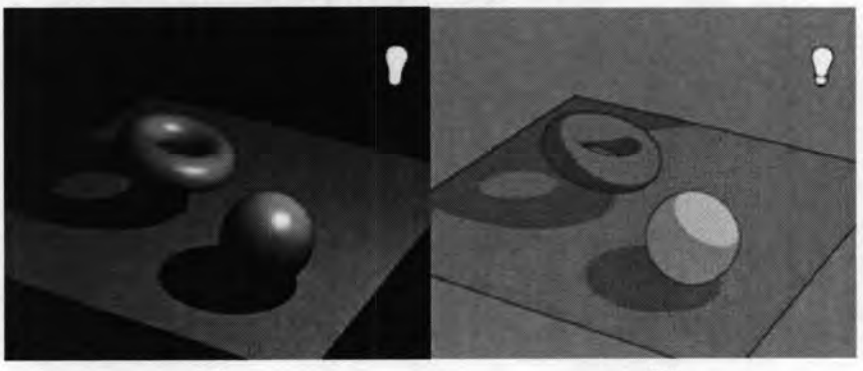
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมวลภาพแบบเซล-เชด และ การลดทอนรายละเอียดของเมช ซึ่งประกอบด้วย ความรู้พื้นฐานที่จำเป็นต้องทราบ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประมวลภาพแบบเซล-เชด รวมไปถึงแนวคิดในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วย

2.1 การประมวลภาพแบบเซล-เชด

การประมวลภาพแบบเซล-เชด หมายถึง กระบวนการที่ใช้ในการสร้างภาพแบบไม่เสมือนจริง (Non-photorealistic) โดยภาพที่ได้นั้นจะมีความคล้ายกับภาพการ์ตูน [4] ที่เกิดจากการวาดของมนุษย์ ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญของภาพประเภทนี้ คือ สีในแต่ละบริเวณซึ่งค่าสีจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าแสงแบบเป็นช่วง (celshading) และมีเส้นขอบเงา (silhouette) ที่เห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากภาพแบบเสมือนจริง ดังรูปที่ 2.1



(a) (b)

รูปที่ 2.1 ภาพเปรียบเทียบระหว่าง [4]

(a) การประมวลภาพแบบเสมือนจริง และ (b) การประมวลภาพแบบเซล-เชด

ดังนั้นในการประมวลภาพแบบเซล-เชดนั้น จึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การหาค่าสีในแต่ละบริเวณ และ การสร้างเส้นขอบรูป ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียด ดังนี้

2.1.1 การหาค่าสีในแต่ละบริเวณ

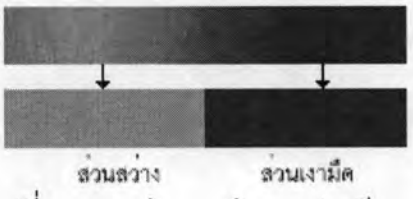
การประมวลภาพแบบเซล-เชดจะมีการคำนวณหาสีที่ใช้ในบริเวณต่างๆ ซึ่งจะขึ้นกับข้อมูลของเมชที่จะทำการประมวลภาพ โดยจะคำนวณจากทุกพื้นผิวของเมช การคำนวณค่าสีที่จะใช้ใน

บริเวณต่างๆ ของการประมวลภาพแบบเซล-เชดนั้น ขั้นต้นจะต้องทำการคำนวณหาค่าสีแบบเสมือนจริงก่อน ซึ่งการหาค่าสีแบบเสมือนจริง จากงานวิจัย[4] จะใช้สมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} Color = {} & ambient_{global} \times ambient_{material} \\ & + \sum_{i=0}^{num_source} ambient_{source} \times ambient_{material} \\ & + \max\{l_i \cdot n, 0\} \times diffuse_{source} \times diffuse_{material} \\ & + \max\{s_i \cdot n, 0\} \times specular_{source} \times specular_{material} \end{aligned} \qquad (1)$$

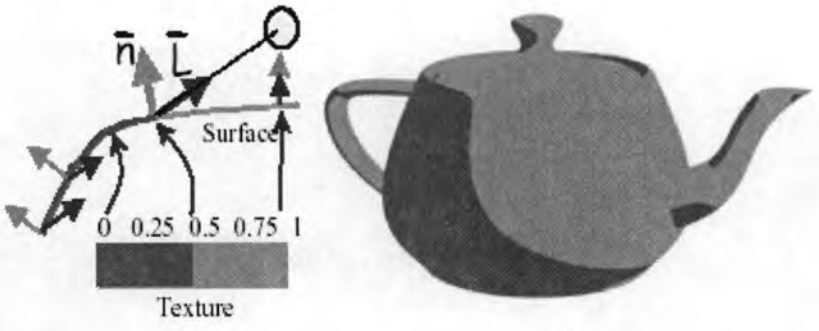
เมื่อ *li* คือ เวกเตอร์ตั้งฉาก(Normal vector) จากพื้นผิว ไปทางต้นกำเนิดแสงที่ i ส่วน *n* คือ เวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นผิว และ *si* คือ เวกเตอร์ตั้งจากพื้นผิวไปทางการกระเจิงของแสง

