

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์โดยใช้อัลกอริทึมปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติสำหรับปฏิมากรรมพุทธศิลป์

Software Product Development using 3D Model Surface Adjustment Algorithm for Buddhist Sculptural Art

นิลลภา บุปผาโชติ¹, คชากฤช เหลี่ยมไธสง² และ กชพรรณ ยังมี³

Ninlagarn Boobpachote, khachakrit Liamthaisong and Kotchaphan Youngmee

Corresponding author, E-mail : khachakrit.l@msu.ac.th

Received : August 19, 2024
Revised : October 24, 2024
Accepted : November 3, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ 2) เพื่อสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ มีกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน ด้วยการเลือกแบบเจาะจง นักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่เคยเรียนวิชาที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปทรงสามมิติมาแล้ว และสำรวจความพึงพอใจโดยวิธีวิจัยเชิงปริมาณด้วยการใช้แบบสอบถามความพึงพอใจ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า 1) ผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ พบว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.78 2) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ โดยรวมมีความพึงพอใจมากที่สุด ค่าเฉลี่ย

4.85 งานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมปรับปรุงคุณภาพของเมชสามมิติโดยการกระจายจุดพื้นผิวให้สม่ำเสมอ ลดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต และรักษารายละเอียดสำคัญไว้ด้วยเทคนิคการรักษาคุณลักษณะ และให้ผู้ใช้รีเมชสามมิติโดยปรับค่าความละเอียดของเมชได้ ผลลัพธ์ที่ได้คือแบบจำลองดิจิทัลสามมิติคุณภาพสูงที่สามารถนำไปใช้ในการศึกษา ใช้ในการทำงานในภาคอุตสาหกรรม การสงวนมรดกทางพุทธศิลป์ไว้ในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการอนุรักษ์และเผยแพร่ศิลปะโบราณให้คงอยู่ต่อไป

คำสำคัญ: ปฏิมากรรมพุทธศิลป์, การรีเมช 3 มิติ, ข้อมูลปริมาตรออกเซล, การรักษารายละเอียด, การสร้างแบบจำลองมรดกดิจิทัล

Abstract

This research aimed to 1) develop a software product for surface adjustment of 3D models in Buddhist sculpture art and 2) investigate the satisfaction of

^{1,2,3} คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
Faculty of Informatics, Mahasarakham University

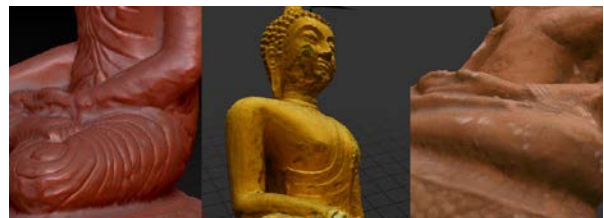
users of the software product for surface adjustment of 3D models in Buddhist sculpture art. The researcher conducted a mixed methods research, the development a software product for surface adjustment of 3D models in Buddhist sculpture art was carried out as a qualitative research, the sample group consisted of 100 undergraduate students from Rajamangala University of Technology Isan who had previously taken courses related to 3D modeling, and survey satisfaction using quantitative research methods using satisfaction questionnaires. The statistics used for data analysis were mean, percentage, and standard deviation. The research results found that 1) the software product for surface adjustment of 3D models in Buddhist sculpture art was found to be the most effective with a mean of 4.78. 2) the sample group that used the software product for surface adjustment of 3D models in Buddhist sculpture art was overall very satisfied with a mean of 4.85. This research employs an algorithm to enhance the quality of 3D meshes by distributing surface points evenly, reducing geometric distortion, and preserving critical details through feature-preserving techniques. Users can remesh the 3D models by adjusting mesh resolution. The resulting high-quality 3D digital models can be utilized in education, industrial applications, and the preservation of Buddhist heritage in digital form, benefiting the conservation and dissemination of ancient art for future generations.

Keywords: Buddhist Sculptures, 3D Remeshing, Voxel Volume Data, Detail Preservation, Digital Heritage Modeling

บทนำ

ปฏิมากรรมพุทธศิลป์เป็นหนึ่งในมรดกทางวัฒนธรรมที่ทรงคุณค่าและสะท้อนความงดงามของศิลปะโบราณ รูปปั้นและปฏิมากรรมเหล่านี้มีรายละเอียดที่ประณีตซับซ้อน ทั้งลวดลายฉลุ พื้นผิวขรุขระ และรอยแตกกร้าวจากกาลเวลา การอนุรักษ์และบันทึกรายละเอียดเหล่านี้ให้คงอยู่ต่อไปจึงเป็นเรื่องท้าทายสำหรับการศึกษาและเผยแพร่ศิลปะเหล่านี้ ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองสามมิติได้ก้าวหน้าไปมาก โดยเฉพาะแบบจำลองสามมิติในงานปฏิมากรรมพุทธ

ศิลป์ที่เกิดจากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) และการสร้างโมเดลสามมิติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI 3D Model Generator) พบว่า แบบจำลองสามมิติที่เกิดจากแปลงข้อมูลโครงสร้างรูปแบบกลุ่มของจุดสามมิติ (Point cloud) มาเป็นรูปแบบข้อมูลเมชสามมิติ (3D mesh) โดยโครงสร้างข้อมูลสามมิติจะประกอบไปด้วยของจุด (vertex) เส้น (edge) และระนาบ (face) เชื่อมต่อกันเป็นแบบโครงสร้างตาข่าย ทำให้สามารถมองเห็นรูปทรงแบบจำลองสามมิตินั้นและตีความได้ว่าเป็นรูปทรงอะไร (อภิสิทธิ์ รุ่งสูงเนิน, 2567) โดยแบบจำลองสามมิติที่ได้มักเกิดเหลี่ยมมุมค่อนข้างเยอะไม่สอดคล้องกับรูปแบบของลายไทยหรือเอกลักษณ์เฉพาะของปฏิมากรรมพุทธศิลป์ที่มีความโค้งมน อ่อนช้อย และมีพื้นผิวขรุขระ ดังนั้นแบบจำลองสามมิติที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวจึงไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้โดยทันทีหลังจบกระบวนการ



ภาพที่ 1 แบบจำลองสามมิติที่ได้จากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry)
ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกะภาพ บุปผาโชติ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีหลายงานวิจัยที่ได้นำเสนอวิธีการและอัลกอริทึมใหม่ ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของเมช (Mesh) และรักษารายละเอียดได้ดียิ่งขึ้น ได้แก่

1) อัลกอริทึมรีเมชแบบเชิงพันธุกรรม (Genetic Remeshing Algorithms) ใช้แนวคิดของวิวัฒนาการเชิงพันธุกรรมในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงการกระจายจุดบนเมช (Mesh) ให้สม่ำเสมอ

2) การรีเมชด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning-based Remeshing) นำเทคนิคการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียม เช่น ออโตเอนโคเดอร์ มาใช้ในการแปลงข้อมูลพื้นผิวเป็นเมช (Mesh) ที่มีคุณภาพสูง

3) อัลกอริทึมบีบอัดเมช (Mesh Compression Algorithms) ช่วยลดขนาดข้อมูลเมช (Mesh) โดยรักษารายละเอียดที่สำคัญ อำนวยความสะดวกในการจัดเก็บและถ่ายโอนข้อมูล

4) เทคนิคการประมวลผลบนกราฟิกพรอกเซสเซอร์ (GPU) ใช้ประโยชน์จากการประมวลผลขนานเพื่อเร่งความเร็วในกระบวนการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) ช่วยให้สามารถประมวลข้อมูลขนาดใหญ่ได้รวดเร็วขึ้น

