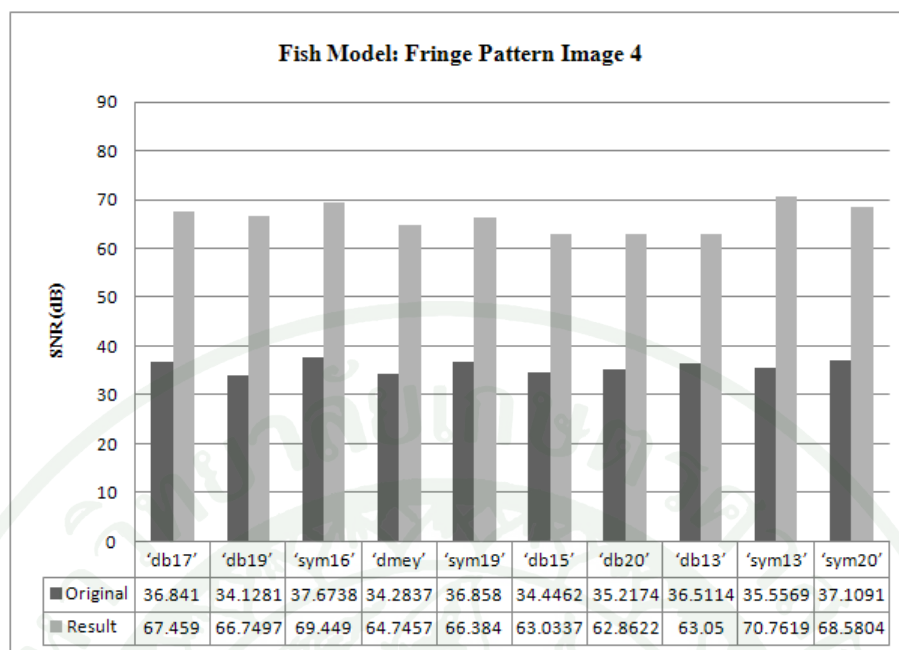
ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปปลา



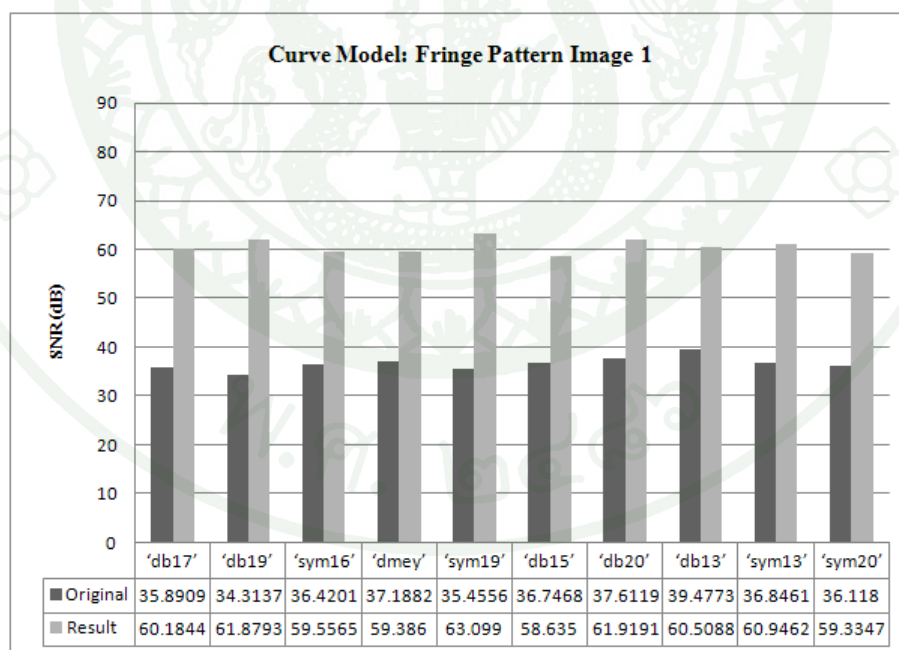
ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปปลา



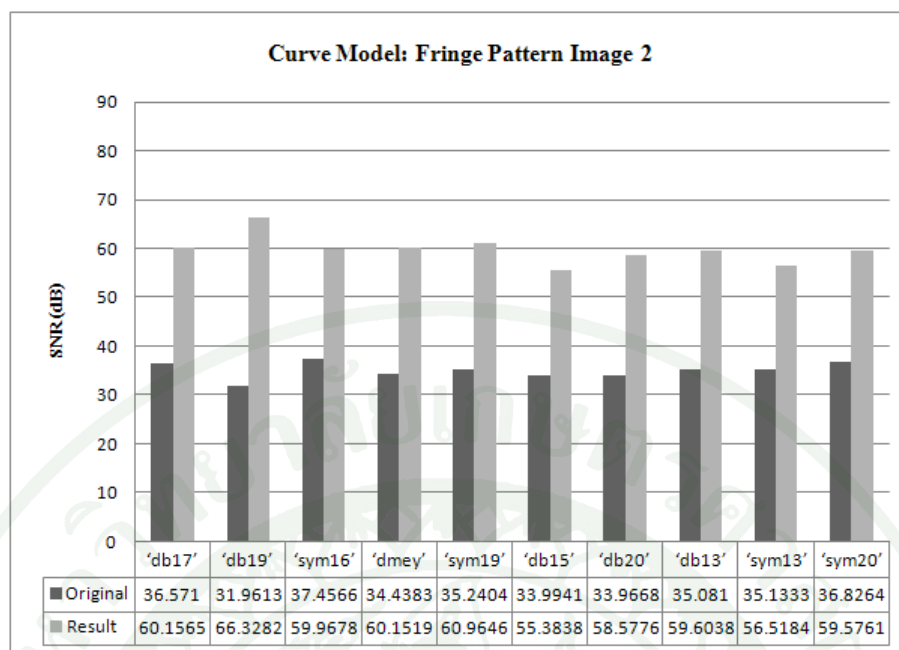
ภาพที่ 52 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปปลา



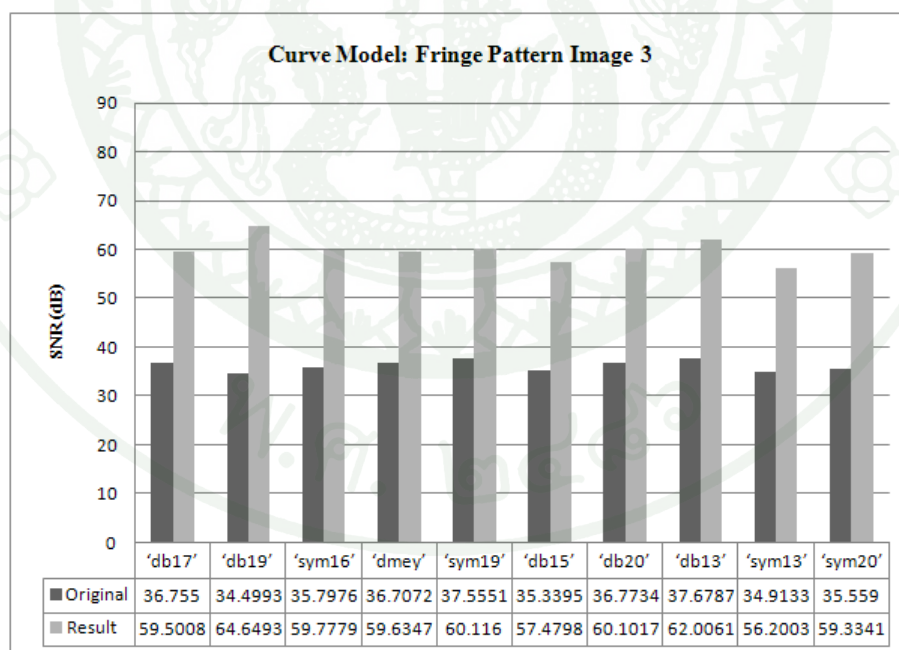
ภาพที่ 53 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปปลา



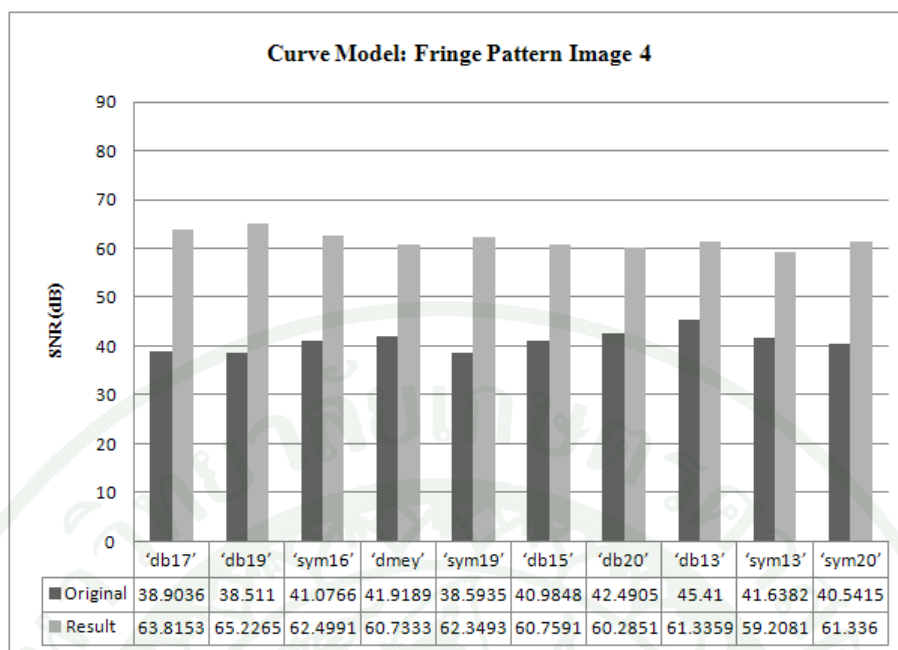
ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง



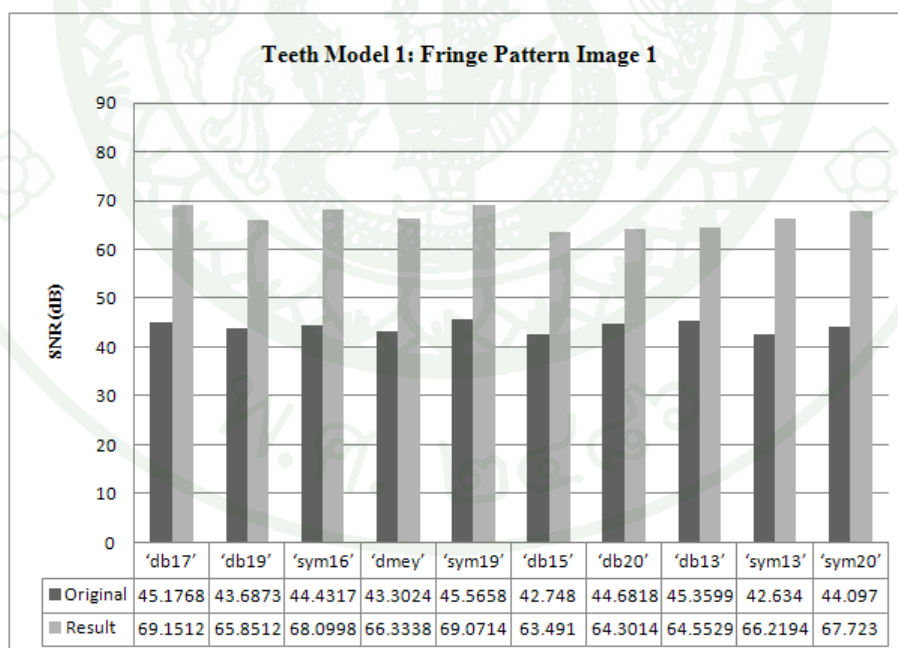
ภาพที่ 55 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง



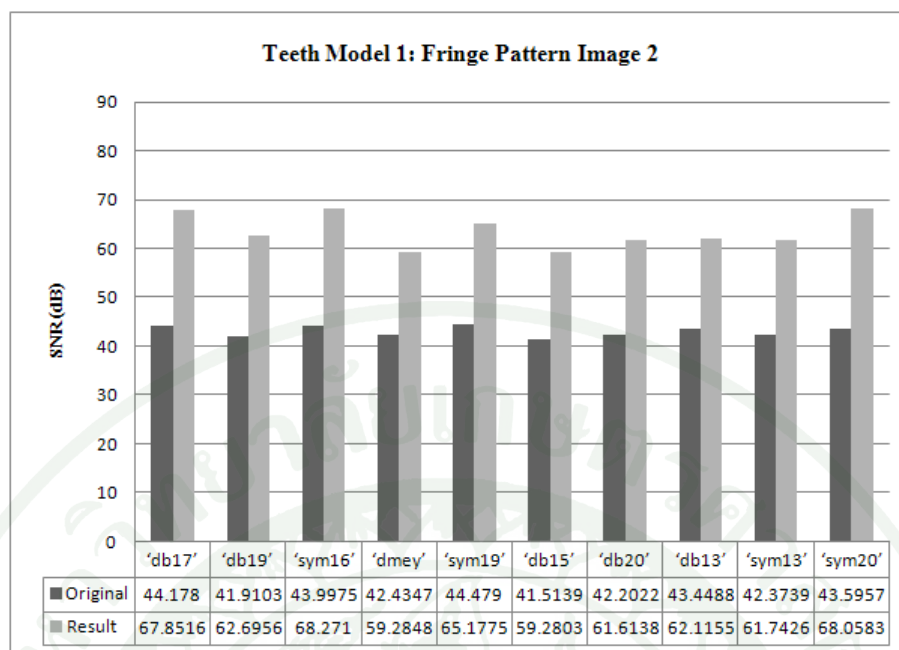
ภาพที่ 56 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง



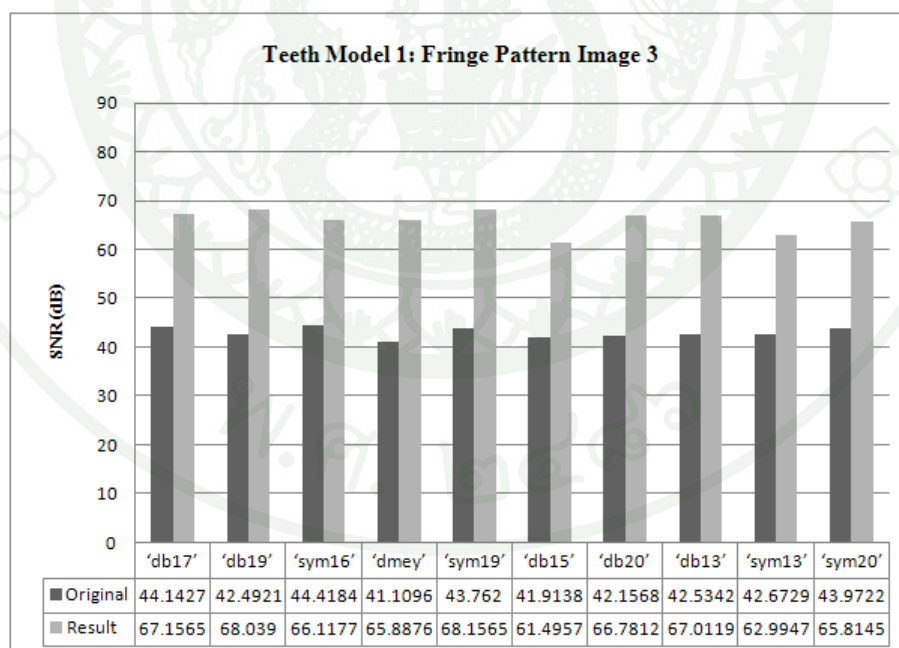
ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปส่วนโค้ง



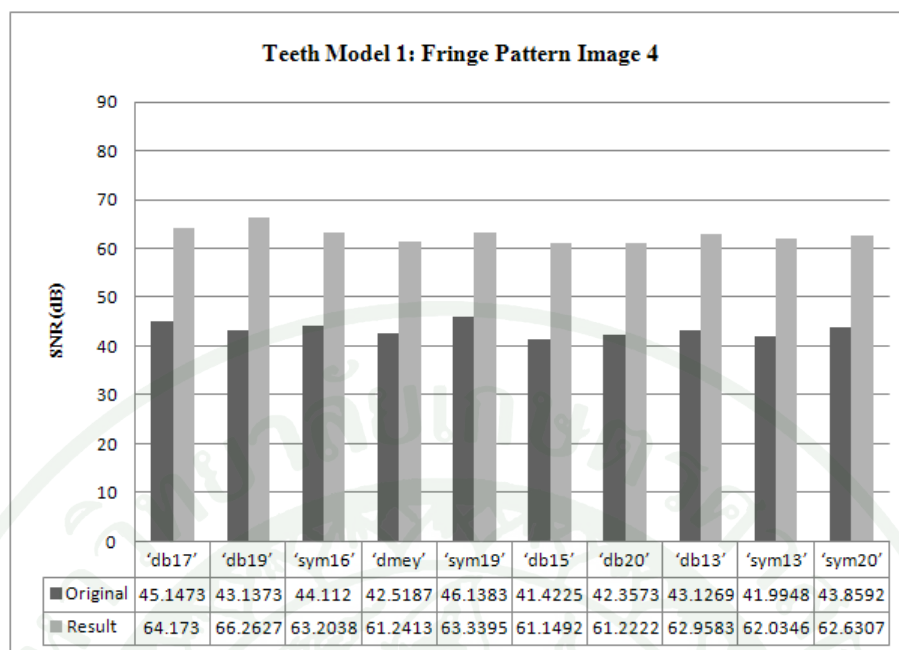
ภาพที่ 58 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 1



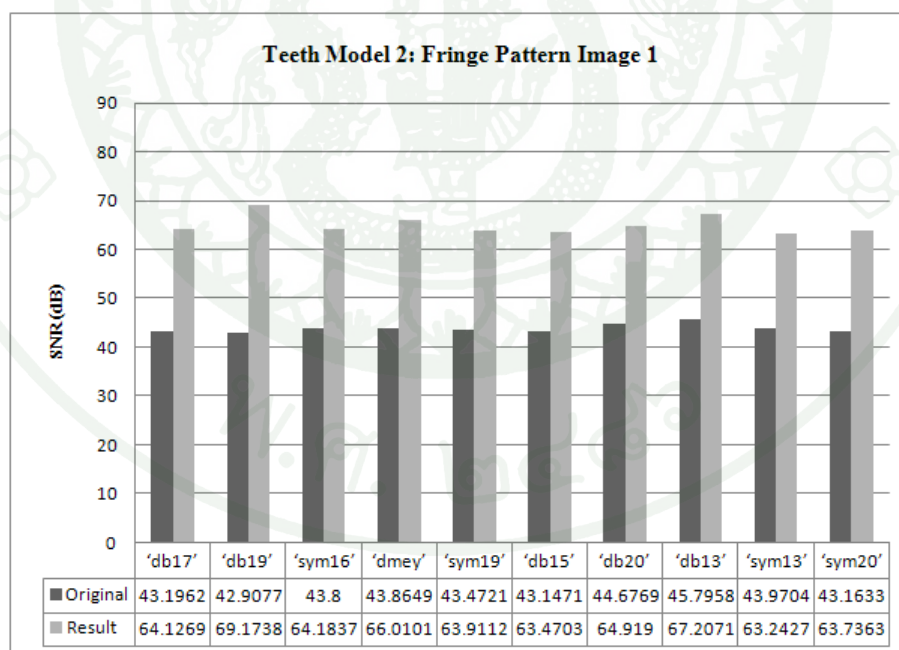
ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 1



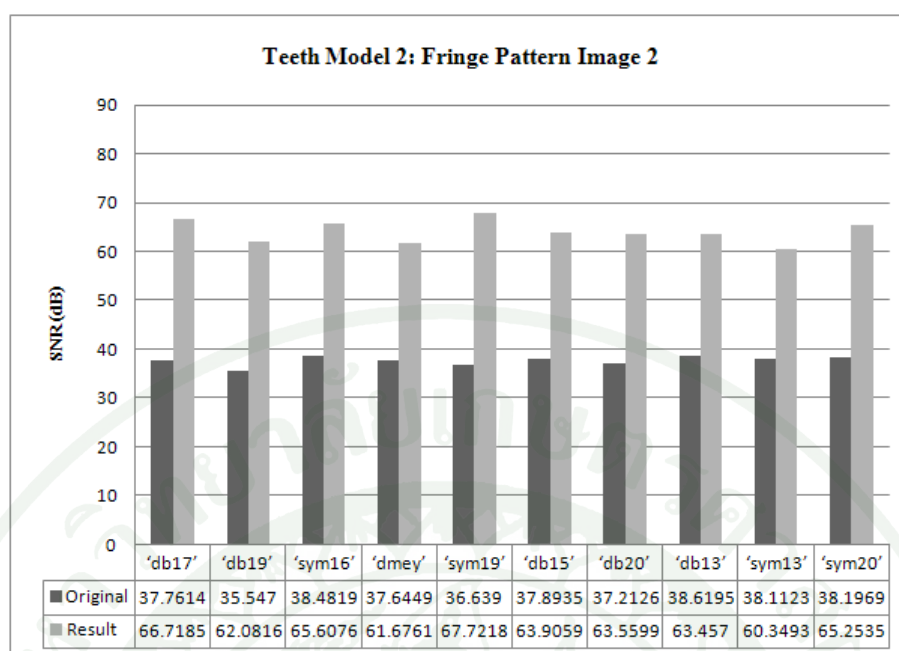
ภาพที่ 60 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 1



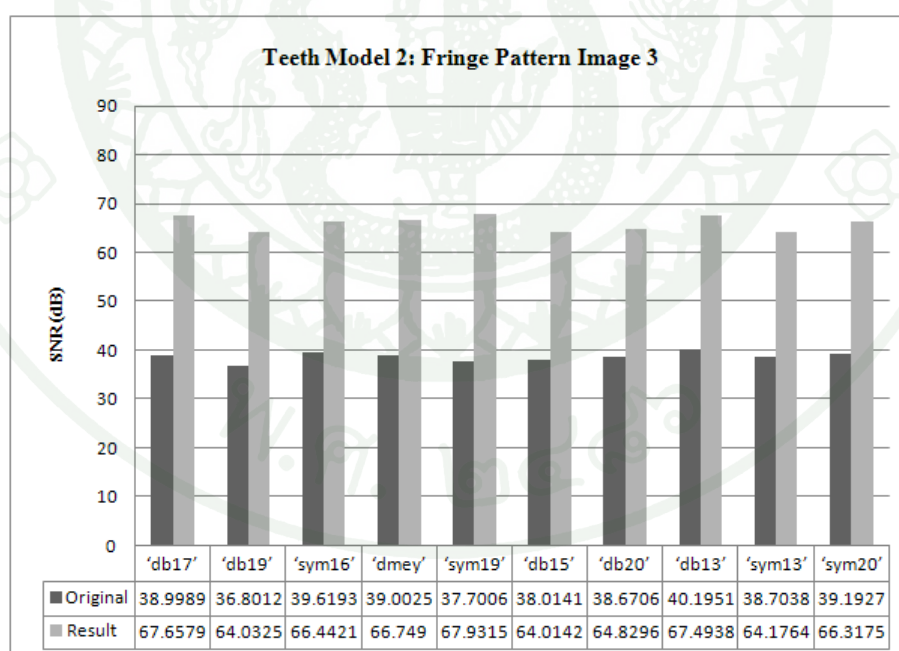
ภาพที่ 61 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 1



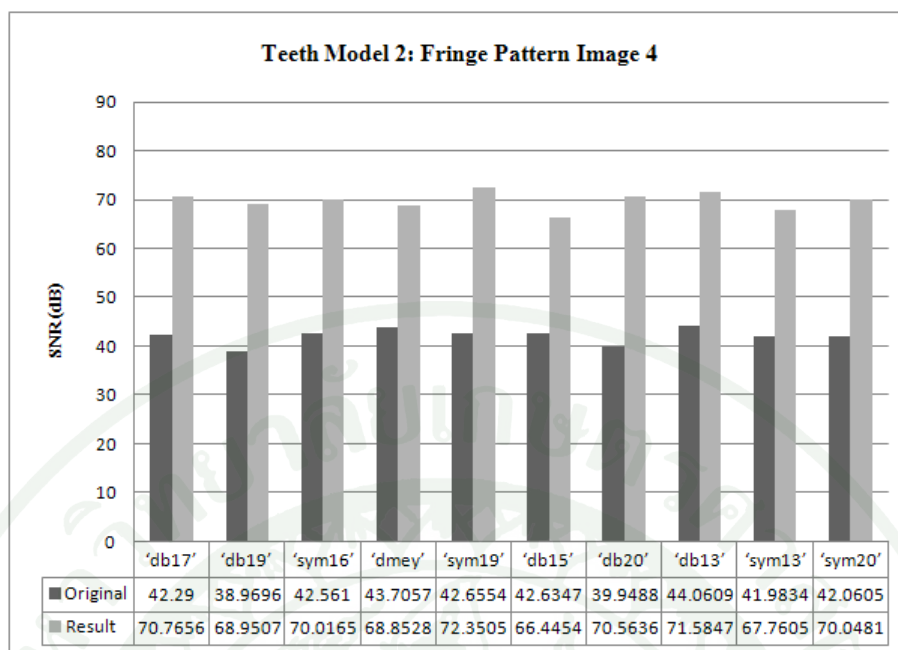
ภาพที่ 62 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 2



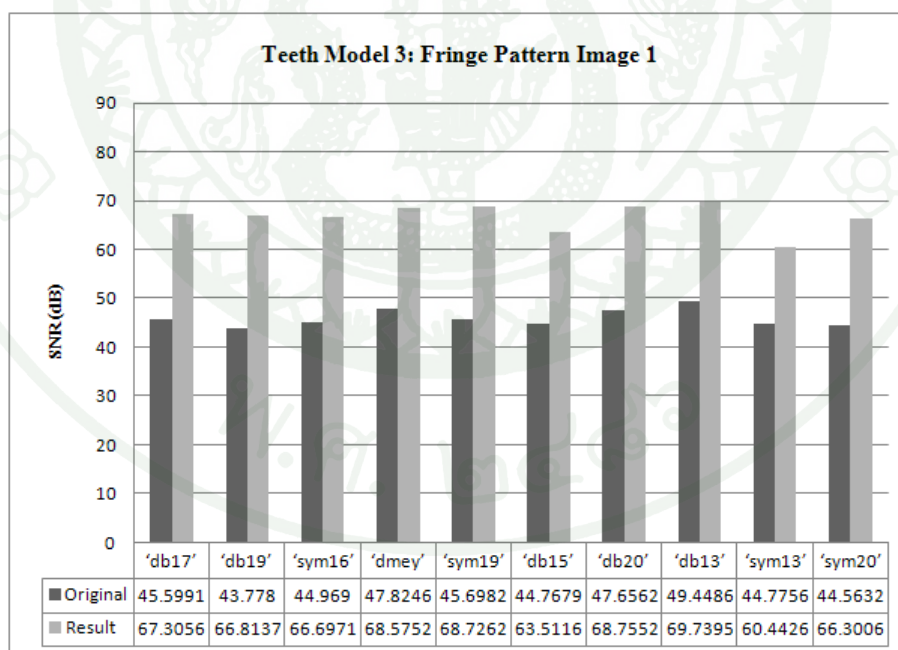
ภาพที่ 63 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 2



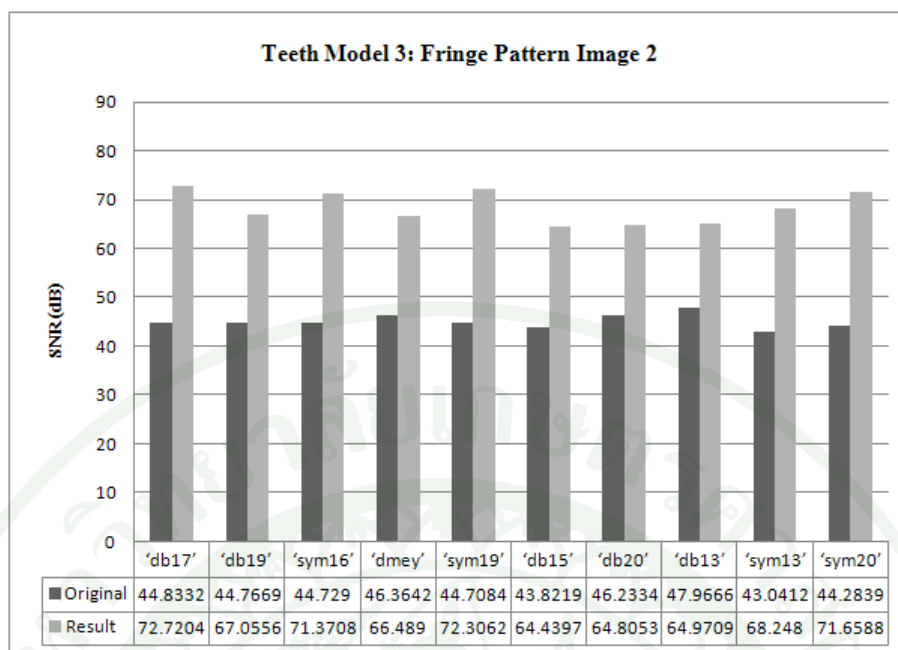
ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 2



