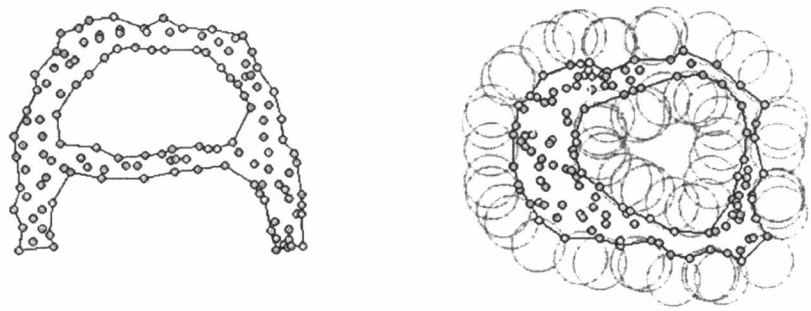
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

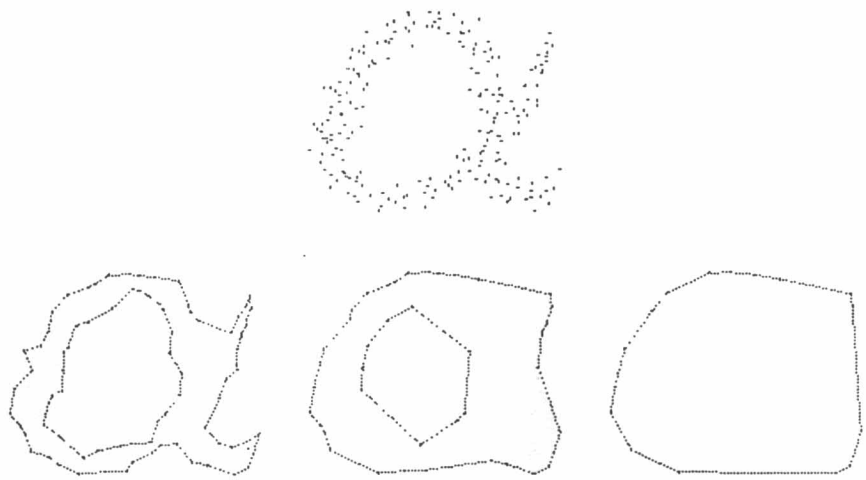
2.1. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีผลงานวิจัยมากมายได้นำเสนอวิธีต่างๆ เพื่อหารายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจุดที่ถูกต้อง (Correct Connectivity) เพื่อสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมจากข้อมูลจุดของผิววัตถุซึ่งมีการกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Unorganized Points) ที่ได้มาจากเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติบนผิวของวัตถุ เมื่อรู้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจุดได้ถูกต้องแล้วจะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมซึ่งแทนผิวของวัตถุนั้นได้ถูกต้องตามไปด้วย

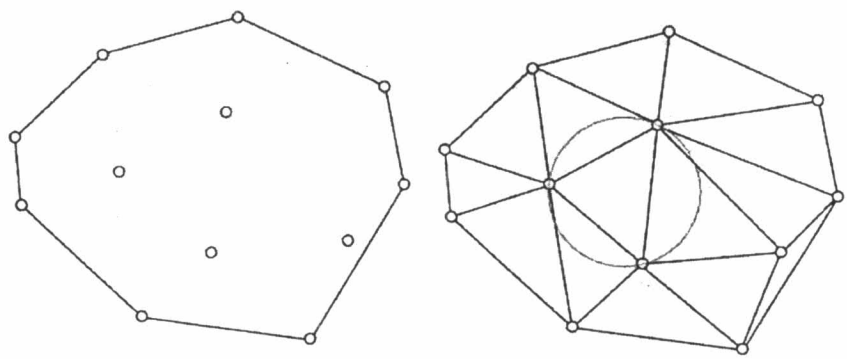
งานวิจัยก่อนหน้านี้มีการใช้วิธีอินเตอร์โพเลชั่น (Interpolation) และวิธีแอปพ็อคซิเมชั่น (Approximation) ซึ่งโดยวิธีแรก คือ อินเตอร์โพเลชั่นนั้น งานวิจัยของ Edelsbrunner [4] และ Attali [5] ใช้พารามิเตอร์ α - Shape เป็นปัจจัยในการสร้างผิวของวัตถุให้มีความถูกต้องตามรูปที่ 2.1 เป็นการหากลุ่มข้อมูลจุดที่อยู่ใกล้ๆกันกว่ากลุ่มข้อมูลจุดอื่นๆโดยใช้ค่าตัวแปรรัศมี คือ α เพื่อกำหนดการจับกลุ่มโดยที่ภายในวงกลมจะต้องมีอย่างน้อย 2 ข้อมูลจุด ซึ่งถ้าตัวแปร α มีค่าแตกต่างกันไปจะได้ขอบเขตในการสร้างผิวสามเหลี่ยมที่แตกต่างกันตามรูปที่ 2.2 เมื่อได้ขอบเขตของกลุ่มข้อมูลจุดที่อยู่บริเวณใกล้ๆกันแล้วสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจุดภายในขอบเขตเหล่านั้นโดยใช้วิธีการสร้างผิวสามเหลี่ยมดีลอเน่ (Delaunay Triangulation) ตามรูปที่ 2.3 เป็นวิธีการสร้างสามเหลี่ยมโดยการเชื่อมโยงข้อมูลจุดที่อยู่ตามขอบวงกลมและภายในวงกลมนั้นจะต้องไม่มีข้อมูลจุดใดๆ บรรจุอยู่ และรูปที่ 2.4 แสดงถึงลักษณะต่างๆของการเชื่อมโยงโครงสร้างสามเหลี่ยมด้วยวิธีการสร้างสามเหลี่ยมดีลอเน่ จะเห็นได้ว่าค่าของ α - Shape ที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวที่มีความถูกต้องได้ นั่นก็ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนข้อมูลจุดในบริเวณส่วนใดๆนั้นจะต้องมีความสม่ำเสมอ (Uniform) ซึ่งโดยปกติแล้วความหนาแน่นของกลุ่มข้อมูลจุดที่นำมาคำนวณนั้นจะไม่มีความสม่ำเสมอกันในบริเวณต่างๆ ทั่วผิววัตถุ ดังนั้นวิธีการนี้จะมีข้อจำกัดในการสร้างผิวสามเหลี่ยมโดยทั่วๆ ไป และในบางกรณีก็ไม่อาจสร้างผิวสามเหลี่ยมได้ ตามรูปที่ 2.5 แสดงการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิววัตถุเมื่อมีการกำหนดค่า α ต่างๆ ที่ไม่เหมาะสม สิ่งสำคัญของวิธีนี้ คือ ความหนาแน่นของข้อมูลจุดนั้นต้องมีจำนวนมาเพียงพอและต้องการการกระจายของข้อมูลจุดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและเป็นข้อมูลจุดที่ได้มาจากผิวที่ราบเรียบ และการกำหนดค่า α นั้นหาได้ด้วยความยากลำบากจะต้องมีการทดลองค่าหลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม และการเชื่อมโยงข้อมูลจุดเพื่อสร้างผิวสามเหลี่ยมใน 3 มิติ ด้วยวิธีการสร้างผิวสามเหลี่ยมดีลอเน่นั้นต้องการคำนวณที่ซับซ้อนมาก



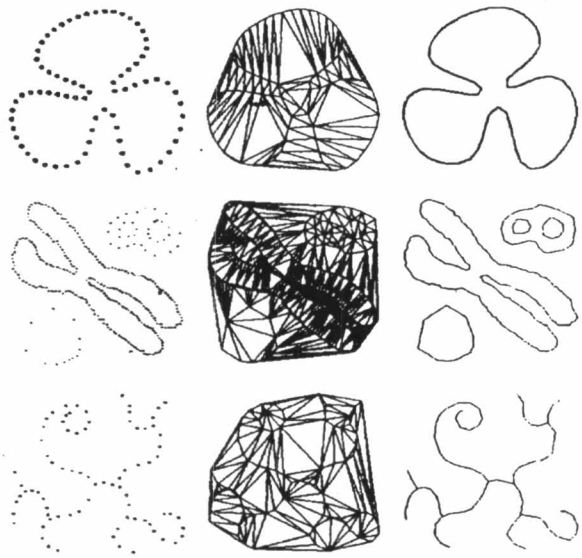
รูปที่ 2.1 การหาขอบเขตในการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมด้วยรัศมี α



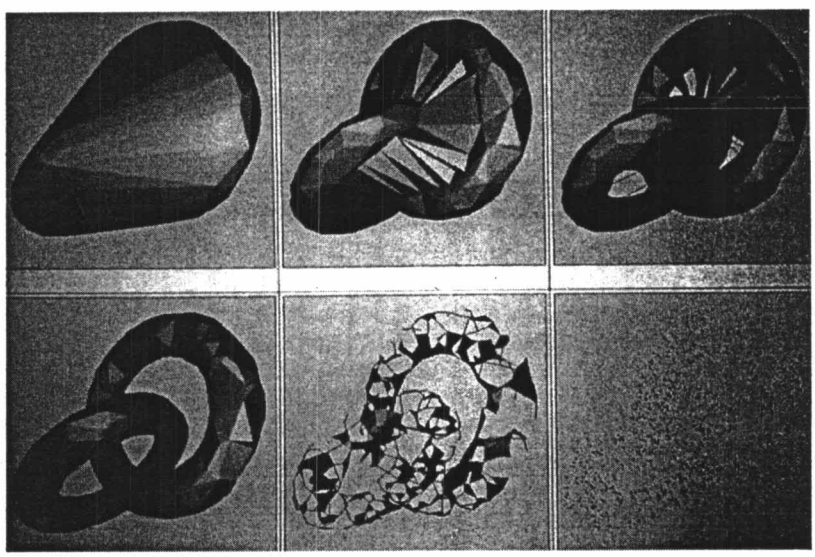
รูปที่ 2.2 ขอบเขตการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมเมื่อค่ารัศมี α เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.3 การสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมภายในขอบเขตของค่ารัศมี α