หลังจากการคำนวณหาค่าสีจากสูตรคำนวณขั้นต้นแล้ว จะได้ค่าสีที่ไล่ระดับความเข้มสีจากสว่างไปมืดตามแนวความโค้งของพื้นผิววัตถุโดยที่พื้นผิวหน้าที่มีเวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นผิวชี้ไปทางจุดกำเนิดแสงจะมีระดับสีที่สว่างและพื้นผิวที่มีเวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นผิวทำมุมกับจุดกำเนิดแสงพื้นผิวนั้นก็มีระดับสีที่มืดลงตามมุมที่เวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นผิวนั้นๆทำกับจุดกำเนิดแสง แต่ค่าสีที่ได้จากการคำนวณนั้นยังไม่ใช่สีที่จะนำมาใช้จริงสำหรับการประมวลภาพแบบเซล-เชด แต่จะต้องนำค่าสีที่ได้มาทำการแปลงไปสู่ค่าสีที่จะใช้จริงในการประมวลภาพแบบเซล-เชดอีกทีหนึ่ง เนื่องจากสีของการ์ตูนนั้นจะเป็นแบบเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงตามระดับความเข้มของแสง โดยต้องมีการกำหนดจำนวนช่วงสีก่อน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วการประมวลภาพแบบเซล-เชดจะกำหนดค่าระดับความเข้มเป็น 2 ระดับ คือ สีส่วนที่อยู่ในบริเวณสว่าง และ สีส่วนที่อยู่ในบริเวณเงามืด



รูปที่ 2.2 การกำหนดจำนวนช่วงสี [4]

ซึ่งจะมีค่าสีที่แตกต่างกัน เมื่อกำหนดแล้วจะทำการขีดแบ่งค่าสีออกเป็น 2 ส่วน โดยจะแปรตามความโค้งของพื้นผิว ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3(a) ซึ่งผลการประมวลภาพแบบเซล-เชด ที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.3(b)



(a) (b)

รูปที่ 2.3 ระดับความเข้มแบ่งเป็น 2 ระดับ [4]
(a) รูปแสดงการขีดแบ่งระดับสีเปรียบเทียบส่วนโค้งของวัตถุ (b) ผลที่ได้จากการขีดแบ่งระดับสี

เมื่อทำการแปลงค่าไปสู่ค่าสีที่ใช้จริงในการประมวลภาพแบบเซล-เชดแล้ว ก็จะได้ค่าสีที่แท้จริงของพื้นผิวนั้นๆ ของเมช ที่จะนำไปใช้ในการประมวลภาพแบบเซล-เชด

2.1.2 การสร้างเส้นขอบรูป

การหาตำแหน่งที่เป็นขอบรูปเป็นวิธีการที่จะต้องใช้ในการสร้างเส้นขอบรูป ซึ่ง วิธีหาเส้นขอบรูปนั้นเราจะใช้วิธีดูจากตำแหน่งจุดของเมชเทียบกับจุดจ้องมอง(Viewpoint) โดยเราจะนำเอาค่าเวกเตอร์ตั้งฉาก และ ตำแหน่งของจุดทุกจุดบนเมชมาทำการคำนวณกับค่าตำแหน่งที่จุดจ้องมอง โดยอาศัยหลักการว่า ที่ ตำแหน่งที่มีเวกเตอร์ตั้งฉาก ตั้งฉากกับเวกเตอร์จากจุดจ้องมองจุดที่ตำแหน่งนั้นจะเป็นขอบ เขียนได้เป็นสมการ [6] ดังนี้

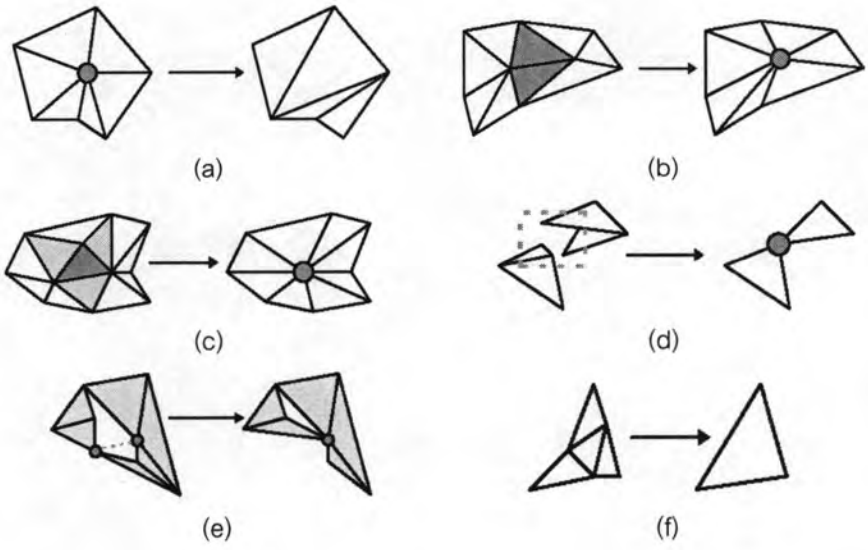
$$n(p)\cdot(p-c)=0 \qquad (2)$$

เมื่อ n(p) คือ เวกเตอร์ตั้งฉากที่จุดบนเมช p คือ ตำแหน่งของจุดบนเมช และ c คือ ตำแหน่งของจุดจ้องมองจากการคำนวณถ้าได้ค่าเป็น 0 แสดงว่าจุดนั้นตั้งอยู่บนเส้นขอบ ซึ่ง ในการสร้างเส้นขอบนั้นเราจะสร้างจากจุดเหล่านี้