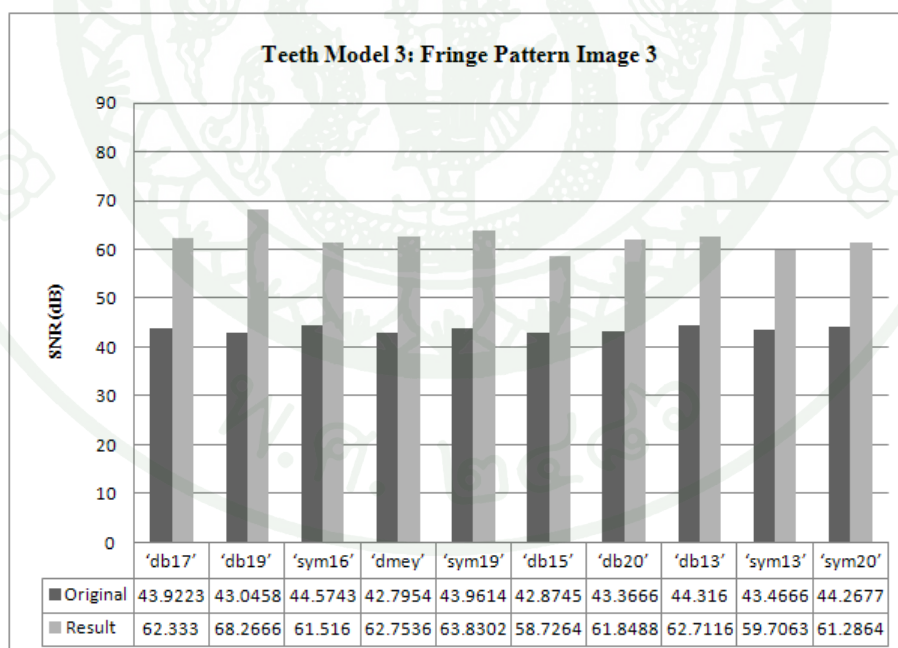
ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 2



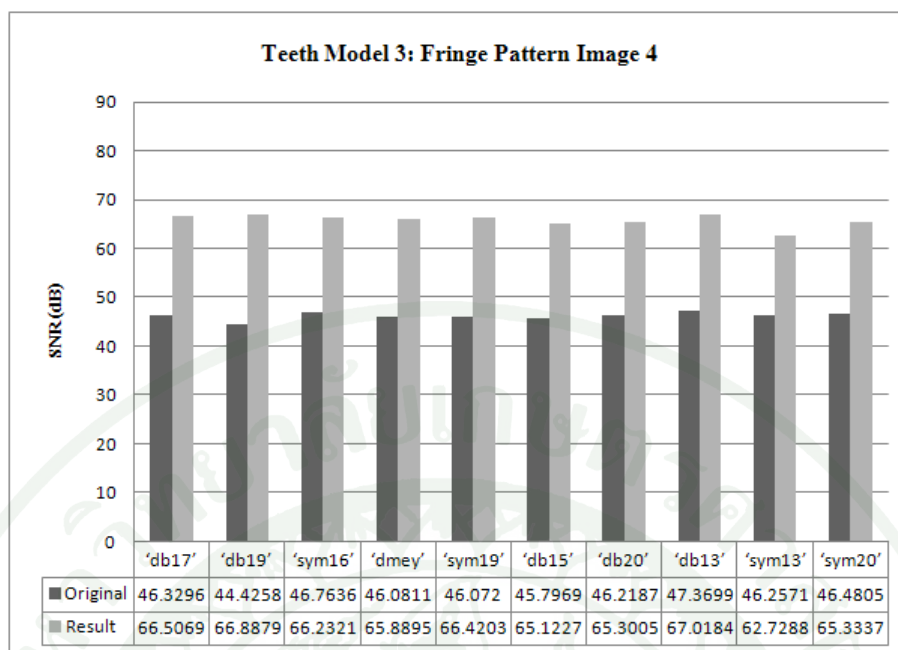
ภาพที่ 66 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 3



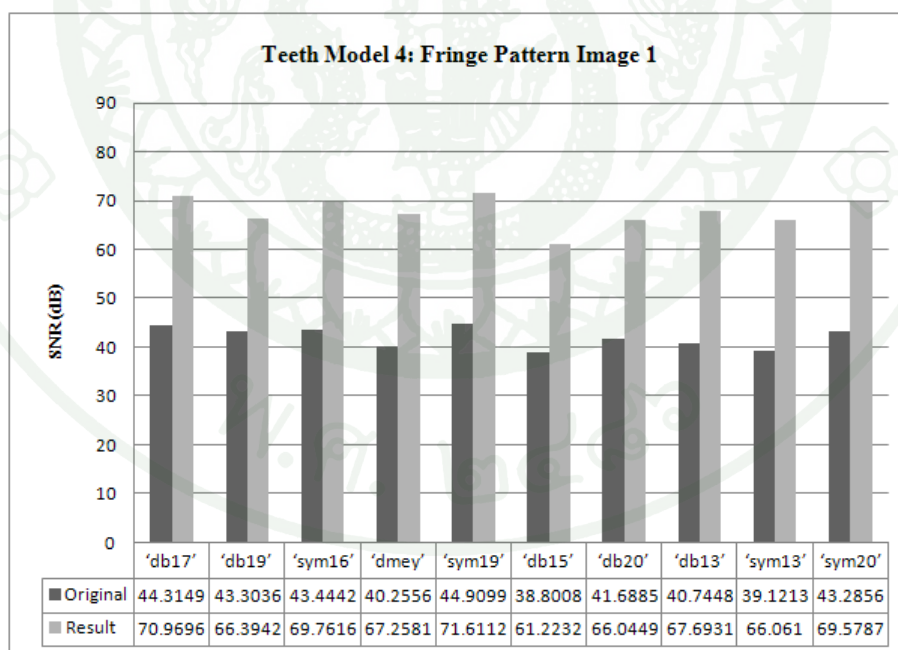
ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 3



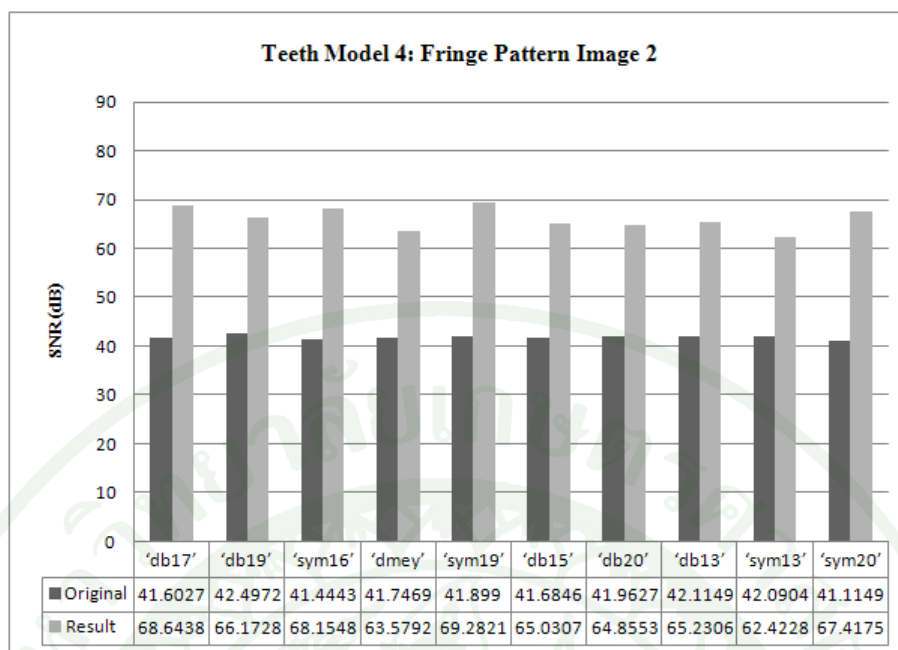
ภาพที่ 68 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 3



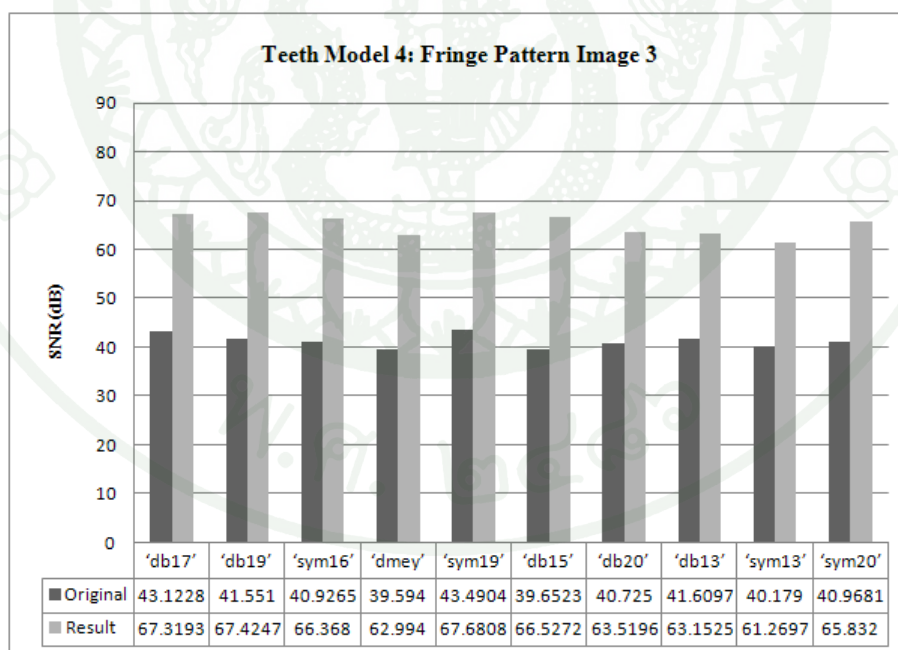
ภาพที่ 69 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 3



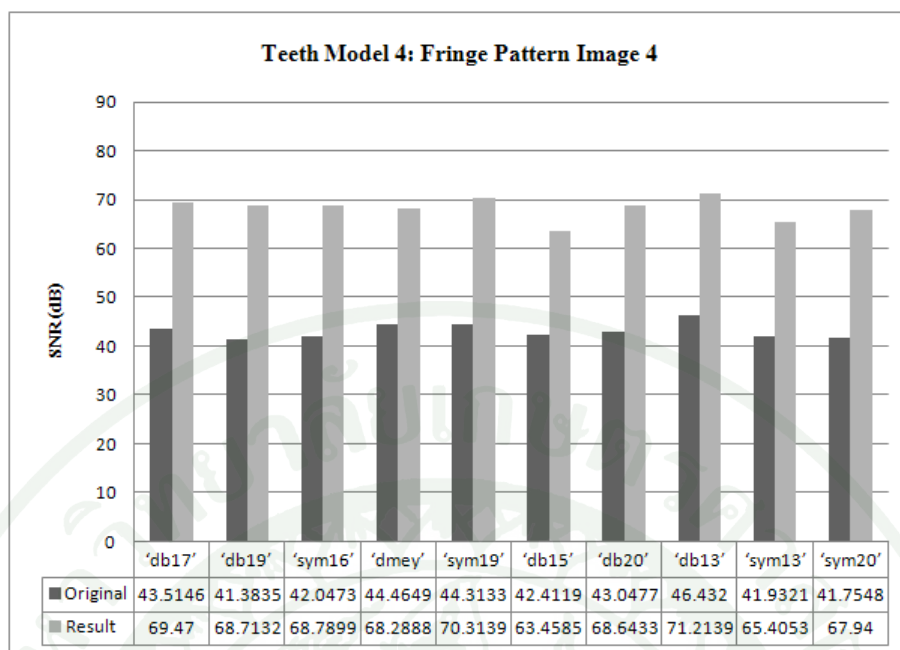
ภาพที่ 70 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 4



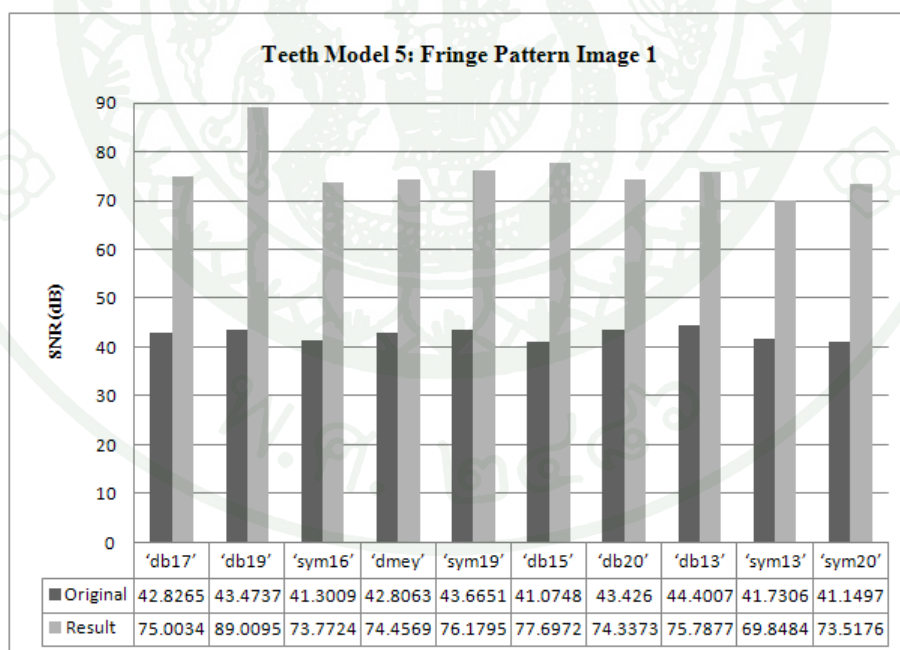
ภาพที่ 71 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวิแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 4