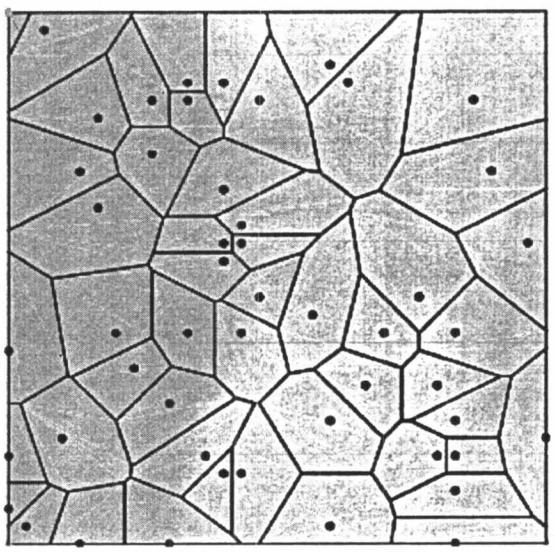
รูปที่ 2.4 ลักษณะต่างๆ สำหรับการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม



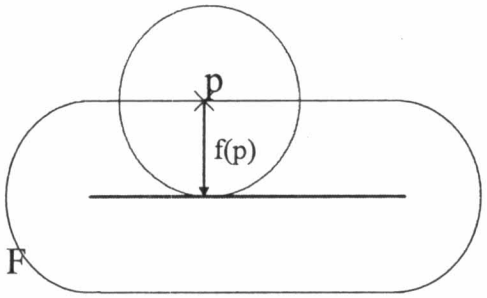
รูปที่ 2.5 ผลการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของผิววัตถุจริงเมื่อกำหนดค่า α ต่างๆ

งานวิจัยของ Amenta และ Bern [6] ใช้วิธีการสร้างโวโรนอยไดอะแกรม (Voronoi Diagram) ในการค้นหาข้อมูลจุดที่ใกล้ๆกันเพื่อเชื่อมโยงข้อมูลจุดเหล่านั้นเพื่อสร้างผิวสามเหลี่ยมนั้น ซึ่งโวโรนอยไดอะแกรม คือ การแยกแยะข้อมูลจุดเข้าสู่โพลีกอน (Polygon) โดยในแต่ละโพลีกอนมีข้อมูลจุดหนึ่งจุดบรรจุอยู่ภายในและระหว่างโพลีกอนบรรจุข้อมูลจุดที่อยู่ใกล้ๆ

กันตามรูปที่ 2.6 สำหรับวิธีการนี้จำนวนของข้อมูลจุดในบริเวณใดๆ จะต้องมีจำนวนมากเพียงพอและเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะรูปร่างส่วนโค้งเว้าของวัตถุ โดยที่ผิวบริเวณที่มีรูปร่างโค้งเว้าจะต้องมีจำนวนจุดมากกว่าบริเวณที่ราบเรียบ ดังนั้นในการคำนวณเพื่อหาข้อมูลจุดที่ใกล้กันและเหมาะสมสำหรับการเชื่อมโยงข้อมูลจุดเพื่อสร้างผิวสามเหลี่ยมจะต้องคำนึงถึงความหนาแน่นของข้อมูลจุดที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของผิวตามรูปที่ 2.7 ฟังก์ชั่น f(p) คือ ฟังก์ชั่นที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของข้อมูลจุดตามบริเวณส่วนโค้งของผิว โดยที่ F คือ พื้นผิวที่มีการกระจายของข้อมูลจุด p ดังนั้นรัศมีของวงกลมสำหรับสร้างโวโรนอยนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของข้อมูลจุด เมื่อได้โวโรนอยตามรูปที่ 2.8 จะเชื่อมโยงข้อมูลจุดที่อยู่ใกล้กันระหว่างเส้นแยกระหว่างกลางของข้อมูลจุด (Medial Axis) ของโวโรนอย และจุดปลายโวโรนอย (Voronoi Vertices) ด้วยวิธีการสร้างสามเหลี่ยมดีรอเน่ (Delaunay Triangulation) ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ต้องใช้กลุ่มข้อมูลจุด (Sampled Point Set) เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่นของชุดข้อมูลเพื่อต้องการหาค่าของ f(p) สำหรับเป็นรัศมีของการกำหนดข้อมูลจุดที่ใกล้กันเพื่อสร้างโวโรนอยไดอะแกรมและเพื่อเชื่อมโยงข้อมูลจุดเหล่านั้นสำหรับสร้างโครงสร้างสามเหลี่ยมด้วย ดังนั้นข้อมูลจุดที่ได้จากการวัดพิกัดบนผิววัตถุจากเครื่องวัดนั้นจะต้องเป็นข้อมูลจุดของผิวที่เรียบและข้อมูลจุดจะต้องมีความหนาแน่นของข้อมูลจุดเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะผิวอย่างถูกต้องด้วย ซึ่งวิธีนี้จึงขาดความยืดหยุ่นในการสร้างผิวสามเหลี่ยมจากข้อมูลจุดที่ได้จากเครื่องมือวัดพิกัดโดยทั่วไป

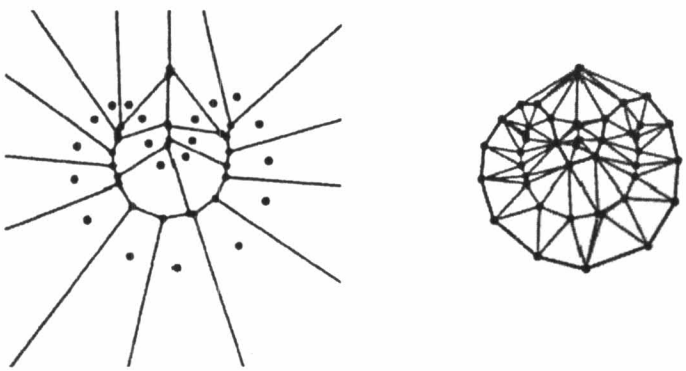


รูปที่ 2.6 โวโรนอยไดอะแกรม (Voronoi Diagram) ของข้อมูลจุด



$$p \in F$$

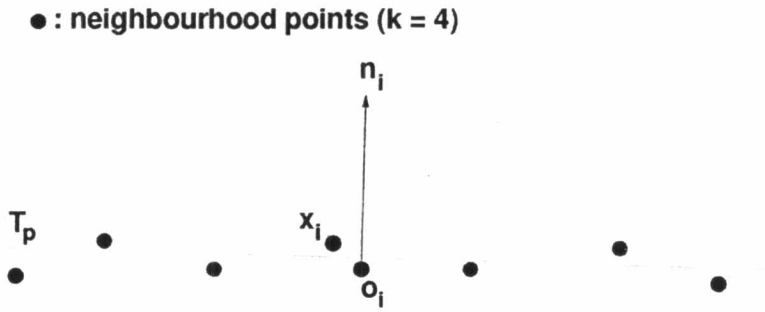
รูปที่ 2.7 รัศมีวงกลมที่เปลี่ยนไปตามความหนาแน่นของข้อมูลจุด



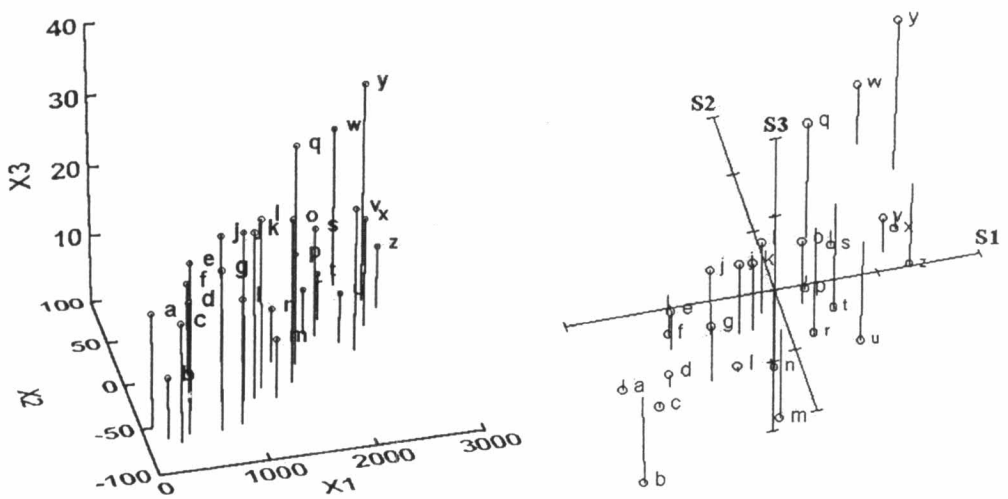
รูปที่ 2.8 การสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมของโวโรนอยไดอะแกรม

ในวิธีที่สองในงานวิจัยของ Hoppe [7-8] และ Curless และ Levoy [9] นั้นใช้หลักการของวิธีแอปพ็อคซิเมชั่นซึ่งเป็นการสร้างผิวสามเหลี่ยมแบบการประมาณ ด้วยการสร้างผิวที่เป็นระนาบ (Piecewise Linear Surface) โดยการประมาณจากกลุ่มข้อมูลจุด (Sampling Points) ซึ่งกำหนดมาจากค่า k คือ จำนวนข้อมูลจุดที่อยู่รอบๆข้อมูลจุดที่พิจารณาอยู่เพื่อนำข้อมูลจุดเหล่านั้นและข้อมูลจุดที่กำลังพิจารณาอยู่มาประมาณหาระนาบสัมผัส (Tangent Plane) ตามรูปที่ 2.9 โดยการสร้างผิวของวัตถุประกอบไปด้วยผิวระนาบเหล่านี้ต่อกันเป็นจำนวนมาก โดยแต่ละผิวสามเหลี่ยมนั้นได้จากการเชื่อมโยงข้อมูลจุดที่มีระยะทางจากข้อมูลจุดนั้นมาสู่ระนาบซึ่งได้จากการประมาณนั้นมีระยะทางใกล้กับระนาบอยู่ในค่าที่กำหนดซึ่ง ก็คือ การพยายามสร้างผิวระนาบจากข้อมูลจุดที่ใกล้เคียงกับระนาบที่ได้จากการประมาณนั่นเอง โดยระนาบนั้นจะคำนวณจากการวิเคราะห์กฎของส่วนประกอบของ 2 เวคเตอร์ (Principal Components Analysis, PCA) เพื่อใช้ในการหาการประมาณระนาบที่เหมาะสมที่สุด (Best-Fitting Plane) จากรูปที่ 2.10 เป็นการคำนวณหาจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของข้อมูลจุดเพื่อหาจุดศูนย์กลางของระนาบสัมผัสที่ได้จาก 2 เวคเตอร์โดยแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อได้ระนาบที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นต้องคำนวณหาข้อมูลจุดที่

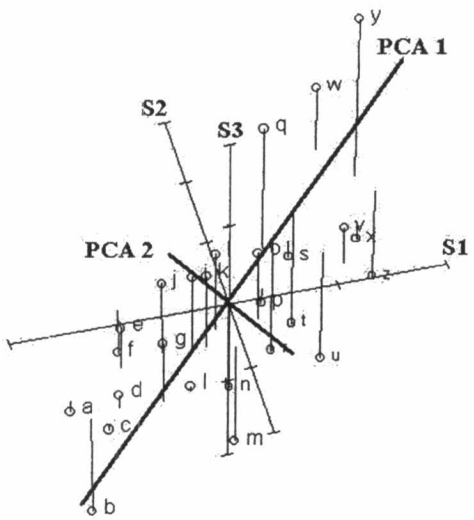
เหมาะสมสำหรับเชื่อมโยงข้อมูลจุดเพื่อสร้างผิวสามเหลี่ยมโดยการหาระยะทางที่ได้จากการฉายระยะทางจากข้อมูลจุดกับจุดศูนย์กลางระนาบไปสู่ทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบตามรูปที่ 2.12 โดยข้อมูลจุดที่เหมาะสมนั้นจะต้องมีระยะทางภายในค่าที่กำหนด ρ ตามรูปที่ 2.13 และการสร้างผิวสามเหลี่ยมในการเชื่อมโยงข้อมูลจุดของระนาบต่อไปนั้น ระนาบนั้นจะต้องประมาณใกล้เคียงไปทิศทางเดียวกันกับระนาบที่ต่อเนื่องกันเพื่อบอกถึงความใกล้กันของข้อมูลจุดและความต่อเนื่องของผิวในบริเวณนั้น ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้จากการวัดพิกัดนั้นจะต้องเป็นข้อมูลจุดของผิววัตถุที่เรียบและมีความหนาแน่นของข้อมูลจุดมาก เนื่องจากความถูกต้องของแบบจำลองผิวสามเหลี่ยมของวัตถุที่สร้างขึ้นจะขึ้นอยู่กับการประมาณระนาบเป็นสำคัญ



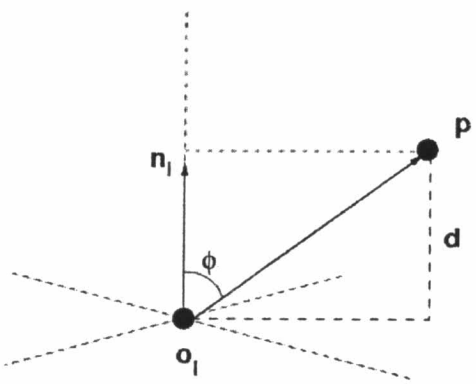
รูปที่ 2.9 กำหนดจำนวนข้อมูลจุดรอบๆ k=4 เพื่อใช้ในการคำนวณระนาบ



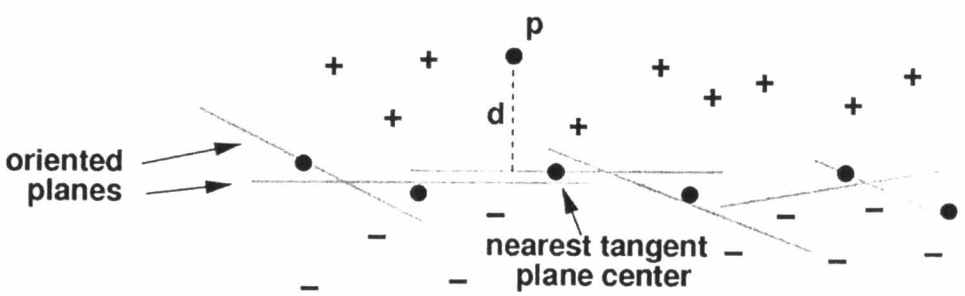
รูปที่ 2.10 การคำนวณหาจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของกลุ่มข้อมูล

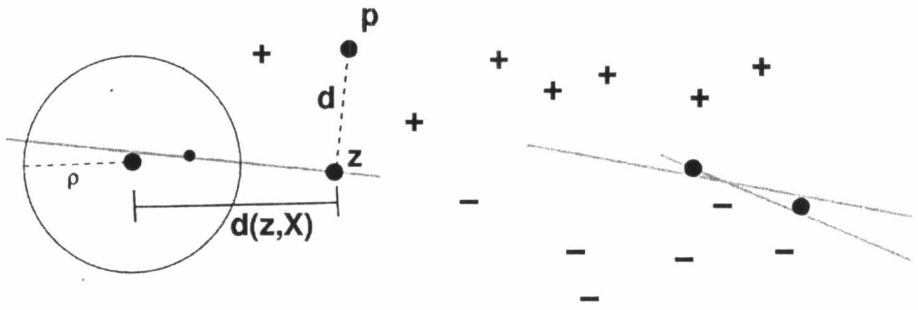


รูปที่ 2.11 การคำนวณแกนของระนาบสัมผัส (Tangent Plane)



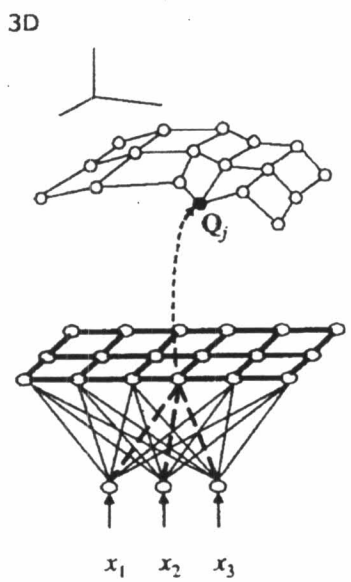
รูปที่ 2.12 การฉาย (Project) ระยะทางของข้อมูลจุดกับจุดศูนย์กลางของระนาบสัมผัส





รูปที่ 2.13 การขอบเขตของข้อมูลจุดที่เหมาะสมสำหรับสร้างผิวสามเหลี่ยม

และงานวิจัยที่นำเอาระบบนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural Network) มาใช้สำหรับขบวนการเรียนรู้ (Learning) เพื่อสร้างผิวตาข่ายสามเหลี่ยมซึ่งเป็นแบบจำลองแทนผิวของวัตถุ โดยมีความแตกต่างกับวิธีที่กล่าวมาแล้ว กล่าวคือ วิธีนี้จะรู้รายละเอียดความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจุดหรือจุดปลาย (Vertices) ของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Connectivity of Triangular Mesh) เรียบร้อยแล้วซึ่งโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมนี้ ก็คือ โครงสร้างเน็ตเวิร์ค (Network Structure) ของระบบนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural Network) นั่นเอง ตามรูปที่ 2.14

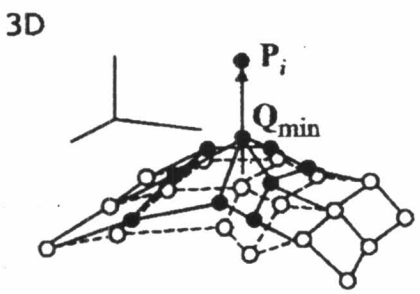


รูปที่ 2.14 ระบบนิวรอลเน็ตเวิร์คของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม

แต่จุดปลายของผิวสามเหลี่ยมของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมจะยังไม่รู้ตำแหน่งที่เหมาะสมที่ใกล้เคียงและสามารถแทนข้อมูลจุดของผิววัตถุได้ ดังนั้นต้องมีการปรับตำแหน่งจุด

ปลายของแต่ละผิวเหลี่ยมเพื่อเข้าใกล้กับข้อมูลจุดของผิววัตถุหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าแต่ละโหนด (Node) ของโครงสร้างเน็ตเวิร์คจะต้องปรับตัวเองให้เข้าใกล้กับข้อมูลอินพุต (Input Data) ตามรูปที่ 2.15 ดังนั้นจึงต้องมีขบวนการเรียนรู้เพื่อปรับโครงสร้างเน็ตเวิร์คให้เข้าใกล้ข้อมูลอินพุตซึ่งในงานด้านวิศวกรรมย้อนกลับ ข้อมูลอินพุต คือ ข้อมูลจุดของผิววัตถุ จากรูปที่ 2.14 ข้อมูลอินพุตหรือจุดพิกัดของข้อมูลต้นแบบ คือ x_1, x_2, x_3 และระบบนิวรอลเน็ตเวิร์คจะเรียนรู้โดยการคำนวณหาว่าข้อมูลจุดอินพุตนั้นใกล้กับจุดปลายจุดใดของผิวสามเหลี่ยมในโครงสร้างเน็ตเวิร์ค ซึ่งจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมที่ใกล้ที่สุดจะให้ชื่อว่า Q_j หลังจากนั้นจุด Q_j และข้อมูลจุดรอบๆในโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมจะต้องมีปรับตำแหน่งเพื่อเข้าใกล้ข้อมูลจุดอินพุต โดยมีลักษณะตามรูปที่ 2.15

ในการปรับตัวของจุดปลายผิวสามเหลี่ยมนี้จะต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์มากมาย เช่น การกำหนดจำนวนของจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมบริเวณรอบๆ จุดปลายที่ Q_j ที่จะต้องมีการปรับตำแหน่งตามจุดปลายที่ Q_j ไปด้วย และขนาดของระยะทางในการปรับตำแหน่งของจุดปลายที่ Q_j และจุดปลายที่อยู่บริเวณรอบๆจุด Q_j ด้วย ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ยากที่จะกำหนดให้เหมาะสมได้



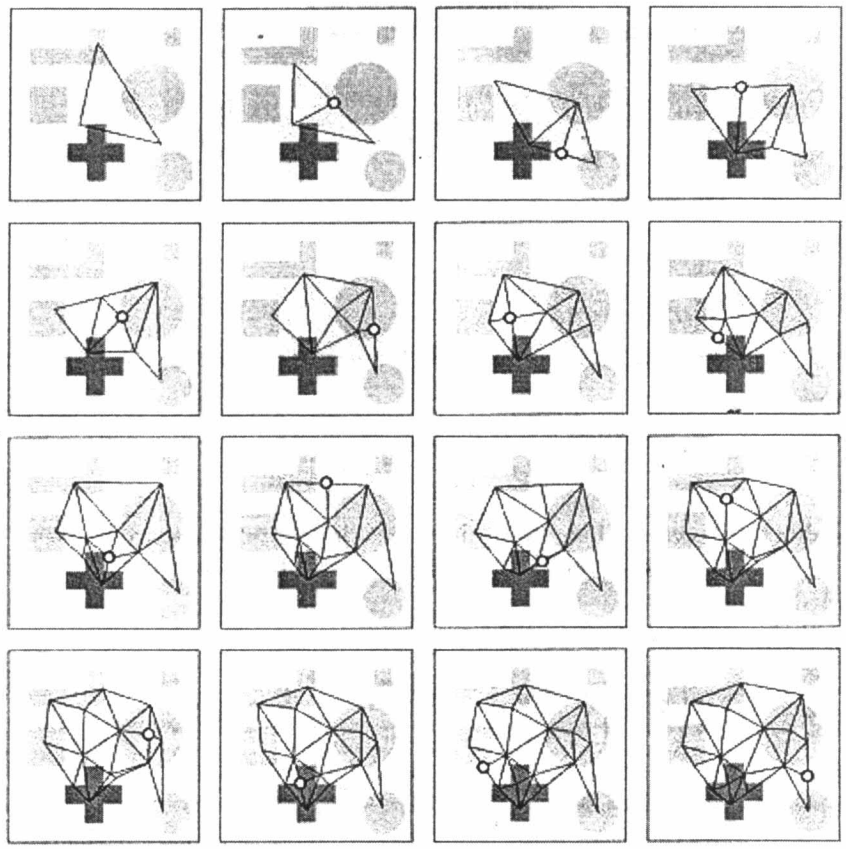
รูปที่ 2.15 การปรับข้อมูลจุดที่ใกล้ที่สุดและข้อมูลจุดบริเวณรอบๆเข้าสู่ข้อมูลจุดของผิววัตถุ

รูปที่ 2.16 การปรับตำแหน่งจุดปลายของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมเข้าสู่ข้อมูลจุดของผิววัตถุ

หลักการของระบบนิวรอลเน็ตเวิร์คที่นำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมย้อนกลับมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ แบบที่หนึ่งวิธีการจัดการโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมด้วยตัวเองของโคโฮเนน (Kohonen's Self Organizing Map, SOM) จะต้องกำหนดโครงสร้างเน็ตเวิร์คล่วงหน้าก่อน ซึ่ง

โครงสร้างเน็ตเวิร์คที่กำหนดนี้ คือ โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh) และโหนด คือ ข้อมูลจุดหรือจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมโดยที่โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมนี้จะรู้รายละเอียดความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจุดหรือจุดปลาย และข้อมูลอินพุตของนิวรอลเน็ตเวิร์ค คือ ข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้จากการวัดบนผิววัตถุและโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆสำหรับจำนวนและความสัมพันธ์ระหว่างจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมในโครงสร้างระหว่างการเรียนรู้ในระบบนิวรอลเน็ตเวิร์ค แต่จะใช้เพียงการปรับตำแหน่งของจุดปลายของแต่ละผิวสามเหลี่ยมของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมให้เข้าใกล้กับข้อมูลจุดของผิววัตถุหรือข้อมูลอินพุตโดยขบวนการเรียนรู้ของนิวรอลเน็ตเวิร์คตามรูปที่ 2.14 รูปที่ 2.15 และ รูปที่ 2.16 แต่เนื่องจากวิธีนี้จะต้องกำหนดโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมไว้ล่วงหน้าก่อนนั้น ถ้ากำหนดโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมไม่เหมาะสมจะทำให้จุดปลายของผิวสามเหลี่ยมในโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมไม่สามารถปรับตัวเองให้เข้าใกล้กับข้อมูลจุดของผิววัตถุตามที่ต้องการได้ ข้อดีของวิธีการนี้ คือ ผิวตาข่ายสามเหลี่ยมที่ได้จากข้อมูลจุดของผิววัตถุจะไม่มีรูเกิดขึ้นเนื่องจากได้กำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว [10-13] แต่ขณะเดียวกันก็เป็นข้อเสียด้วยถ้าผิวเป็นผิวไม่ต่อเนื่องมีรูอยู่ที่ผิววัตถุก็ยากที่จะสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมด้วยเช่นกัน และในแบบที่สอง คือ วิธีการเพิ่มจำนวนเซลล์ของโครงสร้าง (Growing Cell Structures) เป็นวิธีที่คล้ายคลึงกับวิธีของโคโฮเนน แต่ปรับปรุงแก้ไขข้อเสียของวิธีของโคโฮเนนที่จะต้องกำหนดจำนวนและความสัมพันธ์ระหว่างจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมภายในโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมที่แน่นอนไว้ล่วงหน้าก่อนตามที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นวิธีการเพิ่มจำนวนเซลล์ของโครงสร้าง [13-16] นั้นจะมีโครงสร้างเน็ตเวิร์คเริ่มต้นเป็นผิวสามเหลี่ยม 1 ผิว และมีโหนดเป็นจุดปลายของผิวสามเหลี่ยม 3 จุด และข้อมูลอินพุตของเน็ตเวิร์ค คือ ข้อมูลจุดของผิววัตถุ โดยจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมซึ่งเป็นโครงสร้างเน็ตเวิร์ค นั้นจะปรับตัวเข้าสู่ข้อมูลจุดของผิววัตถุ ซึ่งจะต้องมีการเพิ่มหรือลดโหนด เข้าไปในโครงสร้างเน็ตเวิร์ค หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า คือ การเพิ่มหรือลดจุดปลายเข้าไปที่โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมเพื่อเพิ่มจำนวนของผิวสามเหลี่ยมให้มากขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับเมื่อมีความหนาแน่นของจำนวนข้อมูลจุดของผิววัตถุบริเวณจุดปลายของผิวสามเหลี่ยมซึ่งปรับเข้าใกล้ไปนั้นมีจำนวนมาก ดังนั้นจะต้องมีการเพิ่มโหนดเข้าไปที่โครงสร้างเน็ตเวิร์คที่บริเวณจุดปลายที่ปรับเข้าใกล้กลุ่มข้อมูลจุดที่มีความหนาแน่นมากตามรูปที่ 2.17 ดังนั้นวิธีนี้ขนาดของโครงสร้างเน็ตเวิร์คสามารถปรับตัวได้อัตโนมัติ แต่วิธีนี้ก็ยังยากที่จะกำหนดพารามิเตอร์ในการปรับตำแหน่งที่เหมาะสมของจุดปลายแต่ละจุดภายในโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมหรือโครงสร้างเน็ตเวิร์คให้เข้าใกล้กับข้อมูลจุดของผิววัตถุมากที่สุด และอาจจะต้องกำหนดจำนวนรอบของการตรวจสอบโครงสร้างว่าจำนวนจุดปลายที่เพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับการกระจายของข้อมูลจุดของผิววัตถุหรือไม่ ซึ่งถ้าบริเวณที่จุดปลายของพื้นผิวสามเหลี่ยมปรับเข้าใกล้ไปนั้น มีจำนวนความหนาแน่นของข้อมูลจุดน้อยก็จะต้องมีการลบโหนดออกจากโครงสร้างเน็ตเวิร์คด้วย ได้มีงานวิจัย [17-18] ที่นำเอาวิธีการเพิ่มจำนวนเซลล์ของโครงสร้างไปใช้สำหรับ