5) การรีเมชพื้นผิวแบบเวกเตอร์ (Vector-based Remeshing) เป็นการนำเสนอการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) ที่พื้นฐานจากเวกเตอร์แทนการใช้พิกเซล (Pixel) หรือวอกเซล (Voxel) ตามแนวทางดั้งเดิม ช่วยให้ได้เมช (Mesh) ความละเอียดสูงโดยยังคงความเรียบสม่ำเสมอ

แนวคิดเกี่ยวกับการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) โดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) โดยแปลงข้อมูลปริมาตรเหล่านี้ให้กลายเป็นพื้นผิวเมชสามมิติ (3D mesh) คุณภาพสูงที่รักษารายละเอียดได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะแบบจำลองสามมิติรูปแบบของลายไทยหรือปฏิมากรรมพุทธศิลป์ที่มีความซับซ้อนของรูปทรง ส่งผลให้กระบวนการแปลงข้อมูลดังกล่าวยังเป็นเรื่องที่ทำนายสำหรับนักพัฒนา เพื่อสร้างกระบวนการโพสโพรเซสเซอร์ (Post Processor) หลังจากสร้างแบบจำลองสามมิติจากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) และ การสร้างโมเดลสามมิติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI 3D Model Generator) หากมีอัลกอริทึมที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อรักษารายละเอียดที่ซับซ้อนและมีคุณลักษณะเฉพาะที่สามารถรักษารายละเอียดของของลายไทยหรือปฏิมากรรมพุทธศิลป์ไว้ได้มากที่สุด จะทำให้แบบจำลองสามมิติจากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) และ การสร้างโมเดลสามมิติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI 3D Model Generator) มีความเหมือนจริงสูงและสามารถนำไปใช้งานต่อได้ทันทีหลังจบกระบวนการได้แก่ การนำแบบจำลองสามมิติไปใช้ในการสร้างสรรค์สื่อใหม่สำหรับการศึกษา การจัดแสดง และการเผยแพร่มรดกทางพุทธศิลป์อย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับหลายสาขา ทั้งด้านวิศวกรรมศาสตร์ การแพทย์ การออกแบบและการศึกษา

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีความสำคัญต่อการพัฒนานวัตกรรมที่ใช้ในการจำลองพื้นผิวสำหรับงานด้านพุทธศิลป์จากเทคโนโลยีการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) ที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อเพิ่มคุณภาพ ประสิทธิภาพ และความแม่นยำในการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) นำไปสู่การสร้างแบบจำลองสามมิติที่สมจริงมากขึ้นโดยเฉพาะลายไทยหรือปฏิมากรรมพุทธศิลป์ ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) เพื่อสร้างแบบจำลองดิจิทัลคุณภาพสูงจากข้อมูลปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) ของ

แบบจำลองสามมิติรูปแบบลายไทยและปฏิมากรรมพุทธศิลป์ รวมทั้งวิธีการคำนวณพื้นผิวแบบวอกเซล (Voxel) ที่พัฒนาขึ้น ยังสามารถนำไปใช้ในงานด้านปัญญาประดิษฐ์เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติอื่น ๆ ให้มีพื้นผิวสวยงามและมีคุณภาพยิ่งขึ้น ตลอดจนสามารถนำองค์ความรู้ไปใช้ในการอนุรักษ์และเผยแพร่มรดกทางศิลปวัฒนธรรม ด้วยการซ่อมแซมวัตถุโบราณที่มีการเสียหาย โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D printing) เข้ามาช่วยในการสร้างต้นแบบ การส่งเสริมการท่องเที่ยวและการศึกษา รวมถึงการเปิดโอกาสทางธุรกิจใหม่ ๆ บนพื้นฐานของเทคโนโลยีดิจิทัล ตลอดจนสามารถนำข้อมูลจำลองในรูปแบบสามมิติไปใช้ประโยชน์ในด้านการสร้างสรรค์สื่อใหม่ที่จะอุบัติขึ้นในอนาคตต่อไปได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์
2. เพื่อสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์

การทบทวนวรรณกรรม

Phung & Spear (2019) งานวิจัยนี้แนะนำการพัฒนากอปรการทำงานที่ใช้วอกเซล (Voxel) เป็นพื้นฐานสำหรับการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) และการจำลองการเติบโตของรอยร้าวในวัสดุที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำและเพิ่มประสิทธิภาพในการจำลองรอยร้าวในแบบจำลองสามมิติ โดยใช้เทคนิคอนุภาคที่แทนจุด (volumetric pixel) หรือเรียกโดยย่อว่า วอกเซล (Voxel) ในการสร้างและจัดการโครงข่ายเมช (Mesh) ของแบบจำลองสามมิติ โดยวอกเซล (Voxel) เป็นหน่วยเล็ก ๆ ที่ใช้ในการสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) ของวัสดุที่มีความซับซ้อน ซึ่งช่วยในการแบ่งส่วนวัสดุเพื่อประมวลผลรอยร้าวในแบบจำลอง มีการใช้อัลกอริทึมสำหรับการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) โดยใช้วอกเซล (Voxel) เพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งอัลกอริทึมจะคำนวณทิศทางและความเร็วของการเติบโตของรอยร้าว โดยอ้างอิงจากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในแต่ละวอกเซล (Voxel) โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสามารถปรับตัวตามความไม่สม่ำเสมอของวัสดุ เช่น การคำนวณความหนาแน่นและอัตราส่วนระหว่างแรงทั้งหมดที่กระทำต่อผิววัสดุในแต่ละวอกเซล (Voxel) เพื่อทำความเข้าใจว่ารอยร้าวจะเติบโตในทิศทางใดและมีลักษณะอย่างไร

Chiaruttini, Riolo, & Feyel (2013) งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการและอัลกอริทึมที่สำคัญในการแปลงข้อมูลปริมาตรให้เป็นเมชสามมิติ (3D mesh) ประกอบไปด้วย 1) การแทนค่าตามวอกเซล (Voxel-Based Representation) โดยใช้การประมวลผลตามตารางวอกเซล (voxel grid) ที่สามารถจับคู่กับข้อมูลปริมาตรเดิมเพื่อการสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) ที่สอดคล้องกับรูปร่างและรายละเอียดของวัตถุ 2) การสร้างตาข่ายจากข้อมูลเชิงปริมาตร (Mesh Generation from Volumetric Data) โดยเปลี่ยนข้อมูลปริมาตรให้กลายเป็นโครงสร้างในรูปแบบเมชสามมิติ (3D mesh) ซึ่งอัลกอริทึมมาร์ชชีงคิวบ์ (Marching Cubes) มีกระบวนการทำงานโดยการเดินทางผ่านตารางวอกเซล (voxel grid) และสร้างพื้นเมชสามมิติ (3D mesh) ที่เหมาะสมตามข้อมูลที่ได้รับ 3) ฟิตติ้งโมเดลที่เปลี่ยนรูปได้ (Deformable Model Fitting) เป็นการปรับแต่งเมชสามมิติ (3D mesh) ให้เข้ากับข้อมูลปริมาตรเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองรูปร่างของวัตถุ โดยอัลกอริทึมแอคทีฟ คอนทัวร์ โมเดล (สเน็ค) (Active Contour Models (Snakes)) หรือวิธีการตั้งระดับ (Level Set Methods) ถูกใช้ในการทำให้เมชสามมิติสามารถปรับตัวเองให้เข้ากับขอบเขตและรูปร่างของวัตถุในข้อมูลปริมาตร 4) การปรับปรุงพื้นผิว (Surface Refinement) การปรับปรุงพื้นผิวของเมชสามมิติ (3D mesh) เพื่อเพิ่มความละเอียดและความสมจริงของแบบจำลอง โดยอัลกอริทึมการปรับให้เรียบแบบลาปลาเซียน (Laplacian Smoothing) และการไหลของความโค้ง (Curvature Flow) ถูกนำมาใช้ในการปรับแต่งพื้นผิวของเมชสามมิติ (3D mesh) เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความเรียบเนียนและสมจริงมากขึ้น 5) เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพเป็นการใช้เทคนิคการปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้นตอนการสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) จากข้อมูลปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) เช่น การลดจำนวนโพลิกอน (polygon) ในขณะที่ยังคงความละเอียดของโมเดล งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการที่มีความสำคัญในการสร้างแบบจำลองที่สามารถใช้ในงานวิเคราะห์และวิจัยในหลากหลายสาขา ได้แก่ การแพทย์ วิศวกรรมศาสตร์ และ คอมพิวเตอร์กราฟิก เป็นต้น