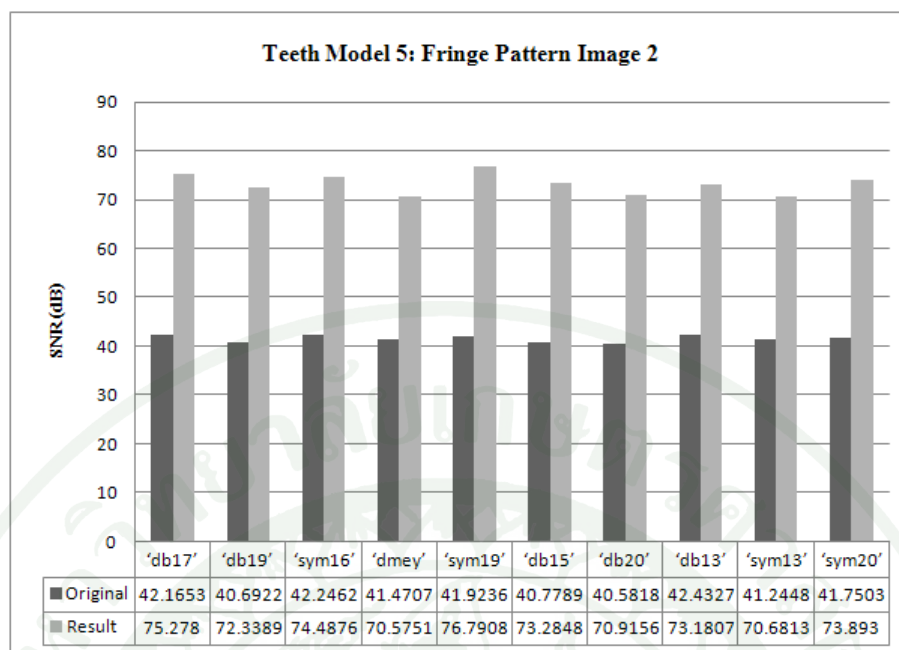
ภาพที่ 72 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพรีวิแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 4



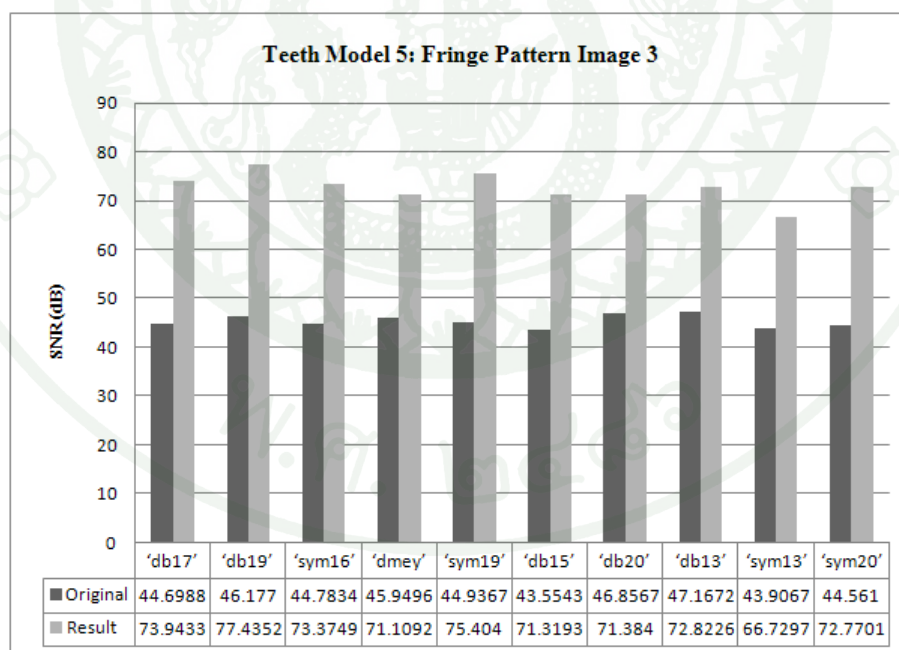
ภาพที่ 73 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 4



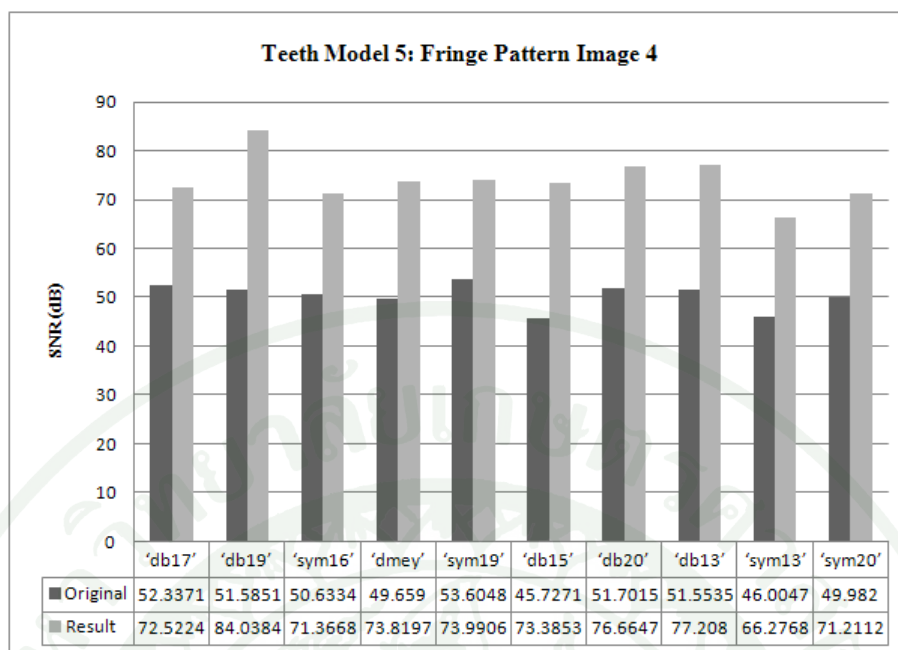
ภาพที่ 74 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 5



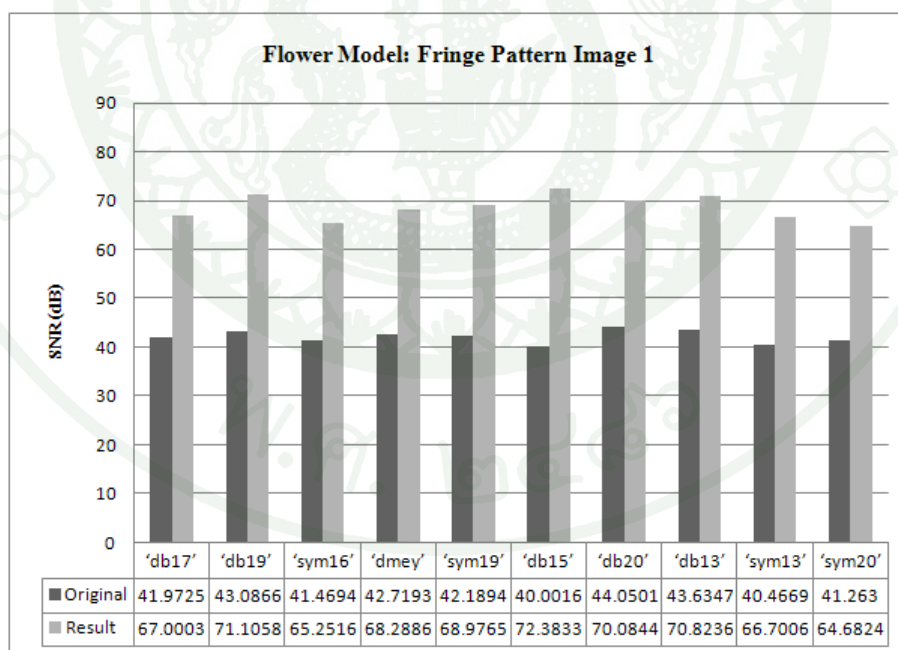
ภาพที่ 75 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 5



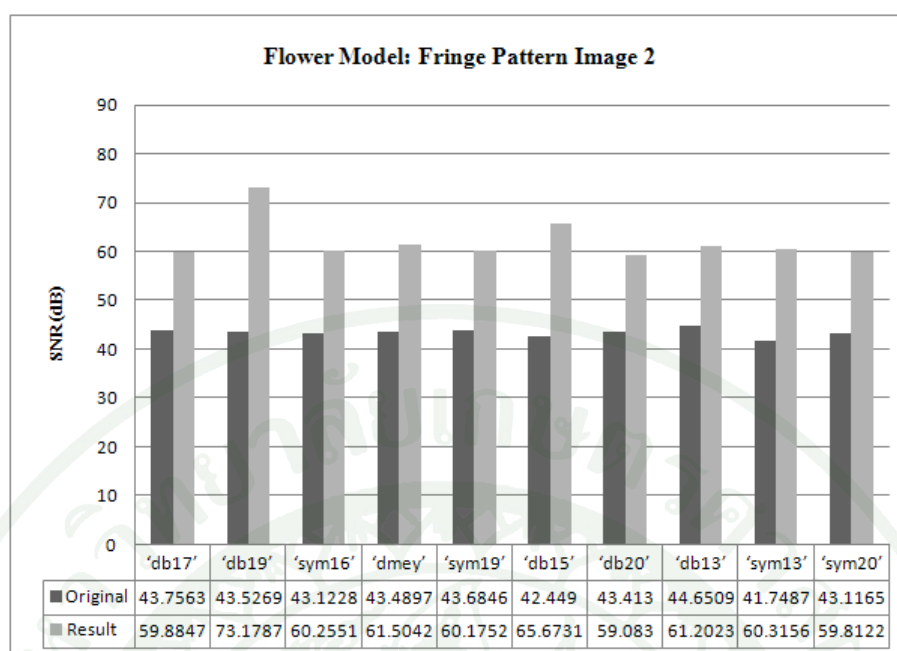
ภาพที่ 76 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 5



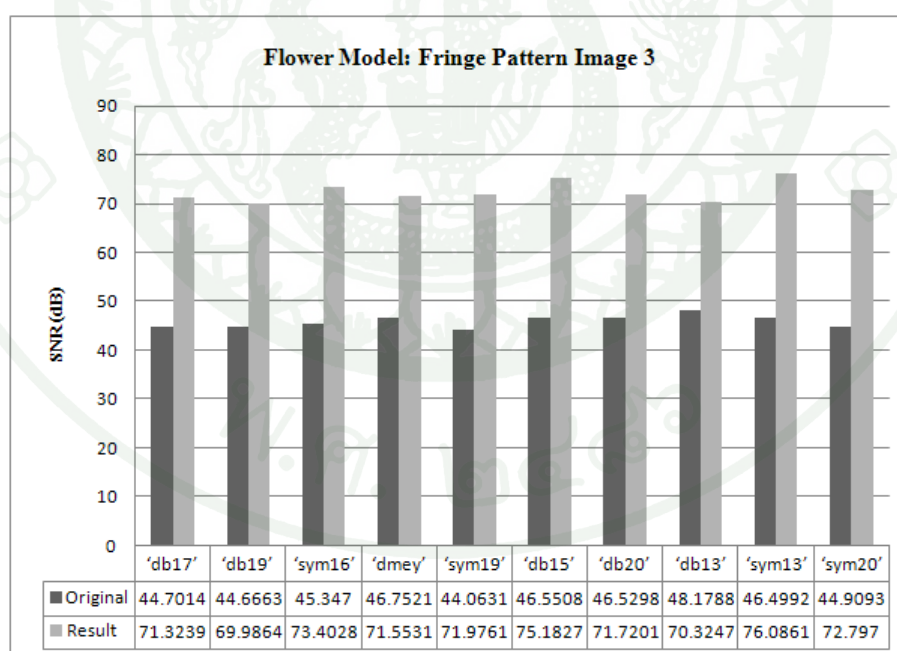
ภาพที่ 77 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปฟัน ชั้นที่ 5



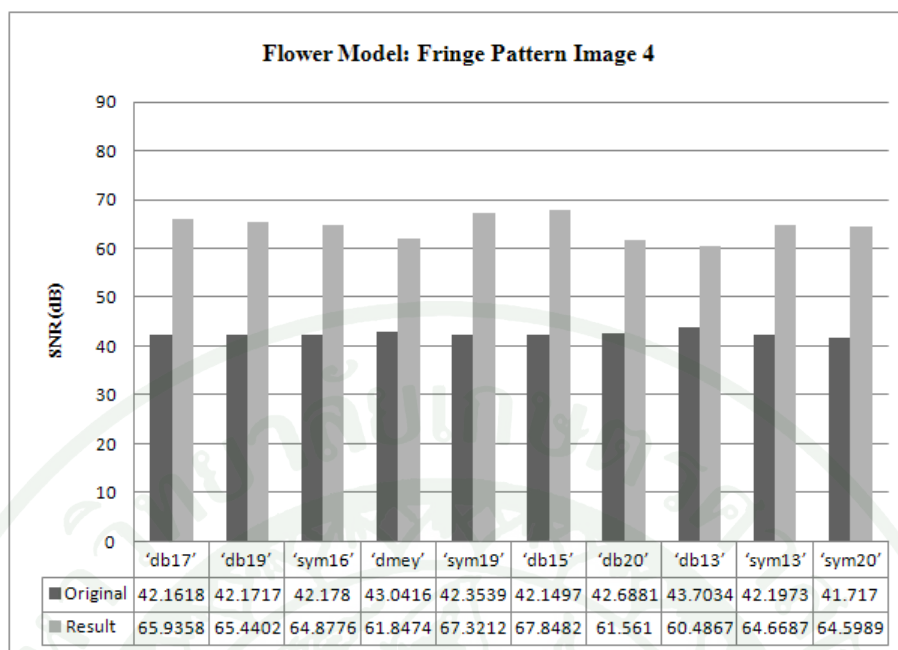
ภาพที่ 78 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 1 ของโมเดลรูปดอกไม้



ภาพที่ 79 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 2 ของโมเดลรูปดอกไม้



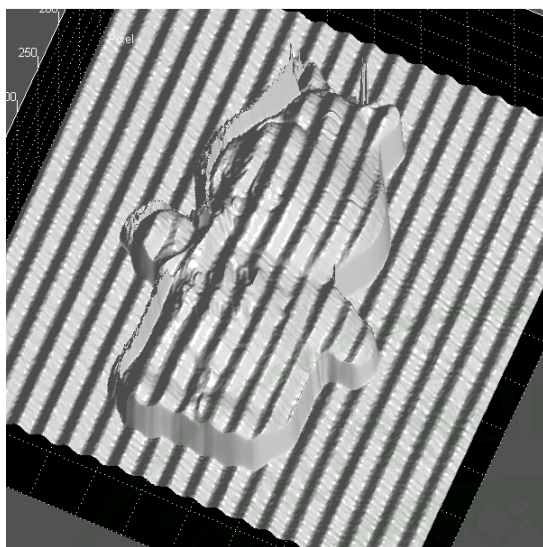
ภาพที่ 80 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 3 ของโมเดลรูปดอกไม้