สร้างผิวตาข่ายสามเหลี่ยมเพื่อแทนผิวของวัตถุจากข้อมูลจุดของผิววัตถุ ที่มีการกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Unorganized Points)



รูปที่ 2.17 การเพิ่มจำนวนเซลล์หรือโหนดเข้าสู่โครงสร้างเน็ตเวิร์ค

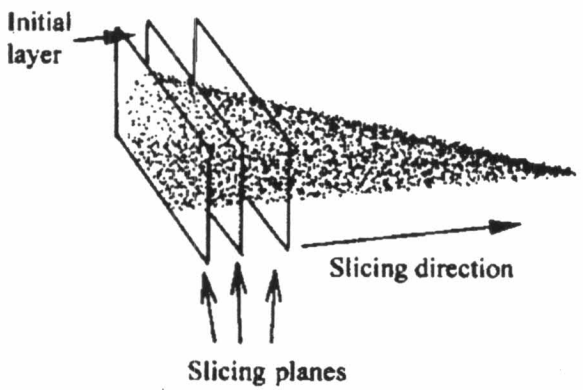
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการอินเตอร์โพเลชั่นนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้จากการวัดบนผิววัตถุซึ่งสมมติว่าข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้นั้นได้มาจากผิววัตถุที่เรียบ และการเลือกกลุ่มข้อมูลจุด (Sampling Points) ขึ้นมาใช้ในการคำนวณเพื่อสร้างผิวสามเหลี่ยมนั้นจะต้องเหมาะสม และวิธีแอปพ็อคซิเมชั่นนั้น นอกจากข้อมูลจุดของผิววัตถุนั้นจะต้องมีคุณภาพและการเลือกกลุ่มข้อมูลจุดที่เหมาะสมและยังจะต้องมีการประมาณระนาบสัมผัส (Tangent Plane) ที่ถูกต้องมากๆ ด้วย เพื่อความถูกต้องของแบบจำลองผิวที่สร้างขึ้น ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้ขาดความยืดหยุ่นในการสร้างพื้นผิว ส่วนวิธีที่ใช้ระบบนิวรอลเน็ตเวิร์ค ซึ่งทั้งสองรูปแบบนั้นผิวตาข่ายสามเหลี่ยมซึ่งเป็นโครงสร้างเน็ตเวิร์ค นั้นเป็นเพียงผิวที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจุดของผิววัตถุเท่านั้น ไม่ใช่ผิวที่เกิดจากข้อมูลจุดของผิววัตถุโดยตรง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องของขนาดรูปร่างวัตถุ เช่น ในงานสร้างต้นแบบอย่าง

เร็ว และงานที่เกี่ยวกับงานทางด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเรียนรู้ของระบบนิวรอลเน็ตเวิร์ควิธีการนี้นั้นมีจำนวนมากและยากต่อการกำหนดเพื่อให้ได้ผิวที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจุดของผิววัตถุ นอกจากนั้นวิธีทั้งหมดที่ได้กล่าวแล้วนั้นยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองผิวที่เป็นรูปแบบ STL

2.2. แนวคิดและทฤษฎี

สำหรับเทคนิคใหม่ที่จะนำเสนอเพื่อสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh) สำหรับแบบจำลอง STL จากข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่กระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (Unorganized Cloud Points) และไม่รู้รายละเอียดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจุด มี 3 ขั้นตอนใหญ่

2.2.1. จัดเรียงอันดับข้อมูลจุดของผิววัตถุด้วยระนาบซไลซ์ (Slicing Planes)

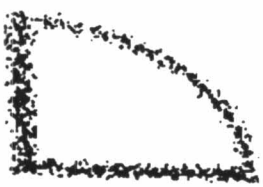


รูปที่ 2.18 ระนาบซไลซ์ (Slicing Plane) ตัดผ่านกับข้อมูลจุดของผิววัตถุ

อัลกอริทึมนี้จะใช้ระนาบซไลซ์ (Slicing Planes) จำนวนหนึ่งตัดผ่านข้อมูลจุดของผิววัตถุด้วยค่าระยะห่างระหว่างแต่ละระนาบดังรูปที่ 2.18 ซึ่งผู้ใช้กำหนดตลอดช่วงของข้อมูลจุด เพื่อการจัดเรียงอันดับข้อมูลจุดและเพื่อค้นหาข้อมูลจุดที่อยู่ใกล้ๆ กับระนาบซไลซ์ที่ระยะทางใดๆ เพื่อคัดแยกกลุ่มของข้อมูลจุดที่อยู่ใกล้ระนาบซไลซ์ที่ระยะทางนั้น โดยไม่มีการฉาย (Project) ข้อมูลจุดใดๆไปที่ระนาบซไลซ์ เพื่อต้องการใช้ข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้มาจากการวัดพิกัด 3 มิติบนผิวของวัตถุจริงๆ มาสร้างแบบจำลองผิว STL ของวัตถุโดยตรง

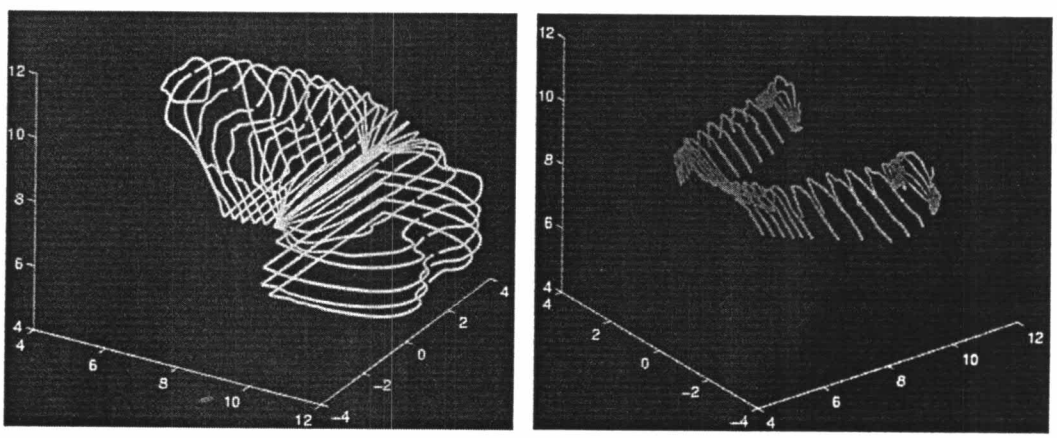
ดังนั้นระนาบซไลซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็เพื่อลดความซับซ้อนของข้อมูลจุด เพื่อคัดเลือกข้อมูลจุด (Sampling Point) นำไปใช้ในขบวนการการจัดการข้อมูลและสร้างแบบจำลอง STL ต่อไป ซึ่งแตกต่างจากวิธีในงานวิจัย [1-3] ที่ใช้ระนาบซไลซ์ สำหรับสร้างข้อมูลซไลซ์จาก

ข้อมูลจุดของผิววัตถุ สำหรับใช้กับงานสร้างต้นแบบอย่างเร็วเท่านั้น ไม่ได้สร้างแบบจำลองผิว STL ของวัตถุ ซึ่งแบบจำลอง STL สามารถนำไปใช้กับงานทางด้านต่างๆได้หลากหลาย และสามารถนำไปใช้กับโปรแกรมประยุกต์ใช้งานทางด้านอื่นๆ ได้ทั่วไป รวมถึงสามารถนำแบบจำลอง STL นี้แปลงเป็นข้อมูลซไลซ์ (Sliced Data) ได้ ซึ่งโดยปกติแล้วโปรแกรมที่ใช้กับเครื่องสร้างต้นแบบอย่างเร็วนั้น โดยทั่วไปต้องการแบบจำลอง STL เพื่อตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับงานให้มีประสิทธิภาพได้มากกว่า และสามารถควบคุมความถูกต้องของขนาดวัตถุต้นแบบได้ หลังจากนั้นโปรแกรมสำหรับเครื่องสร้างต้นแบบนี้จะสร้างข้อมูลซไลซ์ ออกมารวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้สำหรับควบคุมเครื่องสร้างต้นแบบนั้นๆ



