

การพัฒนาเทคนิคขั้นสูงสำหรับการวัดพิทัก 3 มิติ ของวัตถุที่มีผิวซับซ้อน โดยใช้ภาพสเตอริโอ

นายเกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1073-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF AN ADVANCED TECHNIQUE FOR 3-D
COORDINATE MEASUREMENT OF COMPLEX SURFACES USING
STEREO VISION

Mr. Kiattisak Sritrakulchai

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic year 2004
ISBN 974-53-1073-5

เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย : การพัฒนาเทคนิคขั้นสูงสำหรับการวัดพิกัด 3 มิติ ของวัตถุที่มีผิว
ซับซ้อนโดยใช้ภาพสเตอริโอ. (THE DEVELOPMENT OF AN ADVANCED
TECHNIQUE FOR 3-D COORDINATE MEASUREMENT OF COMPLEX
SURFACES USING STEREO VISION)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 100 หน้า. ISBN 974-53-1073 -5.

วิทยานิพนธ์นี้ได้คิดค้นและพัฒนาเทคนิคใหม่สำหรับสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม
(Triangular Mesh) สำหรับแบบจำลอง STL (STL Model) จากข้อมูลจุดของผิววัตถุซึ่งไม่รู้
ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจุด (Unorganized Points) โดยตรง ซึ่งได้พัฒนาอัลกอริทึมการจัดการ
และคัดแยกข้อมูลจุด (Organizing and Clustering) แบบโครงสร้างสี่บทยอดปรับตัวเองได้สอง
ระดับ (Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm) ข้อมูลจุดที่อยู่ในโครงสร้าง
สี่บทยอดสองระดับจะเป็นข้อมูลจุดที่ได้ถูกคัดแยกอย่างเหมาะสมเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง STL
นอกจากนั้นยังได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับปรับการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมแบบ
ปรับตัวเองได้ (Adaptive Self-Adjustable Connectivity of Triangular Mesh Structure
Algorithm) เพื่อให้ลักษณะโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมมีคุณภาพที่ดี ผลลัพธ์ของการทดลอง
แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลอง STL ของผิววัตถุที่
มีความซับซ้อน เช่น แบบจำลองพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องแบบเปิดที่มีรูและไม่มีรูอยู่ภายใน และ
แบบจำลองพื้นผิวแบบปิด นอกจากนี้แบบจำลอง STL สามารถนำไปใช้งานกับโปรแกรม
ประยุกต์ในงานทางด้านการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ทั่วไปได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4371802021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: ADVANCED TECHNIQUE / 3-D COORDINATE MEASUREMENT / COMPLEX SURFACES

KIATTISAK SRITRAKULCHAI: THE DEVELOPMENT OF AN ADVANCED TECHNIQUE FOR 3-D COORDINATE MEASUREMENT OF COMPLEX SURFACES USING STEREO VISION.

THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 100 pp. ISBN 974-53-1073-5.

In this dissertation, the novel technique for surface reconstruction of the unorganized cloud points. The technique begins with the organization of the cloud points by using the two-level adaptive hierarchical clustering algorithm which is developed by the authors. We also develop an adaptive self-adjustable connectivity to improve triangular mesh structure. The result is that better mesh surfaces can be obtained. Experimental results have shown that these techniques work satisfactorily for complex surfaces, such as open surface models, discontinuous surface, for example, a surface with holes and without holes, as well as close surface models. In addition, the surface model in STL format can be imported to commercial CAD/CAM software for extended applications.