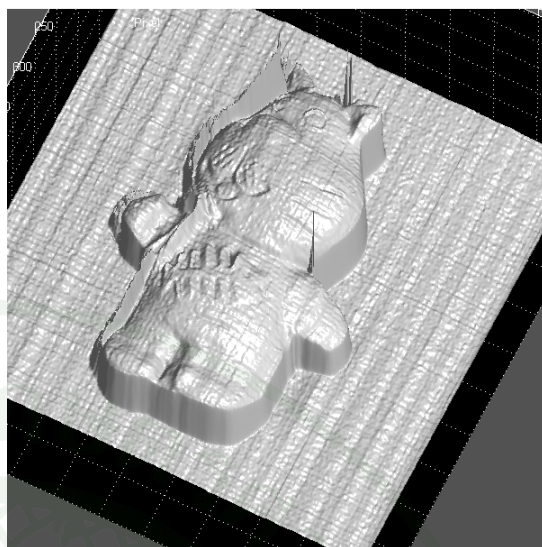
ภาพที่ 81 การเปรียบเทียบค่า SNR ระหว่างภาพต้นฉบับและผลลัพธ์ของภาพวีวแสง รูปแบบที่ 4 ของโมเดลรูปดอกไม้

2. ผลการแก้ไขปัญหาแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma)

การแก้ไขปัญหาแกมมาไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยใช้โมเดลบนพลาสติกจำนวน 9 ชั้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ถัดมาจากการแก้ไขปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟกต์ด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmev' แสดงดังภาพที่ 82 ถึง 90 เป็นข้อมูลภาพสามมิติก่อนการแก้ไขจะมีลักษณะเป็นริ้วคลื่นบนบึงพื้นผิวและรูปร่างของวัตถุ เมื่อทำการแก้ไขแล้วได้ข้อมูลภาพสามมิติที่สมจริง ริ้วคลื่นหายไป พื้นผิวและรูปร่างของวัตถุจริงๆ ปรากฏขึ้น และผลการคำนวณค่าช่วงของพื้นผิวข้อมูลภาพสามมิติทั้งก่อนและหลังการแก้ไขด้วยตัวกรองช่วง (Range Filter) แสดงดังภาพที่ 91 จะเห็นว่าค่าช่วงของพื้นผิวภาพสามมิติหลังแก้ไขมีค่าน้อยกว่าค่าช่วงของพื้นผิวภาพสามมิติก่อนแก้ไข

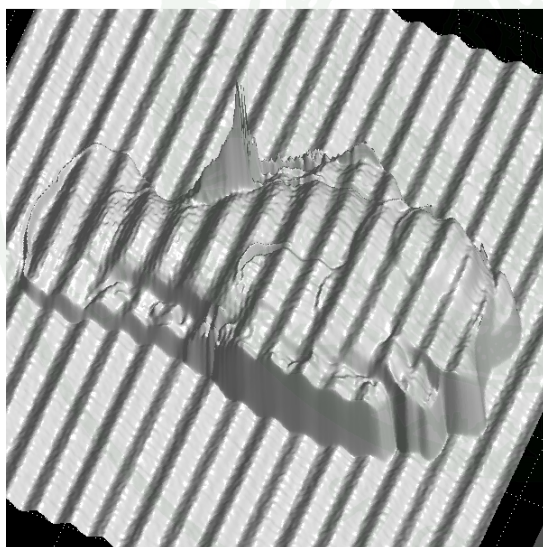


(ก) ภาพก่อน

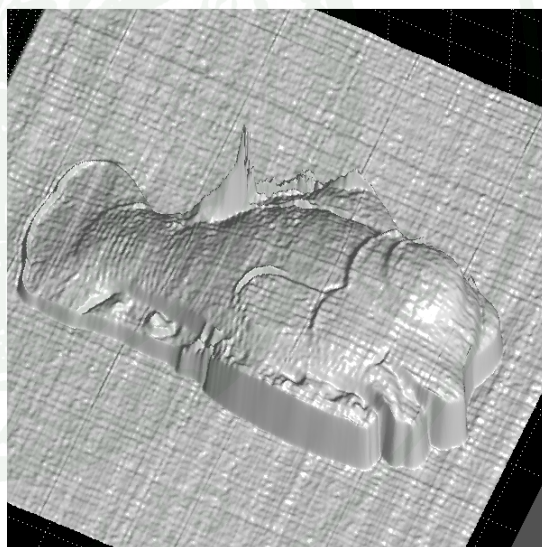


(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 82 ภาพสามมิติของโมเดลปูนปลาสเตอร์รูปแมว

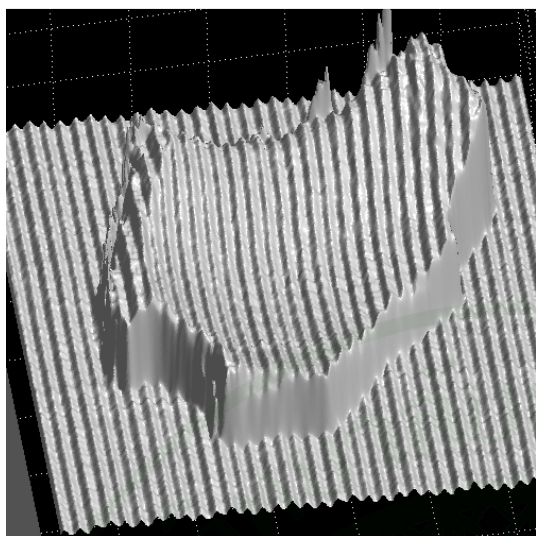


(ก) ภาพก่อน

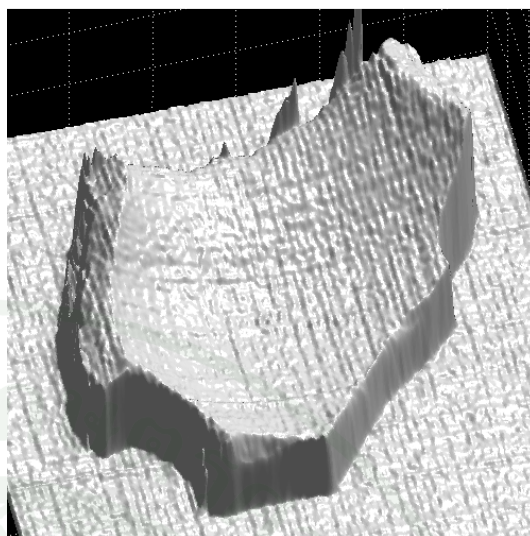


(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 83 ภาพสามมิติของโมเดลปูนปลาสเตอร์รูปปลา



(ก) ภาพก่อน

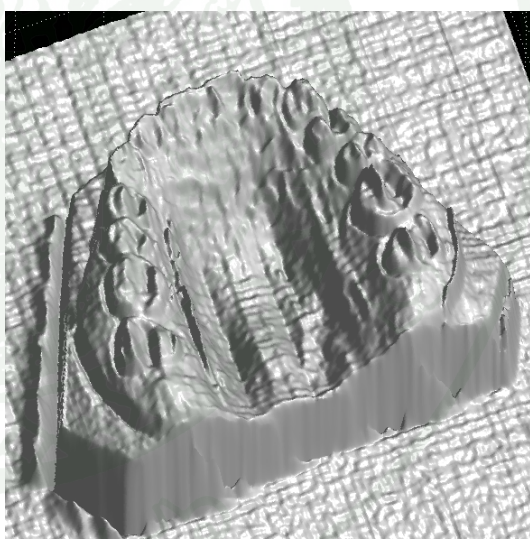


(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 84 ภาพสามมิติของโมเดลปูนปลาสเตอร์ส่วนโค้ง

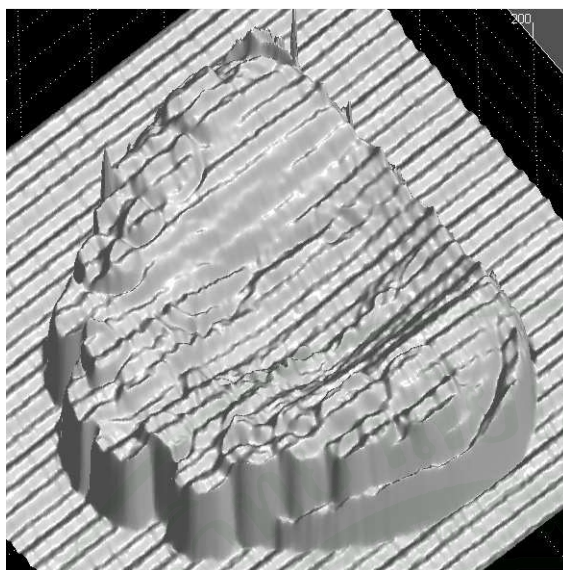


(ก) ภาพก่อน



(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 85 โมเดลฟันปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 1

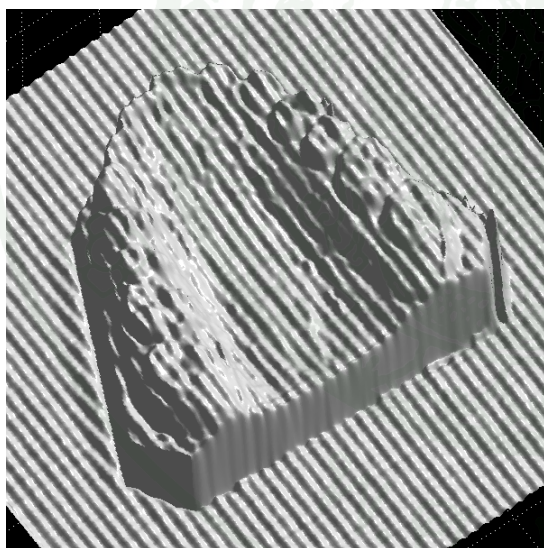


(ก) ภาพก่อน

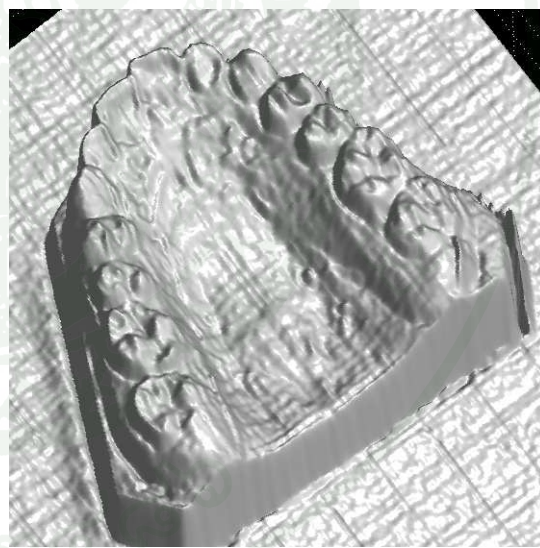


(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 86 โมเดลฟันปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 2

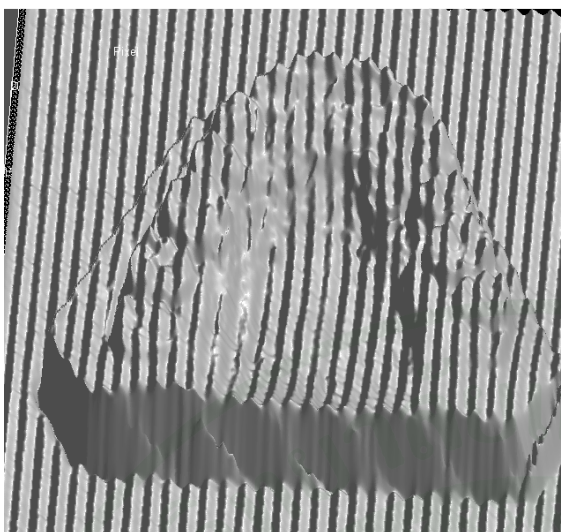


(ก) ภาพก่อน

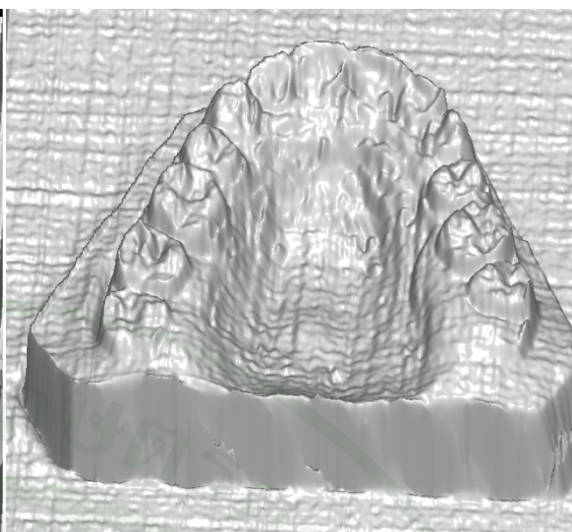


(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 87 โมเดลฟันปูนปลาสเตอร์ ชั้นที่ 3

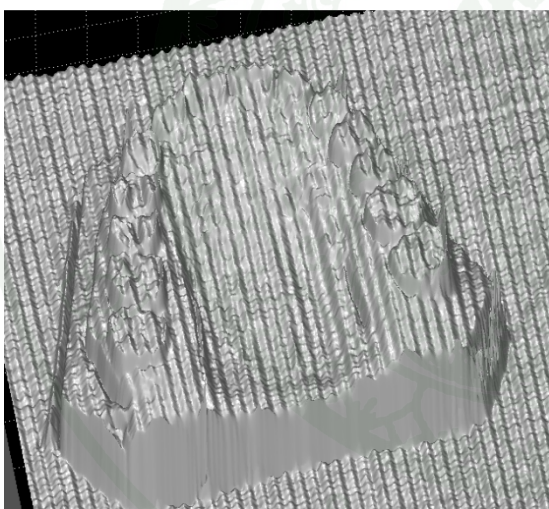


(ก) ภาพก่อน

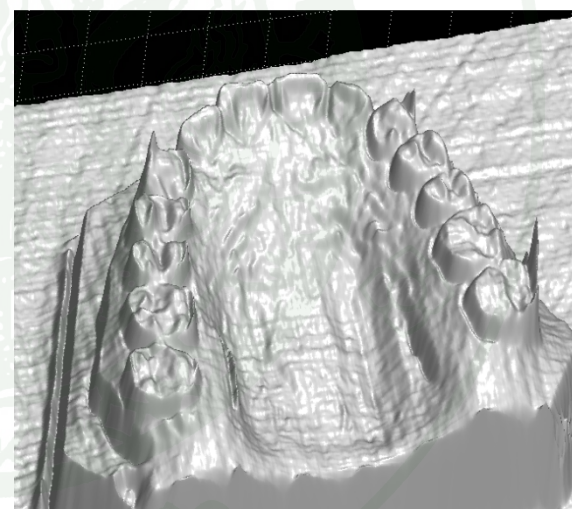


(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 88 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 4