The projected points of initial layer onto the projected plane

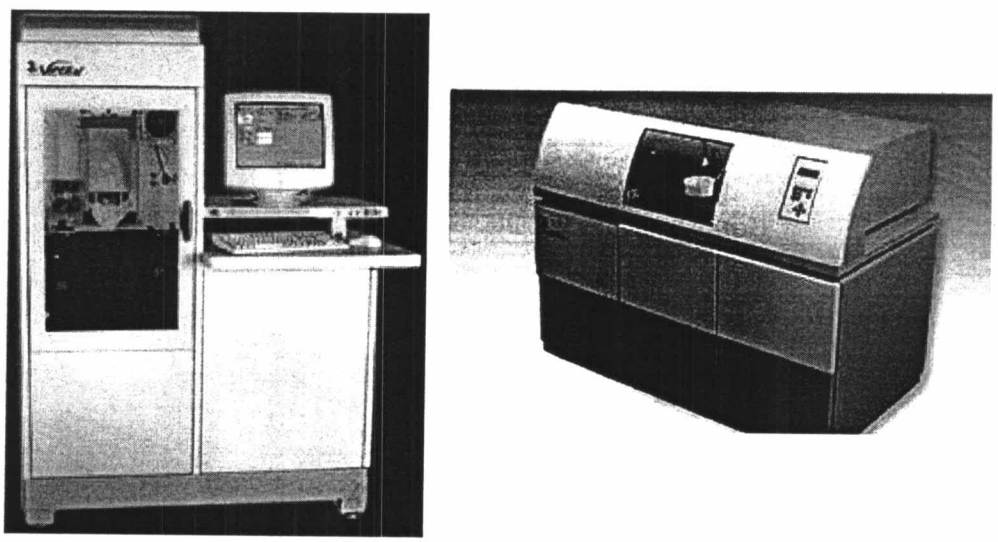
รูปที่ 2.19 การฉาย (Project) ข้อมูลจุดเข้าสู่ระนาบซไลซ์



รูปที่ 2.20 ข้อมูลซไลซ์ (Sliced Data) ที่สร้างจากข้อมูลจุดที่ฉายบนระนาบซไลซ์

นอกจากนั้นข้อมูลซไลซ์ที่ได้จากงานวิจัย [1-3] ใช้ข้อมูลจุดที่ถูกฉายเข้าสู่ระนาบซไลซ์มาคำนวณเพื่อสร้างข้อมูลซไลซ์ตามรูปที่ 2.20 และพยายามที่ควบคุมค่าผิดพลาด (Shape Error) เนื่องมาจากการแปลงข้อมูลจากแบบจำลองโซลิด ไปสู่แบบจำลอง STL และจาก

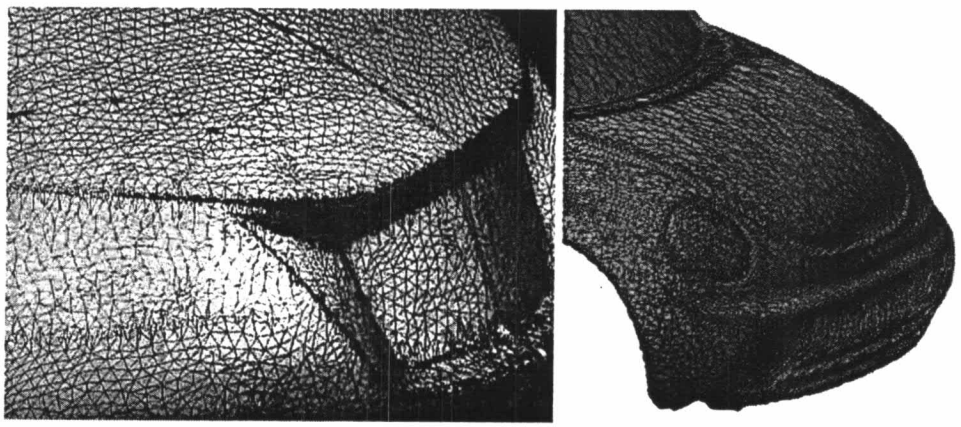
แบบจำลอง STL ไปสู่ข้อมูลซไลซ์ แต่การควบคุมค่าผิดพลาดของรูปร่างนั้นจะทำให้ความหนาของชั้นเลเยอร์ (Layer) หรือช่วงระยะห่างระหว่างระนาบซไลซ์ เปลี่ยนแปลงอย่างไม่แน่นอนตลอดทั้งวัตถุเพื่อควบคุมค่าผิดพลาดให้มีค่าน้อยตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากความหนาของชั้นเลเยอร์ที่มีเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จึงเป็นยากลำบากและสิ้นเปลืองเวลาที่จะนำมาใช้งานได้จริงกับเครื่อง RP โดยทั่วไปได้ในทางปฏิบัติ แต่ด้วยเทคนิคที่ได้นำเสนอนั้นจะใช้ข้อมูลจุดของผิววัตถุที่ได้จากการวัดพิกัดบนผิววัตถุโดยตรงเพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง STL ดังนั้น STL ที่ได้นี้จะมีถูกต้องตรงกับข้อมูลจุดของผิววัตถุ และถ้าต้องการข้อมูลซไลซ์ ก็สามารถนำ STL ไฟล์ไปใช้กับโปรแกรมซึ่งใช้สำหรับเครื่องสร้างต้นแบบอย่างเร็ว RP รุ่นนั้นๆ โดยตรงเพื่อประสิทธิภาพในการสร้างวัตถุต้นแบบ โดยสามารถเลือกช่วงที่ผิวของวัตถุเป็นส่วนโค้งและซับซ้อน ให้มีความหนาชั้นเลเยอร์ละเอียดมากขึ้น และส่วนที่เป็นผิวแบนที่ไม่ซับซ้อน ก็สามารถเลือกช่วงของความหนาเลเยอร์มากขึ้นได้ ดังนั้นจึงสามารถที่จะกำหนดช่วงของความหนาของชั้นเลเยอร์เปลี่ยนแปลงไปตามความซับซ้อนของผิวเป็นช่วงๆ ซึ่งจะทำให้ประหยัดเวลาและใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยในห้องปฏิบัติวิจัยที่ผู้วิจัยทำงานอยู่นั้นมีเครื่องสร้างต้นแบบอย่างเร็วอยู่ 2 เครื่อง คือ รุ่น Viper Si^2 เป็นเทคโนโลยีแบบ SLA (Stereolithography Apparatus) ตามรูปที่ 2.21(a) และรุ่น ThermoJet Printer เป็นเทคโนโลยีแบบใช้หัวฉีดหลายหัว (Multi-Jet Modeling) จากบริษัท 3D Systems ตามรูปที่ 2.21(b)



(a) (b)

รูปที่ 2.21 เครื่องสร้างต้นแบบอย่างเร็วในห้องปฏิบัติการวิจัย

ลักษณะรูปแบบข้อมูล STL ไฟล์ ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งสร้างมาจากผิวระนาบสามเหลี่ยม (Triangle) จำนวนมากซึ่งเชื่อมโยงกัน (Connectivity) ระหว่างผิวสามเหลี่ยมหลายๆ ผิว มีลักษณะคล้ายตาข่าย (Mesh) แต่ละผิวระนาบสามเหลี่ยมประกอบไปด้วยจุดปลาย (Vertices) 3 จุด ซึ่งเป็นจุดพิกัด 3 มิติ บนผิววัตถุนั่นเอง จำนวนของแผ่นสามเหลี่ยมจะมีจำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของข้อมูลจุดของผิววัตถุ ซึ่งข้อมูลจุดเหล่านี้จะเป็นจุดปลายของแต่ละผิวระนาบสามเหลี่ยมซึ่งเชื่อมโยงกันครอบคลุมผิวนอกของวัตถุ ดังนั้นข้อมูลจุดของผิววัตถุซึ่งได้จากเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติบนผิววัตถุ โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมจะสร้างมาจากข้อมูลจุดของผิววัตถุโดยตรง แต่ถ้าข้อมูลของวัตถุเป็นแบบจำลองโซลิดจากโปรแกรมแคด (CAD) โดยทั่วไปจะต้องกำหนดช่วงของผิดพลาดที่ยอมรับได้ระหว่างแบบจำลองโซลิด และแบบจำลอง STL ซึ่งค่าผิดพลาดเกิดจากผิวของแบบจำลองโซลิดในบริเวณที่ไม่ได้เป็นระนาบแต่ต้องการแทนด้วยผิวที่เป็นผิวระนาบสามเหลี่ยม ดังนั้นจะเกิดค่าขึ้นในบริเวณส่วนผิวโค้งซึ่งพยายามที่แทนด้วยผิวระนาบโดยที่ถ้าต้องการผิวโค้งด้วยระนาบให้ใกล้เคียงมากขึ้นจะต้องมีผิวระนาบจำนวนมากขึ้น แต่ก็จะทำให้ขนาดของ STL ไฟล์มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนั้นข้อมูล STL ยังต้องการทิศทางของเวคเตอร์ที่ตั้งฉาก (Normal Vector) ผิวระนาบสามเหลี่ยมด้วยเพื่อบ่งชี้ถึงคุณสมบัติที่เป็นผิวของวัตถุนั้นซึ่งเวคเตอร์จะต้องมีทิศทางพุ่งออกจากผิววัตถุ สำหรับรายละเอียดของรูปแบบข้อมูล STL สามารถดูได้จากภาคผนวก ก



รูปที่ 2.22 โครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh)

2.2.2. การจัดการคัดแยกข้อมูลจุดแบบโครงสร้างสืบทอดปรับตัวได้สองระดับ (Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm)โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์คแบบใหม่ (New Neural Network)

