

บทที่ 5

ผลการทดลอง

การทดสอบทฤษฎีที่ได้คิดค้นและพัฒนาขึ้นและได้นำเสนอในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบเทคนิคการจัดการและคัดแยกข้อมูลจุดแบบโครงสร้างสี่บทอปรับตัวเองได้สองระดับ (Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm) และการทดสอบเทคนิคการสร้างผิวโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลอง STL ด้วยอัลกอริทึมสำหรับการปรับการเชื่อมโยงโครงสร้างของตาข่ายสามเหลี่ยมแบบปรับตัวเองได้ (Adaptive Self-Adjustable Connectivity of Triangular Mesh Structure Algorithm)

เพื่อทดสอบเทคนิคต่างๆ ทางทฤษฎี มาใช้ในทางปฏิบัติจริงสำหรับการจัดการข้อมูลจุดของผิววัตถุซึ่งมีลักษณะคล้ายกลุ่มเมฆ (Point Cloud) และสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับ STL ไฟล์ จึงได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อทดสอบเทคนิคเหล่านี้โดยใช้โปรแกรมภาษา Python [21] ซึ่งเป็นโปรแกรมภาษาแบบอ็อบเจกต์ออเรียนท์เท็ด (Object-Oriented Programming Language) โดยมีการแปลคำสั่งแบบอินเตอร์แอคทีฟ (Interactive) ข้อดีของโปรแกรมภาษานี้คือ มีกฎเกณฑ์ของคำสั่งในการใช้งานที่ชัดเจนมากๆ จะช่วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนั้นง่ายต่อการตรวจสอบ ลดข้อผิดพลาดในการใช้คำสั่งที่ไม่ระมัดระวัง นอกจากนี้ Python ยังเป็นโปรแกรมภาษาที่สามารถใช้ร่วมกับไลบรารี (Library) ของระบบปฏิบัติการต่างๆ ได้ และสามารถนำโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษานี้ไปใช้งานได้กับระบบปฏิบัติการอื่นได้ (UNIX, Windows, OS/2, Mac, Amiga และอื่นๆ) โปรแกรมได้พัฒนาขึ้นบนเครื่อง Pentium III 700 MHz ใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux) และเพื่อแสดงผลเป็นภาพของแบบจำลองผิว STL ที่สร้างจากข้อมูลจุดของผิววัตถุจริง ดังนั้นจึงได้พัฒนาโมดูล (Module) พิเศษเพื่อประมวลผลและแสดงผลแบบจำลอง STL บนโปรแกรม Blender [22] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถนำมาใช้ได้ฟรี (Freeware) โดยจะแสดงผลโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลอง STL และข้อมูลจุดของผิววัตถุซึ่งลักษณะคล้ายกับกลุ่มเมฆ (Point Cloud) ของผิววัตถุที่ใช้ในการทดสอบนั้น ซึ่งได้มาจากเครื่องมือวัดพิค 3 มิติจำนวน 3 เครื่อง คือ

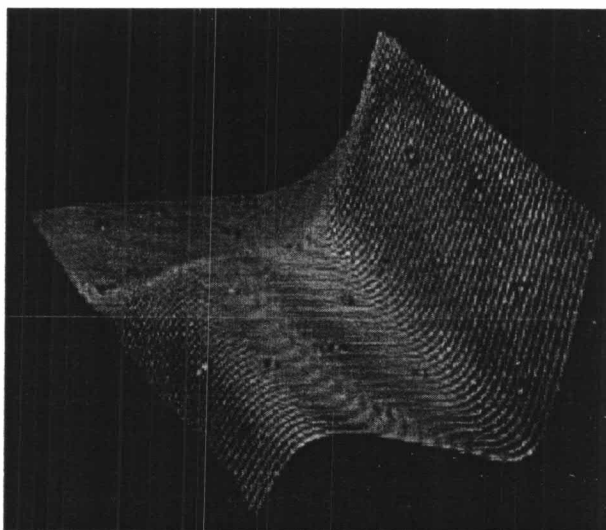
1. เครื่องมือวัดพิค 3 มิติแบบไม่สัมผัสด้วยระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo Vision System) แบบใช้อินเตอร์เฟอโรเมตริกซ์ (Interferometric) ของบริษัท GOM Optical Measuring Techniques รุ่น ATOS II 400
2. เครื่องมือวัดพิค 3 มิติแบบสัมผัสกับวัตถุของบริษัท Brown & Sharpe รุ่น Microval 343

3. เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติแบบไม่สัมผัสวัดจากระบบสเตอริโอวิชั่นแบบใช้แถบแสงเลเซอร์ (Line Laser Scanner) ที่พัฒนาขึ้นเองโดยห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบนี้จะกำหนดช่วงระยะห่างของระนาบซไลซ์ (Slicing Plane) ที่ 0.1 มิลลิเมตร และช่วงการจับกลุ่มข้อมูลจุดในระนาบซไลซ์ คือ ± 0.05 และช่วงระยะห่างนี้จะเท่าๆ กันตลอดทั้งผิวของวัตถุที่ต้องการจะสร้างแบบจำลองผิวจากข้อมูลจุดของผิววัตถุ และกำหนดมุม $\psi = \pi/18$ สำหรับตรวจสอบการซ้อนทับระหว่างผิวสามเหลี่ยม

5.1. ผลการทดสอบการใช้เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบต่างๆ

5.1.1. เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ระบบสเตอริโอวิชั่นแบบใช้อินเตอร์เฟอโรเมตริกซ์ของบริษัท GOM



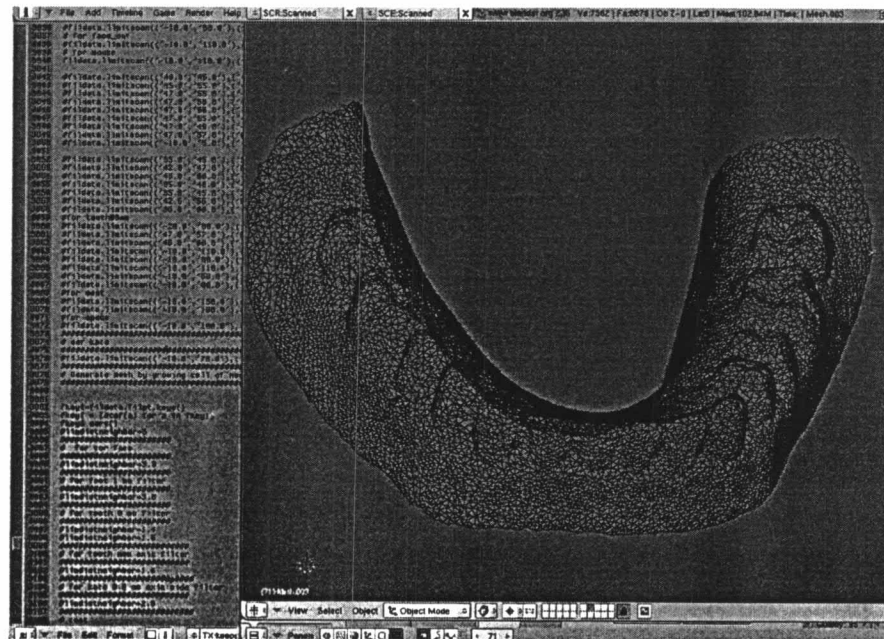
รูปที่ 5.1 การฉายแสงลงบนผิวของวัตถุ

ในรูปที่ 5.2 แสดงข้อมูลจุดจำนวน 7,886 จุดของผิวพื้นปโลมบนโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งได้มาจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติระบบสเตอริโอวิชั่นแบบใช้อินเตอร์เฟอโรเมตริกซ์ (Interferometric) โดยใช้เทคนิคการฉายแสงที่มีรูปแบบเป็นคาบแบบคงที่ไปบนพื้นผิวของวัตถุตามรูปที่ 5.1 จากนั้นบันทึกภาพแสงที่ฉายไปบนพื้นผิวด้วยกล้อง CCD ทั้งสองตัวแล้วนำภาพถ่ายมาประมวลผลด้วยขบวนการทางภาพถ่าย (Image Processing) แล้วนำข้อมูลมาคำนวณร่วมกับรูปแบบอ้างอิงเพื่อช่วยในการแปลงข้อมูลออกมาเป็นลักษณะของข้อมูลจุดพิกัดบนพื้นผิวได้ โดยข้อมูลจุดจะมีลักษณะกระจายตัวที่ดี ในรูปที่ 5.3 แสดงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมซึ่งมีจำนวนผิวสามเหลี่ยม 15,487 ผิวบนโปรแกรมซึ่งได้จากการนำข้อมูลจุดของผิววัตถุมาประมวลผลตามทฤษฎี

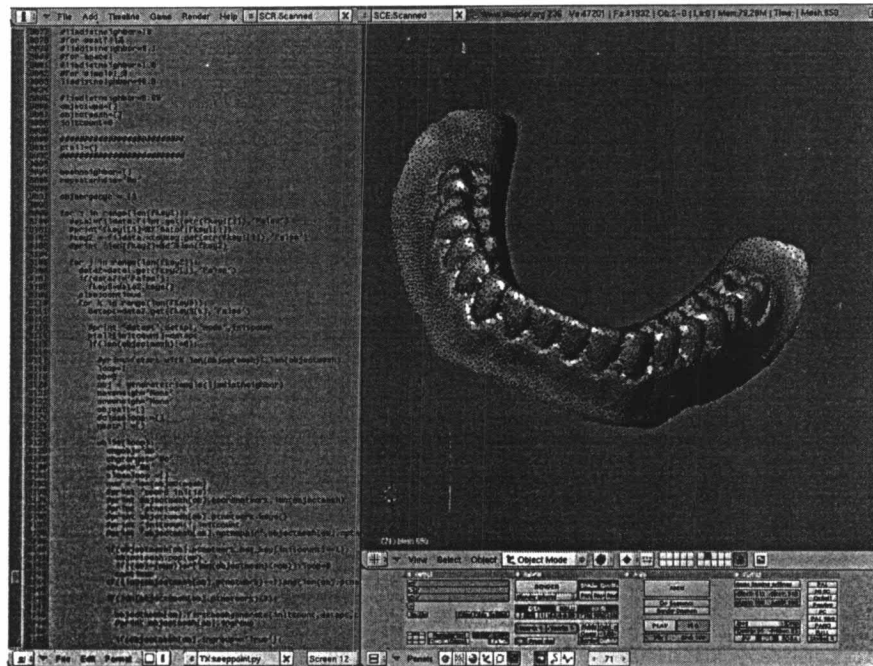
ได้คิดค้นขึ้นเพื่อสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลองฟันปลอม ในรูปที่ 5.4 แสดงภาพเรนเดอร์ (Render) ของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลอง STL



รูปที่ 5.2 ข้อมูลจุดของผิวฟันปลอมที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้อินเตอร์เฟียร์โรเมตริกซ์