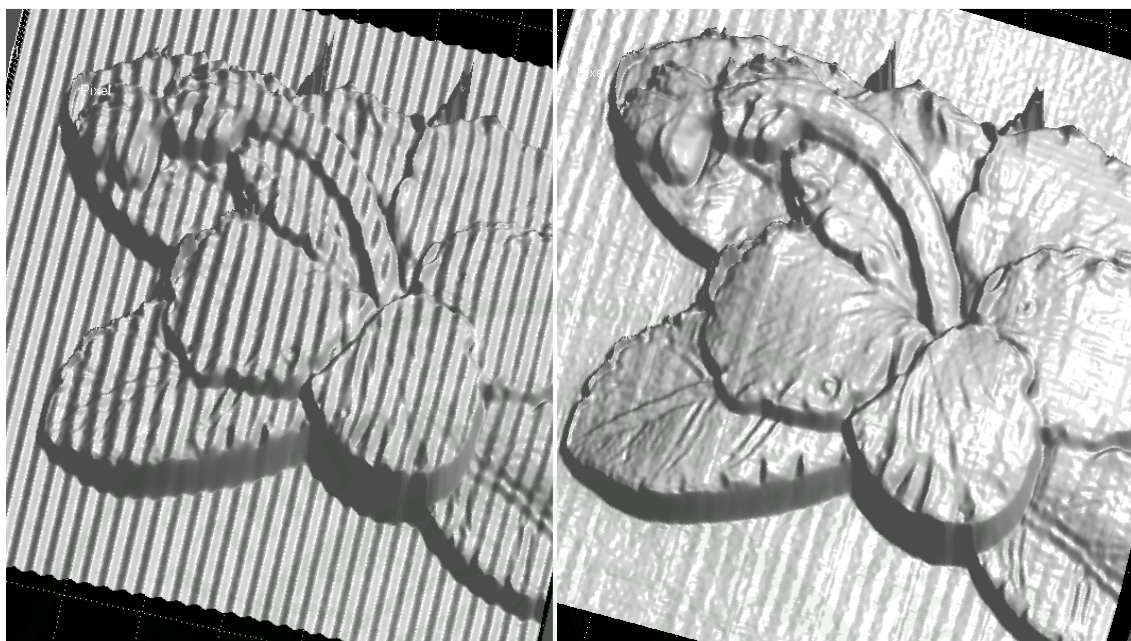


(ก) ภาพก่อน



(ข) ภาพหลัง

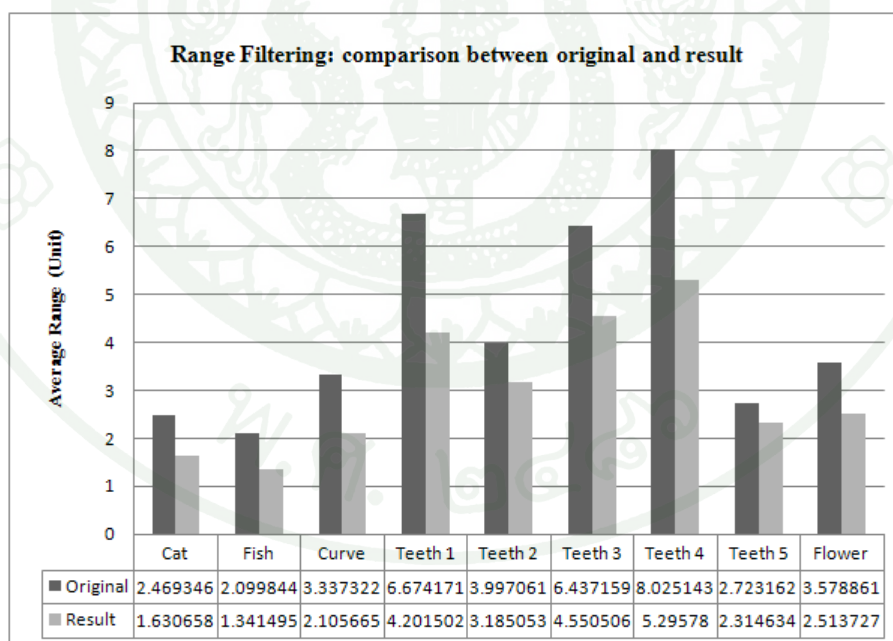
ภาพที่ 89 โมเดลฟันปูนพลาสติก ชั้นที่ 5



(ก) ภาพก่อน

(ข) ภาพหลัง

ภาพที่ 90 โมเดลปูนปลาสเตอร์รูปดอกไม้



ภาพที่ 91 การเปรียบเทียบค่าช่วงระหว่างภาพสามมิติต้นฉบับและผลลัพธ์

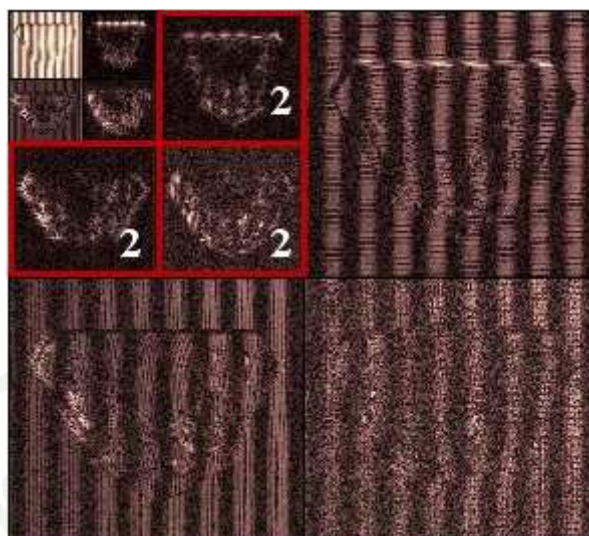
วิจารณ์

1. วิจารณ์ผลการแก้ไขปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟกต์ (Screen Door Effect)

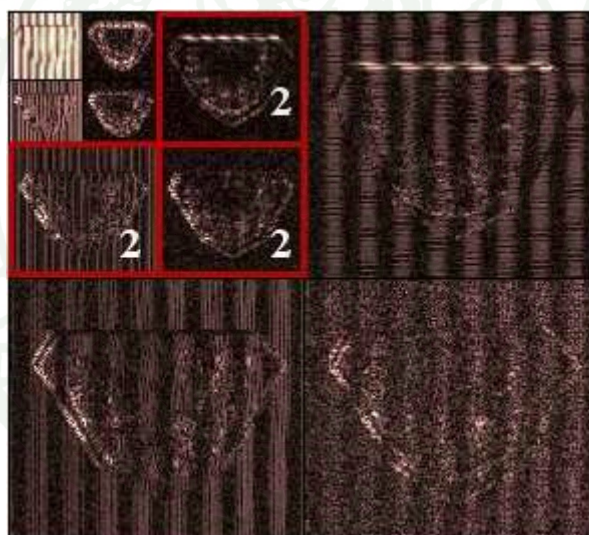
จากการทดลองเพื่อให้เกิดความชัดเจนยิ่งขึ้นว่าวิธีการนี้สามารถลบสัญญาณรบกวนดังกล่าวออกไปจากข้อมูลภาพได้ จึงได้นำข้อมูลภาพที่พบปัญหาดังกล่าวมาทำการแยกองค์ประกอบเป็น 3 ระดับด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmev' และ 'rbio3.3' ซึ่งข้อมูลที่ผ่านการแยกองค์ประกอบในระดับที่ 2 ของ 'rbio3.3' มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงกว่า 'dmev' กล่าวคือ ถ้าเวฟเลตฟังก์ชันนั้นๆ สามารถแยกสัญญาณรบกวนรายคาบออกไปได้ จะเห็นว่าในระดับที่ 2 ไม่มีข้อมูลของสัญญาณรบกวนรายคาบหลงเหลืออยู่ หรือนั่นก็คือมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยๆ แสดงดังภาพที่ 92 ในทางตรงข้ามถ้าเวฟเลตฟังก์ชันนั้นๆ ไม่สามารถแยกสัญญาณรบกวนออกไปได้ หมายความว่าในระดับที่ 2 มีสัญญาณหลงเหลืออยู่ แสดงดังภาพที่ 93 และได้้นำข้อมูลภาพที่ผ่านการลบสัญญาณรบกวนด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmev' และเวฟเลตฟังก์ชันตัวอื่นๆ ตามตารางที่ 4 มาทำการแปลงด้วยฟูเรียร์ เพื่อดูถึงลักษณะสเปกตรัมของข้อมูลภาพนั้นๆ ว่ายังมีสัญญาณรบกวนที่เป็นรายคาบหลงเหลืออยู่หรือไม่ แสดงดังภาพที่ 94 ภาพสเปกตรัมของภาพต้นฉบับมีลักษณะเป็นจุดสว่างสี่เหลี่ยม นั่นคือสัญญาณรบกวนรายคาบที่เกิดจากปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟกต์นั่นเอง พิจารณาภาพสเปกตรัมของเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmev' และ 'db15' พบว่าสามารถกรองสัญญาณรบกวนออกไปได้ดีเช่นกันและเมื่อพิจารณาถึงค่า SNR ของข้อมูลภาพรีวส์แสงแต่ละภาพก่อนการแก้ไขมีค่า SNR ของภาพแต่ละเวฟเลตฟังก์ชันทั้ง 10 ที่ใกล้เคียงกันและหลังการแก้ไขปัญหานี้ก็ให้ค่า SNR ของข้อมูลภาพที่ผ่านแต่ละเวฟเลตฟังก์ชันใกล้เคียงกันเช่นกัน ดังนั้นการกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวสามารถเลือกใช้เวฟเลตฟังก์ชันตัวไหนก็ได้ให้ผลไม่แตกต่างกัน

2. วิจารณ์ผลการแก้ไขปัญหาแกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma)

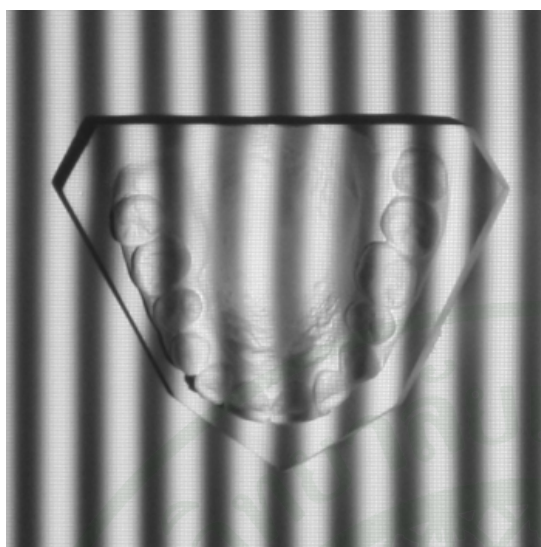
จากผลการทดลองพบว่าข้อมูลภาพสามมิติหลังการแก้ไขแตกต่างกับภาพสามมิติก่อนการแก้ไข โดยที่ภาพสามมิติที่ผ่านการแก้ไขแล้วมีลักษณะพื้นผิวภาพที่สมจริงและรีวส์ลื่นหายไป จากข้อมูลค่าช่วงเฉลี่ยดังภาพที่ 91 จะเห็นว่าข้อมูลภาพสามมิติก่อนการแก้ไขมีค่าสูงกว่าหลังการแก้ไขอยู่ระหว่าง 0.40 – 2.70 หน่วย เป็นการยืนยันได้ว่าข้อมูลภาพสามมิติที่ผ่านการแก้ไขปัญหาดังกล่าวมีพื้นผิวภาพที่เรียบขึ้นจริง อย่างไรก็ตามพื้นผิวข้อมูลภาพสามมิติควรปรับปรุงให้มีความราบเรียบเพิ่มขึ้น โดยรวมแล้วผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ



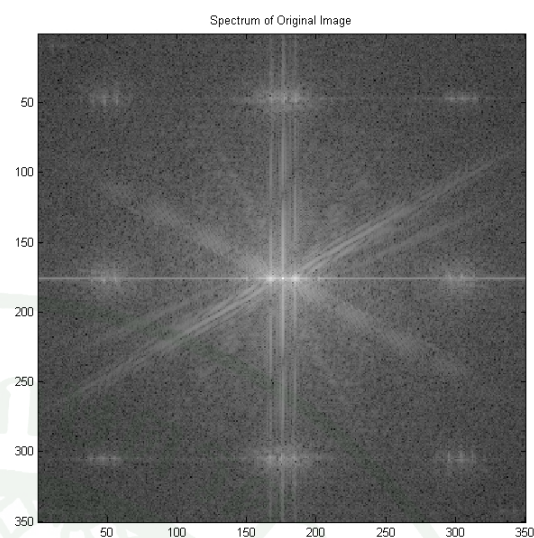
ภาพที่ 92 การแยกองค์ประกอบข้อมูลภาพด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmev' 3 ระดับ



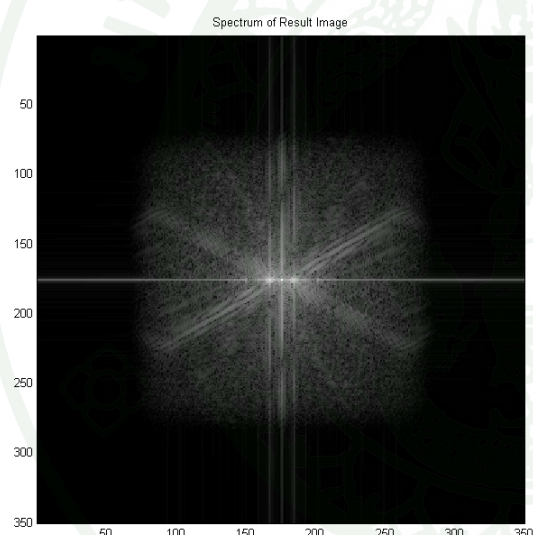
ภาพที่ 93 การแยกองค์ประกอบข้อมูลภาพด้วยเวฟเลตฟังก์ชัน 'rbio3.3' 3 ระดับ



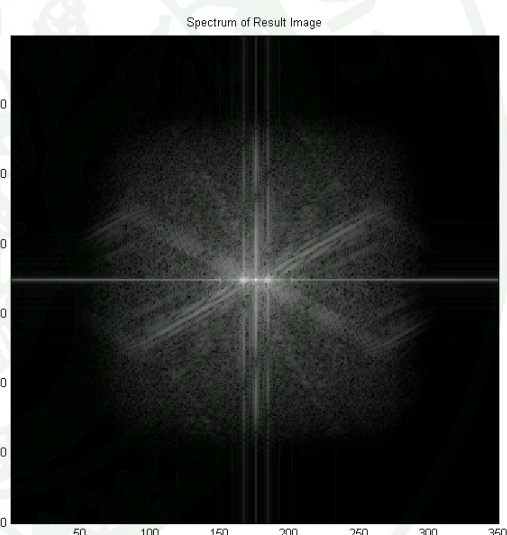
(ก) ข้อมูลภาพต้นฉบับที่มีสัญญาณรบกวน



(ข) ภาพสเปกตรัมของภาพต้นฉบับ



(ค) ภาพสเปกตรัมของภาพที่ผ่าน 'dmey'



(ง) ภาพสเปกตรัมของภาพที่ผ่าน 'db15'