2.2 การลดรายละเอียดของเมช

การลดทอนรายละเอียดของเมช[5]นั้นเราจะใช้ในการลดความซับซ้อนของเมชโดยการทำให้เมชมีรายละเอียดน้อยกว่าเดิมเพื่อ ลดเวลาที่ใช้การคำนวณในการประมวลภาพแบบ 3 มิติ ทำให้การประมวลภาพทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้นและทำให้ประหยัดหน่วยความจำที่ต้องใช้ในการเก็บข้อมูลรายละเอียดของเมชนั้นๆอีกด้วย วิธีการทำลดรายละเอียดของเมชในปัจจุบันจึงมีการใช้

อย่างแพร่หลายในงานที่การประมวลภาพต้องการความรวดเร็ว ซึ่งวิธีที่ใช้ในการลดรายละเอียดของเมชนี้ มีวิธีการอยู่หลายวิธีจากงานวิจัย[5] ได้นำเสนอวิธีต่างๆดังนี้ การลบจุดของเมช(Vertex Remove), การลบเส้นขอบของเมช (Edge Collapse), การลบพื้นผิวของเมช (Face Collapse), การรวมกลุ่มจุดของเมช (Vertex Cluster), การลบที่เส้นขอบแนวเดียวกัน (Generalized Edge Collapse) และ การยุบแขนงย่อย (Unsubdivide) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วิธีการที่ใช้ในการลดรายละเอียดของเมช [5]
(a) การลบจุด (b) การลบเส้นขอบ (c) การลบพื้นผิว (d) การรวมกลุ่มจุด
(e) การลบที่เส้นขอบแนวเดียวกัน (f) การยุบแขนงย่อย

โดยทั่วไปแล้ววิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีการลบเส้นขอบของเมช เพราะเป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และสะดวกในการคืนรายละเอียดของเมชให้กลับมาเป็นรูปต้นแบบได้ง่าย

2.2.1 การลบเส้นขอบของเมช

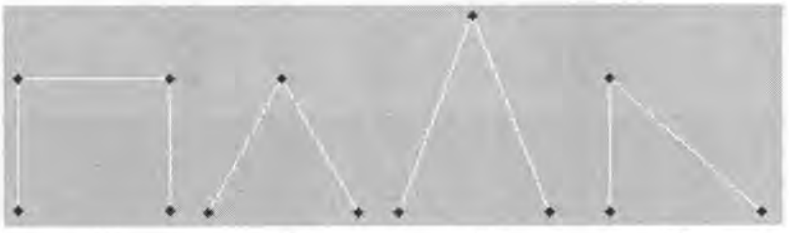
การลบเส้นขอบนี้เป็นวิธีการลดรายละเอียดของเมชที่นิยมใช้กันมาก โดยเป็นการนำจุดที่อยู่บนเส้นขอบเดียวกันสองจุดมารวมเป็นจุดเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เส้นขอบเส้นนั้นหายไป เส้นขอบที่เคยอยู่ที่จุดทั้งสองจะถูกรวมมาบรรจบที่จุดที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ดังรูปที่ 2.4(b)

สำหรับวิธีการนี้จะต้องเลือกตำแหน่งของจุดที่เกิดขึ้นใหม่[3] โดยมีวิธีเลือกตำแหน่งได้ดังนี้

1.จุดกึ่งกลางระหว่างสองจุด เป็นวิธีการหาตำแหน่งโดยคิดตำแหน่งจุดกึ่งกลางระหว่างจุดทั้งสอง

2.จุดที่เหมาะสมที่สุด เป็นการหาตำแหน่งของที่เหมาะสมที่สุดจากการรวมจุดทั้งสองจุดหนึ่งโดยใช้เส้นโค้ง(Contour curve) มาช่วยดังรูปที่6(c) วิธีนี้ต้องใช้เวลามาก แต่ให้ตำแหน่งที่ถูกต้องที่สุดเช่นกัน

3.จุดปลายของเส้นขอบ วิธีนี้เป็นการที่ใช้เวลาน้อยที่สุดโดยการเลือกตำแหน่งหนึ่งในสองจุดที่จะทำการรวม โดยเลือกเอาตำแหน่งของจุดนั้นเป็นตำแหน่งใหม่ของจุดที่เกิดขึ้น



(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 2.5 วิธีการที่ใช้หาตำแหน่งจุดที่เกิดขึ้นใหม่หลังจากการทำการลบเส้นขอบ
(a) รูปตั้งต้น (b) จุดกึ่งกลาง (c) จุดที่เหมาะสมที่สุด (d) จุดปลายของเส้นขอบ