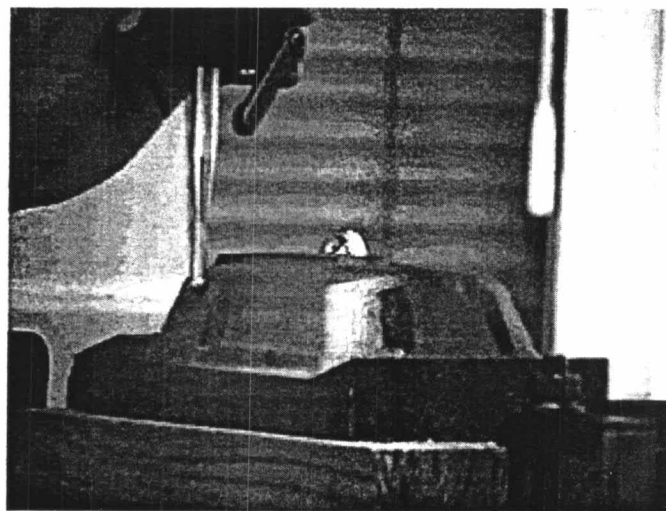


รูปที่ 5.3 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวฟันปลอม

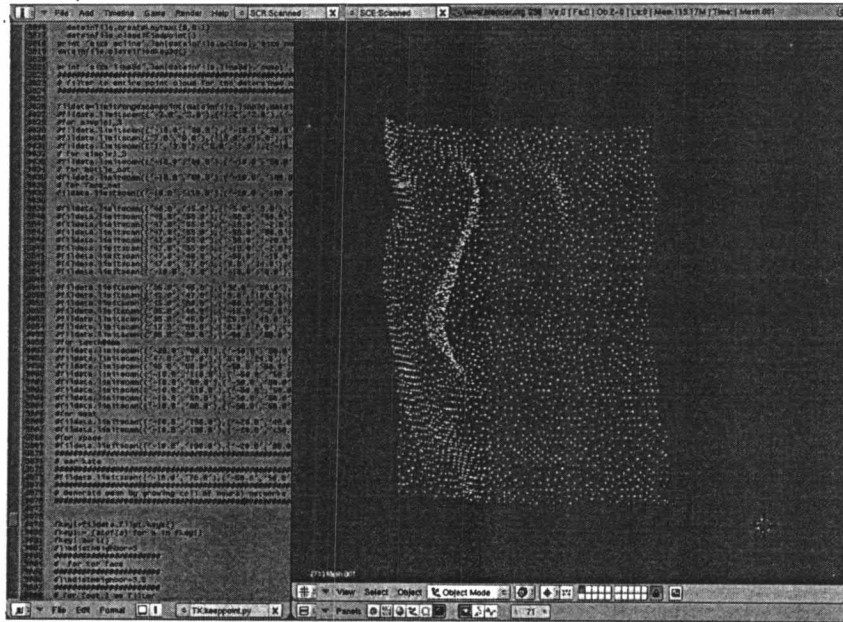


รูปที่ 5.4 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองฟัน STL ของฟันปลอม

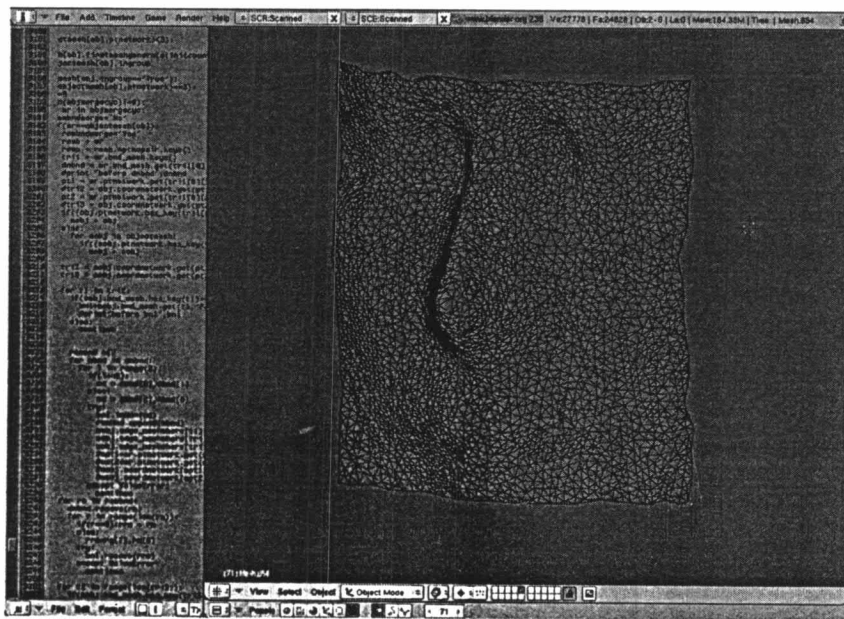
5.1.2. เครื่องมือวัดพิทัด 3 มิติแบบสัมผัสกับวัตถุของบริษัท Brown & Sharpe



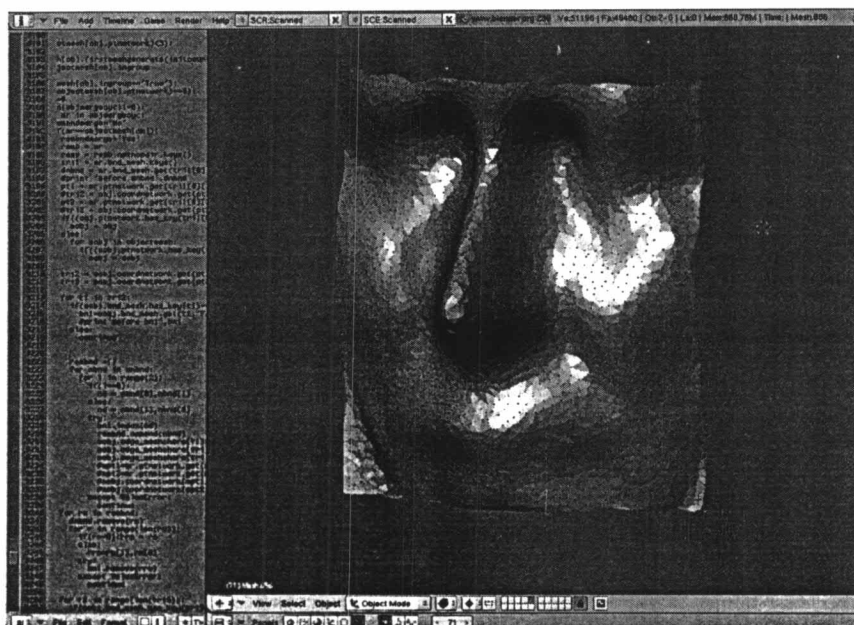
รูปที่ 5.5 การวัดฟันวัตถุด้วยเครื่องมือวัดพิทัดแบบสัมผัส



รูปที่ 5.6 ข้อมูลจุดของผิวหนังมนุษย์ที่ได้จากเครื่องมือวัดกักแบบใช้หัวโพรบ (Probe)



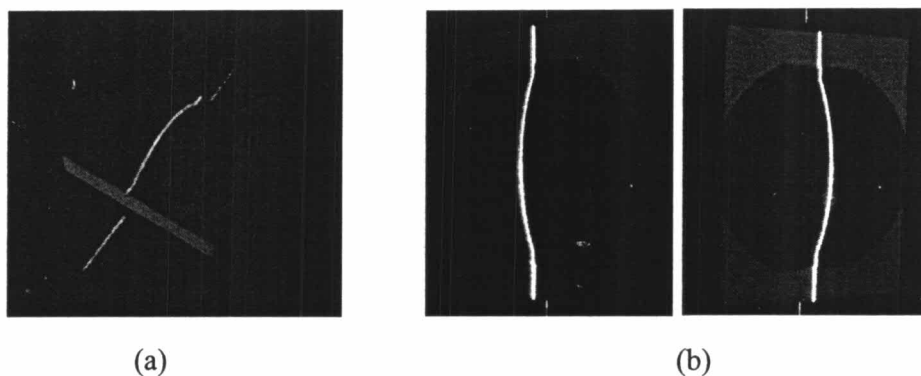
รูปที่ 5.7 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวหนังมนุษย์



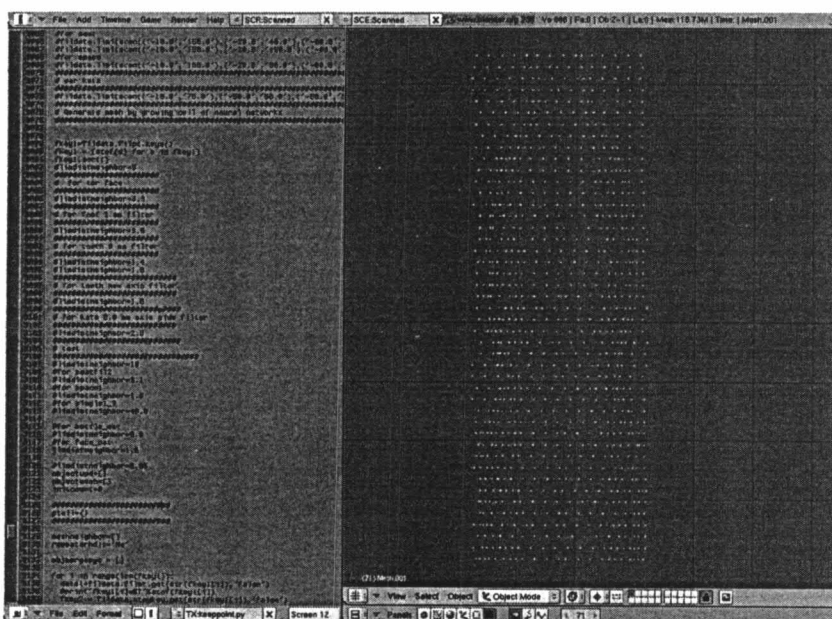
รูปที่ 5.8 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวหนังจมูก

ในรูปที่ 5.6 แสดงข้อมูลจุดจำนวน 3,157 จุดของผิวหนังจมูกบนโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งได้มาจากเครื่องวัดพิทัก 3 มิติแบบสัมผัสตามรูปที่ 5.5 โดยข้อมูลจุดมีลักษณะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ความหนาแน่นของข้อมูลจุดไม่คงที่เนื่องจากเวลาทำการวัดพิทักบนผิววัตถุที่ผู้วิจัยใช้หัวโพรบแตะบนผิวโดยไม่คำนึงถึงทิศทางใดๆ ระหว่างการวัดและระยะห่างระหว่างจุดก็ไม่คงที่เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถของทฤษฎี ในรูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมซึ่งมีจำนวนผิวสามเหลี่ยม 6,186 ผิวบนโปรแกรมซึ่งได้จากการนำข้อมูลจุดของผิววัตถุมาประมวลผลตามทฤษฎีได้คิดค้นขึ้นเพื่อสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลองผิวหนังจมูก ในรูปที่ 5.8 แสดงภาพเรนเดอร์ (Render) ของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลอง STL