ข้อมูลจุดที่ได้จากการเรียงและจัดอันดับข้อมูลต่างๆ ด้วยระนาบซไลซ์ นั้นจะนำไปใช้ในขบวนการการจัดการข้อมูล โดยในงานวิจัยนี้ได้คิดค้นและพัฒนาวิธีจัดการกับข้อมูลจุดโดยใช้ระบบนิวรอลเน็ตเวิร์คแบบใหม่ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของอัลกอริทึมการจัดการคัดแยกข้อมูลจุดแบบโครงสร้างสืบทอดปรับตัวได้สองระดับ (Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm) เพื่อนำข้อมูลจุดที่ได้ถูกคัดแยกแล้วสำหรับสร้างแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมของวัตถุที่มีความซับซ้อน วิธีนี้แตกต่างจากวิธีที่เคยมีมาซึ่งใช้การจัดการกับข้อมูลโดยทั่วไปสำหรับจัดการฐานข้อมูลเพื่อแปลความหมายของรูปแบบข้อมูล (Pattern Recognition) ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับนำใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ

โดยงานวิจัย Song และ Lee [19] ซึ่งใช้วิธีการจัดการแบ่งกลุ่ม (Clustering) ด้วยโครงสร้างข้อมูลแบบสืบทอดคล้ายกับต้นไม้ซึ่งมีแตกก้านและใบโดยใช้ระบบนิวรอลเน็ตเวิร์คสำหรับการจัดการข้อมูลด้วยตัวเอง (Self-Organizing Neural Network) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานวิธีของโคโฮเนน (Kohonen) โดยวิธีนี้ยังมีข้อเสีย เช่น ไม่สามารถจัดการกับข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกันมากกว่าหนึ่งกลุ่ม และจะต้องกำหนดรูปแบบจำลองการกระจายของข้อมูลอินพุตขึ้นก่อนล่วงหน้า [20] และในงานวิจัยของ Hodge และ Austin [21] เป็นวิธีซึ่งใช้ระบบนิวรอลเน็ตเวิร์คมาใช้ในการจัดการข้อมูลและคัดแยกข้อมูลเข้าสู่โครงสร้างข้อมูลแบบสืบทอด (Hierarchical Structure) ลักษณะคล้ายต้นไม้ โดยใช้วิธีการเพิ่มเซลล์ของโครงสร้าง (Growing Cell Structure ,GCS) เพื่อแก้ปัญหาที่มีในงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ยังไรก็ตามยังมีข้อเสีย คือ โครงสร้างสืบทอด (Hierarchical Structure) โดยใช้ GCS จะมีการสืบทอดแบบแตกก้านและใบลงมาจำนวนมากหลายระดับชั้น ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนบางอย่างของความสัมพันธ์ของข้อมูล จะต้องมีขบวนการปรับเปลี่ยนข้อมูลในระดับที่ต่ำลงไปด้วย ดังนั้นจึงทำให้มีข้อมูลจำนวนมากที่จะต้องปรับเปลี่ยนต่อเนื่องกันไป หรือถ้ามีข้อมูลในระดับใดผิดพลาดก็จะมีความผิดพลาดสะสมมากขึ้นในระดับที่ต่ำลงมา [22]

แต่วิธีที่ในงานวิจัยได้นำเสนอใช้เพียงสองระดับด้วยระบบการจัดการแบบนิวรอลเน็ตเวิร์คแบบใหม่เพื่อจัดการกับกลุ่มข้อมูลซึ่งอยู่บนพื้นฐานระบบโครงสร้างสืบทอดระดับขั้น (Hierarchical Structured Knowledge System) [19-23] ซึ่งเป็นระบบการเรียนรู้ด้วยตัวเองเพื่อจัดการกับข้อมูลและคัดแยกข้อมูลเข้าสู่โครงสืบทอดความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลแบบอัตโนมัติโดยการคัดแยก (Clustering) ข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายคลึง (Similarity) กันให้อยู่ภายในกลุ่มเดียวกันและภายในกลุ่มเดียวก็สามารถแยกกลุ่มลงไปอีกในรายละเอียดที่เพิ่มขึ้นเป็นการสืบทอดลำดับขั้นความสำคัญลงมาคล้ายกับการแตกก้านและใบของต้นไม้ ซึ่งระบบนี้จะช่วยลดความซับซ้อนของข้อมูลที่มีจำนวนมากๆ โดยมีการจัดเก็บข้อมูลที่เป็นระบบมากขึ้นทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้น ลดเวลาในการค้นหาข้อมูลและเพิ่มความถูกต้องกับ

ข้อมูลที่ต้องการ โดยเริ่มต้นการค้นหาเฉพาะข้อมูลที่มีแนวโน้มว่าจะมีข้อมูลที่ต้องการอยู่ในกลุ่มนี้มากกว่ากลุ่มอื่นๆ แทนที่จะต้องค้นหาข้อมูลทั้งหมด ดังนั้นจะช่วยให้ข้อมูลที่ต้องค้นหามีจำนวนลดลง โดยการเข้าถึงข้อมูลที่ระดับบนของการสืบทอดก่อนซึ่งเป็นแยกแยะข้อมูลอย่างกว้างๆ ถ้าต้องการค้นหาข้อมูลในรายละเอียดที่ลึกเข้าก็เข้าค้นหาในระดับที่ต่ำลงมาเปรียบเสมือนแยกไปตามก้านไปสู่ใบของต้นไม้ กฎเกณฑ์ในวัดความใกล้เคียงกันหรือความเหมือนกันของข้อมูลนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ระยะทางระหว่างจุดพิกัดแต่ละจุด โดยกำหนดขอบเขตของความคล้ายคลึงกัน คือ ระยะทางระหว่างจุดพิกัดแต่ละจุดนี้มีระยะทางไม่เกินเท่าไร จึงจะพิจารณาได้ว่ามีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มที่มีความคล้ายกันแสดงว่าระยะทางระหว่างจุดพิกัดในกลุ่มนี้มีระยะทางไม่เกินกับกฎเกณฑ์ความยาวที่กำหนดไว้ ดังนั้นการจัดการและเก็บบันทึกข้อมูลด้วยวิธีนี้จะเป็นเตรียมข้อมูลจุดที่สามารถนำไปสร้างแบบจำลอง STL ได้ต่อไป

2.2.3. สร้างผิวสามเหลี่ยมและปรับปรุงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมให้ดีขึ้นด้วยอัลกอริทึมการปรับการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมแบบปรับตัวเองได้ (Adaptive Self-Adjustable Connectivity of Triangular Mesh Structure Algorithm)

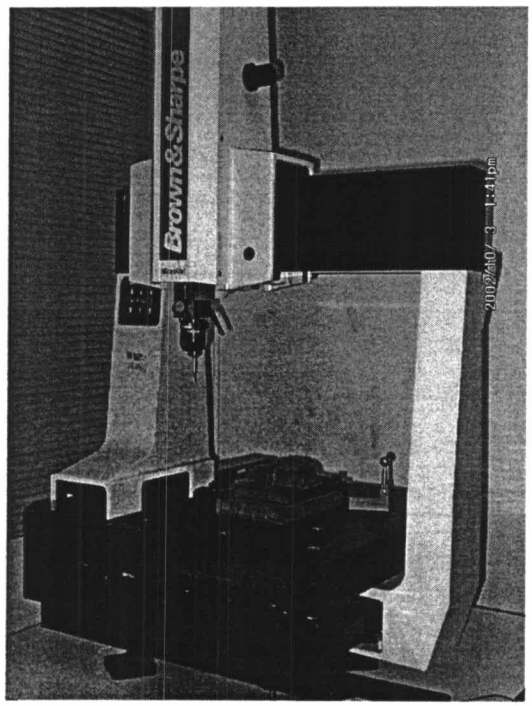
จากข้อมูลจุดที่ได้ถูกจัดการ (Organized Points) เรียบร้อยแล้วตามที่กล่าวมาและพร้อมที่จะสร้างผิวสามเหลี่ยม ในขั้นตอนนี้จะนำเสนออัลกอริทึมการสร้างโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยมแบบปรับตัวเองได้ อัลกอริทึมนี้จะนำจุดที่ได้จากขบวนการจัดการข้อมูลมาสร้างผิวระนาบสามเหลี่ยมและสร้างเวคเตอร์ตั้งฉากกับผิวระนาบ จากนั้นตรวจสอบและปรับตัวเองเพื่อให้การเชื่อมต่อระหว่างผิวสามเหลี่ยมแต่ละผิวของโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม (Triangular Mesh) ให้มีคุณภาพมากขึ้น

ขั้นตอนต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้นเป็นอัลกอริทึมซึ่งเป็นการเรียนรู้อย่างไม่สิ้นสุดจนกว่าจะไม่สอดคล้องกับกฎเกณฑ์ที่ได้กำหนดเอาไว้และปรับตัวเองได้เองแบบอัตโนมัติ ทั้งการจัดการข้อมูลจุดและการปรับปรุงโครงสร้างตาข่ายสามเหลี่ยม ดังนั้นจึงเรียกอัลกอริทึมเหล่านี้ว่ามีคุณสมบัติแบบปรับ (Adaptive) ตัวเองได้ คือ Two-Level Adaptive Hierarchical Clustering Algorithm และ Adaptive Self-Adjustable Connectivity of Triangular Mesh Structure Algorithm โดยรายละเอียดของทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วจะกล่าวโดยละเอียดมากขึ้นในบทต่อไป