2.3 การตรวจจับเส้นขอบที่มีลักษณะเด่น (Feature edge detection)[2][7]

การตรวจจับเส้นขอบที่มีลักษณะเด่นนั้นจะทำเพื่อต้องการที่จะหาเส้นขอบที่มีความสำคัญต่อรูปทรงหลักของเมชนั้น เนื่องจากในบางครั้งเส้นขอบบางเส้นของเมชนั้นเป็นเส้นขอบที่จะรักษารูปทรงหลักหรือเป็นเส้นขอบเขตของสีในแต่ละส่วน ดังนั้น หากเราทำการลบเส้นขอบเหล่านั้นออกไป จะทำให้เมชนั้นเสียลักษณะเด่นไป

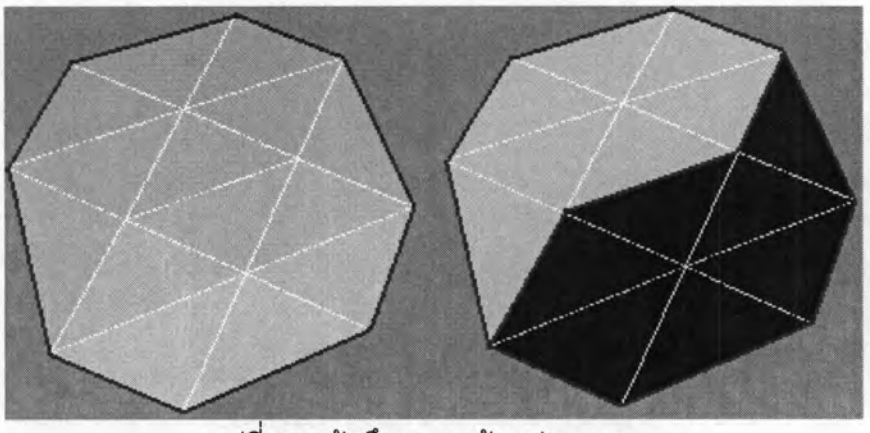
เส้นขอบที่มีลักษณะเด่นนั้นในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

2.3.1. เส้นขอบคม (Sharp edge)[7]

เป็นเส้นขอบของเมชที่ตำแหน่งที่ส่งผลต่อรูปทรงโดยรวมของเมช แบ่งเป็นสองประเภทคือ เส้นขอบที่เป็นเส้นที่สุดขอบเขต และ เส้นขอบที่เป็นเส้นระหว่างพื้นผิวที่มีคุณลักษณะต่างกัน ซึ่งเส้นขอบใดๆจะเป็นเส้นขอบคมก็ต่อเมื่อมีคุณสมบัติใดคุณสมบัติหนึ่งดังต่อไปนี้

ก. เส้นขอบนั้นเป็นเส้นขอบแบ่งขอบเขต(Boundary edge) เส้นขอบนั้นเป็นเส้นขอบที่มีพื้นผิวประกบอยู่เพียงด้านเดียว ดังรูป 2.6

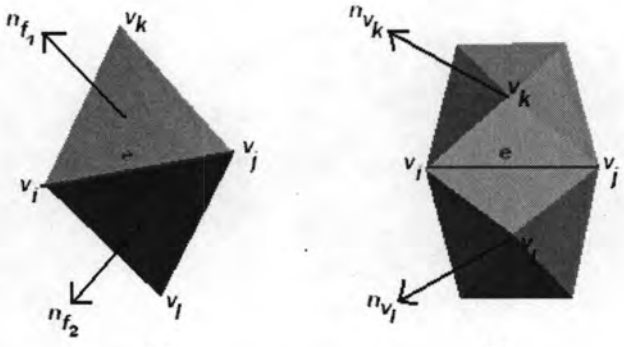
ข. เส้นของนั้นเป็นเส้นที่มีพื้นผิวที่ประกบอยู่กับเส้นขอบนั้นเป็นสองพื้นผิวที่มีค่าคุณลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น สีแตกต่างกัน



รูปที่ 2.6 เส้นทึบแสดงเส้นแบ่งขอบเขต

2.3.2. เส้นขอบฐาน(Base edge)[2]

เส้นขอบฐานเป็นลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งของเมช ซึ่งบางครั้งจะไม่ถูกจัดเป็นเส้นขอบคม ดังนั้นเราจึงต้องมีการตรวจหาเส้นขอบฐานด้วยวิธีการ อีเอสโอดี(Extended Second Order Difference -ESOD) หรือ วิธีการ เอสโอดี (Second Order Difference SOD) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



(a) (b)