Department ... Mechanical Engineering ... Student's signature..... *Kiattisak Sritrakulchai*
Field of study ... Mechanical Engineering ... Advisor's signature..... *[Signature]*
Academic year 2004 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และความรู้ต่างๆ ที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งโอกาสดีๆ ที่ท่านให้ เพื่อฝึกฝนตัวเองและหาความรู้ทางด้านต่างๆ มากมาย พร้อมทั้งคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ เงินทุน และสถานที่ในการทำวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด จนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอกราบขอบพระคุณ พล.อ.ต.ศ.ดร. สมนึก พาลีบัตร ผศ.ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ ผศ.ดร. รัชทิน จันท์เจริญ และ อ.ดร. วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้ และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งแก่ บิดา มารดา พี่ชาย พี่สาว ซึ่งคอยเป็นกำลังใจอย่างดียิ่งในการฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆ ให้ผ่านไปได้ด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จ การศึกษา และขอขอบคุณ น้องแพนที่ช่วยตรวจสอบแก้ไขคำผิดในวิทยานิพนธ์นี้ และคอยดูแลห่วงใย สุขภาพ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ตลอดจนขอขอบคุณ คุณพงศกร เพชรพันธ์ศรี นิสิตที่กำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโทที่ช่วยสร้างเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ระบบสเตอริโอวิชั่นแบบแถบแสงเลเซอร์ และเพื่อนรุ่นพี่ เพื่อน น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยนี้ ที่คอยห่วงใย ให้กำลังใจ และช่วยเหลือทางด้านต่างๆ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.2 แนวคิดและทฤษฎี	19
2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	24
3 เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติบนผิววัตถุ	28
3.1 เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัย	28
4 เทคนิคการจัดการข้อมูลและสร้างแบบจำลอง STL.....	35
4.1 ระบบการจัดการข้อมูล (Data Management System)	35
4.2 การสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (The Triangular Mesh Creation)	43
4.3 โพลีชาร์ตของอัลกอริทึมการจัดการข้อมูลจุดและสร้างแบบจำลอง STL	56
4.4 ข้อดีของเทคนิควิธีการใหม่ที่น่าเสนอในงานวิจัย.....	58
5 ผลการทดลอง.....	59
5.1 ผลการทดสอบการใช้เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติแบบต่างๆ	60
5.2 ผลการทดสอบการจัดการข้อมูลจุดของผิววัตถุ.....	69
5.3 การทดสอบการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมและSTL ไฟล์	72
5.4 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา	82

6 สรุปผลการวิจัย	86
6.1 สรุปผลการวิจัย	86
6.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง	89
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก รูปแบบข้อมูลของแบบจำลอง STL.....	94
ภาคผนวก ข แนวคิดการจัดการและคัดแยกข้อมูลจุดของผิววัตถุ.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	100

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 การสร้างแบบจำลองโซลิด (Solid Model) จากแบบกราฟตั้ง 2 มิติ (2D Drafting).....	1
รูปที่ 1.2 การออกแบบที่มีความซับซ้อนในงานผลิตภัณฑ์.....	2
รูปที่ 1.3 การสร้างแบบจำลองผิวจากข้อมูลจุดของผิวชิ้นงาน	4
รูปที่ 2.1 การหาขอบเขตในการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมด้วยรัศมี α	9
รูปที่ 2.2 ขอบเขตการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมเมื่อค่ารัศมี α เปลี่ยนไป.....	9
รูปที่ 2.3 การสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมภายในขอบเขตของค่ารัศมี α	9
รูปที่ 2.4 ลักษณะต่างๆ สำหรับการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม.....	10
รูปที่ 2.5 ผลการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิววัตถุจริงเมื่อกำหนดค่า α ต่างๆ	10
รูปที่ 2.6 โวโรนอยไดอะแกรม (Voronoi Diagram) ของข้อมูลจุด	11
รูปที่ 2.7 รัศมีวงกลมที่เปลี่ยนไปตามความหนาแน่นของข้อมูลจุด.....	12
รูปที่ 2.8 การสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของโวโรนอยไดอะแกรม	12
รูปที่ 2.9 กำหนดจำนวนข้อมูลจุดรอบๆ $k=4$ เพื่อใช้ในการคำนวณระนาบ.....	13
รูปที่ 2.10 การคำนวณหาจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของกลุ่มข้อมูล	13
รูปที่ 2.11 การคำนวณแกนของระนาบสัมผัส (Tangent Plane)	14
รูปที่ 2.12 การฉาย (Project) ระยะทางของข้อมูลจุดกับจุดศูนย์กลางของระนาบสัมผัส	14
รูปที่ 2.13 การขอบเขตของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยม	15
รูปที่ 2.14 ระบบนิรโรลเนตเวิร์คของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม	15
รูปที่ 2.15 การปรับข้อมูลจุดที่ใกล้ที่สุดและข้อมูลจุดบริเวณรอบๆเข้าสู่ข้อมูลจุดของผิววัตถุ.....	16
รูปที่ 2.16 การปรับตำแหน่งจุดปลายของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมเข้าสู่ข้อมูลจุดของผิววัตถุ..	16
รูปที่ 2.17 การเพิ่มจำนวนเซลล์หรือโหนดเข้าสู่โครงสร้างเน็ตเวิร์ค	18
รูปที่ 2.18 ระนาบซไลซ์ (Slicing Plane) ตัดผ่านกับข้อมูลจุดของผิววัตถุ	19
รูปที่ 2.19 การฉาย (Project) ข้อมูลจุดเข้าสู่ระนาบซไลซ์.....	20
รูปที่ 2.20 ข้อมูลซไลซ์ (Sliced Data) ที่สร้างจากข้อมูลจุดที่ฉายบนระนาบซไลซ์.....	20
รูปที่ 2.21 เครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วในห้องปฏิบัติการวิจัย	21
รูปที่ 2.22 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh).....	22
รูปที่ 2.23 เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ แบบสัมผัสกับวัตถุ.....	25
รูปที่ 2.24 เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ ระบบสเตอริโอวิชันแบบใช้แถบแสงเลเซอร์.....	25
รูปที่ 2.25 เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ ระบบสเตอริโอวิชันแบบใช้อินเตอร์เฟอโรเมตริกซ์	26
รูปที่ 2.26 โปรแกรมภาษา Python เพื่อใช้ร่วมกับ โปรแกรม Blender	27