Lv, Lin, & Zhao (2022) งานวิจัยนี้พัฒนาเทคนิคและอัลกอริทึมในการสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) จากข้อมูลกลุ่มของจุดสามมิติ (Point cloud) โดยใช้โครงสร้าง วอกเซล (Voxel) เป็นฐานในการประมวลผล โดยเริ่มกระบวนการจากการกรองข้อมูลกลุ่มของจุดสามมิติ (Point cloud filtering) จากนั้นทำการจัดกลุ่มจุดที่อยู่ใกล้กัน (Clustering) เพื่อสร้างโครงสร้างวอกเซล (Voxel) ที่เป็นตัวแทนของข้อมูลจุด ใช้ อัลกอริทึมวอกเซลิเซชัน (voxelization) เพื่อจัดระเบียบ

ข้อมูลจุดให้เป็นตารางวอกเซล (voxel grid) จากนั้นจึงสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) ด้วยอัลกอริทึมมาร์ชชีงคิวบ์ (Marching Cubes) โดยอัลกอริทึมนี้จะสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) ที่แสดงขอบเขตของปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) ที่ถูกเติมเต็ม และทำการปรับปรุงพื้นผิวของแบบจำลองให้มีความเรียบเนียน และจบด้วยกระบวนการสุดท้ายคือ โปสโสต์โพรเซสเซอร์ (Post Processor) และการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization) โดยใช้อัลกอริทึมเดซิเมชัน (Decimation) ในการลดจำนวนโพลิกอนในแบบจำลองสามมิติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณและการแสดงผลแต่ยังคงรักษาคุณภาพของแบบจำลองให้คงเดิม

Li et al. (2022) งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างภาพเหมือนสามมิติที่คงทนจากข้อมูลวอกเซล (Voxel) นำเสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองเมชสามมิติ (3D mesh) ของใบหน้ามนุษย์จากข้อมูลวอกเซล (Voxel) โดยมีขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ 1) การประมวลผลข้อมูลวอกเซล (Voxel) เบื้องต้น ใช้อัลกอริทึมมาร์ชชีงคิวบ์ (Marching Cubes) เพื่อแปลงข้อมูลวอกเซล (Voxel) เป็นพื้นผิวเมช (Mesh) ขั้นต้น 2) ใช้ฟิลเตอร์เมดิแอนเพื่อกำจัดจุดผิดปกติจากพื้นผิวสำหรับการสร้างภาพเหมือนใบหน้า 3) ใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) เพื่อหาจุดสำคัญบนใบหน้า สร้างโมเดลใบหน้าจากจุดสำคัญเหล่านี้ด้วยเทคนิคการประมาณค่าแบบไม่เรียบ 4) การผสมผสานแบบจำลองใบหน้ากับพื้นผิวเมช (Mesh) นำโมเดลใบหน้ามาผสมผสานกับพื้นผิวเมช (Mesh) ขั้นต้น 5) ใช้วิธีการประมาณค่าแบบนอนรีเกรสซีฟ (non regressive) เพื่อปรับแต่งพื้นผิวให้สอดคล้องกับโมเดลใบหน้า 6) การปรับปรุงคุณภาพและรายละเอียด 7) ใช้การเรียงลำดับโพลิกอนใหม่เพื่อกำจัดรอยต่อบนพื้นผิว โดยประยุกต์ใช้ตัวกรองความคมชัดและการปรับเรียบพื้นผิวเพื่อเพิ่มรายละเอียด งานวิจัยนี้มีจุดเด่นในการรักษารูปร่างและรายละเอียดของใบหน้าได้อย่างดี โดยใช้การผสมผสานระหว่างข้อมูลวอกเซล (Voxel) กับโมเดลใบหน้า ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองภาพเหมือนสามมิติที่มีความแม่นยำและคงทนได้ เทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างอวตารดิจิทัลหรือแอปพลิเคชันด้านความบันเทิงต่าง ๆ

Palestini et al. (2022) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายเพื่อใช้ในการสำรวจและออกแบบทางสถาปัตยกรรม โดยมีสาระสำคัญ 1) งานวิจัยนี้เสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองสถาปัตยกรรมสามมิติจากภาพถ่ายโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) 2) แนวทางการ

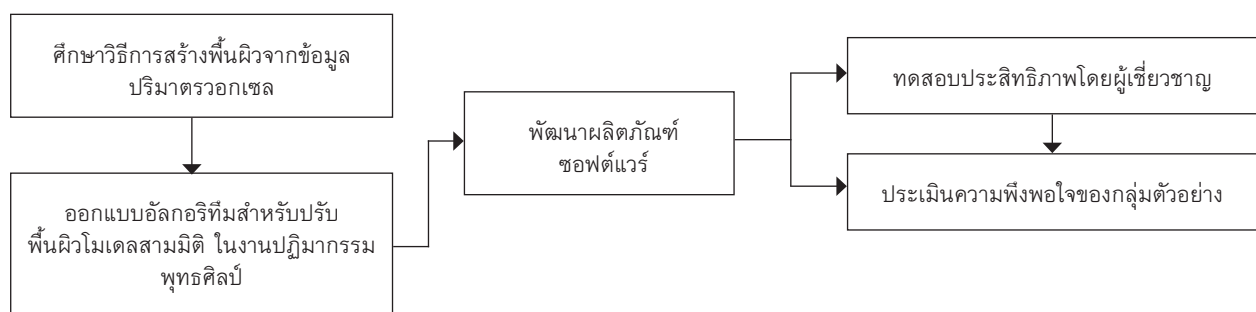
ประมวลผลภาพแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดในด้านความซับซ้อน ความแม่นยำ และประสิทธิภาพ 3) เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ โดยการฝึกสอนโมเดลด้วยข้อมูลจำนวนมากเพื่อให้เรียนรู้ลักษณะของวัตถุ 4) เครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันแนล (Convolutional Neural Networks: CNNs) สำหรับการจำแนกและตรวจจับวัตถุในภาพ 5) เครือข่ายการต่อต้านเชิงสร้างสรรค์ (Generative Adversarial Networks: GANs) สำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพสองมิติ 6) การถ่ายโอนการเรียนรู้เพื่อใช้ประโยชน์จากโมเดลที่ผ่านการฝึกฝนมาก่อนแล้ว 7) ใช้การเพิ่มข้อมูลเพื่อสร้างข้อมูลฝึกสอนที่หลากหลายมากขึ้น โดยสรุปแล้ว งานวิจัยชิ้นนี้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติทางสถาปัตยกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ

Stigeborn (2018) การวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคโนโลยี AI ที่เรียกว่า เครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันแนล (Convolutional Neural Networks: CNNs) ในมุมมองต่างๆ เพื่อให้มีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับความสามารถของเทคโนโลยีนี้ งานที่จัดทำคือการสร้างเครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันแนล (Convolutional Neural Networks:

CNNs) ที่สามารถใช้ประมาณค่าว่าวัตถุจากรูปภาพสองมิติให้มีลักษณะเป็นสามมิติ ในกรณีที่โมเดลถูกสร้างโดยระบบปัญญาประดิษฐ์อัตโนมัติ การพัฒนาจะง่ายขึ้นและส่งผลให้ มีนักพัฒนาเกมใช้เครื่องมือพัฒนาเกมเพิ่มขึ้น เพื่อให้การสร้างโมเดลสามมิติด้วยวิธีการอัตโนมัติเป็นไปได้ จึงมีการสอนปัญญาประดิษฐ์ให้เรียนรู้ รูปทรงต่าง ๆ และ สร้างรูปทรงขึ้นมาจากพอยต์คลาวด์ (Point Cloud) ที่เป็นลักษณะ สุ่ม ทำให้รูปทรงที่สร้างขึ้นแต่ละครั้งซ้ำกันได้ยาก หลังจากขึ้นรูปทรงมีการปรับแต่งลักษณะของเส้นโครงสร้างสามมิติ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในโปรแกรมสามมิติ หรือ โปรแกรมสร้างเกมต่อไป

กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยมีแนวคิดออกแบบอัลกอริทึมสำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฎิบัติการบูรณาการศิลปะ โดยใช้การสร้างพื้นผิวจากข้อมูลปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) จากนั้นจึงนำองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ และให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการสร้างแบบจำลองสามมิติในงานปฎิบัติการบูรณาการศิลปะทดสอบประสิทธิภาพ และให้กลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งานและประเมินความพึงพอใจ



ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย
ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละภาพ นุบผาโชติ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

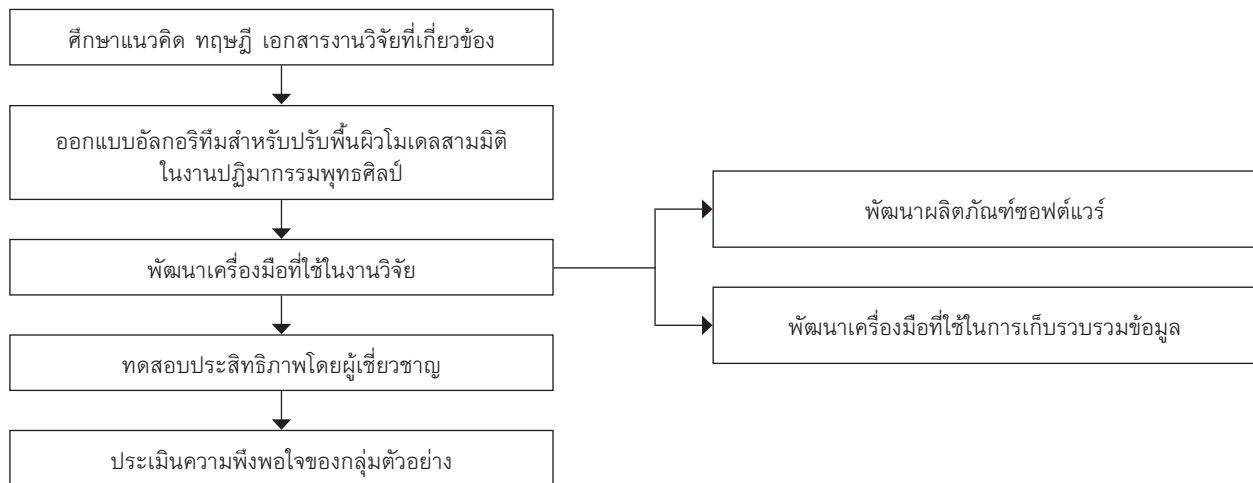
1) ประชากร คือ นักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ชั้นปีที่ 1 ถึงชั้นปีที่ 4 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 16,286 คน (ข้อมูล ณ วันที่ 1 มกราคม 2567)

2) กลุ่มตัวอย่าง คือ นักศึกษาระดับปริญญาตรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยไม่ใช้หลักความน่าจะเป็น (Non-Probability Sampling) เลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยเจาะจงนักศึกษาที่เคยเรียนวิชาที่เกี่ยวกับการขึ้นรูปทรงสามมิติมาแล้ว จำนวน 100 คน

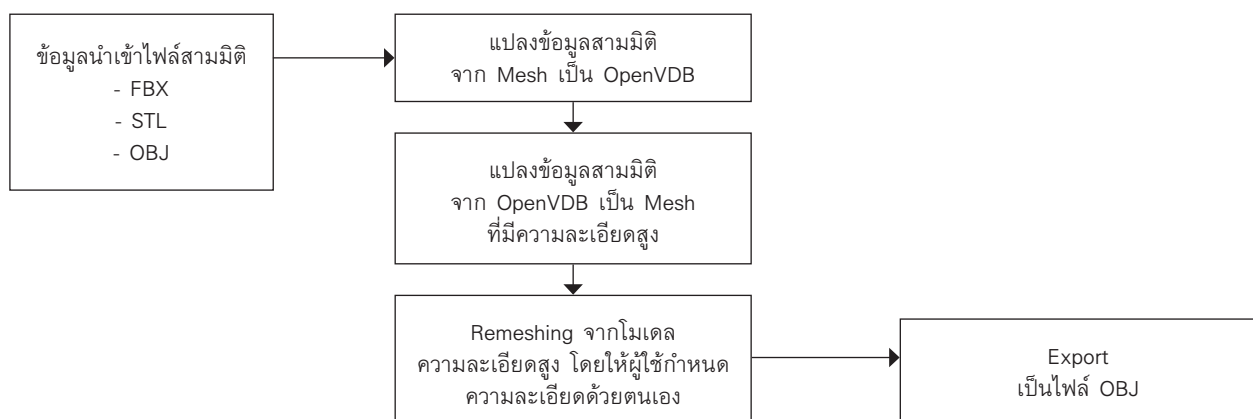
วิธีการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดการวิจัยครั้งนี้เป็นรูปแบบการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3 กรอบแนวคิดการวิจัย
ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาพ บุปผาโชติ

1. ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองสามมิติ การสร้างพื้นผิวแบบจำลองสามมิติ ประเภทและวิธีการจัดการข้อมูลสามมิติ การแปลงข้อมูลสามมิติ รูปทรงปฏิมากรรมพุทธศิลป์ รายละเอียดของปฏิมากรรมพุทธศิลป์ จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในการออกแบบอัลกอริทึมสำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ พบว่าสามารถประยุกต์ใช้อัลกอริทึมรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) สร้างแบบจำลองสามมิติสำหรับปฏิมากรรมพุทธศิลป์ โดยใช้การสร้างพื้นผิวจากข้อมูลปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) ซึ่งมีจุดเด่นและความก้าวหน้าทางด้านเทคนิคในการรักษารายละเอียดของลวดลาย การคงไว้ของพื้นผิวขรุขระและรอยแตกร้าว จึงเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติด้านปฏิมากรรมพุทธศิลป์ ที่ต้องการความละเอียดสูงและมีรูปทรงที่อ่อนช้อยงดงาม
2. ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษารวบรวม วิเคราะห์และสังเคราะห์ออกมาเป็นลำดับขั้นตอน เพื่อออกแบบอัลกอริทึมให้คอมพิวเตอร์สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการจนบรรลุวัตถุประสงค์ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 อัลกอริทึมสำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์
ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาพ บุปผาโชติ