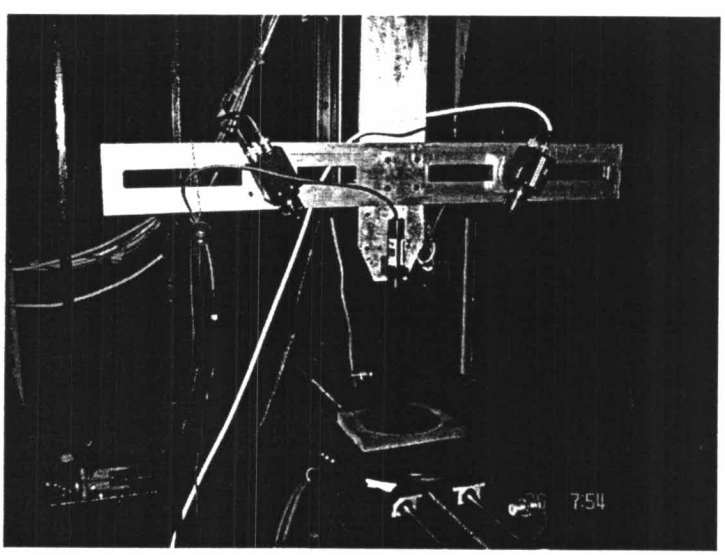
2.3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.3.1. เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดพิกัด 3 มิติบนผิววัตถุในงานวิจัยนี้มี 3 เครื่อง คือ

2.3.1.1. เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ (Coordinate Measurement Machines, CMM's) แบบสัมผัส (Contact CMM) ของบริษัท Brown & Sharpe รุ่น Microval 343 ปี 1997 พื้นที่ทำงาน 14"×16"×12" และใช้โปรแกรมควบคุม Micromeasure ดังรูปที่ 2.23

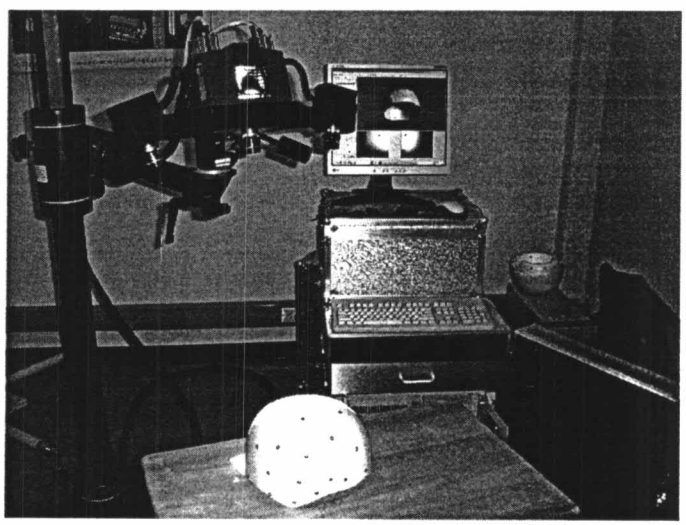


รูปที่ 2.23 เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบสัมผัสกับวัตถุ



รูปที่ 2.24 เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ระบบสเตอรีโอวิชั่นแบบใช้แถบแสงเลเซอร์

2.3.1.2. เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุ (Non–Contact CMM) ด้วยระบบสเตอรีโอวิชั่น (Stereo Vision System) แบบใช้แถบแสงเลเซอร์ (Line Laser Scanner) ซึ่งทางห้องปฏิบัติการได้พัฒนาขึ้นเองดังรูปที่ 2.24 โดยได้พัฒนาจากเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติแบบเดิม [24-27] ความละเอียดของกล้อง (Camera Resolution) คือ ประมาณ 310,000 พิกเซล (Pixels) 640×480 พิกเซล



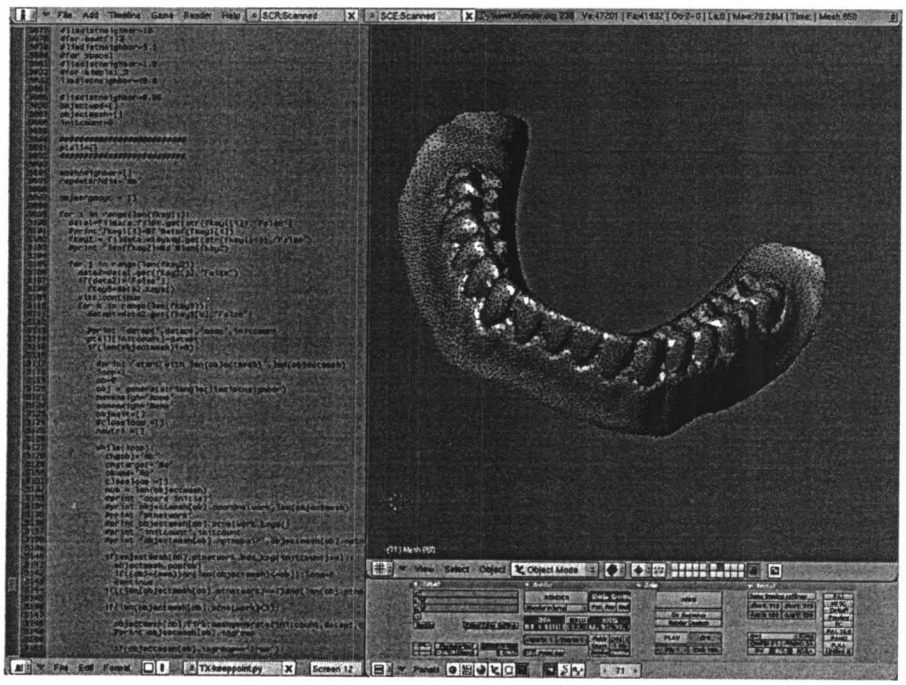
รูปที่ 2.25 เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ระบบสเตอรีโอวิชั่นแบบใช้อินเตอร์เฟอร์โรเมตริกซ์

2.3.1.3. เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุระบบสเตอรีโอวิชั่น (Stereo Vision System) แบบใช้อินเตอร์เฟอร์โรเมตริกซ์ (Interferometric) คือ การฉายแสงที่มีรูปแบบเป็นคาบแบบคงที่หรือไม่คงที่ไปบนพื้นผิวของวัตถุ จากนั้นจะผสมแสงที่สะท้อนกลับมากับรูปแบบอ้างอิง รูปแบบที่ใช้อ้างอิงจะช่วยแปลงข้อมูลออกมาเป็นลักษณะของพื้นผิวได้ ซึ่งเป็นของบริษัท GOM Optical Measuring Techniques รุ่น ATOS II 400 ความละเอียดของกล้อง (Camera Resolution) คือ ประมาณ 1,300,000 พิกเซล (Pixels) 1280×1024 พิกเซลดังรูปที่ 2.25

2.3.2. คอมพิวเตอร์เพนเที่ยม III 700 เมกะเฮิร์ทซ์ (Pentium III 700 MHz) ใช้ระบบปฏิบัติการลีนุกซ์ (Linux) สำหรับประมวลผลการจัดการข้อมูลจุดและสร้างแบบจำลอง STL เพื่อทดสอบทฤษฎีที่ได้คิดค้นขึ้น

2.3.3. โปรแกรมภาษา Python [28] เป็นโปรแกรมภาษาแบบอ๊อปเจคส์ออเรนท์เท็ด (Object-Oriented Programming Language) โดยมีการแปลคำสั่งแบบอินเตอร์แอ๊กทีฟ (Interactive) เปรียบเทียบได้กับภาษา Tcl, Perl, Scheme, หรือ Java ข้อดีของโปรแกรมภาษานี้

คือ มีกฎเกณฑ์ของคำสั่งในการใช้งานที่ชัดเจนมากๆ จะช่วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนั้นง่ายต่อการตรวจสอบ ลดข้อผิดพลาดในการใช้คำสั่งที่ไม่ระมัดระวัง และโปรแกรมภาษา Python ยังสามารถใช้ไลบรารี่ (Library) ของระบบปฏิบัติการต่างๆ มากมาย เช่น X11 , Motif, Tk, Mac, MFC และสามารถใช้เพื่อเขียนโปรแกรมพิเศษเพิ่มความสามารถของโปรแกรมใช้งานทั่วๆไปได้ (An Extension Language For Applications) และโมดูล (Module) ใน Python สร้างได้จากโปรแกรมภาษา C หรือ C++ นอกจากนั้น Python สามารถนำไปใช้งานได้ในหลายระบบปฏิบัติการ Unix , Windows , OS/2, Mac, Amiga, และอื่นๆ



รูปที่ 2.26 โปรแกรมภาษา Python เพื่อใช้ร่วมกับโปรแกรม Blender

2.3.4. เพื่อแสดงผลลัพธ์ (Post Processor) เป็นภาพของผิวที่ได้จากการคำนวณ ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโมดูลพิเศษด้วยโปรแกรมภาษา Python เพื่อใช้ร่วมกับโปรแกรม Blender [29] ซึ่งเป็นโปรแกรมสร้างภาพเคลื่อนไหวใน 3 มิติ (3D Animation) ที่สามารถหามาใช้ได้ฟรี (Freeware) และทางห้องปฏิบัติการวิจัยได้พัฒนาโปรแกรมแสดงผลภาพขึ้นเองด้วย [30] เพื่อแสดงผลลัพธ์เป็นภาพแบบจำลองผิวตาข่ายสามเหลี่ยมที่ได้จากการคำนวณตามเทคนิคที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ตามรูปที่ 2.26