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.1 ระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo Vision System)	29
รูปที่ 3.2 แบบจำลองเส้นทางการมองเห็น (Line of Sight) ของ 2 กล้อง	29
รูปที่ 3.3 ลักษณะของเรขาคณิตอีพิโพลาร์ (Epipolar Geometry)	30
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ ที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัย	31
รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์กับคอมพิวเตอร์	31
รูปที่ 3.6 โปรแกรม StereoCMM ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ	32
รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานของเครื่องมือวัดพิทักระบบสเตอริโอวิชันแบบใช้แถบแสงเลเซอร์	33
รูปที่ 4.1 การจัดเรียงอันดับของระนาบซไลซ์และข้อมูลจุดของแต่ละระนาบซไลซ์	35
รูปที่ 4.2 ขบวนการจัดการข้อมูลให้เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างผิวโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม	37
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของข้อมูลการสืบทอดระดับชั้น	38
รูปที่ 4.4 โครงสร้างเน็ตเวิร์คพื้นฐาน (Basic Network Structure).....	39
รูปที่ 4.5 ขบวนการการเรียนรู้และเพิ่ม โหนดข้อมูลเข้าสู่โครงสร้างเน็ตเวิร์ค	41
รูปที่ 4.6 พาร์ติชันและพาร์ติชันย่อยของข้อมูลจุดภายในโครงสร้างสืบทอดสองระดับ	41
รูปที่ 4.7 ขบวนการลบและการรวมข้อมูลของโครงสร้างสืบทอดระดับที่หนึ่ง	42
รูปที่ 4.8 ขบวนการลบและการรวมข้อมูลของโครงสร้างสืบทอดระดับที่สอง	42
รูปที่ 4.9 ทิศทางของเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างครั้งแรก	43
รูปที่ 4.10 การสร้างผิวสามเหลี่ยมอื่นๆหลังจากผิวสามเหลี่ยมแรกถูกสร้างขึ้น	44
รูปที่ 4.11 การค้นหาระยะทางใกล้ที่สุดระหว่างข้อมูลจุดอินพุตใหม่กับ BTM	45
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของผิวสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นใหม่กับผิวสามเหลี่ยมวินเนอร์.....	46
รูปที่ 4.13 มุมระหว่างผิวสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นใหม่กับผิวสามเหลี่ยมวินเนอร์	46
รูปที่ 4.14 ลักษณะผิวสามเหลี่ยมที่สามารถสร้างได้	
ในเงื่อนไข $g > 0$, $\theta > \pi/2$ และ $\gamma \leq \pi/2$	47
รูปที่ 4.15 ลักษณะผิวสามเหลี่ยมที่ไม่สามารถสร้างได้	
ในเงื่อนไข $g > 0$, $\theta > \pi/2$ และ $\gamma > \pi/2$	48
รูปที่ 4.16 การตรวจสอบการซ้อนกันของผิวสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นใหม่.....	50
รูปที่ 4.17 ผิวสามเหลี่ยมวินเนอร์ (Winner Triangle) ถูกแยกเป็น 3 ผิว	51
รูปที่ 4.18 กรณีที่จะเกิดขึ้นในการพิจารณาการสร้างผิวสามเหลี่ยมรอบๆ ผิวสามเหลี่ยมใหม่.....	53
รูปที่ 4.19 การปรับตัวการเชื่อมโยงกันของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม	54
รูปที่ 4.20 โพลีชาร์ตของอัลกอริทึมการจัดการข้อมูลจุดและสร้างแบบจำลอง STL	57