จากภาพที่ 4 สามารถอธิบายกระบวนการได้ดังนี้

2.1 เริ่มกระบวนการโดยผู้ใช้งานสามารถนำเข้าไฟล์สามมิติ โดยรองรับไฟล์นามสกุล FBX, STL, OBJ ซึ่งเป็นไฟล์สามมิติที่เก็บข้อมูลโครงสร้างของแบบจำลองสามมิติประเภทเมช (Mesh) โดยไฟล์ชนิดนี้จะมียอดประกอบของจุดและเส้นเชื่อมโยกันเป็นโครงสร้างตาข่ายเพื่อแสดงถึงรูปทรงแบบจำลองสามมิติ โดยเฉพาะงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ที่เกิดจากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) และการสร้างโมเดลสามมิติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI 3D Model Generator) พบว่าเมช (Mesh) ของแบบจำลองสามมิติมักเกิดเหลี่ยมมุมค่อนข้างเยอะ ซึ่งไม่สอดคล้องกับรูปแบบของลายไทยหรือเอกลักษณ์เฉพาะของปฏิมากรรมพุทธศิลป์ จากการทดลองด้วยตัวผู้วิจัยเองผู้วิจัยเริ่มจากถ่ายภาพลายไทย “กระจงใบเทศ” จากการแกะสลักโฟม จากนั้นใช้เทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) เพื่อให้ซอฟต์แวร์สร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย ผลที่ได้คือ โครงสร้างของแบบจำลองสามมิติประเภทเมช (Mesh) เป็นเหลี่ยมไม่มีความโค้งมน อีกทั้งยังมีจำนวนเมช (Mesh) มากจนเกินไป ดังภาพที่ 5

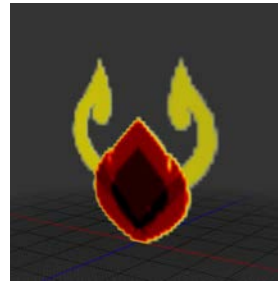


ภาพที่ 5 แบบจำลองสามมิติลายไทยกระจงใบเทศที่ได้จากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry)

ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาฬ นุบผาโชติ

2.2 ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดแปลงไฟล์สามมิติจากเมช (Mesh) เป็นปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) โดยใช้ OpenVDB ซึ่งกระบวนการนี้ไฟล์สามมิติจะถูกแปลงข้อมูลโครงสร้างตาข่ายเป็นกลุ่มความหนาแน่นของกล่องที่ประกอบด้วยโครงสร้างข้อมูลแบบลำดับขั้นใหม่และชุดเครื่องมือสำหรับจัดเก็บและจัดการข้อมูลเชิงปริมาตรแบบบางที่แบ่งตามปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีความละเอียดมากกว่ากลุ่มของจุดสามมิติที่ได้จากเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) โดยทั่วไป ข้อมูลสามมิติแบบปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) นิยมนำมาใช้สร้างการจำลองฝุ่น คำนวณ ไฟ สำหรับงานภาพยนตร์ ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้ข้อมูลสามมิติแบบ

ปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) เพื่อคงรายละเอียดของลายไทยหรือเอกลักษณ์เฉพาะของปฏิมากรรมพุทธศิลป์ที่มีความอ่อนช้อยและมีความโค้งมนของรูปทรง



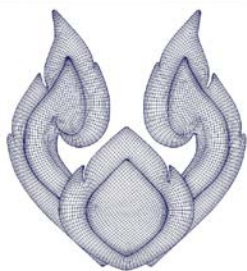
ภาพที่ 6 โครงสร้างข้อมูลแบบปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) ของแบบจำลองสามมิติลายไทยกระจงใบเทศ ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาฬ นุบผาโชติ

2.3 แปลงข้อมูลสามมิติจากปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) โดยใช้ OpenVDB กลับมาเป็นเมช (Mesh) ที่มีความละเอียดสูง กล่าวคือ เมช (Mesh) ที่ได้จากกระบวนการนี้จะมียอดประกอบของจุดและเส้นโครงสร้างของข้อมูลสามมิติที่มีจำนวนมาก เพื่อรักษารายละเอียดให้เทียบเท่ากับข้อมูลในรูปแบบปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) แต่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงจึงต้องแปลงข้อมูลของแบบจำลองสามมิติให้อยู่ในรูปแบบของเมช (Mesh)



ภาพที่ 7 เมชสามมิติ (3D mesh) ลายไทยกระจงใบเทศ ที่มีโครงสร้างข้อมูลปริมาณมากและมีความละเอียดสูง ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาฬ นุบผาโชติ

2.4 ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) เป็นฐาน เพื่อสร้างโครงสร้างแบบจำลองสามมิติจากโครงสร้างที่มีปริมาณมากให้น้อยลง ในกระบวนการนี้ผู้วิจัยจะเป็นผู้กำหนดองค์ประกอบของจุดและเส้นโครงสร้างของข้อมูลสามมิติตามที่ต้องการจากการกำหนดด้วยตนเอง การที่ผู้วิจัยออกแบบกระบวนการในขั้นตอนนี้เพื่อเป็นการสนับสนุนให้ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้ในสาขาวิชาชีพที่หลากหลาย

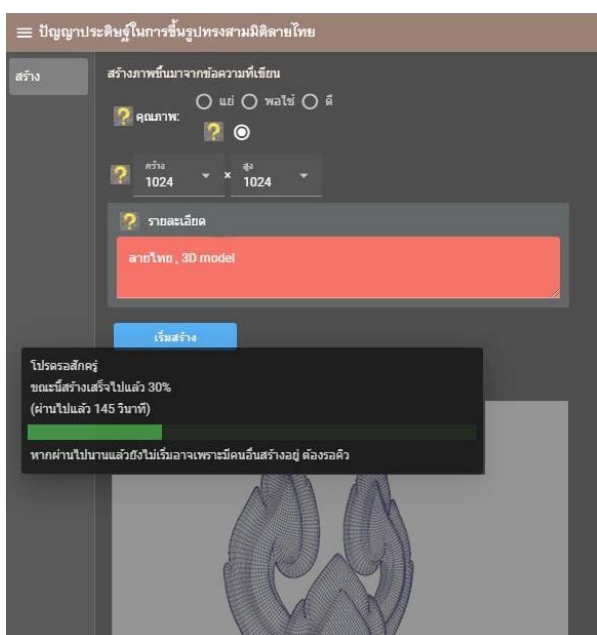


ภาพที่ 8 เมชสามมิติ (3D mesh) ลายไทยกระจังใบเทศ
ที่มีโครงสร้างข้อมูลน้อยแต่มีความละเอียดสูง
ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาฬ บุษผาโชติ

2.5 ส่งออกแบบจำลองสามมิติเป็นไฟล์นามสกุล OBJ เนื่องจากเป็นนามสกุลไฟล์สามมิติที่สามารถใช้งาน
ได้กับซอฟต์แวร์สร้างงานสามมิติได้ทุกซอฟต์แวร์ หากผู้ใช้
ต้องการไฟล์นามสกุลอื่น ก็สามารถนำไฟล์นามสกุล OBJ
ไปแปลงได้ในซอฟต์แวร์สร้างงานสามมิติที่ตนเองใช้อยู่

3. พัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบไปด้วย

3.1 พัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิว
โมเดลสามมิติในงานประติมากรรมพุทธศิลป์ โดยผู้วิจัยเขียน
โค้ดด้วยภาษา Python ตามอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้และ
ทดสอบการทำงานและความถูกต้องด้วยตัวผู้วิจัยเอง



ภาพที่ 9 ผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดล
สามมิติในงานประติมากรรมพุทธศิลป์
ที่มา: ภาพโดยผู้วิจัย นิลละกาฬ บุษผาโชติ

3.2 พัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล
โดยผู้วิจัยได้ศึกษาจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่ง
ประกอบไปด้วย

1) แบบทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์
สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานประติมากรรมพุทธศิลป์
แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านการออกแบบ
ส่วนต่อประสานผู้ใช้และด้านการทดสอบประสิทธิภาพ ใช้
ข้อคำถามรูปแบบมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ ของลิเคิร์ท
ซึ่งใช้เกณฑ์ 5 ระดับ แทน 5 ความหมาย ได้แก่

5 หมายถึง มีประสิทธิภาพมากที่สุด

4 หมายถึง มีประสิทธิภาพมาก

3 หมายถึง มีประสิทธิภาพปานกลาง

2 หมายถึง ประสิทธิภาพพอใช้

1 หมายถึง ควรปรับปรุงประสิทธิภาพ

2) แบบสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์
ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานประติมากรรม
พุทธศิลป์ ใช้ข้อคำถามรูปแบบมาตรฐานประมาณค่า 5 ระดับ
ของลิเคิร์ทซึ่งใช้เกณฑ์ 5 ระดับ แทน 5 ความหมาย ได้แก่

5 หมายถึง พึงพอใจมากที่สุด

4 หมายถึง พึงพอใจมาก

3 หมายถึง พึงพอใจปานกลาง

2 หมายถึง พึงพอใจน้อย

1 หมายถึง พึงพอใจน้อยที่สุด

นำเครื่องมือที่ใช้ในการการเก็บรวบรวมข้อมูลไปให้
ผู้เชี่ยวชาญด้านแบบสอบถามประเมินความตรงของแบบ
ประเมิน เพื่อหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item
Objective Congruence : IOC) จากนั้นคัดเลือกข้อคำถาม
ที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป ซึ่งจากการหาค่า IOC พบ
ว่าข้อคำถามทุกข้อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.67 ถึง 1.00 สามารถ
นำไปใช้ได้โดยไม่ต้องตัดข้อคำถามใดออก

4. ทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับ
ปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานประติมากรรมพุทธศิลป์ จาก
ผู้เชี่ยวชาญด้านการขึ้นรูปสามมิติในงานประติมากรรมพุทธ
ศิลป์ จำนวน 10 ท่าน จากนั้นจึงรวบรวมข้อมูลมาวิเคราะห์
ผลโดยการนำค่าเฉลี่ยมาแปลผล ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.21 – 5.00 หมายถึง มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ค่าเฉลี่ย 3.41 – 4.20 หมายถึง มีประสิทธิภาพมาก

ค่าเฉลี่ย 2.61 – 3.40 หมายถึง มีประสิทธิภาพ
ปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.81 – 2.60 หมายถึง ประสิทธิภาพพอใช้

ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.80 หมายถึง ควรปรับปรุงประสิทธิภาพ

5. สำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์
ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานประติมากรรม

พุทธศิลป์ จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน ด้วยการเลือกแบบเจาะจงนักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่เคยเรียนวิชาที่เกี่ยวกับการขึ้นรูปทรงสามมิติมาแล้ว จากนั้นจึงรวบรวมข้อมูลมาวิเคราะห์ผลโดยการนำค่าเฉลี่ยมาแปลผล ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.21 – 5.00 หมายถึง มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด

ค่าเฉลี่ย 3.41 – 4.20 หมายถึง มีระดับความพึงพอใจมาก

ค่าเฉลี่ย 2.61 – 3.40 หมายถึง มีระดับความพึงพอใจปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.81 – 2.60 หมายถึง มีระดับความพึงพอใจน้อย

ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.80 หมายถึง มีระดับความพึงพอใจน้อยที่สุด

ผลการวิจัย

ผู้วิจัยแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 2 รายการ ดังนี้

1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏึกการมรรพพุทธศิลป์

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์

(N = 10)

รายการ	ค่าเฉลี่ย	.S.D	ประสิทธิภาพ
1. ด้านการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้			
1.1 การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้แสดงปริมาณของการนับพื้นผิว	5.00	0.00	มากที่สุด
1.2 การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้จำนวนแท็บของฟังก์ชัน	5.00	0.00	มากที่สุด
1.3 การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้แสดงผลเส้นโครงสร้าง	5.00	0.00	มากที่สุด
1.4 การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ใช้สลับการเชื่อมต่อหรือ Boolean วัตถุที่มีมากกว่า 1 ชิ้น	5.00	0.00	มากที่สุด
1.5 การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้การแสดงผลการปรับฟิลเตอร์ที่ใช้คำนวณพื้นผิว	4.60	0.51	มากที่สุด
1.6 การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ใช้ในการเคลื่อนไหวของพื้นผิว	4.30	0.48	มากที่สุด
สรุปรวมด้านการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้	4.82	0.30	มากที่สุด
2. ด้านการทดสอบประสิทธิภาพ			
2.1 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวแบบ Draft	5.00	0.00	มากที่สุด
2.2 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวแบบ Production	5.00	0.00	มากที่สุด
2.3 ความ Stable การทำงานของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์	5.00	0.00	มากที่สุด
2.4 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวแบบ Medium	4.60	0.51	มากที่สุด
2.5 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวโมเดลที่รายละเอียดน้อย	4.60	0.51	มากที่สุด
2.6 ด้านความถูกต้องของรูปทรง เปรียบเทียบกับต้นฉบับจริง	4.60	0.51	มากที่สุด
2.7 ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิว ที่มีความซับซ้อน รายละเอียดสูง	4.30	0.48	มากที่สุด
สรุปรวมการทดสอบประสิทธิภาพ	4.73	0.28	มากที่สุด
สรุปโดยรวม	4.78	0.27	มากที่สุด

จากตารางที่ 1 อธิบายได้ว่าผลการทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยาเคมีฟอโตเคมี โดยรวมมีประสิทธิภาพมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.78 หากพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ผู้เชี่ยวชาญประเมินประสิทธิภาพด้านการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้สูงกว่าด้านการทดสอบด้านประสิทธิภาพ ค่าเฉลี่ย 4.82 และ 4.73 ตามลำดับ หากพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้แสดงปริมาณของการปรับพื้นผิว, การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้จำนวนแท็บของฟังก์ชัน, การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้แสดงผลเส้นโครงสร้าง, การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ใช้สลับการเชื่อมต่อหรือ Boolean วัตถุที่มีมากกว่า 1 ชิ้น, ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวแบบ Draft, ประสิทธิภาพด้าน

เวลาในการคำนวณพื้นผิวแบบ Production, ความ Stable การทำงานของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ ค่าเฉลี่ย 5.00 รองลงมาคือ การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้การแสดงผลการปรับฟิลเตอร์ที่ใช้คำนวณพื้นผิว, ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวแบบ Medium, ประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวโมเดลที่รายละเอียดน้อย และด้านความถูกต้องของรูปทรง เปรียบเทียบกับต้นฉบับจริง ค่าเฉลี่ย 4.60 รองลงมาคือ การออกแบบและการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ใช้ในการเคลื่อนไหวของพื้นผิว และประสิทธิภาพด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิว ที่มีความซับซ้อน รายละเอียดสูง ค่าเฉลี่ย 4.30

2 ผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยาเคมีฟอโตเคมี

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

(N = 100)

รายการประเมินความพึงพอใจ	ค่าเฉลี่ย	.S.D	ระดับความพึงพอใจ
1. ส่วนต่อประสานผู้ใช้เหมาะสมต่อการใช้งาน	4.95	0.22	มากที่สุด
2 . ความสะดวกแก่การใช้งาน	4.90	0.30	มากที่สุด
3. ประสิทธิภาพผู้ใช้เหมาะสมต่อการใช้งาน	4.90	0.30	มากที่สุด
4. แบบจำลองมีความเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน	4.87	0.33	มากที่สุด
5. การใช้งานโดยรวมของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์	4.87	0.33	มากที่สุด
6. การจัดวางตำแหน่งเหมาะสมแก่การใช้งาน	4.85	0.36	มากที่สุด
7 . การทำงานของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ร่วมกับซอฟต์แวร์สามมิติ	4.82	0.38	มากที่สุด
8 . การใช้งานของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์มีความเหมาะสม	4.82	0.38	มากที่สุด
9. ความรวดเร็วในการใช้งาน	4.80	0.40	มากที่สุด
10. การออกแบบเมนูและฟังก์ชัน	4.67	0.47	มากที่สุด
สรุปโดยรวม	4.85	0.08	มากที่สุด

จากตารางที่ 2 อธิบายได้ว่าผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยาเคมีฟอโตเคมี โดยรวมมีความพึงพอใจมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.85 หากพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า รายการประเมินความพึงพอใจที่กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจมากที่สุด 3 อันดับ ได้แก่ ส่วนต่อประสานผู้ใช้เหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.95 รองลงมาคือ ความสะดวกแก่การใช้งาน และประสิทธิภาพผู้ใช้เหมาะสมต่อการใช้งาน ค่าเฉลี่ย 4.90 รองลงมาคือ ความเหมาะสม

แก่การนำไปใช้งาน และการใช้งานโดยรวมของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ ค่าเฉลี่ย 4.87

สรุปจากผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยาเคมีฟอโตเคมี มีประสิทธิภาพมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าซอฟต์แวร์สามารถตอบโจทย์การใช้งานได้อย่างดี โดยผู้เชี่ยวชาญได้ให้คะแนนด้านการออกแบบ ส่วนต่อประสานผู้ใช้สูงกว่าด้านการทดสอบ

ประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาในรายละเอียดตามรายการประเมินพบว่าซอฟต์แวร์มีการออกแบบและใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้ในหลายด้าน ได้แก่ การแสดงปริมาณของการนับพื้นผิว การใช้งานแท็บฟังก์ชันต่าง ๆ การแสดงผลเส้นโครงสร้าง และการสลับการเชื่อมต่อวัตถุ Boolean มากกว่า 1 ขึ้น ประสิทธิภาพในด้านเวลาในการคำนวณพื้นผิวทั้งในโหมด Draft และ Production ก็ได้รับการประเมินประสิทธิภาพในระดับมากที่สุดเช่นกัน โดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.00 แสดงให้เห็นถึงความรวดเร็วและเสถียรภาพของซอฟต์แวร์ในการทำงาน อย่างไรก็ตาม ในด้านของการแสดงผลการปรับฟิลเตอร์ การคำนวณพื้นผิวในโหมด Medium และการคำนวณพื้นผิวโมเดลที่มีรายละเอียดน้อย รวมถึงความถูกต้องของรูปทรงเมื่อเปรียบเทียบกับต้นฉบับจริง ได้รับค่าเฉลี่ย 4.60 ยังมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ด้านการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ใช้ในการสร้างแอนิเมชันของพื้นผิวและการคำนวณพื้นผิวที่มีความซับซ้อนและรายละเอียดสูงได้รับคะแนนเฉลี่ย 4.30 แต่ก็ยังมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรองรับงานที่มีความซับซ้อนได้

2. ผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยากรรมพหุศิลป์ สรุปได้ว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด โดยเฉพาะในด้านความเหมาะสมของส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ได้รับการประเมินความพึงพอใจว่ามีความเหมาะสมและสะดวกต่อการใช้งานสูงสุด ซึ่งการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่ดี ช่วยให้ผู้ใช้ใช้งานรู้สึกสบายใจและสามารถใช้งานซอฟต์แวร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการประเมินความสะดวกในการใช้งานและประสบการณ์ผู้ใช้อย่างได้รับความพึงพอใจเป็นลำดับถัดมา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความง่ายในการเข้าถึงฟังก์ชันการทำงานและการนำซอฟต์แวร์ไปใช้งานจริง อีกทั้งผลิตภัณฑ์ยังได้รับความพึงพอใจในด้านความเหมาะสมของการนำไปใช้งานโดยรวม รวมถึงการออกแบบการจัดวางตำแหน่งและการทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์สามมิติอื่น ๆ ก็มีผลการประเมินความพึงพอใจในระดับมากที่สุด แม้การออกแบบเมนูและฟังก์ชันจะได้รับคะแนนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ แต่ยังคงมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าควรมีการออกแบบเมนูและฟังก์ชันที่เพิ่มความสะดวกและประสบการณ์ใช้งานที่ดียิ่งขึ้นในการทำวิจัยครั้งต่อไป

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ผู้วิจัยสรุปผลการวิจัย 1) การทดสอบผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยากรรม

พหุศิลป์ พบว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.78 และ 2) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยากรรมพหุศิลป์ โดยรวมมีความพึงพอใจมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.85 จึงนำมาอภิปรายผล โดยแบ่งออกเป็น 2 รายการดังนี้

1. การทดสอบผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิกิริยากรรมพหุศิลป์ พบว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.78 เนื่องจากผู้วิจัยมีการจำลองโครงสร้างข้อมูลสามมิติโดยใช้ปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) ด้วย OpenVDB ที่มีคุณสมบัติการรักษารายละเอียดที่ซับซ้อน และใช้อัลกอริทึมรีเมชสามมิติ (3D Remeshing) เพื่อให้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiaruttini, Riolo, & Feyel (2013) ที่ได้ศึกษาและนำเสนอกระบวนการและอัลกอริทึมที่สำคัญในการแปลงข้อมูลปริมาตรให้เป็นเมชสามมิติ (3D mesh) ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำองค์ความรู้มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเมชสามมิติ (3D mesh) สำหรับงานปฏิกิริยากรรมพหุศิลป์ที่มีผลผลิตไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาในเรื่องคุณภาพแบบจำลองสามมิติที่เกิดจากการใช้เทคโนโลยีที่มีความทันสมัยในการสร้างแบบจำลองสามมิติ ได้แก่ เทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) และการสร้างโมเดลสามมิติด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI 3D Model Generator) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Palestini et al. (2022) จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย และยังสอดคล้องกับ Stigeborn (2018) จากการศึกษาเทคโนโลยี AI ที่เรียกว่า Convolutional Neural Networks (CNN) ในมุมมองต่าง ๆ เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพสองมิติ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคเหล่านี้เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีลายไทยหรือปฏิกิริยากรรมพหุศิลป์ แต่แบบจำลองที่สร้างจากเทคนิคดังกล่าวมักเกิดเหลี่ยมมุมค่อนข้างเยอะ ซึ่งไม่สอดคล้องกับรูปแบบของลายไทยหรือเอกลักษณ์เฉพาะของปฏิกิริยากรรมพหุศิลป์ จึงไม่สามารถนำแบบจำลองสามมิตินั้นไปใช้งานต่อได้ ผู้วิจัยจึงศึกษาแนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และพบว่าข้อมูลสามมิติรูปแบบปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) โดยใช้ OpenVDB สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างข้อมูลจากรูปแบบเมช (ตาข่าย) ให้เป็นแบบลำดับขั้นใหม่และชุดเครื่องมือสำหรับจัดเก็บและจัดการข้อมูลเชิงปริมาตรแบบเบาบางที่แบ่งตามกริดสามมิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษารายละเอียดของแบบจำลองสามมิติลายไทยหรือปฏิกิริยากรรม

รมพุทธศิลป์ ตลอดจนนำไปสู่การสร้างรูปทรงที่มีความอ่อน
ช้อยโค้งมน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2022)
ที่ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการสร้างแบบจำลองเมชสามมิติ
(3D mesh) ของใบหน้ามนุษย์จากข้อมูลปริมาตรวอกเซล
(Voxel Volume) ผู้วิจัยจึงนำองค์ความรู้ดังกล่าว โดยออก
เป็นเป็นอัลกอริทึมให้เหมาะสมกับการสร้างแบบจำลองสาม
มิติรูปแบบลายไทยและปฏิมากรรมพุทธศิลป์ จากนั้นจึง
พัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ที่สามารถปรับพื้นผิวโมเดลสาม
มิติ สำหรับงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ที่มีลวดลายไทยที่อ่อน
ช้อย งดงาม ส่งผลให้การทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์
ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์สำหรับ
ปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ โดย
รวมมีความพึงพอใจมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.85 หากพิจารณา
เป็นรายข้อพบว่า รายการประเมินความพึงพอใจที่กลุ่ม
ตัวอย่างมีความพึงพอใจสูงสุด 3 อันดับ ได้แก่ ส่วนต่อ
ประสานผู้ใช้เหมาะสมต่อการใช้งานสูงสุด ค่าเฉลี่ย 4.95
รองลงมาคือ ความสะดวกแก่การใช้งาน และประสบการณ์
ผู้ใช้เหมาะสมต่อการใช้งาน ค่าเฉลี่ย 4.90 รองลงมาคือ
ความเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน และการใช้งานโดยรวม
ของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ ค่าเฉลี่ย 4.87 เนื่องจากผู้วิจัยได้
พัฒนาผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์โดยใช้อัลกอริทึมสำหรับปรับพื้นผิว
โมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ที่ผู้วิจัยออกแบบไว้
ตลอดจนมีการออกแบบ UX และ UI โดยอาศัยข้อมูล
จากการใช้งานซอฟต์แวร์สร้างงานสามมิติอย่างเป็นสากล
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phung & Spear (2019) ที่ได้
นำเสนอการพัฒนารอบการทำงานที่ใช้วอกเซล (Voxel)
เป็นพื้นฐานสำหรับการรีเมชสามมิติ (3D Remeshing)
ผู้วิจัยจึงนำมาประยุกต์ใช้กับวัตถุศิลปะไทยที่มีลวดลายประณีต
และรายละเอียดซับซ้อน โดยเน้นการออกแบบอัลกอริทึมที่
สามารถจัดการกับข้อมูลความละเอียดสูงให้มีเมชสามมิติ
(3D mesh) น้อยลงแต่ยังคงรายละเอียดไว้เช่นเดิม และ
สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lv, Lin, & Zhao (2022)
ที่ได้พัฒนาเทคนิคและอัลกอริทึมในการสร้างเมชสามมิติ
(3D mesh) ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้กระบวนการสุดท้ายคือ โพสต์
โพรเซสเซอร์ (Post Processor) และการเพิ่มประสิทธิภาพ
(Optimization) โดยใช้อัลกอริทึม Decimation ในการลด
จำนวนโพลิกอนในแบบจำลองสามมิติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
ในการคำนวณและการแสดงผล แต่ยังคงรักษาคุณภาพของ
แบบจำลองให้คงเดิม ซึ่งเป็นกระบวนการที่จำเป็นต่อการนำ
ไปใช้สำหรับสร้างแบบจำลองโบราณวัตถุทางวัฒนธรรมให้
อยู่ในรูปแบบดิจิทัลสามมิติ ตลอดจนผู้วิจัยได้กำหนดการ

ส่งออกเมชสามมิติ (3D mesh) เป็นไฟล์ OBJ เนื่องจากเป็น
นามสกุลไฟล์สามมิติที่สามารถใช้งานได้กับซอฟต์แวร์สร้าง
งานสามมิติได้ทุกซอฟต์แวร์ หากผู้ใช้ต้องการไฟล์นามสกุลอื่น
ก็สามารถนำไฟล์ OBJ ไปแปลงไฟล์ได้ในซอฟต์แวร์สร้าง
งานสามมิติที่ตนเองใช้อยู่ จึงส่งผลให้ผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์
ซอฟต์แวร์สำหรับปรับพื้นผิวโมเดลสามมิติ ในงานปฏิมากรรม
พุทธศิลป์มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอัลกอริทึมสำหรับการรีเมช
สามมิติ (3D Remeshing) ข้อมูลของแบบจำลองสามมิติ
จนนำไปสู่การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับปรับพื้นผิวโมเดล
สามมิติ ในงานปฏิมากรรมพุทธศิลป์ และนำมาพัฒนาพัฒนา
ผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์โดยใช้การสร้างพื้นผิวจากข้อมูลปริมาตร
วอกเซล (Voxel Volume) ผู้วิจัยได้พบปัญหาและข้อจำกัด
ตลอดจนแนะนำแนวทางที่จะสามารถนำไปพัฒนาสื่อที่มี
ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยปริมาณพื้นที่ที่ใช้จัดเก็บข้อมูล
ปริมาตรวอกเซล (Voxel Volume) ใช้ปริมาณสูง และด้วย
อารยธรรมด้านพุทธศิลป์ที่มีมาอย่างยาวนานถึง 2,567 ปี
ฐานข้อมูลของ ปฏิมากรรมพุทธศิลป์หากจัดเก็บแบบจำลอง
สามมิติด้วยเทคนิคการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ
(photogrammetry) จากการใช้ 3D scanner เพื่อเก็บแบบ
จำลองดังกล่าวไว้ทั้งหมด จะทำให้มีการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่
ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะ ให้มีการนำ Machine learning มา
ใช้ เพื่อให้ AI เรียนรู้และจดจำลวดลายต่าง ๆ นำไปสู่
การพัฒนาต่อเป็น AI Generative ออกมาเป็นไฟล์สาม
มิติ สำหรับผู้ที่ต้องการใช้งาน โดยติดตั้งเซิร์ฟเวอร์หลักเป็น
ศูนย์กลาง จากนั้นจึงบริการแก่ผู้ที่สนใจ ให้สามารถเข้าไป
ใช้งานในลักษณะออนไลน์ เมื่อต้องการรูปทรงสามมิติแบบ
ลายไทยหรือปฏิมากรรมพุทธศิลป์ต่อไป ยกตัวอย่างเช่น จัด
ทำเป็นระบบเว็บไซต์คล้าย ๆ กับ ChatGPT หรือ Discord
server เหมือน AI generative ภาพ Midjourney เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- อกินันท์ รุ่งสูงเนิน, สุวิช ธีระโคตร และมนัสวี แก่นอำพรพันธ์. (2567). ประสิทธิภาพและประสิทธิผลส่วนเสริมของซอฟต์แวร์เบลนเดอร์เพื่อสร้างโมเดล 3 มิติสำหรับจักรวาลนฤมิต. **วารสารวิชาการนวัตกรรมสื่อสารสังคม**. 12(1), 62-71.
- Chiaruttini, V., Riolo, V., & Feyel, F. (2013). Advanced remeshing techniques for complex 3D crack propagation. In **Proceedings of the 13th International Conference on Fracture** (Vol. 1, pp. 547-555). Beijing, China.
- Li, Z., Yu, T., Zheng, Z., & Liu, Y. (2022). Robust and Accurate 3D Self-Portraits in Seconds. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. 44(11), 7854-7870. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3113164>
- Lv, C., Lin, W., & Zhao, B. (2022). Voxel Structure-Based Mesh Reconstruction from a 3D Point Cloud. **IEEE Transactions on Multimedia**. 24, 1815-1829. <https://doi.org/10.1109/TMM.2021.3073265>
- Palestini, C., Basso, A., & Perticarini, M. (2022). Machine Learning as an Alternative to 3D Photomodeling Employed in Architectural Survey and Automatic Design Modelling. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W1-2022**. 191-197. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-191-2022>
- Phung, B. R., & Spear, A. D. (2019). A voxel-based remeshing framework for the simulation of arbitrary three-dimensional crack growth in heterogeneous materials. **Engineering Fracture Mechanics**. 209, 404-422. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.01.008>
- Stigeborn, P. (2018). **Generating 3D-objects using neural networks**. (Master's thesis), School of Electrical Engineering and Computer Science, KTH Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. Retrieved June 14, 2024, from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1218064/FULLTEXT01.pdf>