ภาพที่ 94 ภาพสเปกตรัมของข้อมูลภาพที่ผ่านเวฟเลตฟังก์ชัน 'dmey' และ 'db15'

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการสำหรับแก้ไขปัญหาใน 2 ส่วน คือ ปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟค (Screen Door Effect) และปัญหาเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Gamma)

ปัญหาแรกได้นำเสนอวิธีการแก้ไขโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตสำหรับกำจัดสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะเป็นลายตารางอันเนื่องมาจากเกิดสกรีนดอร์เอฟเฟคของเครื่องฉายภาพผลึกเหลว และเวฟเล็ตฟังก์ชัน 'dmey' ที่เลือกใช้ สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนดังกล่าวออกไปได้ดี พร้อมทั้งทำการพิสูจน์ว่าสัญญาณรบกวนดังกล่าวถูกกำจัดออกไปได้ดี โดยนำข้อมูลภาพที่ผ่านเวฟเล็ตฟังก์ชันมาทำการแปลงฟูเรียร์และทำการพิจารณาสเปกตรัมของภาพเหล่านั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกระบวนการกำจัดสัญญาณรบกวนระหว่างการแปลงฟูเรียร์และการแปลงเวฟเล็ต จะเห็นว่าการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยการแปลงเวฟเล็ตมีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดด้วยการแปลงฟูเรียร์ แสดงดังตารางที่ 5 และรายละเอียดการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในส่วนถัดไป

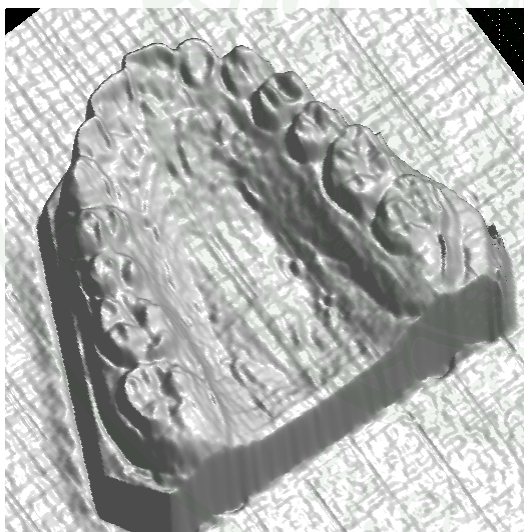
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบกระบวนการระหว่างการแปลงฟูเรียร์และการแปลงเวฟเล็ต

ลำดับ	การแปลงฟูเรียร์	การแปลงเวฟเล็ต
1.	ข้อมูลภาพที่เกิดสกรีนดอร์เอฟเฟค	ข้อมูลภาพที่เกิดสกรีนดอร์เอฟเฟค
2.	นำข้อมูลภาพด้วยการแปลงฟูเรียร์ได้ภาพสเปกตรัม	นำข้อมูลภาพด้วยการแปลงเวฟเล็ตได้ภาพรายละเอียดหลายระดับ
3.	สังเกตภาพสเปกตรัม และสร้างหน้ากากกรองความถี่ของสัญญาณรบกวนรายคาบ	เลือกค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณรบกวนรายคาบที่อยู่ในระดับที่ 1
4.	แปลงข้อมูลกลับและได้ภาพผลลัพธ์	แปลงข้อมูลกลับและได้ภาพผลลัพธ์

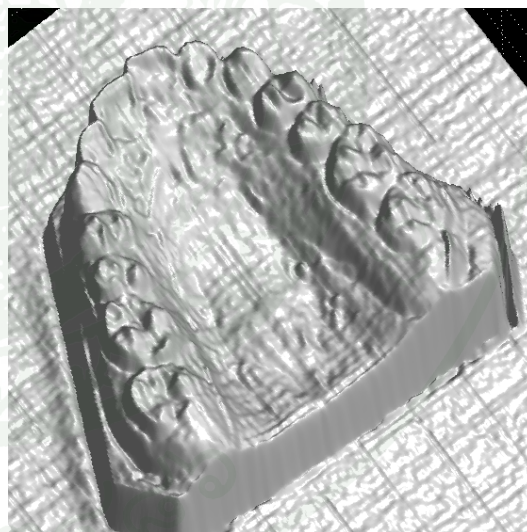
จากตารางที่ 5 การแปลงฟูเรียร์ใช้การแทนข้อมูล (Data Representation) โดยการแสดงผลภาพสเปกตรัมของภาพที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมสีขาว จากนั้นทำการออกแบบตัวกรองแถบ (Band Reject Filter) นำมาทำการคอนโวลูชัน (Convolution) กับภาพสเปกตรัมและทำการแปลงฟูเรียร์กลับเพื่อสร้างเป็นภาพผลลัพธ์ ในลำดับของการออกแบบตัวกรองแถบนั้นไม่รับประกันว่าจะสามารถกรองสัญญาณรบกวนรายคาบออกไปได้ดี

การแปลงเวฟเล็ตใช้การแทนข้อมูล (Data Representation) โดยการแสดงผลภาพด้วยความละเอียดหลายระดับ (Multiresolution) และสังเกตค่าสัมประสิทธิ์ในระดับต่างๆ ซึ่งระดับที่มีสัญญาณรบกวนรายคาบอยู่คือระดับที่ 1 ทำให้สามารถลบค่าสัมประสิทธิ์ของสัญญาณรบกวนส่วนนี้ออกไปได้ง่ายและรับประกันว่าสามารถกรองสัญญาณรบกวนรายคาบออกไปได้ดี เพราะสังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์ในระดับที่ 2 จะเห็นว่าไม่มีสัญญาณรบกวนดังกล่าวหลงเหลืออยู่และสุดท้ายทำการแปลงเวฟเล็ตกลับเพื่อสร้างเป็นภาพผลลัพธ์ เปรียบเทียบภาพสามมิติระหว่างภาพที่แก้ไขด้วยการแปลงฟูเรียร์และการแปลงเวฟเล็ต จะเห็นว่าได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน แสดงดังภาพที่ 95

เมื่อความกว้างของริ้วแสงเปลี่ยนไป การแปลงฟูเรียร์จะต้องออกแบบหน้าต่างตัวกรองใหม่เสมอ เพราะขนาดสี่เหลี่ยมที่ปรากฏในภาพสเปกตรัมจะมีลักษณะเฉพาะตัวเปลี่ยนไปตามความกว้างของริ้วแสง แสดงดังภาพที่ 96 แต่การแปลงเวฟเล็ตไม่ว่าจะเปลี่ยนความกว้างริ้วแสงขนาดใดก็ตามไม่ต้องออกแบบหน้าต่างตัวกรองใหม่หรือเลือกใช้ฟังก์ชันเวฟเล็ตตัวใหม่ ซึ่งการแปลงเวฟเล็ตมีลักษณะทั่วไป (Generalization) มากกว่าการแปลงฟูเรียร์

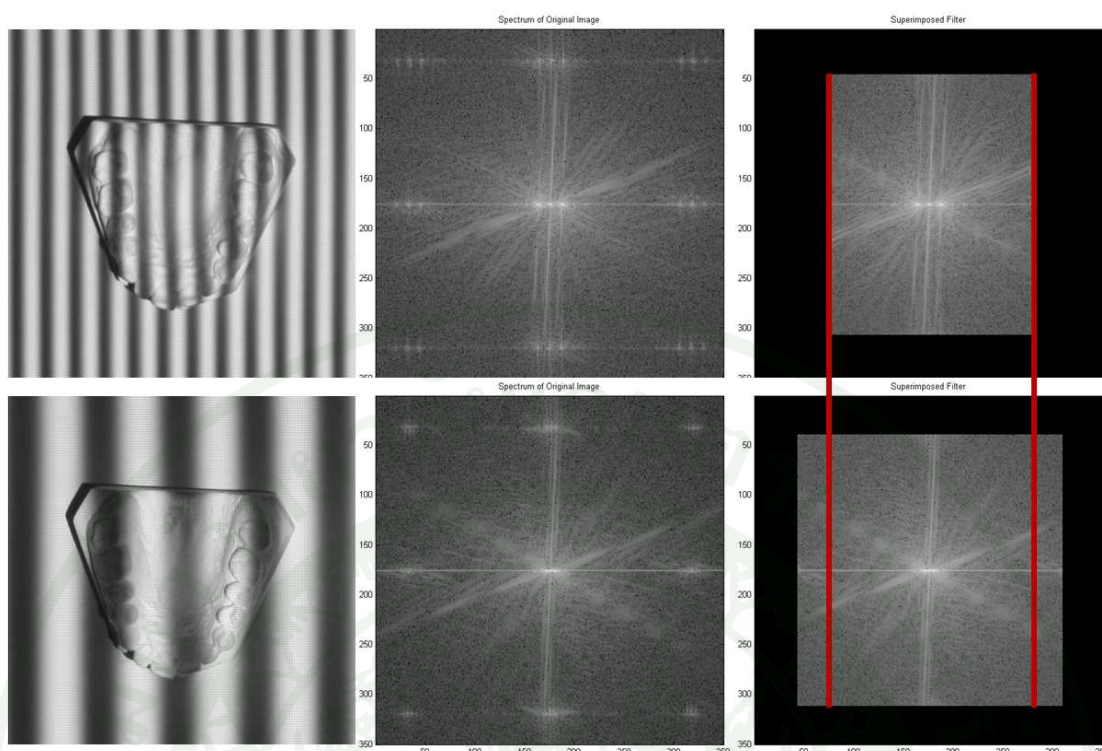


(ก)



(ข)

ภาพที่ 95 การเปรียบเทียบภาพสามมิติที่แก้ไขโดย (ก) การแปลงฟูเรียร์ (ข) การแปลงเวฟเล็ต



ภาพที่ 96 หน้ากากตัวกรองความถี่เปลี่ยนไปตามความกว้างของริ้วแสง

ดังนั้นทั้งงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับเลนส์ให้อยู่ในจุดโฟกัส (Focus) ซึ่งปรับได้ง่ายกว่าการทำการเลื่อนออกจากจุดโฟกัส (Defocus) โดยอาศัยการสังเกตเห็นลายตาข่ายของสกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์ (Screen Door Effect) ที่ชัดเจน วิธีการนี้ทำให้ภาพริ้วแสงมีความคมชัดไม่เบลอ แต่ข้อมูลภาพริ้วแสงที่บันทึกมาได้มีลายตาข่ายแทรกซ้อนอยู่ ซึ่งวิธีการแปลงเวฟเล็ดที่ได้นำเสนอสำหรับปรับปรุงภาพริ้วแสงให้ผลลัพธ์ภาพที่ดีขึ้นจริง และเมื่อทราบถึงเวฟเล็ดฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์แล้วสามารถนำไปออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อให้มีความยืดหยุ่นและประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ปัญหาที่สองได้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฟสจริง (Real Phase) กับค่าเฟสในอุดมคติ (Ideal Phase) ซึ่งค่าเฟสจริงได้มาจากการเลือกพื้นที่สนใจบนข้อมูลภาพที่ผ่านการแก้ค่าเฟสที่ถูกต้องแล้ว และนำค่าเหล่านั้นมาทำการคำนวณหาความกว้างของริ้วแสง และทำการเตรียมตารางค้นหา (Look-up Table) ของค่าเฟสในอุดมคติโดยคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์ นำค่าความกว้างของค่าเฟสจริงมาค้นหาในตารางค้นหาดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าเฟสในอุดมคติอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำมาหาค่าความต่างและสร้างตารางค้นหาสำหรับใช้ชดเชยค่าเฟสอันเนื่องมาจากปัญหเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น นำตารางที่ได้นี้ไปใช้

ชดเชยกับค่าเฟสจริงจะได้ภาพสามมิติที่ไม่มีลูกคลื่นรบกวนและได้พื้นผิวภาพจริงกลับคืนมา การทดลองในงานวิจัยนี้ได้แสดงภาพสามมิติก่อนและหลังการแก้ไขด้วยวิธีดังกล่าว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ดี ทำให้ได้ภาพสามมิติที่สมจริงยิ่งขึ้น และได้ทำการพิสูจน์ความราบเรียบของพื้นผิวด้วยตัวกรองช่วง ค่าที่ได้สอดคล้องกับผลภาพที่มองเห็น

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีโดยอาศัยเทคนิคการเก็บข้อมูลภาพ กล่าวคือ ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพให้เก็บข้อมูลที่มีบริเวณของวัตถุที่สนใจและบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบ โดยมองว่าข้อมูลภาพเป็นภาพที่สมบูรณ์คือภาพไม่มีการบิดเบือน จากนั้นเลือกข้อมูลภาพของบริเวณพื้นหลังที่เป็นระนาบในแนวแกน y ของภาพมาทำการคำนวณตามขั้นตอนวิธีที่ได้ออกแบบโดยใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าเฟสจริงที่ได้จากการถ่ายภาพในห้องทดลองกับค่าเฟสในอุดมคติที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี เพื่อให้ได้มาซึ่งชุดข้อมูลของค่าความต่างของค่าเฟสของข้อมูลชุดนั้นๆ จากนั้นนำไปใช้ในการชดเชยกับค่าเฟสจริงของข้อมูลชุดดังกล่าว ซึ่งวิธีการนี้ง่ายและสะดวกต่อการประยุกต์ใช้งานและยังไม่ต้องทำการปรับแต่งค่าเกมมาของเครื่องฉายภาพผลึกเหลว (LCD Projector) และยังไม่ขึ้นกับเครื่องฉายภาพดิจิทัลและกล้องดิจิทัล อีกทั้งวิธีการนี้ทำการคำนวณเป็นแบบออนไลน์ (Online Processing) เวลาที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละขั้นตอนแสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งใช้ข้อมูลภาพขนาด 660 x 586 พิกเซล เป็นข้อมูลภาพที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่ใช้ในการทดลอง เวลารวมที่ใช้ไปทั้งหมด คือ 49.999 วินาทีหรือประมาณ 50 วินาที

ตารางที่ 6 สรุปเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละขั้นตอน

ลำดับ	ขั้นตอนวิธี	เวลาที่ใช้ (วินาที)
1.	การแก้ปัญหาสกรีนคอร์เอฟเฟค	2.499
2.	วิเคราะห์ภาพรีวแสง	0.047
3.	การตรวจแก้ค่าเฟส	0.313
4.	การแก้ปัญหเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น	1.297
5.	การคลี่เฟส	44.609
6.	การลบสัญญาณพาหะ	1.234

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้แก้ไขปัญหาคู่ 2 ส่วน ซึ่งมีความสัมพันธ์กันโดยข้อมูลภาพมีความไม่เหมาะสมเพราะถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนรายคาบ จึงต้องทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวก่อนเข้าสู่กระบวนการถัดไป จากนั้นจะเห็นว่าข้อมูลภาพสามมิติถูกรบกวนด้วยรบกวนอื่นเนื่องมาจากปัญหาเกมมาไม่เชิงเส้น