5.1.3. เครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติแบบไม่สัมผัสวัดระยะแบบสเตอริโอวิชันแบบใช้แถบแสงเลเซอร์ที่พัฒนาขึ้นเองโดยห้องปฏิบัติการ



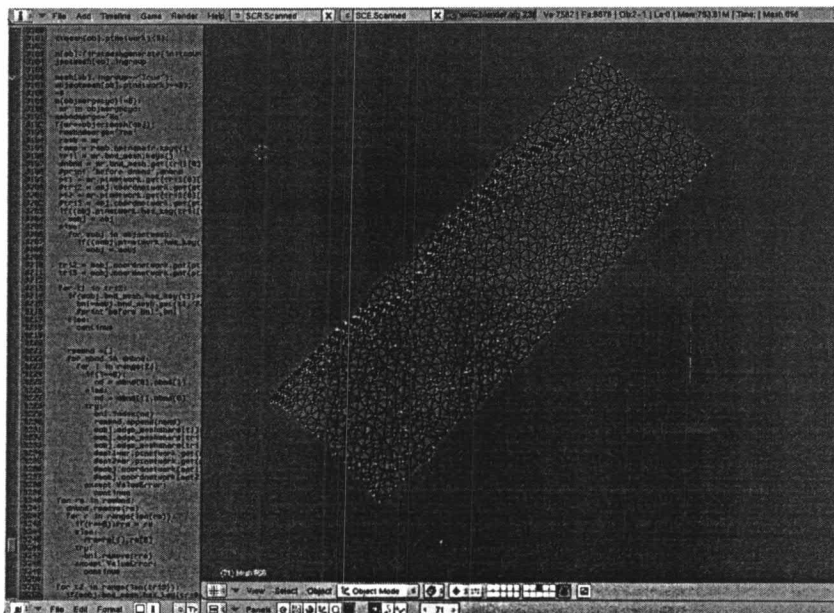
รูปที่ 5.9 การวัดพิกัดโดยการฉายแถบแสงเลเซอร์ลงบนผิวของวัตถุ



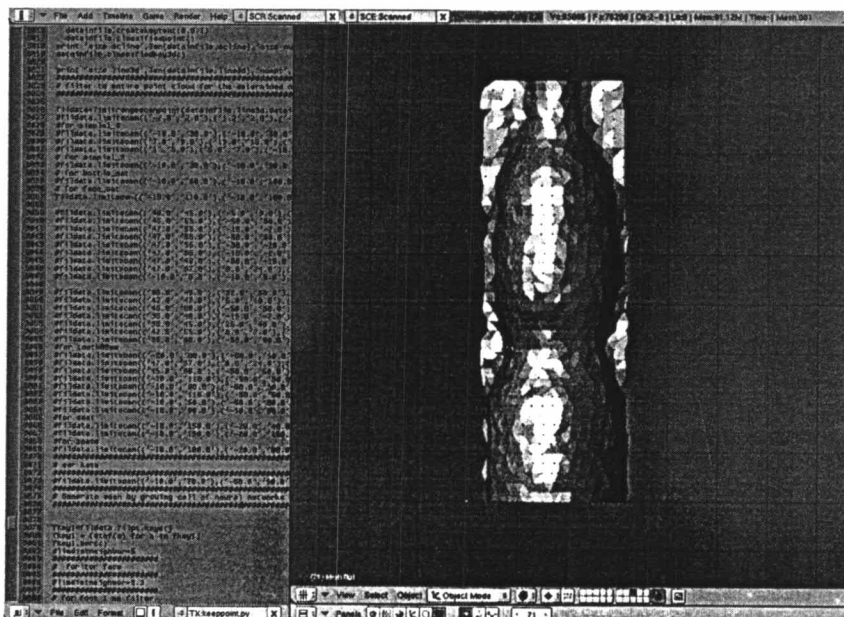
รูปที่ 5.10 ข้อมูลจุดของผิวขูดที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์

ในรูปที่ 5.10 แสดงข้อมูลจุดจำนวน 892 จุดของผิวขูด และรูปที่ 5.13 ข้อมูลจุดจำนวน 2,055 จุดของผิวเมาส์ บน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งได้มาจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติระบบสเตอริโอวิชั่นแบบใช้แถบแสงเลเซอร์ ในรูปที่ 5.9(a) แสดงแสงเลเซอร์ที่ฉายลงบนผิววัตถุ และในรูปที่ 5.9(b) เป็นภาพถ่ายของลักษณะแถบแสงเลเซอร์ที่ฉายบนผิววัตถุที่ถูกบันทึกด้วยกล้อง CCD ทั้งสองกล้องโดยข้อมูลจุดมีลักษณะเป็นแนวยาวตามลักษณะของเส้นเลเซอร์ ในรูปที่ 5.11 แสดงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมซึ่งมีจำนวนผิวสามเหลี่ยม 1,669 ผิว สำหรับแบบจำลองผิวขูดและในรูปที่ 5.14 แสดงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมจำนวน 3,988 ผิว สำหรับแบบจำลองผิวเมาส์ บน

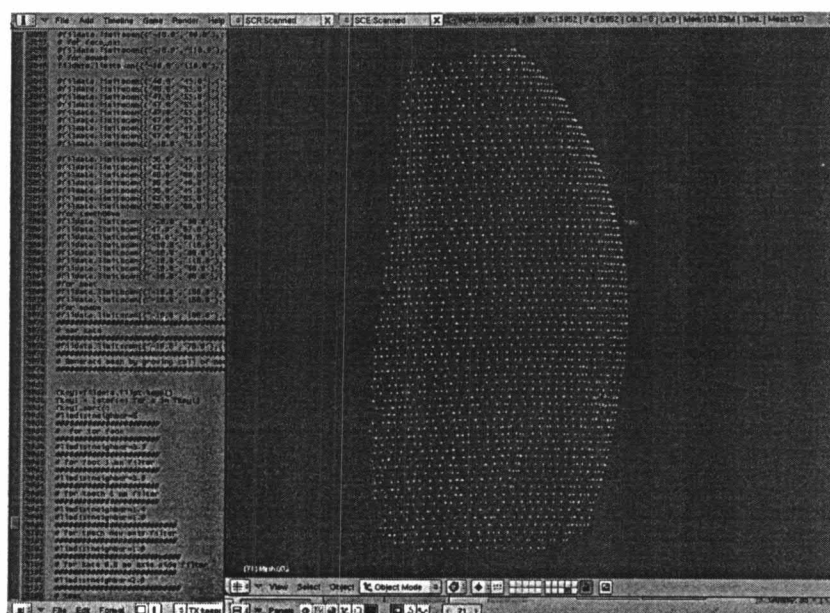
โปรแกรมซึ่งได้จากการนำข้อมูลจุดของผิววัตถุมาประมวลผลตามทฤษฎีได้คิดค้นขึ้นเพื่อสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม ในรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.15 แสดงภาพเรนเดอร์ (Render) ของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมสำหรับแบบจำลอง STL ของผิวขวดและผิวเมาส์



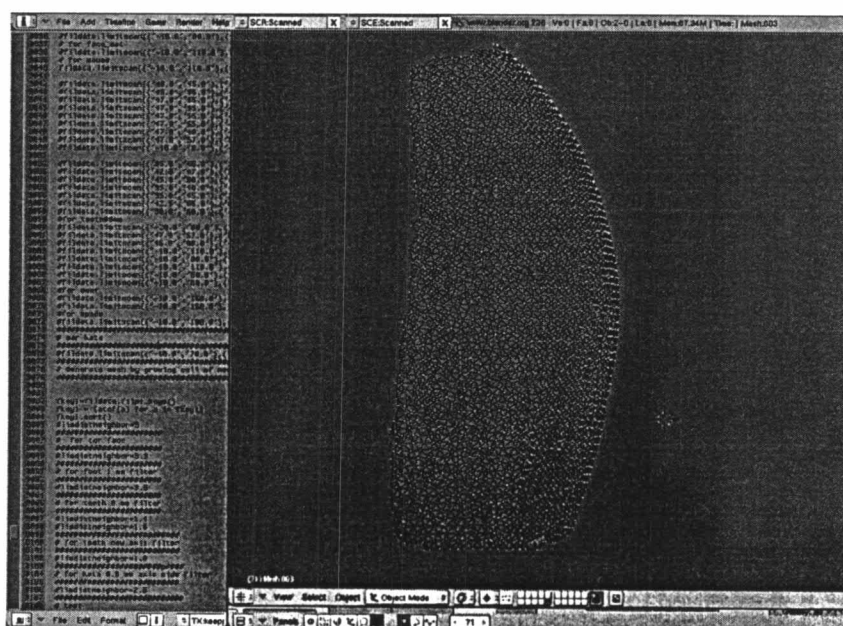
รูปที่ 5.11 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวขวด



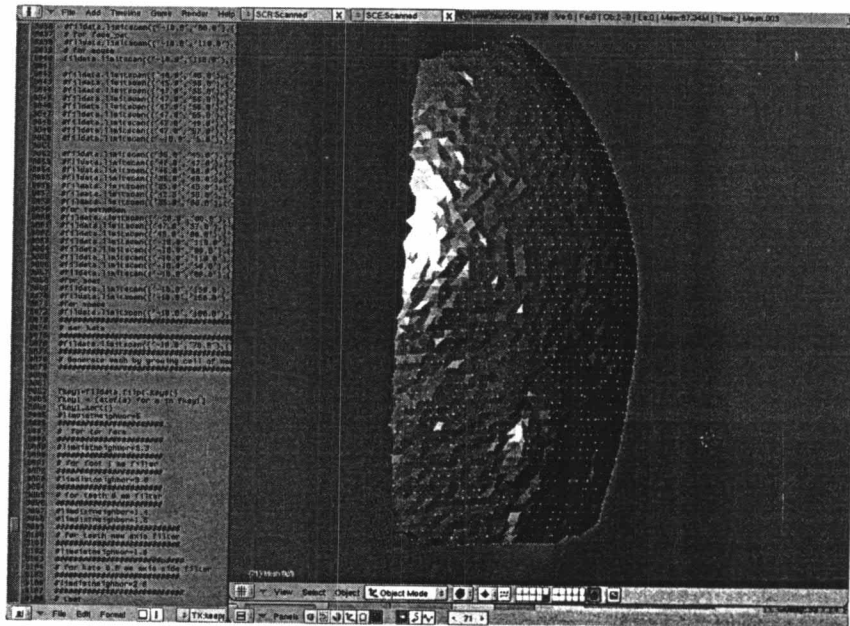
รูปที่ 5.12 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวขวด



รูปที่ 5.13 ข้อมูลจุดของผิวเมสที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์