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.1 การฉายแสงลงบนผิวของวัตถุ.....	60
รูปที่ 5.2 ข้อมูลจุดของผิวพื้นป्लอมที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้อินเตอร์เฟอโรมेटริกซ์	61
รูปที่ 5.3 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวพื้นป्लอม	61
รูปที่ 5.4 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวพื้นป्लอม	62
รูปที่ 5.5 การวัดผิววัตถุด้วยเครื่องมือวัดพิกัดแบบสัมผัส.....	62
รูปที่ 5.6 ข้อมูลจุดของผิวหน้ามนุษย์ที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้หัวโพรบ (Probe).....	63
รูปที่ 5.7 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวหน้ามนุษย์.....	63
รูปที่ 5.8 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวหน้ามนุษย์.....	64
รูปที่ 5.9 การวัดพิกัดโดยการฉายแถบแสงเลเซอร์ลงบนผิวของวัตถุ	65
รูปที่ 5.10 ข้อมูลจุดของผิวขาคที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์	65
รูปที่ 5.11 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวขา.....	66
รูปที่ 5.12 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวขา	66
รูปที่ 5.13 ข้อมูลจุดของผิวเมาส์ที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์	67
รูปที่ 5.14 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวเมาส์	67
รูปที่ 5.15 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวเมาส์.....	68
รูปที่ 5.16 ข้อมูลจุดของผิววัตถุ (Point Cloud)	69
รูปที่ 5.17 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยม ที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 5$	70
รูปที่ 5.18 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยม ที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 6$	70
รูปที่ 5.19 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยม ที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 10$	71
รูปที่ 5.20 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยม ที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 40$	72
รูปที่ 5.21 ภาพแบบจำลองผิวดาข่ายสามเหลี่ยมของผิวหน้ามนุษย์.....	73
รูปที่ 5.22 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ของผิวหน้ามนุษย์	73
รูปที่ 5.23 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากของแบบจำลอง STL ผิวหน้ามนุษย์เฉพาะบริเวณที่ต้องการ	74
รูปที่ 5.24 ภาพแบบจำลองผิวดาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานที่มีผิวต่อเนื่อง.....	75
รูปที่ 5.25 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ของชิ้นงานที่มีผิวต่อเนื่อง	75

สารบัญภาพ (ต่อ)

ฉ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.26 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานหุกระทะ	76
รูปที่ 5.27 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ชิ้นงานหุกระทะ.....	76
รูปที่ 5.28 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานฟินปลอม	77
รูปที่ 5.29 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ชิ้นงานฟินปลอม	78
รูปที่ 5.30 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานเบาะรถยนต์.....	79
รูปที่ 5.31 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ชิ้นงานเบาะรถยนต์	80
รูปที่ 5.32 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานอะไหล่รถยนต์ที่ไม่สมบูรณ์.....	81
รูปที่ 5.33 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานอะไหล่รถยนต์ที่สมบูรณ์.....	81
รูปที่ 5.34 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ของชิ้นงานอะไหล่รถยนต์.....	82
รูปที่ 5.35 แบบจำลองฟินปลอมสร้างจากเทคนิคในงานวิจัยที่ผ่านมา กับ เทคนิคใหม่ที่พัฒนาขึ้น	82
รูปที่ 5.36 แบบจำลองผิวหน้ามนุษย์สร้างจากเทคนิคในงานวิจัยที่ผ่านมา กับ เทคนิคใหม่ที่พัฒนาขึ้น	83
รูปที่ 6.1 ขบวนการสร้างแบบจำลองผิวของวัตถุโดยใช้คอมพิวเตอร์หลายตัว	88
รูปที่ ข.1 ข้อมูลจุดสำหรับการคัดแยกเข้าสู่พาร์ติชันเดียวกัน	96
รูปที่ ข.2 ตารางการคัดแยกข้อมูลจุดเข้าสู่พาร์ติชันเดียวกัน.....	97
รูปที่ ข.3 โครงสร้างสืบทอดสองระดับสำหรับการคัดแยกข้อมูลจุดเข้าสู่พาร์ติชันเดียวกัน	97
รูปที่ ข.4 ข้อมูลจุดสำหรับการคัดแยกเข้าสู่พาร์ติชันแตกต่างกัน	98
รูปที่ ข.5 ตารางการคัดแยกข้อมูลจุดเข้าสู่พาร์ติชันแตกต่างกัน.....	98
รูปที่ ข.6 โครงสร้างสืบทอดสองระดับสำหรับการคัดแยกข้อมูลจุดเข้าสู่พาร์ติชันแตกต่างกัน	99