รูปที่ 2.7 วิธีการหาค่าน้ำหนักของเส้นขอบ e

(a) วิธีเอสโอดี (b) วิธีอีเอสโอดี

วิธีการเอสโอดีนั้นเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจหาลักษณะเด่นของเมช โดยมันจะทำการกำหนดค่าน้ำหนักสำหรับทุกๆเส้นขอบ e ซึ่งคำนวณจากเวกเตอร์ตั้งฉาก(normal vector)ของรูปพื้นผิวสามเหลี่ยมที่อยู่ติดกัน เมื่อ $w(e) = n_{f1} \bullet n_{f2}$ ตัวอย่างเช่น ดังรูปที่ 2.7(a) เมื่อ พื้นผิวสามเหลี่ยม f_1 ที่ประกอบด้วยจุด i ,j และ k และพื้นผิวสามเหลี่ยม f_2 ที่ประกอบด้วยจุด i ,l และ j เป็นรูปสามเหลี่ยมที่อยู่ติดกันกับเส้นขอบ eโดยเวกเตอร์ตั้งฉากของรูปพื้นผิวสามเหลี่ยม f ($\mathbf{n}_f$) ที่ประกอบด้วยจุด i ,j และ k หาได้จากสมการ

$$n_f = (v_j \bullet v_i) \times (v_k \bullet v_i) / \|(v_j \bullet v_i) \times (v_k \bullet v_i)\| \qquad (3)$$

เมื่อ v_j คือ ตำแหน่งของจุด j, v_iคือ ตำแหน่งของจุด i และ v_kคือ ตำแหน่งของจุด k แต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัด คือ ไม่เหมาะสำหรับเมชที่มีรายละเอียดสูงหรือมีค่ารบกวน(noise)สูง

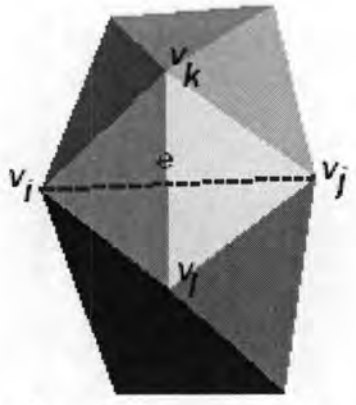
อีเอสโอดีเป็นวิธีที่พัฒนามาจากเอสโอดี โดยวิธีนี้นั้นจะใช้ค่าเวกเตอร์ตั้งฉากเฉลี่ยซึ่งคำนวณจากสามเหลี่ยมที่ต่อกันเป็นวงแหวนรอบจุด v_k และ v_l ดังที่แสดงใน รูปที่ 2.7(b) ดังนั้นค่าน้ำหนักของเส้นขอบ e จะหาได้จากสมการ

$$w(e) = n_{vk} \bullet n_{vl} \qquad (4)$$

โดยที่ n_v เป็นค่าเวกเตอร์ตั้งฉากของจุดยอด v หาได้จากสมการ

$$n_v = \sum_{v \in f} area(f) \bullet n_f \Big/ \sum_{v \in f} area(f) \qquad (5)$$

เมื่อ area (*f*)หมายถึงพื้นที่ของสามเหลี่ยม *f*



รูปที่ 2.8 เส้นขอบลักษณะเด่นเสมือน

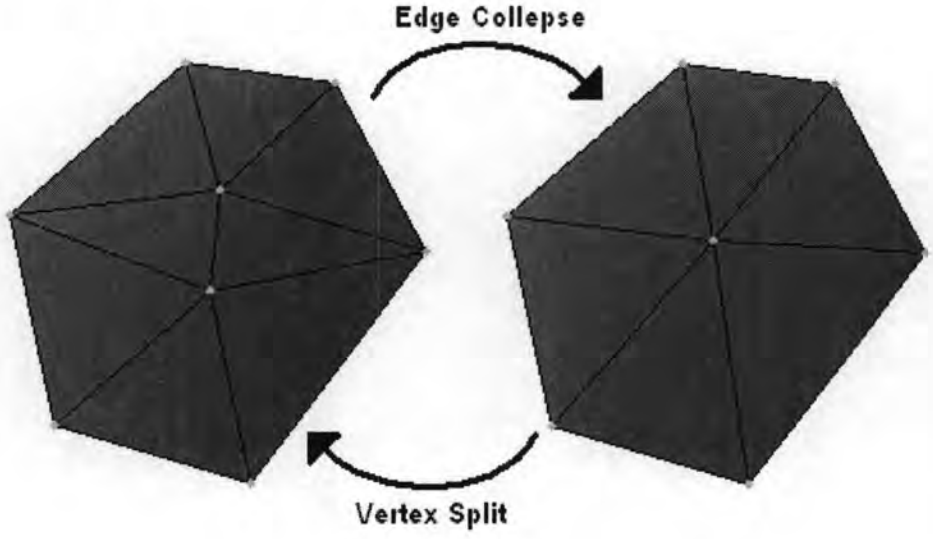
แต่วิธีทั้ง วิธีเอสโอดี และวิธีอีเอสโอดี ที่กล่าวมาข้างต้น จะเสียเวลาคำนวณเส้นขอบทั้งหมดสูงมาก ดังนั้นจึงมีการนำอีเอสโอดีมาใช้โดยนำมาใช้ในการหา เส้นขอบลักษณะเด่นเสมือน(Virtual feature edge) ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูป 2.8 เส้นขอบ e จะถูกเรียกว่า เส้นขอบเสมือนของเส้นขอบ k และ l เมื่อเส้นขอบนั้นไม่มีอยู่จริง เส้นขอบนั้นจะเป็นเส้นขอบลักษณะเด่นเสมือนเมื่อค่าน้ำหนักที่คำนวณได้จากวิธีการอีเอสโอดีนั้นมีสมการดังนี้

$$w(e) = n_{vk} \bullet n_{vl} < \varepsilon \qquad (6)$$

เมื่อค่า ε เป็นค่าระหว่าง [-1,1] แล้วถ้าเส้น i j นั้นเป็นเส้นขอบเสมือนแล้ว เส้น k,l จะเป็นเส้นขอบฐาน

2.4 การคืนรายละเอียดของเมช

เมชที่ถูกลดทอนรายละเอียด[2] นั้นเราจะทำการเก็บข้อมูลของการลดรายละเอียดเอาไว้ เช่นการลบเส้นขอบแต่ละครั้ง เพื่อใช้คืนรายละเอียดของเมช เพราะในบางครั้งเราอาจต้องการที่รายละเอียดของเมชที่มากกว่าที่ผ่านการลดรายละเอียดไปแล้วกลับมาซึ่งการจะคืนรายละเอียดของเมชนั้น จะทำโดยการค้นกลับไปยังจุดที่ถูกลดทอนลงไปเพื่อทำการคืนรายละเอียดของเมชกลับมาโดย วิธีการ แยกจุด (Vertex split) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทำแยกจุด และ การลบเส้นขอบ

เมชที่ได้จากการคืนรายละเอียดด้วยการแยกจุดกับทุกเส้นขอบที่ถูกลบไปแล้วนั้น จะมีรายละเอียดเหมือนเมชต้นแบบทุกประการ

2.5 การประมวลภาพแบบทันที[14]

การประมวลภาพแบบทันทีคือการประมวลภาพที่ใช้เวลาในการประมวลภาพรวดเร็วพอเพียงที่จะทำให้ผู้ชมสามารถปฏิสัมพันธ์กับภาพที่ประมวลจากคอมพิวเตอร์ได้เสมือนมีอยู่จริง ซึ่งในการสร้างภาพแบบต่อเนื่องนั้นผู้ดูจะไม่รู้สึกถึงความไม่ต่อเนื่อง หรือ ความไม่ราบรื่นเลย โดยวิธีในการสร้างภาพแบบต่อเนื่องให้มีความราบรื่นนั้น เนื่องจากสมองของมนุษย์นั้นมีความสามารถในการสร้างภาพต่อเนื่องจากภาพที่เห็นเป็นช่วงๆได้ ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างภาพที่จะเปลี่ยนในช่วงเวลาหนึ่งแทนการสร้างภาพในทุกๆเวลาซึ่งทำให้ลดการทำงานในการสร้างภาพลงไปได้เป็นอย่างมาก ซึ่งความเร็วในการสร้างภาพที่จะนำมาแสดงนั้นจะมีการวัดด้วยปริมาณภาพที่สร้างได้ใน 1 วินาที(frames per second : fps) เรียกว่าอัตราการประมวลภาพ(frame rate) โดยที่อัตรา

การประมวลภาพที่ผู้ชมเริ่มรู้สึกถึงการปฏิสัมพันธ์ได้เล็กน้อย คือ ที่อัตรา 6 ภาพต่อวินาที อัตราที่เป็นแบบทันทีเริ่ม ที่ 15 ภาพต่อวินาที ในอัตรานี้ผู้ชมจะสามารถมีปฏิสัมพันธ์ได้แบบราบรื่น สำหรับที่อัตราประมาณ 72 ภาพต่อวินาที ขึ้นไปนั้นผู้ชมจะไม่รู้สึกถึงความแตกต่างอีกต่อไป สำหรับอัตราการประมวลภาพที่ใช้ในฟิล์มภาพยนตร์ หรือ วีดิโอ ในปัจจุบันนั้นมีอัตราการประมวลภาพอยู่ที่ 24 ภาพต่อวินาที การประมวลภาพแบบทันทีนั้นต้องพยายามลดสิ่งที่จะทำให้เกิดความล่าช้าในการประมวลภาพลงไป ซึ่งส่วนหลักๆที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการประมวลภาพแบบทันที คือ ส่วนข้อมูลที่เข้ามามีปริมาณมาก, การคำนวณที่มีความละเอียดซับซ้อนสูง และ การแสดงผลที่มีความละเอียดสูง ดังนั้นการจะประมวลภาพแบบทันทีนั้นจะต้องหาวิธีที่จะจัดการในส่วนเหล่านี้ให้ได้ เพื่อที่จะสามารถทำการประมวลภาพได้อย่างรวดเร็วที่สุด สามารถประมวลภาพได้ในอัตราที่กำหนด

2.6 การวัดคุณภาพของภาพ[13]

การวัดคุณภาพของภาพเป็นกระบวนการที่ใช้ทดสอบความผิดเพี้ยนของภาพ 2 ภาพ เพื่อทดสอบว่าภาพทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันเพียงใด มีวิธีทดสอบใน 2 ทาง คือ ในเชิงพื้นที่(Spatial domain) และ ในเชิงความถี่ (Frequency domain) ซึ่งสำหรับภาพที่มีความซับซ้อนไม่มาก เช่น ภาพแบบเซล-เชด นี้เราจะใช้วิธีในเชิงพื้นที่มาเป็นตัววัดคุณภาพ โดยวิธีดังนี้

2.6.1 การหาค่าความเพี้ยนโดยใช้อิมเมจเบสอาร์เอ็มเอส(image-based root-mean-square)

เป็นวิธีการพื้นฐานในการเปรียบเทียบภาพ 2 ภาพในเชิงพื้นที่ โดยการหาขนาดความแตกต่างของภาพโดยทดสอบจากมุมมอง 6 มุมมอง ในรูปแบบของค่าของความเพี้ยน ของภาพทั้ง 2 ด้วยสมการดังนี้

$$\text{RMS}\ (M_i, M_o) = \sqrt{\sum_{n=1}^{6} DP_i^n} \qquad (7)$$

เมื่อ DP^n_i คือ ค่าของความเพี้ยนของภาพ M_i เปรียบเทียบกับ M_o คือ ค่าสีที่จุด i ของภาพ

2.6.2 การหารากที่สองค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความเพี้ยนที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalized Root Mean Squared Error)

วิธีหาค่าความเพี้ยนโดยวิธีหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง นั้นค่าที่ได้อาจเกิดความผิดพลาดได้จากการคลาดเคลื่อนโดยรวม(global-shift) ดังนั้นในการวัดความเพี้ยนเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเราจะใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความเพี้ยนที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐาน นี้ซึ่งพัฒนามาจากวิธีการหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง โดยจะนำภาพที่จะนำมาเปรียบเทียบมาทำให้เป็นบรรทัดฐาน

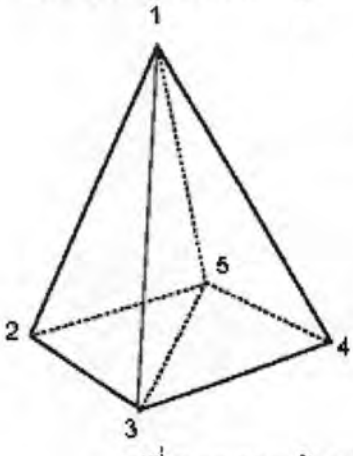
(normalize) ก่อน โดยจะทำ2ระดับ คือ ในระดับที่ 1 จะนำเอาภาพ a มาหาค่าเฉลี่ย μ ของค่าสีของภาพมาหารค่าสีในแต่ละจุด จะได้รูปที่เป็นบรรทัดฐานในระดับที่1 คือ $a'_{x,y} = a_{x,y} / \mu$ จากนั้นจะทำ ในระดับที่ 2 นำภาพ a' มาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $s_{a'}$ และนำมาหารแต่ละจุดในภาพ a' จะได้รูปที่เป็นบรรทัดฐานในระดับที่2 คือ $a''_{x,y} = a'_{x,y} / s_{a'}$ จากนั้นจึงนำภาพที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง กับภาพ b'' ซึ่งถูกทำเป็นบรรทัดฐานระดับที่2 ด้วยกระบวนการเดียวกับภาพ a''

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการประมวลภาพแบบเซล-เชดและการลดทอนรายละเอียดของเมช มี ดังนี้

Cartoon-Looking rendering of 3D-Scenes [4] โดย Philippe Decaudin งานวิจัยนี้นำเสนอการประมวลภาพแบบเซล-เชด ซึ่งประกอบด้วยการหาค่าสีบริเวณต่างๆของภาพ และการหาเส้นขอบรูป ดังนั้นเราจึงจะใช้ทฤษฎีการประมวลภาพแบบเซล-เชดจากงานวิจัยนี้มาใช้ แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการทางภาพในการค้นหาเส้นขอบรูปซึ่งจะใช้เวลาในการประมวลภาพมากจึงไม่หมาะสมกับงานที่ต้องการการประมวลภาพแบบทันที

The edge buffer: A data structure for easy silhouette rendering [15] โดย J. Buchanan, M. Sousa งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างตารางข้อมูลของเส้นขอบรูปของเมช เพื่อความรวดเร็วในการคำนวณหาเส้นขอบรูป และลดความซ้ำซ้อนที่จะเกิดจากการแยกคำนวณแบบทีละจุดบนเมช แต่การสร้างตารางเพื่อเก็บข้อมูลของเส้นขอบนี้ต้องใช้หน่วยความจำเป็นจำนวนมากจึงไม่เหมาะสมกับเมชที่มีรายละเอียดสูง



Vertex	*VFB*	*VFB*	*VFB*	*VFB*
1	**211**	**300**	**411**	**500**
2	**311**	**500**	x00	x00
3	**411**	**500**	x00	x00
4	**500**	x00	x00	x00
5	x00	x00	x00	x00

รูปที่ 2.10 การสร้างตารางข้อมูลของเส้นขอบรูปของเมช [15]

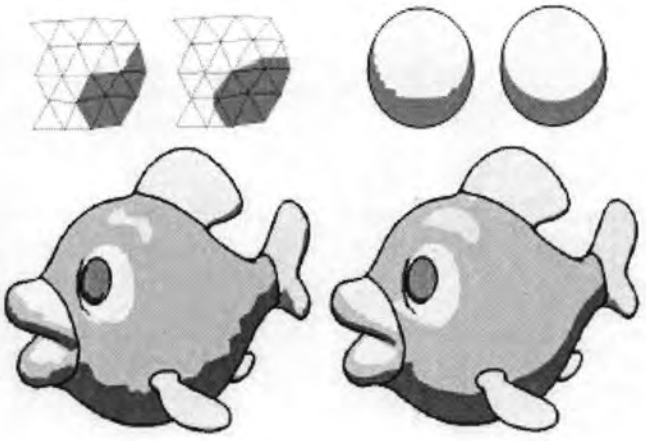
An Efficient Mesh Simplification Method with Feature Detection for Unstructured Meshes and Web Graphics [2] โดย Bing-Yu Chen และ Tomoyuki Nishita งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการลดทอนรายละเอียดของเมช โดยใช้การหาเส้นขอบลักษณะเด่นเสมือน ซึ่งสามารถคงลักษณะเด่นๆต่างๆ เช่น ขอบของเมช สีบนส่วนต่างๆของเมชได้ แต่คุณภาพของภาพที่ได้จากการประมวลภาพจากเมชที่ถูกลดทอนนี้ จะมีคุณภาพน้อยลงจากเมชต้นแบบ

(a)

(b)

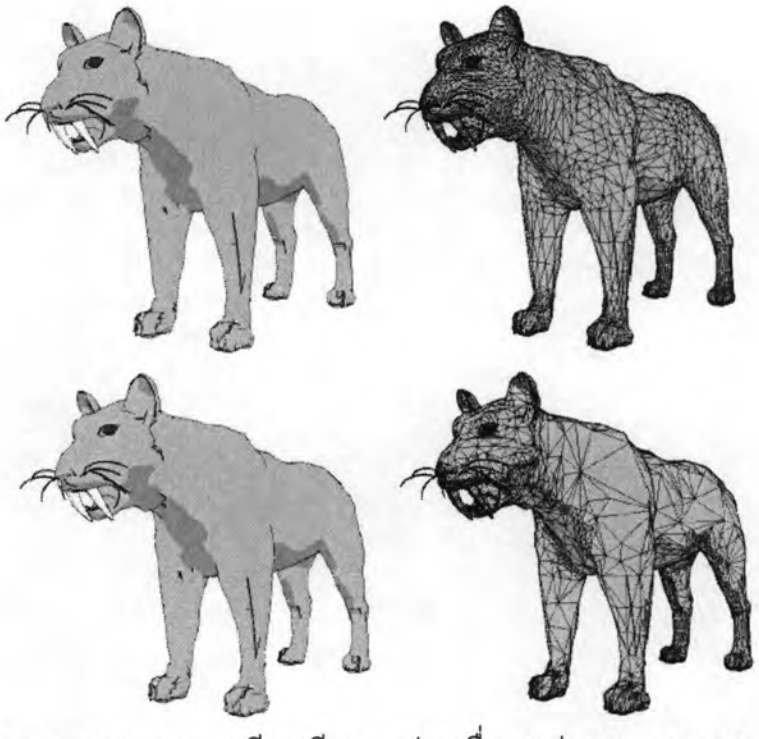
รูปที่ 2.11 เมชที่ถูกลดทอนรายละเอียดของเมช โดยใช้การหาเส้นขอบลักษณะเด่นเสมือน [2] (a) เป็นเมชต้นแบบ ในขณะที่รูป (b) เป็นเมชที่ถูกลดรายละเอียด

Fast 3D Cartoon Rendering with Improved Quality by Exploiting Graphics Hardware[6] โดย Johan Claes, Fabian Di Fiore, Gert Vansichem และ Frank Van Reeth งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพการประมวลภาพแบบเซล-เชดแบบทันที โดยนำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพโดยการแบ่งแขนงย่อย(Subdivision) เมชให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น แต่ในการปรับปรุงคุณภาพเมชโดยการแบ่งแขนงย่อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้นั้นจะต้องใช้เวลาในประมวลผลภาพมากจึงไม่เหมาะสมกับเมชที่มีรายละเอียดสูง



รูปที่ 2.12 การแบ่งแขนงย่อยเพื่อปรับปรุงคุณภาพของการประมวลภาพ [6]

Multiresolution Hierarchy for Real-Time Cartoon-Style Rendering [17] โดย Michael Press และ Jihad El-Sana งานวิจัยนี้นำเสนอการประมวลภาพแบบเซล-เชดแบบทันที โดยนำเสนอวิธีการลดทอนรายละเอียดเฉพาะส่วน โดยจะทำให้เมชให้มีความละเอียดน้อยลง เพื่อการประมวลภาพแบบทันที แต่วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถทำการประมวลภาพแบบทันทีได้ในแค่เพียงมุมมองเดียวเท่านั้นซึ่งเมื่อเปลี่ยนมุมมองไปจะต้องทำการลดทอนรายละเอียดใหม่



รูปที่ 2.13 การลดทอนรายละเอียดเพียงบางส่วนเพื่อการประมวลภาพแบบเซล-เชด [17]