รูปที่ 5.14 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวเมส

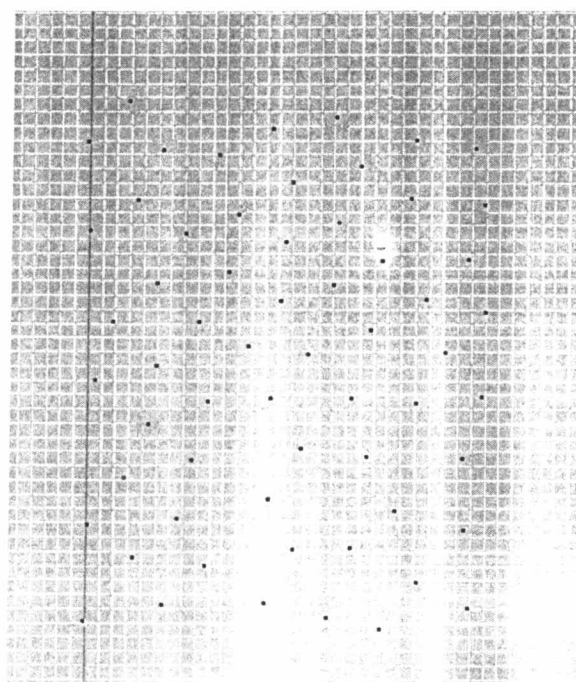


รูปที่ 5.15 ภาพเรนเดอร์ (Render) แบบจำลองผิว STL ของผิวมาส์

จากการทดสอบการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมจากข้อมูลจุดที่ได้จากเครื่องมือวัดพิศระบบต่างๆ จะเห็นได้เทคนิคใหม่ที่ได้ออกมาและพัฒนามันนี้สามารถสร้างแบบจำลอง STL ได้ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นในการนำข้อมูลจุดที่วัดได้จากเครื่องมือวัดพิศระบบต่างๆ มาใช้สร้างแบบจำลอง STL โดยข้อมูลจุดที่วัดได้จะมีลักษณะต่าง ๆ กัน มีทั้งลักษณะการกระจายตัวที่ดีและไม่ดี และจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง STL ในรูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.15 ที่สร้างจากข้อมูลจุดที่วัดได้จากเครื่องมือวัดพิศแบบแถบแสงเลเซอร์นั้นจะมีผิวที่ค่อนข้างขรุขระก็เนื่องมาจากความเสื่อมของอุปกรณ์เลเซอร์ ในรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าเส้นเลเซอร์ที่ฉายลงบนผิวของวัตถุที่มีความหนาแน่นมากเกินไปซึ่งจะทำให้ข้อมูลจุดที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาด จึงทำให้ผิวแบบจำลอง STL ที่ได้นั้นมีลักษณะคล้ายกับเป็นผิววัตถุที่มีความขรุขระ

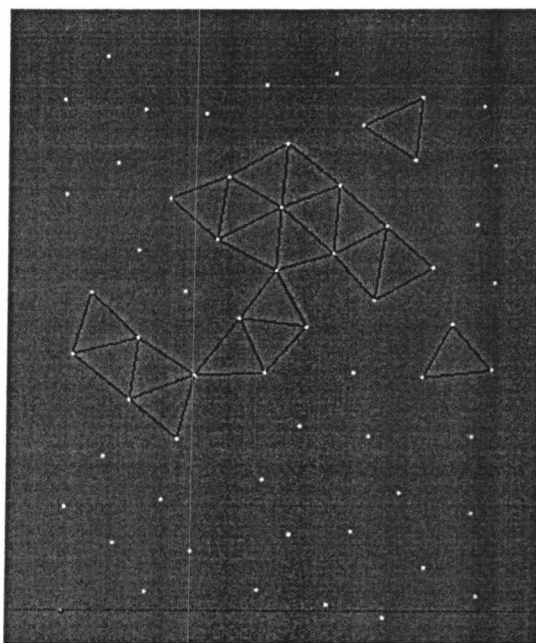
ในหัวข้อ 5.2 เป็นการทดสอบให้เห็นถึงการจัดการข้อมูลจุดของผิววัตถุด้วยอัลกอริทึมการจัดการและคัดแยกข้อมูลแบบโครงสร้างสี่เหลี่ยมปรับตัวเองได้สองระดับ (Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm) และการปรับโครงสร้างด้วยอัลกอริทึมสำหรับปรับการเชื่อมโยงโครงสร้างของตาข่ายสามเหลี่ยมแบบปรับตัวเองได้ (Adaptive Self-Adjustable Connectivity of Triangular Mesh Structure Algorithm) และในหัวข้อ 5.3 เป็นทดสอบการสร้างแบบจำลองผิว STL ในลักษณะผิวซับซ้อนต่างๆ และสุดท้ายในหัวข้อ 5.4 เป็นผลลัพธ์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

5.2. ผลการทดสอบการจัดการข้อมูลจุดของผิววัตถุ

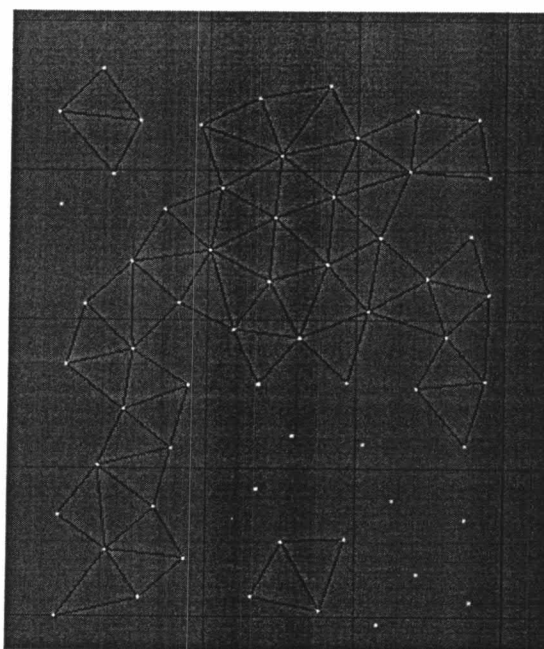


รูปที่ 5.16 ข้อมูลจุดของผิววัตถุ (Point Cloud)

ข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ใช้ในการทดสอบมี 61 จุด ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.16 และค่าจำกัดความยาว (Limited Length) เพื่อกำหนดเกณฑ์ของความคล้ายคลึงกันของข้อมูลจุด คือ $p=5$ ผลลัพธ์ในการทดสอบนั้นจะแสดงข้อมูลจุดที่ได้ถูกจัดการคัดแยกอย่างเหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยมได้และเพื่อความชัดเจน ดังนั้นจึงจำลองการสร้างผิวสามเหลี่ยมจากข้อมูลจุดที่ได้ถูกจัดการเรียบร้อยแล้ว และจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.17 ซึ่งมี 3 พาร์ติชันในโครงสร้างสี่ทอกระดับที่หนึ่ง (SM) ถูกสร้างขึ้น โดยที่พาร์ติชันแรก SM_1 มี 20 ข้อมูลจุด และในโครงสร้างสี่ทอระดับที่สองสามารถสร้างผิวสามเหลี่ยม 17 ผิว พาร์ติชันที่สอง SM_2 และ พาร์ติชันที่สาม SM_3 มี 3 ข้อมูลจุด และสามารถสร้างผิวสามเหลี่ยมได้ 1 ผิว ในรูปที่ 5.17 จะสังเกตได้ว่าข้อมูลจุดที่สามารถสร้างผิวสามเหลี่ยมได้นั้นจะอยู่ใกล้กันและกัน มากกว่าข้อมูลจุดที่ไม่สามารถสร้างผิวได้ เหตุผลก็เนื่องมาจากว่าได้กำหนดค่าจำกัดความยาวนั้นยังมีความยาวที่น้อยเกินไป ซึ่งไม่ครอบคลุมถึงข้อมูลจุดที่มีระยะห่างออกไปอื่นๆ ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองต่อไปโดยเพิ่มค่าจำกัดความยาวเป็น $p=6$, $p=10$ และ $p=40$ ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงในรูปที่ 5.18, รูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 เพื่อสามารถสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมได้ดีขึ้น



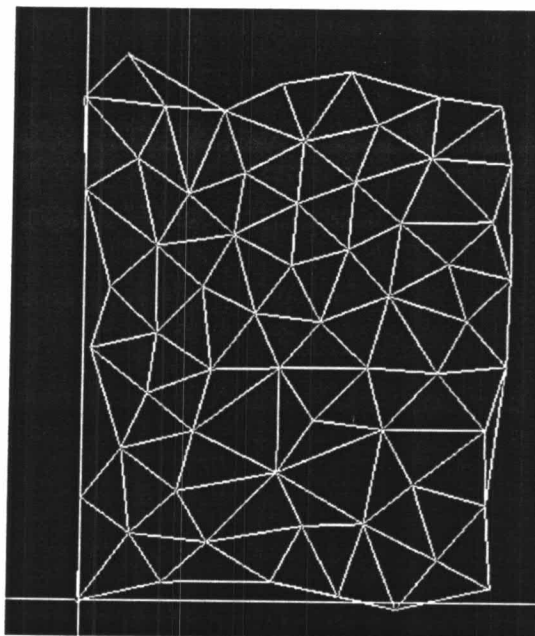
รูปที่ 5.17 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยมที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 5$



รูปที่ 5.18 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยมที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 6$

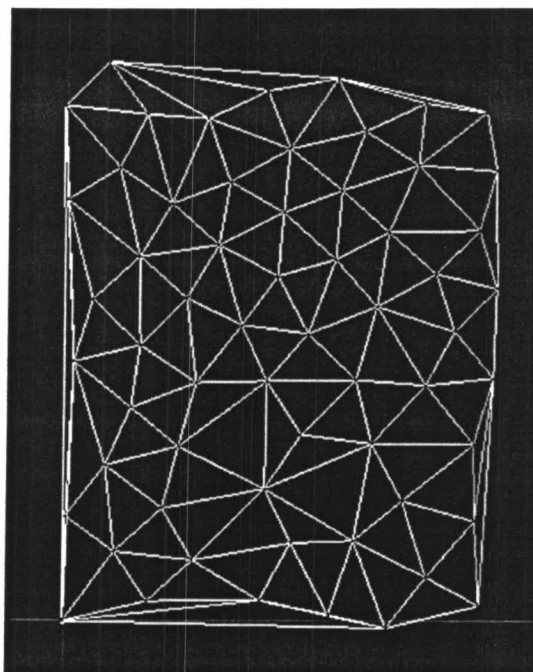
ผลลัพธ์ในรูปที่ 5.18 นั้น ยังคงมี 3 พาร์ติชันของข้อมูลจุดของผิววัตถุ M สำหรับค่าจำกัดความยาวที่ $\rho = 6$ โดยที่พาร์ติชันที่มีขนาดใหญ่ที่สุดมี 44 ข้อมูลจุด และมี 48 ผิวสามเหลี่ยม ส่วนอีก 2 พาร์ติชันที่เหลือจะมี 4 ข้อมูลจุดและมี 2 ผิวสามเหลี่ยม

ผลลัพธ์ในรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 สำหรับค่าจำกัดความยาว $\rho = 10$ และ $\rho = 40$ โดยทั้งสองกรณีนั้นมีเพียง 1 พาร์ติชันเหมือนกันแต่ที่แตกต่างกัน คือ จำนวนของผิวสามเหลี่ยมที่สามารถสร้างได้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างทางด้านคุณภาพของผิวตาข่ายโครงสร้างสามเหลี่ยมนั้น รูปที่ 5.19 นั้นจะมีคุณภาพของแบบจำลองผิวดีกว่าเมื่อเทียบกับรูปที่ 5.20 ซึ่งการทดลองนี้ให้ค่าจำกัดความยาวที่มากเกินไป จึงทำให้เกิดผิวสามเหลี่ยมที่ไม่เหมาะสมเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้เคียงกับขอบของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม



รูปที่ 5.19 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยมที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 10$

จากการทดสอบมาแล้วนั้นจะเห็นว่าอัลกอริทึมนี้สามารถดำเนินการเรียนรู้ได้อย่างไม่รู้จักจบเพื่อจัดการกับข้อมูลจุดและคัดแยกข้อมูลจุดเข้าสู่โครงสร้างการสืบทอดสองระดับอย่างอัตโนมัติ นี่เป็นสาเหตุว่าอัลกอริทึมนี้จึงเรียกว่า อัลกอริทึมการจัดการและคัดแยกข้อมูลเข้าสู่โครงสร้างสืบทอดแบบปรับตัวได้สองระดับ (Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm)



รูปที่ 5.20 ผลลัพธ์ของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยมที่ค่าจำกัดความยาว $\rho = 40$

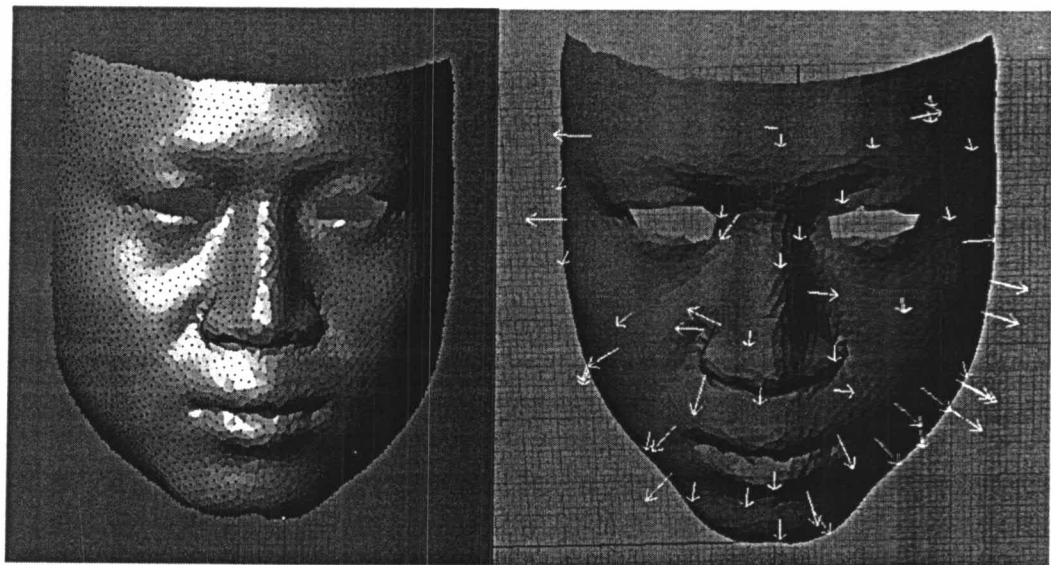
5.3. การทดสอบการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมและ STL ไฟล์

ผลลัพธ์ของการทดสอบใน ส่วนที่ 2 นี้เป็นโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม และแบบจำลองผิว STL จากข้อมูลจุดของผิววัตถุ ซึ่งจะผ่านขบวนการจัดการข้อมูลจากเทคนิคที่ทดสอบแล้วในส่วนที่แรก หลังจากนั้นข้อมูลจุดได้ถูกจัดการแล้วพร้อมที่สร้างผิวและ STL ไฟล์ ซึ่งจะได้ทำการทดสอบในส่วนนี้ โดยผิวของวัตถุที่จะนำมาทดสอบนั้นมี 7 ตัวอย่าง และผลลัพธ์ของตัวอย่างทั้งหมดนั้นจะแสดงทิศทางของเวกเตอร์ตั้งฉากของแบบจำลองผิว STL ที่ได้สร้างขึ้นด้วย เวกเตอร์นี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสร้างแบบจำลองผิว STL และบอกคุณลักษณะความเป็นผิวของวัตถุด้วย กล่าวคือ ถ้าทิศทางเวกเตอร์พุ่งออกจะบอกถึงความเป็นผิว แต่ถ้าทิศทางพุ่งเข้าจะบอกถึงความไม่มีผิวในบริเวณนั้น

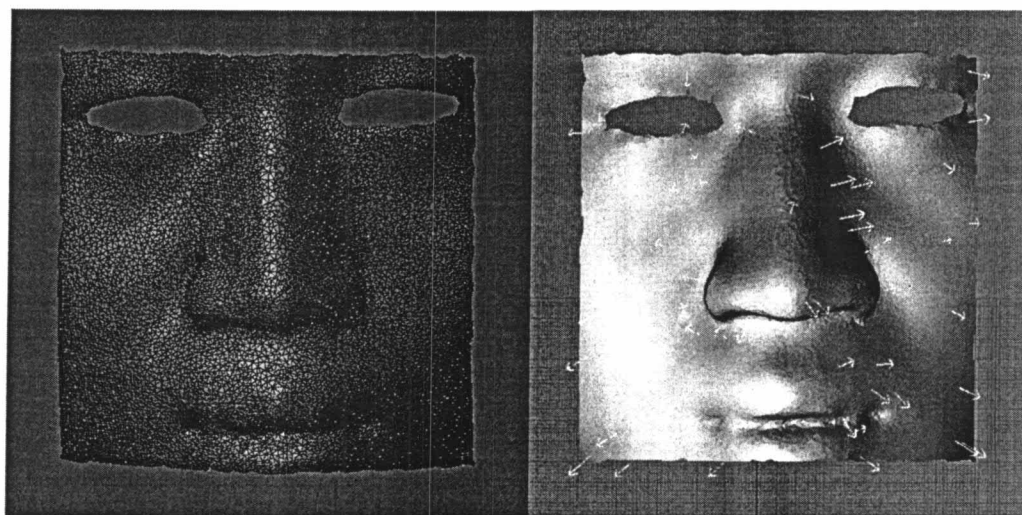
ตัวอย่างที่ 1 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิทัก 3 มิติจากผิวหนังมนุษย์ มีคุณลักษณะเป็นผิวที่ไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือมี 2 รู ซึ่งแทนเข้าตามนุษย์ กับพื้นผิวแบบเปิด (Open Surface) โดยข้อมูลจุดมีจำนวน 5,716 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้น 11,379 ผิว และ ความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยมซึ่ง หรือค่าจำกัดความยาวกำหนดให้เท่ากับ $\rho = 3.6$ ในรูปที่ 5.21 และ รูปที่ 5.22 ซึ่งเป็นผลลัพธ์การทดสอบของตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 5.21 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของผิวหน้ามนุษย์



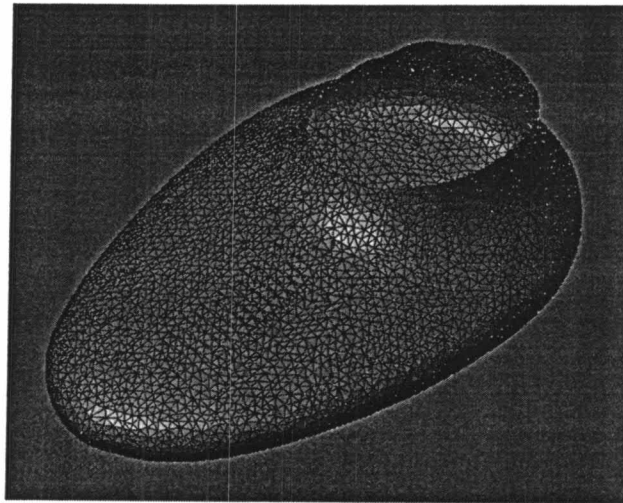
รูปที่ 5.22 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ของผิวหน้ามนุษย์



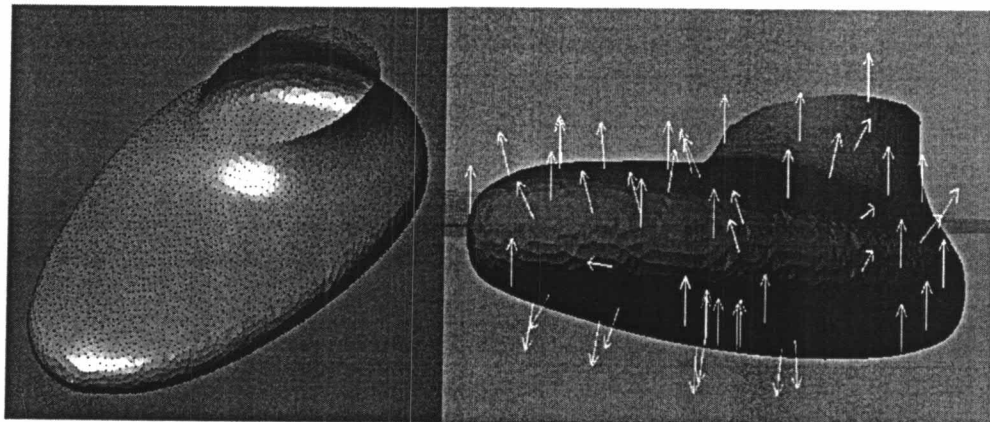
รูปที่ 5.23 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากของแบบจำลอง STL ผิวหน้ามนุษย์เฉพาะบริเวณที่ต้องการ

ตัวอย่างที่ 2 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิทัก 3 มิติจากผิวหน้ามนุษย์ มีคุณลักษณะเป็นพื้นผิวแบบเปิด (Open Surface) ในช่วงของข้อมูลจุดในบริเวณที่ต้องการที่จะสร้างแบบจำลอง STL บริเวณส่วนนั้น ซึ่งข้อมูลจุดมีจำนวน 7,103 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้น 13,923 ผิว โดยในตัวอย่างนี้กำหนดช่วงไว้ที่ $x = [30, 130]$, $y = [-55, 50]$, $z = [-25, 45]$ และกำหนดความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยม $p = 1.5$ ในรูปที่ 5.23 เป็นแบบจำลอง STL และแสดงทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉาก ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบของตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 3 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิทัก 3 มิติจากชิ้นงานที่มีผิวต่อเนื่อง มีคุณลักษณะเป็นพื้นผิวแบบเปิด (Open Surface) และเป็นพื้นผิวที่ประกอบด้วยผิวที่มีความต่อเนื่อง ข้อมูลจุดของผิวชิ้นงานมีความหนาแน่นไม่แน่นอนซึ่งข้อมูลจุดมีจำนวน 3,260 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้น 6,370 ผิว และความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยม $p = 2.0$ รูปที่ 5.24 และรูปที่ 5.25 เป็นแบบจำลอง STL ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบของตัวอย่างที่ 3

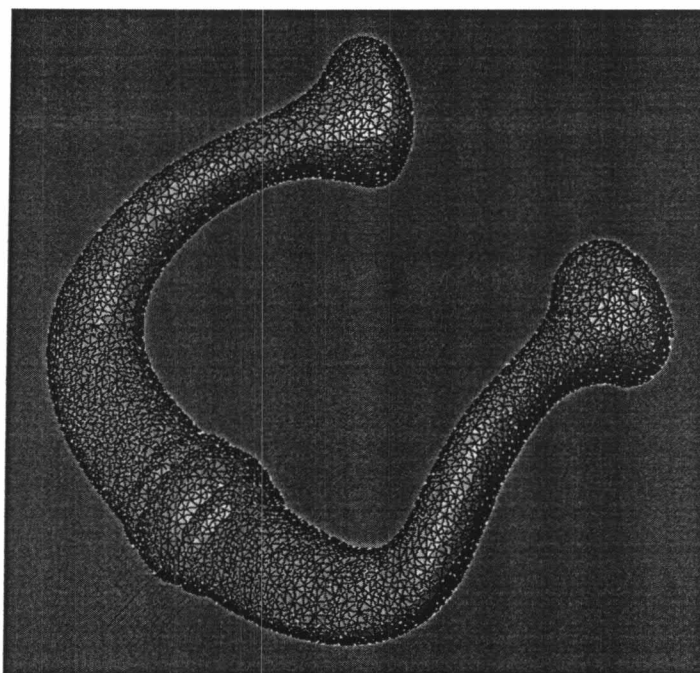


รูปที่ 5.24 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานที่มีผิวต่อเนื่อง

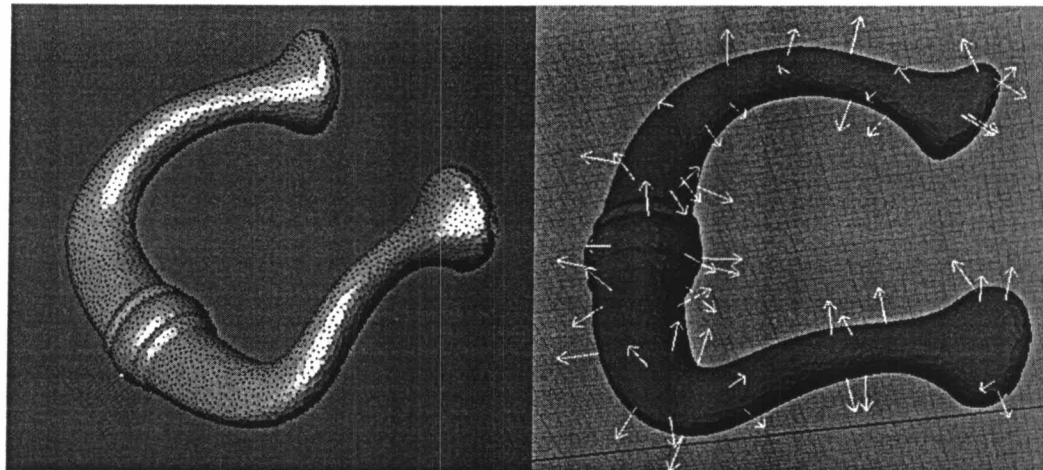


รูปที่ 5.25 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ของชิ้นงานที่มีผิวต่อเนื่อง

ตัวอย่างที่ 4 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิกัด 3 มิติจากชิ้นงานหุกระทะ มีคุณลักษณะเป็นพื้นผิวแบบปิด (Closed Surface) และเป็นพื้นผิวที่ประกอบด้วยผิวที่มีความต่อเนื่องและผิวไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากอยู่ในบริเวณช่วงกลางของหุกระทะซึ่งมีการทำร่อง 3 ร่อง โดยข้อมูลจุดมีจำนวน 5,271 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้น 10,538 ผิว และความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยม $\rho = 2.8$ รูปที่ 5.26 และ รูปที่ 5.27 เป็นแบบจำลอง STL ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบของตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 5.26 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานหูกระต่าย



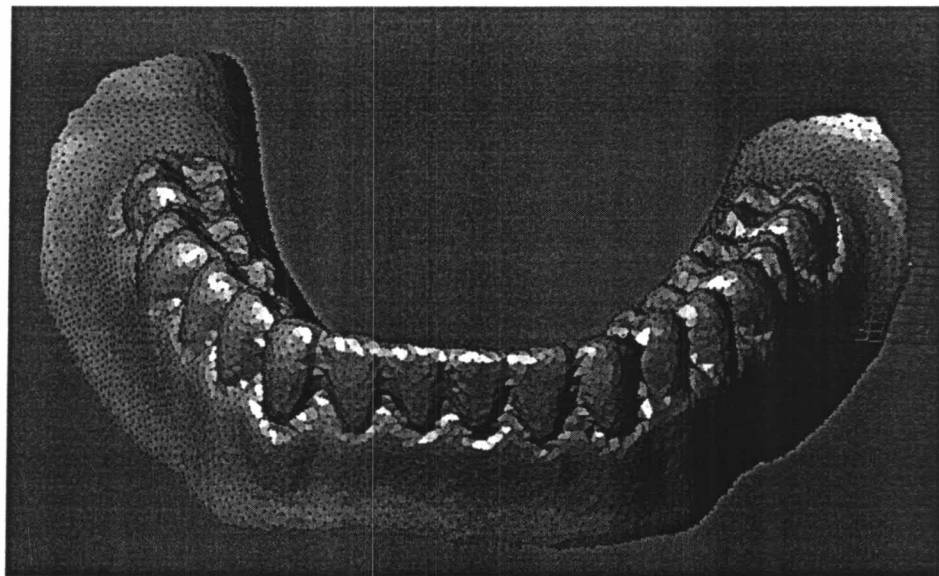
รูปที่ 5.27 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ชิ้นงานหูกระต่าย

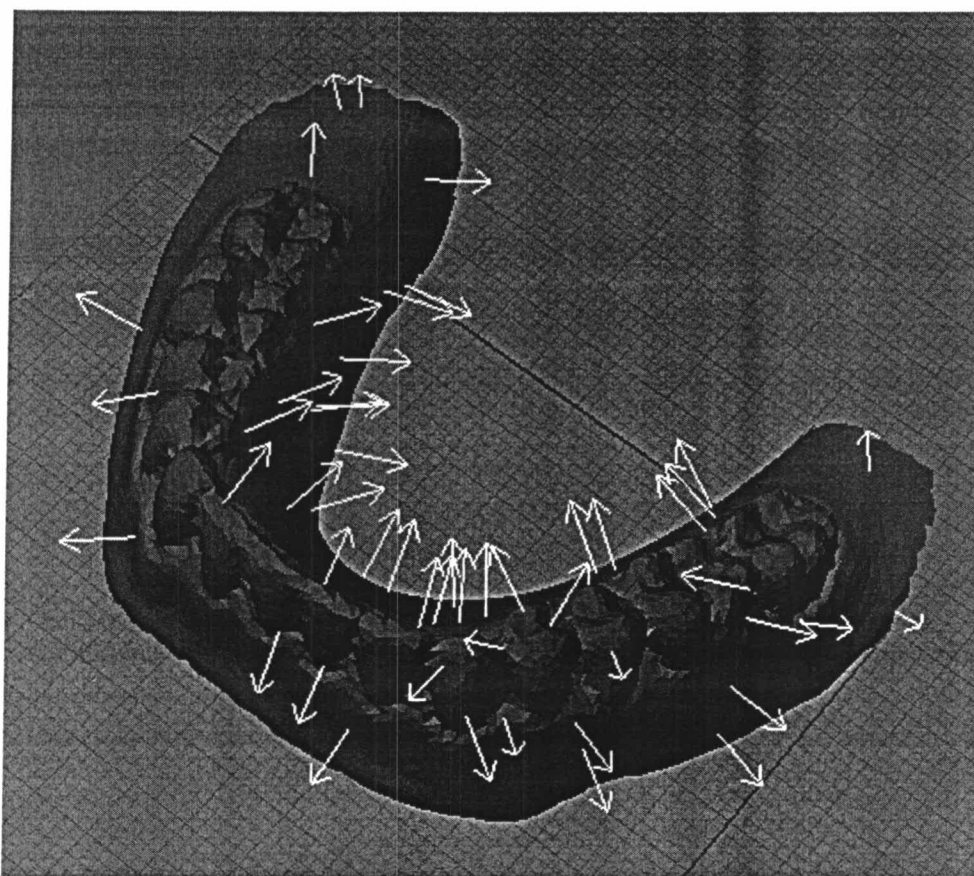
ตัวอย่างที่ 5 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิกัด 3 มิติจากพื้นป्लอม มีคุณลักษณะเป็นพื้นผิวแบบเปิด (Open Surface) และเป็นพื้นผิวที่มีความซับซ้อนมากประกอบไปด้วยผิวที่ต่อเนื่องและผิวไม่ต่อเนื่องจำนวนมาก โดยข้อมูลจุดมีจำนวน 7,886 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่

ถูกสร้างขึ้น 15,487 ผิว และกำหนดความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยม $\rho = 1.6$ รูปที่ 5.28 และรูปที่ 5.29 เป็นแบบจำลอง STL ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบของตัวอย่างที่ 5



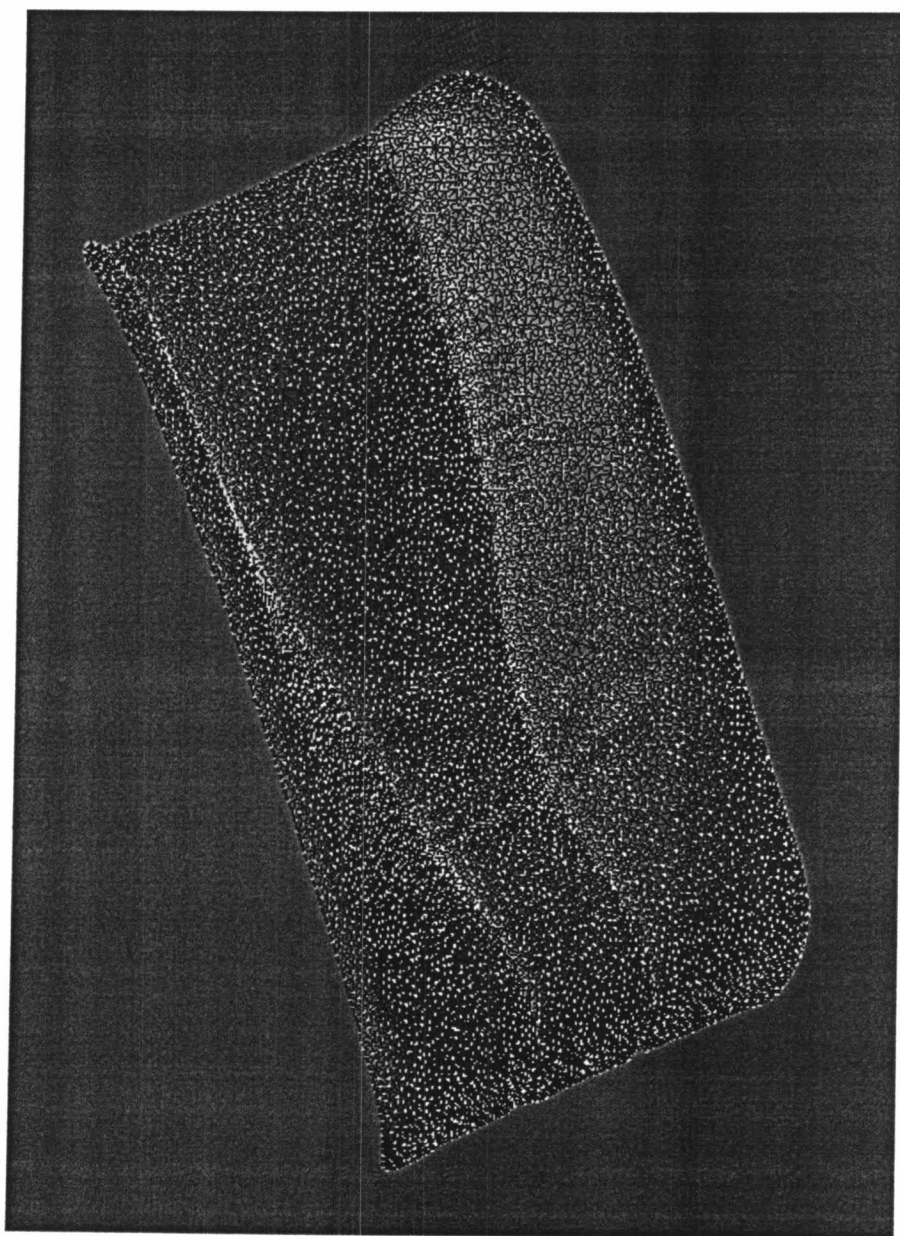
รูปที่ 5.28 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานฟันปลอม



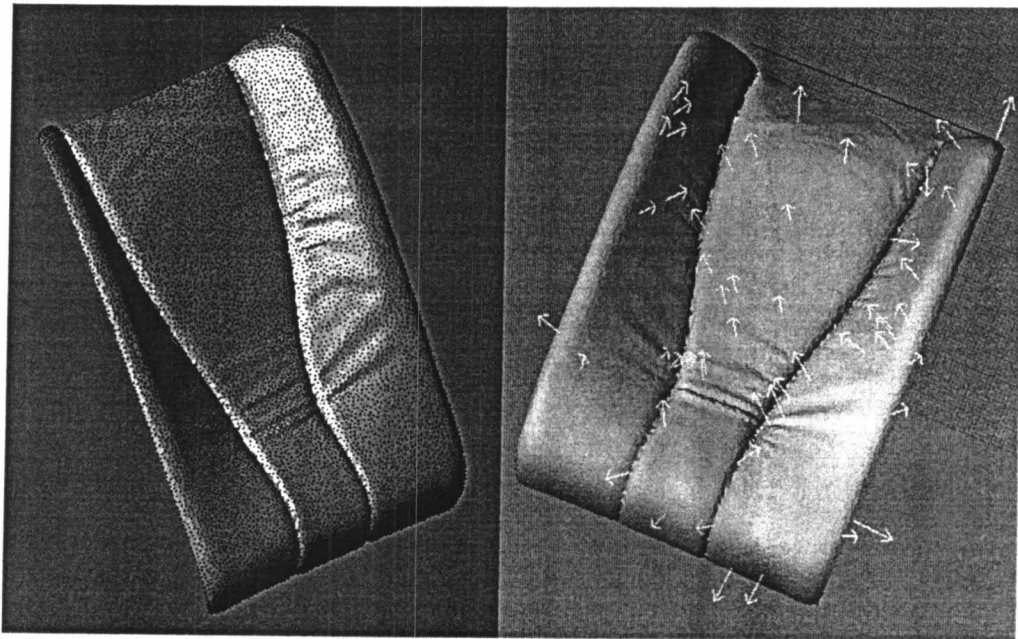


รูปที่ 5.29 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ชิ้นงานฟันปลอม

ตัวอย่างที่ 6 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิกัด 3 มิติจากชิ้นงานเบาะนั่งรถยนต์ มีคุณลักษณะเป็นพื้นผิวแบบเปิด (Open Surface) และเป็นพื้นผิวที่มีความซับซ้อนมาก ประกอบไปด้วยผิวที่ต่อเนื่องและผิวไม่ต่อเนื่องจำนวนมากเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 5 โดยข้อมูลจุดมีจำนวน 9,680 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้น 19,037 ผิว และกำหนดความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยม $p=3.2$ ในรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.31 เป็นแบบจำลอง STL ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบของตัวอย่างที่ 6

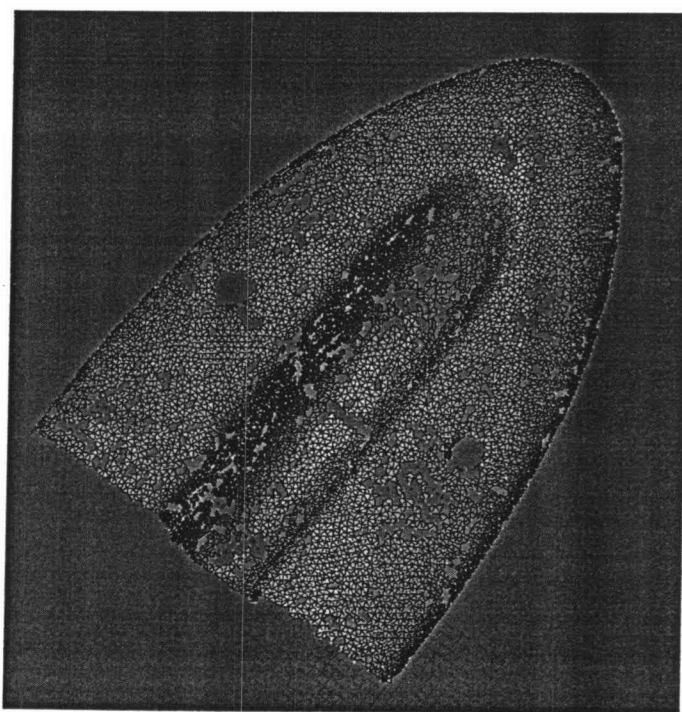


รูปที่ 5.30 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชั้นงานเบาะรถยนต์

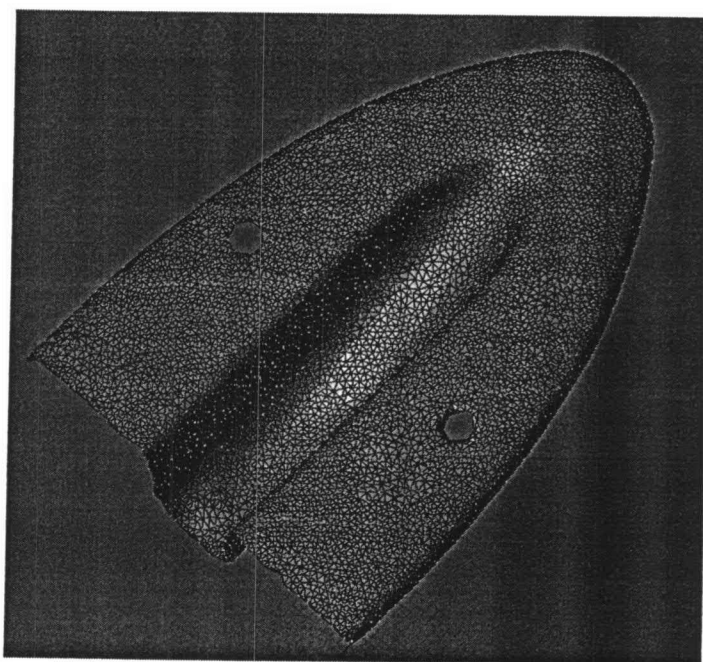


รูปที่ 5.31 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ชิ้นงานเบาะรถยนต์

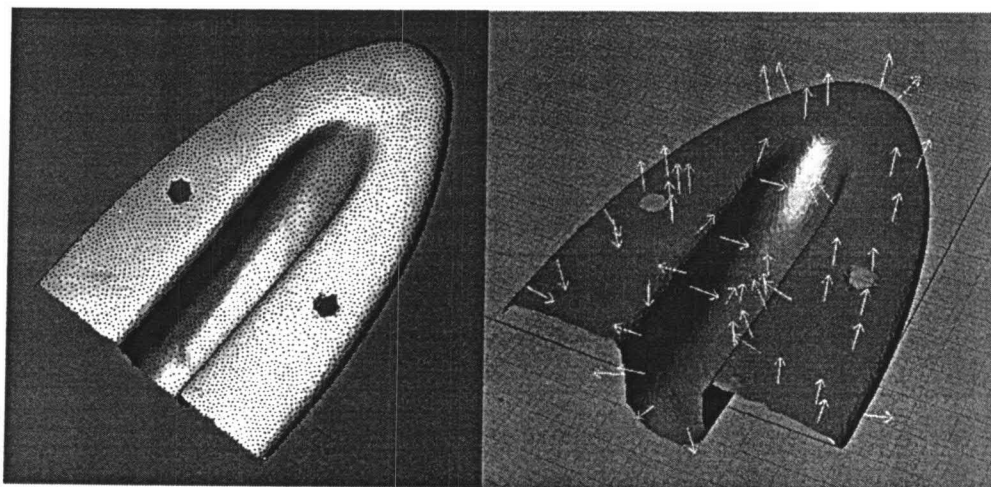
ตัวอย่างที่ 7 ข้อมูลจุดของผิววัตถุได้มาจากการวัดพิทัก 3 มิติจากชิ้นงานอะไหล่รถยนต์ มีคุณลักษณะเป็นผิวแบบเปิด (Open Surface) และเป็นผิวที่ประกอบไปด้วยผิวที่ต่อเนื่องและผิวไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือ มี 2 รู สำหรับใส่สกรูบนชิ้นงาน ในตัวอย่างทดสอบผลกระทบของความยาวขอบหรือค่าจำกัดความยาว ρ โดยข้อมูลจุดมีจำนวน 6,642 จุด มีผิวสามเหลี่ยมที่ถูกสร้างขึ้น 12,938 ผิว และกำหนดความยาวขอบของผิวสามเหลี่ยม $\rho = 1.0$ ในรูปที่ 5.32 จะเกิดรูในบริเวณที่ไม่ต้องการขึ้นเนื่องจากกำหนดค่า ρ ไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงได้มีการเพิ่มค่า $\rho = 2.5$ ในรูปที่ 5.33 และในรูปที่ 5.34 เป็นแบบจำลอง STL ที่มีผิวที่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของทดสอบของตัวอย่างที่ 7



รูปที่ 5.32 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานอะไหล่รถยนต์ที่ไม่สมบูรณ์

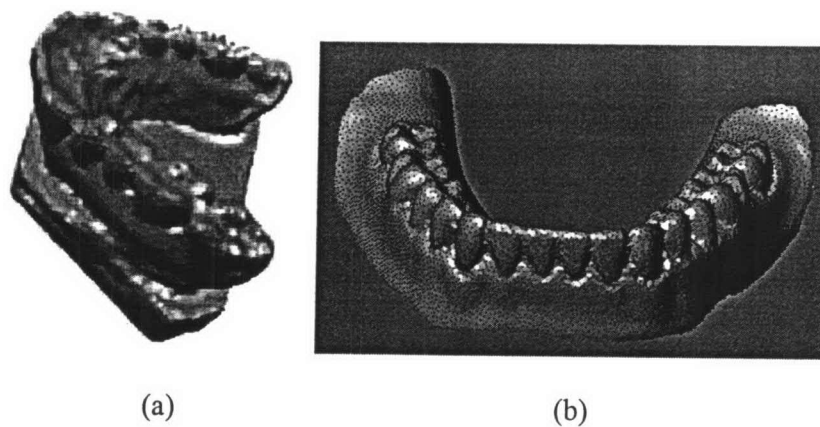


รูปที่ 5.33 ภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของชิ้นงานอะไหล่รถยนต์ที่สมบูรณ์



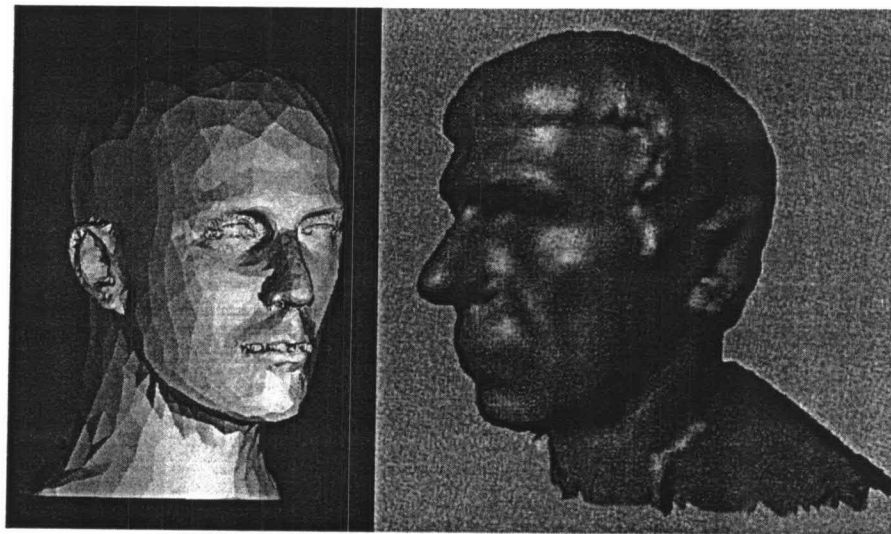
รูปที่ 5.34 ทิศทางเวกเตอร์ตั้งฉากสำหรับแบบจำลอง STL ของชิ้นงานอะไหล่รถยนต์

5.4. ผลลัพธ์การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา



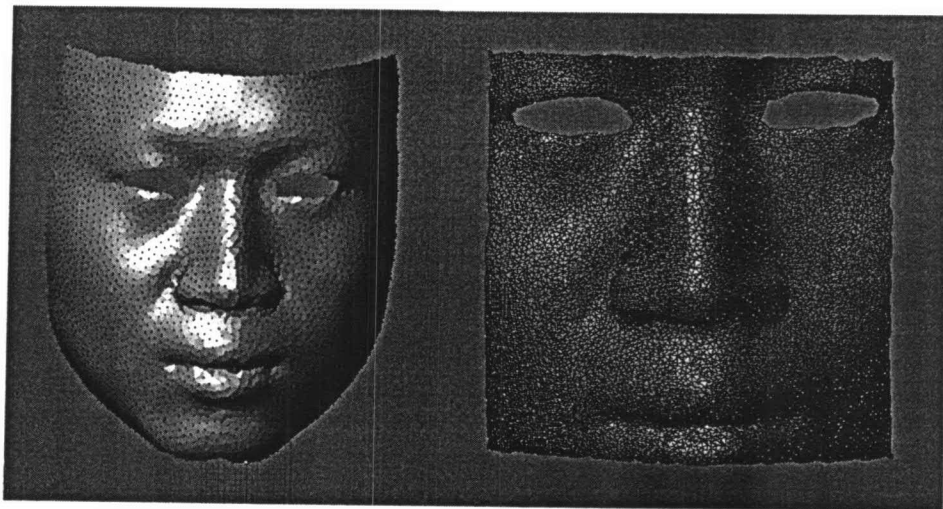
รูปที่ 5.35 แบบจำลองฟันปลอมสร้างจากเทคนิคในงานวิจัยที่ผ่านมา กับเทคนิคใหม่ที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 5.35(a) เป็นผลลัพธ์จากงานวิจัยของ Ivrisimtzis [17] ซึ่งใช้วิธีการของ นีวโรลเน็ตเวิร์ค โดยการเพิ่มเซลล์เข้าสู่โครงสร้าง (Growing Cell Structures, GCS) และรูปที่ 5.35(b) เป็นผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ซึ่งได้พัฒนาเทคนิคขึ้นใหม่



(a)

(b)



(c)

รูปที่ 5.36 แบบจำลองผิวหน้ามนุษย์สร้างจากเทคนิคในงานวิจัยที่ผ่านมา กับเทคนิคใหม่ที่พัฒนาขึ้น

ในรูปที่ 5.36(a) เป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยของ Amenta [6] ซึ่งใช้วิธีอินเตอร์โพลชัน (Interpolation) รูปที่ 5.36(b) เป็นผลลัพธ์ของงานวิจัยของ Hoppe [8] ซึ่งใช้วิธีแอปพ็อกซิเมชัน (Approximation) และรูปที่ 5.36(c) เป็นผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ซึ่งได้พัฒนาเทคนิคขึ้นใหม่

ปัญหาของวิธี GCS ของงานวิจัยที่ผ่านมา

- โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นไม่ได้มาจากข้อมูลจุดของผิววัตถุโดยตรง ดังนั้นจะทำให้โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมที่ได้มีขนาดไม่ถูกต้องตรงกับผิวของวัตถุจริง
- พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเรียนรู้ระบบนิเวศเน็ตเวิร์คเพื่อปรับโครงสร้างเน็ตเวิร์คให้เข้าใกล้กับข้อมูลจุดของผิววัตถุนั้นมีจำนวนมากและยากต่อการปรับค่าให้เหมาะสม
- บริเวณผิวที่ซับซ้อนมากๆ และผิวที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ไม่สามารถปรับโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมให้ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจุดของผิววัตถุได้ เช่น บริเวณร่องฟันกรามจะมีรูปร่างของผิวที่ไม่ชัดเจนในรูปที่ 5.35(a)
- ไม่ได้สร้างแบบจำลอง STL

ปัญหาของวิธีอินเตอร์โพลชัน

- จำนวนของข้อมูลจุดของผิววัตถุจะต้องมีมากเพียงพอและความหนาแน่นของข้อมูลจุดต้องมีความสม่ำเสมอ เพราะถ้าการคัดเลือกกลุ่มข้อมูลจุด (Sampling Point Set) เพื่อสร้างผิวสามเหลี่ยมไม่เหมาะสมจะทำให้ผิวสามเหลี่ยมที่สร้างไม่ถูกต้อง
- ไม่มีความยืดหยุ่นในการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิววัตถุทั่วไป เนื่องจากค่า α -Shape ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมสำหรับผิวของวัตถุบางชนิด
- ผิววัตถุที่สามารถนำข้อมูลจุดมาสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมได้จะต้องเป็นผิวต่อเนื่อง เช่น ไม่มีรู และไม่มี การเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวอย่างทันทีทันใดมากนัก จะเห็นว่าจากรูปที่ 5.36(a) เป็นแบบจำลองผิวหน้ามนุษย์ซึ่งในบริเวณช่องปาก จมูก หู และรอบเข่าตาจะมีผิวสามเหลี่ยมไม่เหมาะสมถูกสร้างขึ้นด้วย นอกจากนั้นบริเวณตาไม่สามารถสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมที่เป็นรูซึ่งเป็นช่องของตาทั้งสองข้างได้
- ไม่ได้สร้างแบบจำลอง STL

ปัญหาของวิธีแอปพ็อกซิเมชัน

- ต้องการข้อมูลจุดที่วัดจากผิววัตถุที่เรียบเท่านั้น
- ขาดรายละเอียดต่างๆที่จำเป็นบนแบบจำลองผิวหน้ามนุษย์ที่สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.36(b)
- อาจเกิดค่าผิดพลาดของขนาดผิวที่สร้างขึ้นกับผิววัตถุจริงได้ง่าย เนื่องจากผิวสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นเกี่ยวข้องกับการประมาณระนาบสัมผัส ดังนั้นจึงต้องการการประมาณระนาบสัมผัสที่ถูกต้องมากจากกลุ่มข้อมูลจุดที่คัดเลือก (Sampling Points) มาเพื่อนำมาคำนวณ
- ไม่ได้สร้างแบบจำลอง STL

ข้อดีของงานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้น

- สร้างแบบจำลอง STL
- โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นมานี้สร้างจากข้อมูลจุดของผิววัตถุโดยตรง ดังนั้นจะไม่เกิดค่าผิดพลาดในระหว่างการสร้างแบบจำลองผิว STL จากข้อมูลจุดของผิววัตถุ
- มีพารามิเตอร์น้อย และง่ายต่อการปรับตัวสำหรับระบบการเรียนรู้นิวรอลเน็ตเวิร์คเพื่อสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม
- สามารถสร้างแบบจำลองผิว STL บริเวณพื้นที่ที่ซับซ้อนได้ ซึ่งมีรายละเอียดบนแบบจำลองผิวฟันทอมที่สมบูรณ์ ดังแสดงรูปที่ 5.35(b) และแบบจำลองผิวหน้ามนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.36(c) และสามารถสร้างแบบจำลองผิวที่มีความไม่ต่อเนื่องได้ เช่น ในบริเวณช่องเบ้าตาทั้งสองซึ่งแสดงในรูปที่ 5.36(c)
- อัลกอริทึมง่ายไม่ซับซ้อน
- ใช้ข้อมูลจุดเพียงจุดเดียวในการคำนวณหนึ่งรอบ ซึ่งจะลดปัญหาเรื่องการคัดเลือกข้อมูลจุด (Sampling Points) ที่ไม่เหมาะสม
- สามารถกำหนดพื้นที่เฉพาะที่ต้องการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมในช่วงที่กำหนดได้เพื่อลดความซับซ้อนได้