ส่วนแรกการแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์ ทำให้ทราบถึงเวฟเลตฟังก์ชันที่เหมาะสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบฟิลเตอร์ (Filter) สำหรับแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ คือ เมื่อได้ทราบถึงเวฟเลตฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมแล้ว ก็จะสามารถศึกษาถึงลักษณะเฉพาะตัวหรือธรรมชาติของสัญญาณรบกวนนั้นๆ ได้ เพื่อนำไปทำการออกแบบด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ต่อไป

ส่วนที่สองการแก้ไขปัญหเกมมาไม่เชิงเส้น เป็นขั้นตอนถัดมาจากการปรับแก้ข้อมูลภาพ พบว่าพื้นผิวข้อมูลภาพสามมิติยังไม่ราบเรียบอยู่พอสมควร ควรจะปรับปรุงแก้ไขต่อไป โดยทำการประมาณค่าพื้นผิวด้วยหลักการ Interpolation ในแบบต่างๆ เพื่อให้พื้นผิวมีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น หรืออีกทางหนึ่งเนื่องจากการแก้ไขปัญหาสกรีนคอร์ดเอฟเฟกต์ก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นการทำแบบ Hard Thresholding ก็เปลี่ยนมาเป็นการทำแบบ Soft Thresholding แทน และนำข้อมูลภาพมาทำการ Interpolation ต่อไป อาจจะทำให้ข้อมูลภาพสามมิติมีความราบเรียบขึ้นและเมื่อสังเกตต่อไปพบว่าพื้นผิวภาพสามมิติยังมีลักษณะเป็นริ้วคลื่นตกค้างอยู่เล็กน้อย อาจเกิดจากการเลือกข้อมูล (Sampling) ในส่วนของการเลือกเส้นที่สนใจยังไม่มากพอ ซึ่งในการเลือกข้อมูลควรจะเลือกเป็น 2 เท่าของริ้วแสงตามทฤษฎีของแชนนอน (Shannon's Theory) ตัวอย่างเช่น ข้อมูลภาพริ้วแสงที่บันทึกมามีริ้วแสงปรากฏอยู่ 5 ริ้วแสง ฉะนั้นจะต้องทำการเลือกข้อมูลมาจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ข้อมูลด้วยหลักการนี้จะทำให้ริ้วคลื่นที่ตกค้างอยู่จะลดลงเพราะมีการเลือกข้อมูลที่เพียงพอสำหรับใช้สร้างโครงสร้างตารางค้นหาที่ใช้หาค่าเฟส

สุดท้ายในการเลือกใช้ภาพริ้วแสงที่มีความกว้างของริ้วแสงแตกต่างกันนั้นจะทำให้ได้รายละเอียดของข้อมูลภาพสามมิติที่ต่างกัน ยิ่งความกว้างของริ้วแสงน้อยๆ จะได้รายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ที่ดี และยิ่งความกว้างของริ้วแสงมากๆ จะได้รายละเอียดแบบหยาบๆ เมื่อนำข้อมูลภาพสามมิติที่เกิดจากความกว้างริ้วแสงต่างๆ มาทำการขึ้นรูปเป็นภาพสามมิติ และนำข้อมูลเหล่านั้นมารวมกันหรือเรียกว่าการทำ Multiresolution โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของ Image Fusion อาจจะทำ

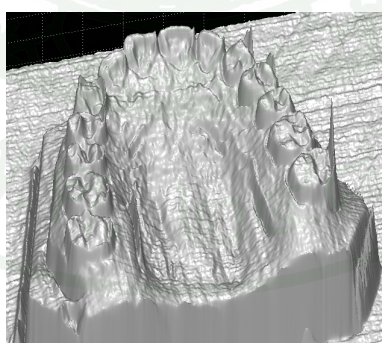
ให้ได้ภาพสามมิติที่มีรายละเอียดสูงขึ้น การทดลองเบื้องต้นได้นำค่าเฟสของภาพรีวแสงขนาดต่างๆ มาทำการหาค่าเฉลี่ย และแสดงเป็นภาพสามมิติ ดังภาพที่ 97



(ก) ภาพรีวแสงที่มีขนาดต่างกัน



(ข) ภาพค่าเฟสของภาพรีวแสงที่มีขนาดต่างกัน

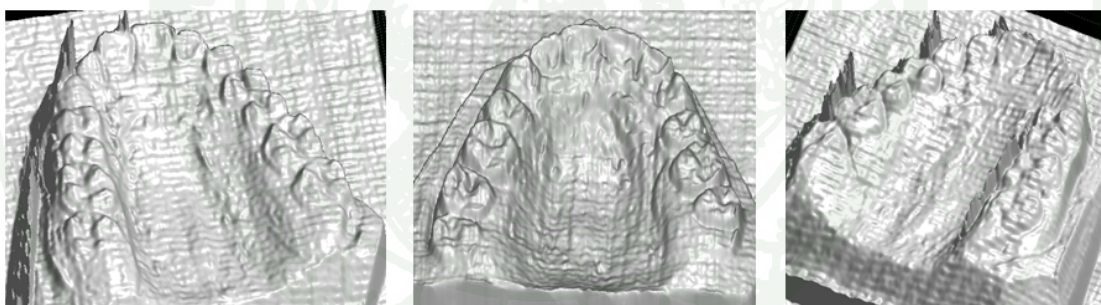


(ค) ภาพสามมิติผ่านการทำ Image Fusion

ภาพที่ 97 ภาพสามมิติที่ได้จากค่าเฟสหลายระดับ (Multiresolution)

สำหรับงานในอนาคต การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถพัฒนาต่อยอดได้ด้วยหลายภาษา อาทิเช่น ภาษาซี ซึ่งมีไลบรารีที่เป็นโอเพ่นซอร์ส (Open Source) ให้เลือกใช้มากมาย เช่น OpenCV เป็นไลบรารีสำหรับคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ในการพัฒนาต่อยอดจะใช้ฟังก์ชันของไลบรารีนี้สำหรับรับข้อมูลภาพนำเข้าและบันทึกข้อมูลภาพในรูปแบบ (Format) ต่างๆ ได้ เป็นไลบรารีที่มีความนิยมและมีมาตรฐานที่ใช้กันทั่วโลก GNU Scientific Library (GSL) เป็นไลบรารีสำหรับการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ เลือกใช้ฟังก์ชันการคำนวณ Discrete Wavelet Transform เพื่อการปรับปรุงภาพที่เกิดปัญหาสกรีนดอร์เอฟเฟกและ Spline Technique สำหรับเติมเต็มข้อมูลในช่วงค่าหนึ่งๆ ตามที่ต้องการ ในการสร้างภาพสามมิติ สามารถเลือกใช้ Gnuplot ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับการวาดกราฟทั้งในสองมิติและสามมิติ

ในส่วนของการสร้างภาพสามมิติ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลภาพเพียงหนึ่งมุมมอง ซึ่งงานในอนาคตที่จะทำต่อไป คือ การถ่ายภาพหลายมุมมองและนำมาทำการรวมกันในสามมิติ เพื่อให้ได้วัตถุสามมิติที่เป็นรูปทรงสมบูรณ์ขึ้น การทดลองเบื้องต้นของการถ่ายภาพหลายมุมมอง แสดงดังภาพที่ 98



ภาพที่ 98 ภาพสามมิติในหลายมุมมอง

ส่วนงานในอนาคตของการแก้ไขปัญหาเกมมาไม่เป็นเชิงเส้น คือ จากภาพสเปคตรัมของข้อมูลภาพที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนหรือสกรีนดอร์เอฟเฟก พบว่าตรงกลางภาพมีจุดอยู่สองจุด ซึ่งโดยปกติจะเป็นจุดสีขาวเพียงจุดเดียวที่เป็นค่าความถี่ต่ำ จึงเป็นที่น่าสังเกตว่าจุดเหล่านั้นจะมีส่วนปลอมปนของความถี่ที่เป็นของค่าเกมมาที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่หรือไม่ และสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตหรือไม่ จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและควรศึกษาต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ศศิน เทียนดี, น้ำฝน มั่งไคร้ และ ประวีร์รัชย์ ถิ่นสุราษฎร์. พ.ศ. 2549. การศึกษาวิธีการ
ตรวจสอบรูปทรงของวัตถุสามมิติด้วยเส้นของแสง. ปรินูญานิพนธ์, มหาวิทยาลัย
กรุงเทพ.

ศศิน เทียนดี, จเร เลิศสุดวิชัย, ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ จันทร์จิรา สีนทะโยชิน. 2553ก.
หลักวิธีการปรับปรุงและวิเคราะห์ภาพสำหรับการฉายแสดงผล, น. 34-39. ใน **The 7th
International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering
(JCSSE 2010)** .

ศศิน เทียนดี, จเร เลิศสุดวิชัย, ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร และ จันทร์จิรา สีนทะโยชิน. 2553ข.
หลักวิธีการลดผลกระทบสกรีนคอร์ดสำหรับเทคนิคการฉายวีวแสดงดิจิทัล, น. 284 - 288.
ใน **NECTEC Annual Conference & Exhibition 2010 (NECTEC-ACE 2010)** .

Baker, M. J., Jiangtao Xi, Joe Chicharo and Enbang Li. 2005. A contrast between DLP and
LCD digital projection technology for triangulation based phase measuring optical
profilometers. **Proceedings of the SPIE** 2005 (Volume 6000): 151-162.

Baker, M. J., J. Xi and J. F. Chicharo. 2008. Elimination of gamma Non-linear Luminance
Effects for Digital Video Projection Phase Measuring Profilometers, pp. 496-501. In
4th IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications .

Bradski, Gary and Adrian Kaehler. 2008. **Learning OpenCV**. First ed. O'Reilly, United States
of America.

Gokturk, S. Burak, Yalcin Hakan and Bamji Cyrus. 2004. A Time-Of-Flight Depth Sensor -
System Description, Issues and Solutions, pp. 35-43. In **Proceedings of the 2004
Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'04)
Volume 3** .

Gonzalez, Rafael C. and Richard E. Woods. 2002. **Digital Image Processing**. 2 ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey .

Guo, Hongwei, Haitao He and Mingyi Chen. 2004. Gamma Correction for Digital Fringe Projection. **Applied Optics** 2004 (Vol. 43, Issue 14): 2906-2914.

Hsieh, Yi-Chih. 2001. Decoding structured light patterns for three-dimensional imaging systems. **Pattern Recognition** (Volume 34, Issue 2): 343-349.

Kreiser, Kevin and Jingyi Yu. 2008. Real-time Projector Depixelation for Videos, *In* **Proceedings of Computer Graphics International (CGI 2008)** .

Mattoccia Stefano. 2010. **Stereo Vision: Algorithms and Applications**. Available Source: <http://www.vision.deis.unibo.it/smatt/Seminars/StereoVision.pdf>. May 17, 2010.

Miao, H., C. Quan, C.J. Tay, Y. Fu and X.P. Wu. 2005. Optical edge projection for surface contouring. **Optics Communications** (Volume 256, Issues 1-3): 16-23.

Quan, C., W. Chen and C. J. Tay. 2010. Phase-retrieval techniques in fringe-projection profilometry. **Optics and Lasers in Engineering** 2010 (48): 235-243.

Quan, C., X. Y. He, C. F. Wang, C. J. Tay and H. M. Shang. 2001. Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting. **Optics Communications** (Volume 189, Issues 1-3): 21-29.

Schreiber, Horst and John H. Bruning. 2007. Phase Shifting Interferometry, p. 547 – 665. *In* Daniel Malacara, ed. **Optical Shop Testing**. Wiley, New York.

- Skocaj, D. and Leonardis, A. 2000. Range Image Acquisition of Objects with Non-Uniform Albedo Using Structured Light Range Sensor, pp. 778 - 781. *In Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on* .
- The MathWorks, Inc. **Analyzing the Texture of an Image**. Available Source: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/fl1-27972.html>. 2010.
- Tiendee, Sasin and Charay Lersudwichai. 2010a. Depixelation Artifact for Digital Fringe Projection, pp. 458-461. *In The 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2010)* .
- Tiendee, Sasin, Charay Lersudwichai, Sarun Sumriddetchkajorn and Chanjira Sinthanayothin. 2010b. Algorithm for Decreasing Nonlinear Gamma Effect with Digital Fringe Projection Images, pp. 1-4. *In IEEE International Conference on ICT and Knowledge Engineering 2010 (IEEE ICT&KE2010)* .
- Valkenburg, R. J. and A. M. McIvor. 1998. Accurate 3D measurement using a structured light system. **Image and Vision Computing** 20 Feb 1998 (Volume 16, Issue 2): 99-110.
- Vass, Gergely and Tamás Perlaki. 2003. Applying and removing lens distortion in post production, *In Colorfront Ltd., Budapest* .
- Wu, H.B., Y. Chen, C.R. Guan and X.Y. Yu. 2006. 3D measurement technology by structured light using stripe-edge-based gray code, p. 537-541. *In Journal of Physics: Conference Series 48* .
- Yen, Hsu-Nan, Du-Ming Tsai and Jun-Yi Yang. 2006. Full-field 3-D measurement of solder pastes using LCD-based phase shifting techniques. **Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on** (vol.29, no.1): 50-57.

Zhang, Li and Shree Nayar. 2006. Projection defocus analysis for scene capture and image display. **ACM Transactions on Graphics (TOG)** July 2006 (Volume 25, Issue 3): 907-915.

Zhang, Song and Shing-Tung Yau. 2007. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector. **Applied Optics** 2007 (Vol. 46, No. 1): 36-43.

Zhang, Song and Huang, Peisen S. 2005. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method, pp. 133-142. *In Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering* .

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายศศิน เทียนดี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 8 เมษายน 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ประเทศไทย
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	1. รางวัลผลงานโดดเด่นด้าน Health Care ประเภท บุคคลทั่วไป รางวัลเจ้าฟ้าไอที รัตนราชสุดา สารสนเทศครั้งที่ 4 ประจำปี 2552 หัวข้อเรื่อง "AlignBracket3D โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่วยวางแผนการติดเหล็กจัดฟันและจำลองผลการ จัดเรียงฟันใน 3 มิติ" 2. รางวัลผลงานประดิษฐ์คิดค้น ระดับชมเชย ด้าน การแพทย์และสาธารณสุข ประจำปี 2552 สำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเทศไทย หัวข้อเรื่อง "AlignBracket3D โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่วยวางแผนการติดเหล็กจัดฟันและจำลองผลการ จัดเรียงฟันใน 3 มิติ"
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโท จากสถาบันบัณฑิต วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประเทศไทย