

Development of a Centralized System for Exchanging Geometric Point Movements in 3D Models for Visual Effects and Computer Animation

Ninlagarn Boobpachote¹, Sittisak Rattanaprapawan², Punyarat Rungsoongnern³, and
Orathai Suttijak^{4,*}

¹Program in Multimedia Technology, Faculty of Architecture and Creative Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; Email: ninlagarn.bo@rmuti.ac.th

²Program in Multimedia Technology, Faculty of Architecture and Creative Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; Email: sittisak.rt@rmuti.ac.th

³Program in Multimedia Technology, Faculty of Architecture and Creative Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand; Email: punyarat.pu@rmuti.ac.th

^{4,*}Department of New Media, Faculty of Informatics, Mahasarakham University, Maha Sarakham 44150, Thailand; Email: orathai.s@msu.ac.th

**Corresponding author: Orathai Suttijak (orathai.s@msu.ac.th)*

Received: 1 March 2026; **Revised:** 7 April 2026;

Accepted: 9 April 2026; **Published:** 30 April 2026

Abstract

This study explores techniques for reducing file sizes and processing time of geometric point movements in 3D models, leading to the development of a GPU Cache algorithm. The objectives of the research were: 1) to design and develop a centralized system for exchanging geometric point movement data in 3D models between visual effects and computer animation software, and 2) to examine user satisfaction and compare the usability of the developed system in supporting workflows in visual effects and computer animation. The sample group consisted of 34 undergraduate students majoring in Multimedia Technology at Rajamangala University of Technology Isan, selected based on their prior coursework in visual effects and computer animation. The research employed mean, standard deviation, and t-test statistics. Results indicated that 1) the developed centralized system was highly effective, with an average score of 4.38, and 2) the sample group showed a statistically significant difference in satisfaction levels before and after using the centralized system at the .05 significance level. Satisfaction after using the system was higher than before, with a mean score of 4.157.

Keywords: Centralized System, Geometric Points, 3D Models, Visual Effects, Computer Animation



Copyright © 2026 Journal of Computer and Creative Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC-ND).

Citation:

Boobpachote, N, Rattanaprapawan, S., Rungsoongnern, P., & Suttijak, O. (2026). Development of a Centralized System for Exchanging Geometric Point Movements in 3D Models for Visual Effects and Computer Animation. *Journal of Computer and Creative Technology*, 4(1), e3713. <https://doi.org/10.65205/jcct.2026.e3713>

การพัฒนาระบบศูนย์กลางเพื่อแลกเปลี่ยนการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดลสามมิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

นิลละภาพ บุบผาโชติ¹, สิทธิศักดิ์ รัตนประภาวรรณ², ปุญญรัตน์ รังสูงเนิน³, และ อรทัย สุทธิจักร^{4,*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดีย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย; Email: ninlagarn.bo@rmu.ac.th

²สาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดีย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย; Email: sittisak.rt@rmu.ac.th

³สาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดีย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
จังหวัดนครราชสีมา 30000 ประเทศไทย; Email: punyarat.pu@rmu.ac.th

^{4,*}ภาควิชาสื่อสมัยใหม่ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150 ประเทศไทย;
Email: orathai.s@msu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บทความ: อรทัย สุทธิจักร (orathai.s@msu.ac.th)

รับบทความ: 1 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 7 เมษายน 2569;

ตอบรับบทความ: 9 เมษายน 2569; เผยแพร่บทความ: 30 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

บทความนี้มีได้ศึกษาเทคนิคการลดขนาดไฟล์และลดเวลาในการประมวลผลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ จนนำไปสู่การสร้าง อัลกอริทึม GPU Cache โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ ระหว่างซอฟต์แวร์สร้างงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจและเปรียบเทียบความสามารถในการใช้งานของระบบที่พัฒนาขึ้นในการสนับสนุนกระบวนการทำงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน มีกลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 34 คน จากการเลือกแบบเจาะจงนักศึกษาที่เคยเรียนวิชาที่เกี่ยวข้องกับวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน สถิติที่ใช้ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการทดสอบค่าที ผลจากการวิจัยพบว่า 1) ระบบศูนย์กลางที่พัฒนาขึ้น มีคุณภาพอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.38 2) กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้ระบบศูนย์กลางมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยมีระดับความพึงพอใจหลังการใช้งานสูงกว่าก่อนการใช้งาน ค่าเฉลี่ย 4.157

คำสำคัญ: ระบบศูนย์กลาง, จุดเรขาคณิต, โมเดล 3 มิติ, วิชวลเอฟเฟกต์, คอมพิวเตอร์แอนิเมชัน



Copyright © 2026 Journal of Computer and Creative Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC-ND).

การอ้างอิง:

นิลละภาพ บุบผาโชติ, สิทธิศักดิ์ รัตนประภาวรรณ, ปุญญรัตน์ รังสูงเนิน, และ อรทัย สุทธิจักร. (2569). การพัฒนาระบบศูนย์กลางเพื่อแลกเปลี่ยนการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดลสามมิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน. วารสารคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์, 4(1), e3713. <https://doi.org/10.65205/jcct.2026.e3713>

1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันการสร้างสรรค์เนื้อหาดิจิทัลได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมมัลติมีเดีย วิดีโอ เกม และเว็บไซต์ ทำให้เทคนิคด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการผลิตสื่อที่มีคุณภาพและมีความน่าสนใจ โดยเทคนิควิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันเป็นเทคนิคสำหรับงานสื่อที่ต้องทำสิ่งเสมือนจริงให้เกิดขึ้นมาได้ ทั้งที่บางครั้งสิ่งนั้นไม่เคยเกิดขึ้นจริง เนื่องจากเหตุการณ์หรือสิ่งที่ต้องการถ่ายทอดนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้หรือไม่อยู่ในโลกของความจริง (Jia & Sundar, 2024) ในปัจจุบันผู้ทำงานเกี่ยวกับวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันมีจำนวนไม่มากนัก เมื่อเทียบกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมที่กำลังเติบโตภายในประเทศและขยายผลออกสู่ต่างประเทศ ส่งผลให้มีการผลิตบัณฑิตออกสู่ภาคอุตสาหกรรมดิจิทัลคอนเทนต์เป็นจำนวนมาก โดยมหาวิทยาลัยเริ่มมีการเปิดหลักสูตรการเรียนการสอนเกี่ยวกับการผลิตสื่อสร้างสรรค์ที่ใช้เทคนิควิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันมากขึ้น ตัวอย่างเช่น คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา ที่มีหลักสูตรการเรียนการสอนในชื่อสาขาวิชาเทคโนโลยีมัลติมีเดีย โดยการเรียนการสอนและการทำงานในภาคอุตสาหกรรมดิจิทัลคอนเทนต์เกี่ยวกับการผลิตสื่อสร้างสรรค์ที่ใช้เทคนิควิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

อย่างไรก็ตาม กระบวนการสร้างงานดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ซอฟต์แวร์ 3 มิติที่มีความซับซ้อน มีจุดเด่น เป้าประสงค์ และลักษณะการสร้างงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันที่แตกต่างกัน เช่น Autodesk Maya, Houdini, Cinema4D, Blender, Foundry Nuke และ 3DsMax โดยแต่ละแอปพลิเคชันมีระบบไฟล์และการเข้ารหัสข้อมูลต่างกัน จึงใช้ไฟล์ฟอร์แมต Fbx, Alembic หรือ USD ที่สามารถส่งไฟล์งานไปมาหากันได้ แต่ไฟล์ฟอร์แมตที่มีการจัดเก็บข้อมูลจำนวนมากมักมีปัญหาในเรื่องของความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลของแอปพลิเคชันที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดปัญหาในการแลกเปลี่ยนไฟล์ เช่น ไฟล์มีขนาดใหญ่ ประมวลผลช้า ไม่รองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ และสิ้นเปลืองทรัพยากรคอมพิวเตอร์ ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการผลิตงานและความยืดหยุ่นในการทำงานร่วมกันระหว่างแอปพลิเคชัน นักพัฒนา และนักศึกษาในสายงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน จึงมีความจำเป็นในการออกแบบระบบที่สามารถลดขนาดไฟล์ ปรับปรุงความเร็วในการประมวลผล และมีความสามารถเชื่อมต่อระหว่างแอปพลิเคชันต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะการจัดการข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ ซึ่งเป็นหัวใจของงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

จากความเป็นมาและความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบศูนย์กลางเพื่อใช้จัดการและแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติระหว่างแอปพลิเคชันสำหรับสร้างงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน เพื่อให้เกิดการประมวลผลที่รวดเร็ว ไฟล์มีขนาดเล็กลง แสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ และสนับสนุนการเรียนการสอน รวมถึงการผลิตงานที่ตอบโจทย์ต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมดิจิทัลคอนเทนต์ของประเทศไทยในอนาคต

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย (Research Objectives)

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติระหว่างซอฟต์แวร์สร้างงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน
2. เพื่อศึกษาความพึงพอใจและเปรียบเทียบความสามารถในการใช้งานของระบบที่พัฒนาขึ้นในการสนับสนุนกระบวนการทำงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

3. การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

3.1 โมเดล 3 มิติ

โมเดล 3 มิติ เกิดจากการสร้างขึ้นด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับสร้างงาน 3 มิติ มักอยู่ในรูปแบบรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) เนื่องจากโมเดล 3 มิติประเภทนี้สามารถปรับแต่งและแก้ไขได้ง่าย มีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานร่วมกับแอปพลิเคชัน 3 มิติที่หลากหลาย (Rungsoongnern et al., 2024) สำหรับโมเดล 3 มิติที่ถูกนำไปใช้งานต่อในงานแอนิเมชัน เกม และวิชวลเอฟเฟกต์ จะใช้วิธีการสร้างการควบคุมในการเคลื่อนไหว ไม่ว่าจะเป็นการใส่กระดูก การทำ Blend shape การตรวจสอบการชน และการคำนวณฟิสิกส์ต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความเสมือนจริง (Rungsoongnern & Chaiyasit, 2022) โมเดล 3 มิติมีองค์ประกอบย่อยซึ่งเป็นข้อมูลเพื่อแสดงถึงรูปทรงของโมเดลให้เห็นเป็น 3 มิติ

ประกอบด้วย 1) จุด (Vertexes) 2) เส้น (Edges) และ 3) ระนาบ (Face) ซึ่งองค์ประกอบย่อยเหล่านี้ล้วนส่งผลแปรผันตามการประมวลผลทั้งในรูปแบบ Pre rendering ที่เป็นการประมวลผลภาพทีละภาพหรือเรียกว่าเฟรม และ Real-time Rendering ที่เป็นการประมวลผลตามเวลาจริง กล่าวคือ หากโมเดล 3 มิติมีองค์ประกอบย่อย (จุด เส้น ระนาบ) จำนวนมากจะส่งผลให้การประมวลผลใช้เวลานานมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากองค์ประกอบย่อยทั้ง 3 ซึ่งได้แก่ จุด เส้น และระนาบแล้ว ในส่วนของงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน จะมีองค์ประกอบอื่น ๆ อีกมากมาย ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ ลวดลายของพื้นผิว แสง เงา กระจก การเคลื่อนไหวของวัตถุ การจำลอง Particle Fluid เป็นต้น

3.2 เทคนิคการจับเก็บข้อมูลโมเดล 3 มิติ

Geometry Cache หรือ "แคชเรขาคณิต" เป็นเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์กราฟิกที่ใช้เทคนิคการเก็บข้อมูลเรขาคณิตแบบคงที่ (Static Geometry) ไว้ล่วงหน้า เพื่อใช้ในการประมวลผลภาพ 3 มิติ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน โดยลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณเรขาคณิตซ้ำ ๆ (Zhang et al., 2025) ซึ่งเป็นแนวทางที่เน้นการจัดเก็บเฉพาะข้อมูลที่จำเป็นต่อการแสดงผล โดย Geometry Cache มีวิธีการจัดเก็บข้อมูลโมเดล 3 มิติไว้ในรูปแบบที่ย่อขนาดลงเพื่อใช้ในภายหลัง ซึ่งเก็บเฉพาะตำแหน่ง X, Y, Z ของจุดยอดของวัตถุ ไม่ใช้การแปล การหมุน หรือมาตราส่วนของโหนดพิกัดของวัตถุ (Domke et al., 2023) ทำให้ไม่ต้องประมวลผลใหม่ทุกครั้ง โดยทั่วไปแล้ว Geometry Cache จะถูกสร้างขึ้นโดยเก็บข้อมูลโมเดล 3 มิติในช่วงเวลาหนึ่งไว้ ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของจุดยอด (Vertices) เส้นขอบ (Edges) และระนาบ (Faces) ของโมเดล 3 มิติในแต่ละเฟรมของวิดีโอหรือแอนิเมชัน (Wyman et al., 2021) การจัดเก็บข้อมูลในระดับจุดยอดเป็นหลัก นิยมใช้ในการปฏิบัติงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน เนื่องจากสามารถลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลระหว่างเฟรมและควบคุมการเคลื่อนไหวได้อย่างละเอียด โดยเรียกแนวทางนี้ว่า Per-Vertex Animation Data ซึ่งจัดเก็บเฉพาะตำแหน่งของจุดยอดในแต่ละช่วงเวลา

นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคการประมวลผลแบบแบ่งชุดข้อมูล (Batch-based Processing) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ โดยมีแนวคิดในการทำงานด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยและประมวลผลแบบลำดับขั้น ซึ่งช่วยลดภาระของ GPU และเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงหน่วยความจำ (Kerbl et al., 2018) ขณะเดียวกัน แนวคิด Vertex Reuse ที่สามารถลดการคำนวณซ้ำ โดยมีวิธีการนำผลลัพธ์ของจุดยอดที่เคยประมวลผลแล้วกลับมาใช้ใหม่ ส่งผลให้ระบบสามารถทำงานได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น (Kenzel et al., 2018) ดังนั้น Geometry Cache ร่วมกับแนวคิด Per-vertex, Batch-based processing และ Vertex Reuse จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผล ลดขนาดไฟล์ สามารถแก้ไขโมเดลได้ง่ายโดยไม่ต้องแก้ไขโมเดล 3 มิติ ดั้งเดิม และลดโอกาสเกิดข้อผิดพลาดจากการประมวลผลโมเดล 3 มิติแบบเรียลไทม์

3.3 วิชวลเอฟเฟกต์

วิชวลเอฟเฟกต์เป็นการทำเทคนิคพิเศษเพื่อสร้างภาพลวงตาที่มีความเหมือนจริง โดยตีความจากความรู้ทางด้านศิลปะและความเชี่ยวชาญทางเทคโนโลยี ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากการสร้างภาพ 3 มิติในรูปแบบของคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน (Pardeshi & Karbhari, 2019) วิชวลเอฟเฟกต์จึงเป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตสื่อภาพยนตร์หรือภาพยนตร์โฆษณา เพื่อสะท้อนให้ผู้ชมเกิดความเข้าใจในเนื้อหาที่เป็นนามธรรม เนื้อหาในจินตนาการ หรือเนื้อหาที่ไม่สามารถเกิดขึ้นจริงได้ (Jones, 2023) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีขั้นตอนที่ซับซ้อนและหลากหลาย ขึ้นอยู่กับลักษณะงานและผลลัพธ์ของงานที่ต้องการ แต่ทุกขั้นตอนล้วนต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูงมากเพื่อใช้ในการสร้างสรรค์ผลงานร่วมกับแอปพลิเคชันสำหรับสร้างงาน 3 มิติ ซึ่งแต่ละบริษัทหรือภาคการศึกษา ก็เลือกใช้แอปพลิเคชันที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และผลลัพธ์ของผลงาน

3.4 คอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

คอมพิวเตอร์แอนิเมชันเป็นเทคนิคการสร้างภาพเคลื่อนไหวโดยใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์เป็นหลัก อาศัยความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ เช่น การคำนวณแรงกระทำ ทิศทางการเคลื่อนที่ รวมไปถึงแรงอื่น ๆ ที่จะส่งผลต่อวัตถุ 3 มิติ ตลอดจนการคำนวณการประมวลผลภาพเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ซึ่งมีความซับซ้อนสูง นำไปสู่การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์แอนิเมชันในงานวิชวลเอฟเฟกต์ จึงมีการปรับตัวและแตกแขนงสาขางานเพื่อสนับสนุนการผลิตแอนิเมชันสำหรับภาพยนตร์และภาพยนตร์โฆษณามากยิ่งขึ้น (Cholodenko, 2024) คอมพิวเตอร์แอนิเมชันจึงนับว่าเป็นรูปแบบหนึ่งของเทคนิคการสร้างภาพเสมือนด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Generated Imagery: CGI) ในปัจจุบัน เทคนิค

CGI เป็นที่นิยมมากในการผลิตภาพยนตร์ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถทดแทนการถ่ายทำในพื้นจริงได้ ทั้งยังสร้างภาพที่เสมือนจริง และภาพจินตนาการได้อย่างไร้ขีดจำกัด และยังประหยัดต้นทุนมากกว่าการยกกองเดินทางไปถ่ายทำจริง (Jiang et al., 2022)

3.5 การประมวลผลแบบเรียลไทม์

การประมวลผล 3 มิติ คือการเปลี่ยนถ่ายโมเดล 3 มิติ ฉาก และสภาพแวดล้อม ให้ออกมาเป็นสื่อที่สมบูรณ์ เกิดจากการคำนวณองค์ประกอบย่อยของโมเดล 3 มิติ ได้แก่ จุด เส้น และระนาบ หากองค์ประกอบทั้งสามมีจำนวนมากจะส่งผลต่อการสิ้นเปลืองทรัพยากรคอมพิวเตอร์ขณะที่มีการประมวลผล (Rungsoongnern, 2025) แต่ในงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันนอกจากองค์ประกอบพื้นฐานของโมเดล 3 มิติแล้ว ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานเหล่านั้น ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ ลวดลายของพื้นผิว แสง เงา กระจก การเคลื่อนไหวของวัตถุ การจำลอง Particle Fluid ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ล้วนทำให้งานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันมีความสมจริง แต่ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์และระยะเวลาในการประมวลผลมากขึ้น โดยเฉพาะการประมวลผลแบบเรียลไทม์ ซึ่งเป็นศาสตร์หนึ่งของคอมพิวเตอร์กราฟิกที่เน้นการวิเคราะห์และสร้างภาพแบบเรียลไทม์ และถูกนำไปใช้มากที่สุด ในสื่อวิดีโอเกม หรือกราฟิก 3 มิติที่มีรูปแบบโต้ตอบกับผู้ใช้ หรือแม้แต่การผลิตภาพยนตร์ที่มีการนำความสามารถของการประมวลผล 3 มิติแบบเรียลไทม์มาใช้ในการถ่ายโอนไฟล์หรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชัน จุดประสงค์หลักในการประมวลผลแบบเรียลไทม์คือการแสดงภาพที่สมจริงให้ได้มากที่สุดที่อยู่ในความเร็วขั้นต่ำที่เป็นที่ยอมรับได้คือ 24 เฟรม/วินาที ซึ่งเป็นความต้องการขั้นต่ำที่สายตามนุษย์สามารถสร้างภาพติดตาทำให้เห็นเป็นภาพเคลื่อนไหว ดังนั้น ในเวลา 1 วินาที ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์จะต้องประมวลผลภาพ 3 มิติออกมาให้ได้อย่างน้อยที่สุดคือ 24 ภาพ (VIVERSE Team, 2024) นำไปสู่การประยุกต์ใช้การประมวลผลแบบเรียลไทม์ในงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน เพื่อจำลองสถานการณ์ล่วงหน้า ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยให้ผู้กำกับและช่างภาพสามารถดูตัวอย่างและทดลองใช้แนวทางภาพและองค์ประกอบการเล่าเรื่องได้โดยไม่ต้องรอให้กระบวนการผลิตเสร็จสิ้น ดังนั้นจึงได้สนใจประยุกต์ใช้ศาสตร์การวิเคราะห์และสร้างภาพแบบเรียลไทม์เพื่อบรรเทาความสับสนในการปรับแต่งแก้ไขสำหรับสร้างสรรค์สื่อภาพยนตร์และภาพยนตร์โฆษณาขณะที่ศิลปินวิชวลเอฟเฟกต์กำลังสร้างสรรค์ผลงาน

3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li et al. (2020) ได้เสนอวิธีการใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผล 3 มิติบนเว็บไซต์ด้วยอุปกรณ์มือถือ โดยแยกข้อมูลโมเดล 3 มิติ และภาพเคลื่อนไหวออกจากกัน ซึ่งข้อมูลโมเดล 3 มิติจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานที่แสดงถึงรูปร่างโมเดล เมื่อมีการแสดงผลโมเดล 3 มิติบนเว็บไซต์ด้วยอุปกรณ์มือถือครั้งแรกเท่านั้น ส่วนข้อมูลภาพเคลื่อนไหวจะโหลดแบบเรียลไทม์ตามที่จำเป็น ขึ้นอยู่กับการโต้ตอบของผู้ใช้ โดยลำดับข้อมูลภาพเคลื่อนไหวจะถูกแบ่งออกเป็นหลายระดับแบ่งออกตามความละเอียด ขึ้นอยู่กับระดับรายละเอียดที่ต้องการ ข้อมูลภาพเคลื่อนไหวที่มีความละเอียดสูงจะโหลดเมื่อผู้ใช้ซูมเข้าหรือโต้ตอบกับโมเดลในระยะใกล้

Schütz et al. (2020) ได้นำเสนอวิธีการประมวลผลแบบเรียลไทม์สำหรับจุดข้อมูลจำนวนมาก (Point Cloud) โดยไม่ใช้โครงสร้างการเร่งความเร็วแบบลำดับชั้น (Hierarchical Acceleration Structures) ซึ่งเป็นวิธีแบบดั้งเดิม แต่วิธีการประมวลผลแบบเรียลไทม์สำหรับจุดข้อมูลจำนวนมากสามารถประมวลผลจุดได้ถึงหนึ่งพันล้านจุด โดยใช้หน่วยความจำ GPU เพียงเล็กน้อย วิธีการนี้ทำงานโดยแบ่งการประมวลผลออกเป็นหลายเฟรม ซึ่งในเฟรมแรกจุดข้อมูลทั้งหมดที่มองเห็นได้จะถูกประมวลผล และในเฟรมถัดไปจุดข้อมูลแบบสุ่มจำนวนหนึ่งจะถูกประมวลผลเพื่อเติมเต็มช่องว่างที่เหลือ กระบวนการนี้มีการทำซ้ำจนกว่าจุดข้อมูลทั้งหมดจะถูกประมวลผลจนครบถ้วน วิธีการนี้มีประโยชน์สำหรับการประมวลผลจุดข้อมูลจำนวนมากในแอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์ ตัวอย่างเช่น สามารถใช้เพื่อประมวลผลสภาพแวดล้อม 3 มิติแบบเรียลไทม์สำหรับเกมหรือการจำลอง หรือเพื่อเรนเดอร์ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์แบบเรียลไทม์

Kerbl et al. (2018) ได้ศึกษาข้อมูลเชิงลึกใหม่เกี่ยวกับวิธีการทำงานของแคชจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติบน GPU สมัยใหม่ ข้อมูลนี้สามารถใช้เพื่อปรับแต่งแอปพลิเคชันกราฟิกเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อให้นักพัฒนาซอฟต์แวร์สามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อปรับแต่งแอปพลิเคชันของตนให้สามารถใช้ประโยชน์จากแคชจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแคชจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติแบบดั้งเดิมเป็นหน่วยความจำแคชที่เก็บผลลัพธ์ไว้ จากนั้นเมื่อต้องการใช้งานจึงดึงข้อมูลผลลัพธ์จากแคชมาใช้แทนที่จะคำนวณใหม่ ส่วนการแคชจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติแบบ Batch-based จะแบ่งแคช

ออกเป็นกลุ่มย่อย แต่ละกลุ่มย่อยมีแคชจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติเป็นของตัวเอง โดยให้แคช Vertex Shader ถูกประมวลผลเป็นกลุ่ม และแคช Vertex จะใช้เฉพาะกับ Vertex ภายในกลุ่มนั้นเท่านั้น วิธีนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับ GPU สมัยใหม่ที่มีคอร์ประมวลผลจำนวนมาก เนื่องจากช่วยลดอัตราการประมวลผลสำหรับแคชจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติเพียงอย่างเดียว

Kenzel et al. (2018) ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของการประมวลผล Geometry ซอฟต์แวร์แบบขนานมวลชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องกับกราฟิก 3 มิติ มักมีปัญหาคือ จุดข้อมูลโมเดล 3 มิติเดียวกันมักถูกอ้างอิงหลายครั้งในโมเดล 3 มิติ ส่งผลให้เกิดการคำนวณซ้ำซ้อนและลดประสิทธิภาพในการประมวลผล การวิจัยนี้เสนอวิธีการใหม่สำหรับการนำ Vertex Reuse แบบ On-the-Fly ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากกว่าแบบดั้งเดิมถึง 2-3 เท่า โดยแบ่งจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติออกเป็นชุดย่อย แต่ละชุดย่อยจะถูกประมวลผลแยกต่างหาก ภายในแต่ละชุดย่อยของจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติแต่ละตัวจะถูกเก็บไว้ในแคช หากจุดข้อมูลโมเดล 3 มิติถูกพบในแคชแล้ว ผลลัพธ์ของการประมวลผลจากการแคชจะถูกนำมาใช้ใหม่แทนที่จะคำนวณใหม่

4. กรอบแนวคิดงานวิจัย (Conceptual Framework)

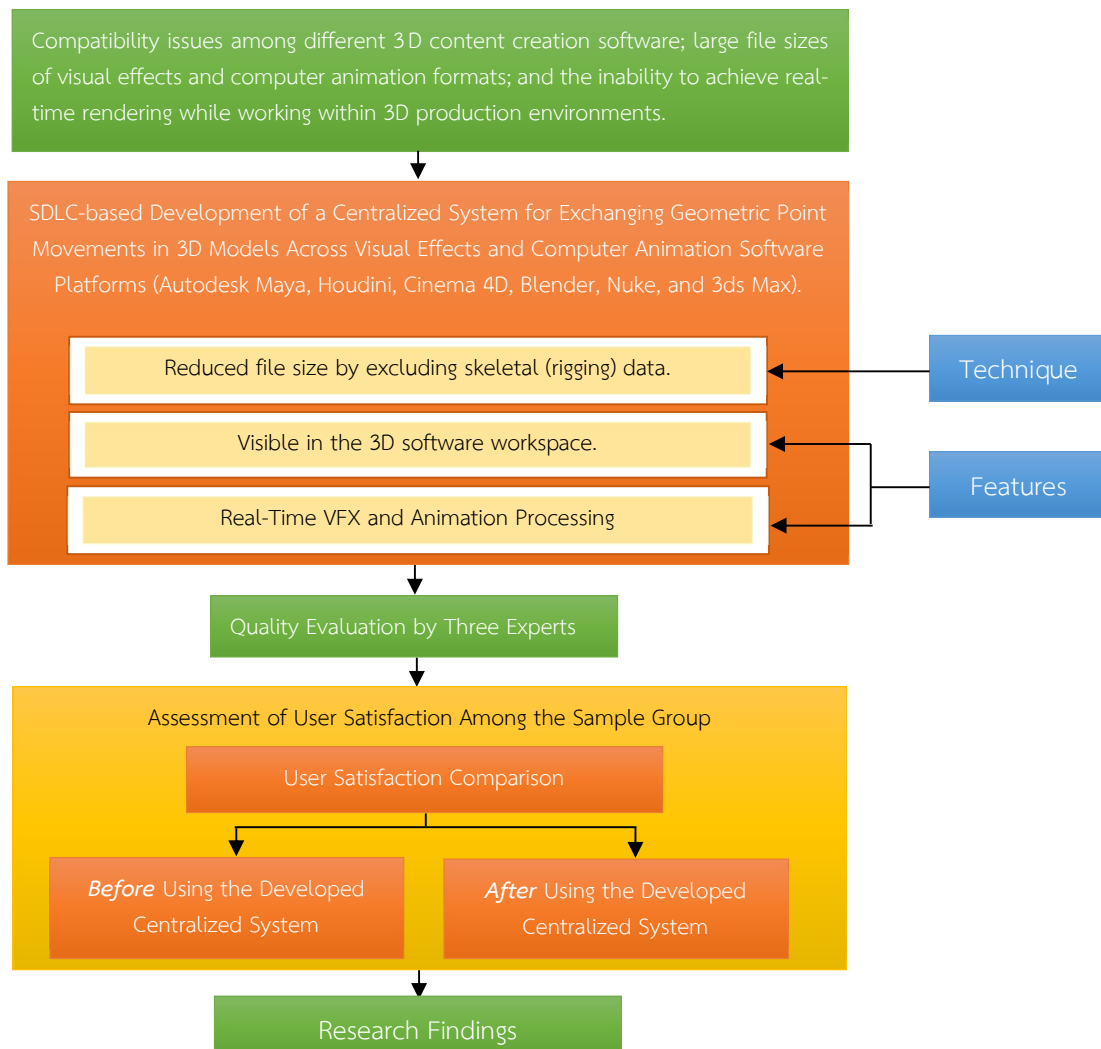


Figure 1. Conceptual Framework

จาก Figure 1. อธิบายได้ว่ากรอบแนวคิดการวิจัยเริ่มจากปัญหาความเข้ากันได้ของซอฟต์แวร์สร้างงาน 3 มิติที่แตกต่างกัน ไฟล์ฟอร์แมตของงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การประมวลผลช้าหรือเกิดข้อผิดพลาดทำให้ไม่สามารถประมวลผลได้ หรือสิ้นเปลืองทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่ต้องใช้พื้นที่บนหน่วยความจำเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังไม่สามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้การทำงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันต้องมีการปรับแต่ง แก้ไข อยู่บ่อยครั้ง ทำให้ใช้ระยะเวลาในการผลิตสื่อยาวนานมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงออกแบบและพัฒนาส่วนเสริมสำหรับโปรแกรมผลิตงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันที่มีระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ ที่ทำให้ขนาดไฟล์ฟอร์แมตลดลงโดยไม่สูญเสียคุณภาพของข้อมูล โดยกำหนดคุณสมบัติให้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงผลการใช้งานในหน้าต่างการทำงานและสามารถประมวลผลวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันในขณะที่กำลังสร้างงานได้แบบเรียลไทม์ เพื่อย่นระยะเวลาในการผลิตสื่อสร้างสรรค์ในส่วนของการทำงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

5. วิธีดำเนินงานวิจัย (Research Methodology)

5.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

5.1.1 ประชากร

งานวิจัยนี้แบ่งประชากรออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ผู้เชี่ยวชาญในภาคอุตสาหกรรมดิจิทัลคอนเทนต์ ซึ่งเป็นผู้ที่มีความเชี่ยวชาญด้านการทำวิชวลเอฟเฟกต์และแอนิเมชันในประเทศไทย และ 2) นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีมีัลติมีเดีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567

5.1.2 กลุ่มตัวอย่าง

1) ผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งเป็นตัวแทนจากบริษัทที่มีชื่อเสียงด้านการทำวิชวลเอฟเฟกต์และแอนิเมชันในประเทศไทย จำนวน 3 ท่าน ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็น (Nonprobability Sampling) ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Boyd et al., 2023) โดยเจาะจงจากผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านการทำวิชวลเอฟเฟกต์หรือคอมพิวเตอร์แอนิเมชันไม่น้อยกว่า 3 ปี จากบริษัทเอกชนในประเทศไทย

2) นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีมีัลติมีเดีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 34 คน ได้มาจากการสุ่มตัวอย่างโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็น ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Boyd et al., 2023) โดยเจาะจงจากนักศึกษาที่เคยเรียนวิชาที่เกี่ยวข้องกับวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

5.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง คือ ระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

5.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประกอบไปด้วยแบบสัมภาษณ์และแบบสอบถามที่ผ่านการประเมินค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามกับด้านที่ต้องประเมิน (Index of Item Objective Congruence: IOC) จากผู้เชี่ยวชาญด้านแบบสอบถามจำนวน 3 ท่าน ผลการวิเคราะห์พบว่า ข้อคำถามทุกข้อมีค่า IOC ระหว่าง 0.67-1.00 ดังรายการต่อไปนี้

1) แบบสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเพื่อทวนสอบเทคนิคและวิธีการลดขนาดไฟล์และลดเวลาในการประมวลผลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน จากนั้นเลือกใช้แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง

2) แบบประเมินคุณภาพระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน งานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบประมาณค่า 5 ระดับ (Jimeno & Prado, 2024) กำหนดเกณฑ์แปลผล โดย 4.51-5.00 = คุณภาพดีมาก 3.51-4.50 = คุณภาพดี 2.51-3.50 = คุณภาพปานกลาง 1.51-2.50 = คุณภาพพอใช้ และ 1.00-1.50 = ควรปรับปรุง วิเคราะห์ผลโดยใช้สถิติพรรณนา ได้แก่ การคำนวณค่าเฉลี่ย และการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3) แบบวัดความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน งานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบประมาณค่า 5 ระดับ (Jimeno & Prado, 2024) กำหนดเกณฑ์แปลผล โดย 4.51-5.00 = พึงพอใจมากที่สุด 3.51-4.50 = พึงพอใจมาก

2.51-3.50 = ฟังพอใจปานกลาง 1.51-2.50 = ฟังพอใจน้อย และ 1.00-1.50 = ฟังพอใจน้อยที่สุด วิเคราะห์ผลโดยการทดสอบค่าที (T-test) เพื่อเปรียบเทียบความพึงพอใจก่อนใช้งานและหลังใช้งาน

5.3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีดำเนินการวิจัยออกเป็น 4 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 Literature Review โดยศึกษา รวบรวมข้อมูล เอกสาร หนังสือ ที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคและวิธีการลดขนาดไฟล์และลดเวลาในการประมวลผลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ การพัฒนาระบบหรือการพัฒนาซอฟต์แวร์ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

ระยะที่ 2 Development Software and Questionnaire เป็นระยะการพัฒนาระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน ซึ่งงานวิจัยนี้ยึดขั้นตอนตามวงจรพัฒนาระบบ SDLC ในรูปแบบ Waterfall Model (Morales, 2024) มีขั้นตอน ดังนี้

1. Requirements/Planning: งานวิจัยนี้ได้รวบรวมและวิเคราะห์ความต้องการจากผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อระบุความต้องการของผู้ใช้และกำหนดขอบเขต ดังนี้

1) วัตถุประสงค์ที่พัฒนา: ระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้การจัดการกับแอนิเมชันที่เก็บข้อมูลได้ในระดับจุด มีขนาดไฟล์เล็กลง ลดการใช้พื้นที่บนหน่วยความจำ ประมวลผลได้เร็วขึ้น และสามารถแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ เพื่อให้การสื่อสารข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชันสร้างงาน 3 มิติราบรื่นและมีประสิทธิภาพด้วยการเชื่อมต่อกันอย่างทันสมัย

2) ฟังก์ชันใช้งานที่ผู้ใช้ต้องการ: ประกอบไปด้วยฟังก์ชันการนำเข้าไฟล์ 3 มิติ ฟังก์ชันการประมวลผลแบบเรียลไทม์ และฟังก์ชันการส่งออกไฟล์งาน

3) ข้อจำกัดของระบบ: ระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันสร้างงาน 3 มิติ ได้แก่ Autodesk Maya, Houdini, Cinema4D, Blender, Foundry Nuke, และ 3DsMax

2. Designing: ขั้นตอนการออกแบบ เกิดขึ้นหลังจากการรวบรวมความต้องการแล้ว โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture Design) ซึ่งได้กำหนดโครงสร้างของระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน ในลักษณะ Modular Architecture ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ โมดูลนำเข้าข้อมูล (Import Module) สำหรับรับข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตจากไฟล์ 3 มิติ โมดูลประมวลผลและจัดเก็บแบบแคช (Processing and GPU Cache Module) ทำหน้าที่จัดการข้อมูลจุดยอด (Vertex) แบบ Batch-based แบ่งข้อมูลเป็นชุดย่อยเพื่อลดการคำนวณซ้ำซ้อนและเพิ่มประสิทธิภาพการเรียกใช้ซ้ำ (Vertex Reuse) และโมดูลส่งออกข้อมูล (Export Module) สำหรับแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำกลับไปใช้งานในแอปพลิเคชัน 3 มิติได้ ซึ่งการออกแบบดังกล่าวช่วยให้แต่ละโมดูลสามารถพัฒนาและทดสอบแยกส่วนได้ ลดความซับซ้อนของระบบโดยรวม และเอื้อต่อการบำรุงรักษาในอนาคต

2) การออกแบบอัลกอริทึม (Algorithm Design) โดยงานวิจัยนี้ออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการจัดการข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในระดับจุด (Per-Vertex Animation Data) โดยใช้แนวคิด Geometry Cache ร่วมกับการประมวลผลแบบ Batch-based เพื่อจัดเก็บเฉพาะค่าพิกัด X, Y, Z ของจุดยอดในแต่ละเฟรม ลดข้อมูลที่ซ้ำซ้อนระหว่างเฟรม แบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยเพื่อลดภาระของ GPU ในการประมวลผลครั้งละจำนวนมาก และรองรับการดึงข้อมูลกลับมาแสดงผลแบบเรียลไทม์ไม่น้อยกว่า 24 เฟรมต่อวินาที

3) การออกแบบโครงสร้างข้อมูล (Data Structure Design) โดยงานวิจัยนี้กำหนดรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลในลักษณะโครงสร้างเชิงลำดับ (Structured Array Format) เพื่อจัดเก็บข้อมูลตำแหน่งจุดยอดตามลำดับเฟรม และสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบ Random Access ได้อย่างรวดเร็ว ลดเวลาในการค้นหาและเรียกใช้ข้อมูล

4) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI/UX Design) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้เน้นความเรียบง่ายและสอดคล้องกับประสบการณ์การใช้งานซอฟต์แวร์ 3 มิติเดิม โดยกำหนดขั้นตอนการทำงานเป็นลำดับชัดเจน ได้แก่ Import > Process > Preview > Export เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเรียนรู้และใช้งานได้โดยไม่ต้องปรับตัวมาก และสนับสนุนการแสดงผลลัพท์แบบเรียลไทม์ระหว่างการทำงาน (see Figure 2.)

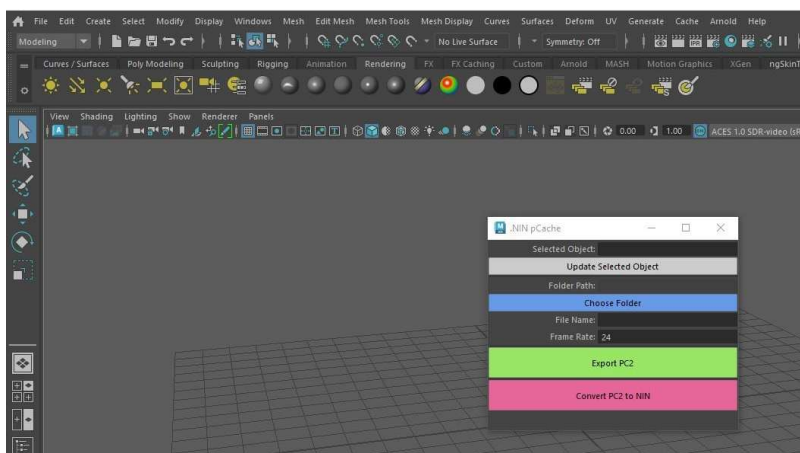


Figure 2. A Centralized Tool Exchange System for Inter-Application Integration Developed by the Researcher

3. Implementation: ดำเนินการพัฒนาซึ่งเป็นช่วงที่การออกแบบกลายเป็นโค้ดที่ปฏิบัติการได้ งานวิจัยนี้ จะมีการเขียนโค้ดด้วยภาษาไพธอน (Python) เพื่อสร้างซอฟต์แวร์จริงตามเอกสารการออกแบบจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ โดยแบ่งงานออกเป็นหลายโมดูล หลังจากที่ได้แต่ละส่วนพัฒนาเสร็จสิ้นก็จะนำมารวมกันเป็นระบบใหญ่ และมีการทดสอบแต่ละส่วนของโค้ดอย่างละเอียดและแก้ไขข้อผิดพลาดอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงทดลองแคชข้อมูลแอนิเมชันจากซอฟต์แวร์ Autodesk Maya ก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอนการทดสอบระบบที่ครอบคลุมมากขึ้น (see Figure 3.)

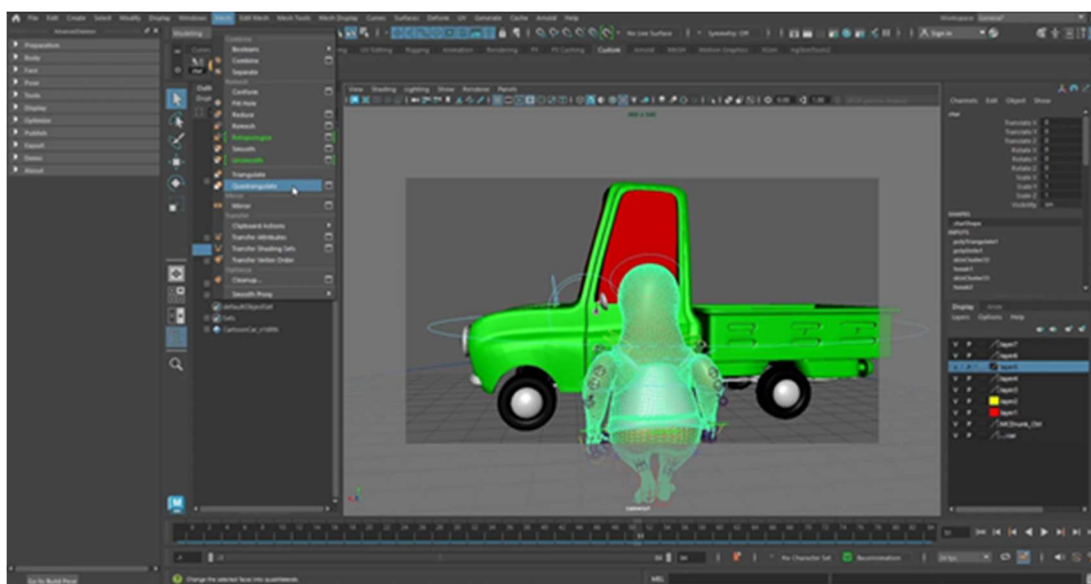


Figure 3. Testing Procedure for Animation Data Caching from Autodesk Maya

4. Testing: ขั้นตอนการตรวจสอบ โดยงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบซอฟต์แวร์จากการนำไปทดสอบใช้งาน เพื่อประเมินว่าการแก้ปัญหาที่สร้างขึ้นนั้นสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ที่กำหนดไว้หรือไม่ ประกอบไปด้วย

1) การทดสอบด้วยตนเองเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ทดสอบใช้งานระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันที่พัฒนาขึ้นร่วมกับแอปพลิเคชันสร้างงาน 3 มิติ จำนวน 6 แอปพลิเคชัน ๆ ละ 3 ครั้ง

ได้แก่ Autodesk Maya, Houdini, Cinema4D, Blender, Foundry Nuke, และ 3DsMax ตัวอย่างเช่น แคชข้อมูลแอนิเมชันจากซอฟต์แวร์ Autodesk Maya จากนั้นแสดงผลตัวละคร 3 มิติและแอนิเมชันใน Blender (see Figure 4.)

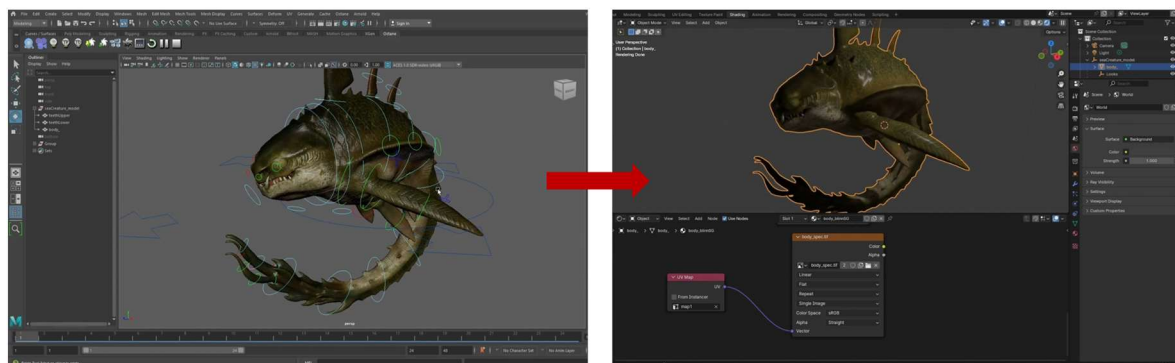


Figure 4. Animation Data Caching from Autodesk Maya and 3D Character Rendering in Blender

2) ประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ โดยให้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านการทำวิชวลเอฟเฟกต์หรือคอมพิวเตอร์แอนิเมชันไม่น้อยกว่า 3 ปี จากบริษัทเอกชนในประเทศไทย ทำแบบประเมินคุณภาพระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5. Maintenance: ขั้นตอนสุดท้ายคือการบำรุงรักษา หลังจากเริ่มใช้งาน ผู้ใช้อาจพบปัญหาที่เกิดขึ้นภายหลัง จึงมีช่องทางเพื่อรับแจ้งปัญหาดังกล่าวและเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อปรับปรุงระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน โดยงานวิจัยนี้จะทำการเปิดเผยโค้ดของ Script ทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น และเผยแพร่ลงบนเว็บไซต์สำหรับผู้สนใจนำไปปรับปรุงและพัฒนาต่อ

ระยะที่ 3 Measure Satisfaction เป็นระยะเพื่อศึกษาความพึงพอใจและเปรียบเทียบการใช้งานระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันที่พัฒนาขึ้น โดยมีกลุ่มตัวอย่างคือ นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีมีเดีย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 34 คน ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ดำเนินการอธิบายถึงวัตถุประสงค์และชี้แจงรายละเอียดสำหรับการทำวิจัย รวมถึงการดำเนินงานตามข้อกำหนดของคณะกรรมการจริยธรรมการทำวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เลขที่ HEC-01-67-040 ให้กลุ่มตัวอย่างรับทราบและทำความเข้าใจ

2. กำหนดไฟล์งานของแอปพลิเคชัน Autodesk Maya ไว้ จำนวน 2 ไฟล์ ประกอบไปด้วย (1) งานด้านวิชวลเอฟเฟกต์ 1 ไฟล์ และ (2) งานด้านคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน 1 ไฟล์ ให้กลุ่มตัวอย่างทดลองส่งออกไฟล์ไปยังแอปพลิเคชันอื่นที่ตนเองสนใจเพื่อการประมวลผลผลงานดังกล่าว

3. กลุ่มตัวอย่างเปิดไฟล์งานในแอปพลิเคชันอื่น ที่ไม่ใช่ Autodesk Maya จากนั้นให้ทำการประมวลผลผลงาน ภายในเวลา 30 นาที จากนั้นจึงให้กลุ่มตัวอย่างตอบแบบวัดความพึงพอใจในรูปแบบ Google Form

4. ดำเนินการนำเสนอระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันที่พัฒนาขึ้น และสาธิตวิธีการใช้งาน จากนั้นจึงให้กลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งาน เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงให้กลุ่มตัวอย่างตอบแบบวัดความพึงพอใจในรูปแบบ Google Form

5. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการตอบแบบวัดความพึงพอใจจากการใช้งานมาวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบค่าที

ระยะที่ 4 Summary of Research Results เป็นระยะเพื่อวิเคราะห์ผล สรุปผล และอภิปรายผลการวิจัย ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อถัดไป

6. ผลการวิจัย (Results)

6.1 ผลการออกแบบและพัฒนาระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ ระหว่างซอฟต์แวร์สร้างงานวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

การประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน แสดงผลดัง Table 1.

Table 1. Expert Assessment of System Performance and Quality

Evaluation Items	Mean	S.D.	Quality Level
1. System Performance	4.39	0.26	Good
1.1 Functional accuracy	5.00	0.00	Very Good
1.2 The centralized system responds effectively with the 3D applications in use	4.67	0.58	Very Good
1.3 File size reduction techniques and methods are appropriate for the centralized system	4.67	0.58	Very Good
1.4 The centralized system operates smoothly and responds quickly	4.33	0.58	Good
1.5 Real-time processing performance is fast	4.33	0.58	Good
1.6 The centralized system requires low computer resource usage	4.33	0.58	Good
1.7 The centralized system uses minimal storage space	4.33	0.58	Good
1.8 The centralized system meets user needs for visual effects or computer animation tasks	4.33	0.58	Good
1.9 The centralized system is not complicated to use	4.33	0.58	Good
1.10 The centralized system is suitable for visual effects or computer animation production	4.33	0.58	Good
2. Design	4.38	0.30	Good
2.1 The UI design of the functions is easy to understand	5.00	0.00	Very Good
2.2 The system UI design is appropriate for visual effects or computer animation work	4.67	0.58	Very Good
2.3 The UX design is easy to use	4.33	0.58	Good
2.4 Font style is clear and easy to read	4.33	0.58	Good
2.5 The workflow design of the centralized system aligns with prior experience using 3D applications	4.33	0.58	Good
2.6 The display format during operation is easy to understand	4.33	0.58	Good
2.7 The graphic design of the centralized system is suitable for 3D applications	4.00	0.00	Good
2.8 The language used is easy to understand	4.00	0.00	Good
Overall Efficiency	4.38	0.27	Good

จาก Table 1. ผลการวิเคราะห์คุณภาพระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน โดยรวมมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับดี ค่าเฉลี่ย 4.38 หากพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ประสิทธิภาพด้านการทำงานของระบบ มีประสิทธิภาพมากกว่าด้านการออกแบบ ค่าเฉลี่ย 4.39 และ 4.38 ตามลำดับ จึงได้ทำการทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง

6.2 ผลการศึกษาความพึงพอใจและเปรียบเทียบความสามารถในการใช้งานของระบบที่พัฒนาขึ้นในการสนับสนุนกระบวนการทำงานด้านวิชาการแฟ้มแฟ้มและคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบระดับความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งาน โดยใช้สถิติทดสอบค่าที่แบบกลุ่มสัมพันธ์ (Paired Samples T-test) ที่ระดับนัยสำคัญ .05 โดยมีสมมติฐานดังนี้ ดังนี้

H₀: ระดับความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งานไม่แตกต่างกัน

H₁: ระดับความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งานแตกต่างกัน

โดยมีผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ดังตารางที่ 2

Table 2. Results of the Comparison of User Satisfaction Before and After Using the Centralized System

Test Results	n	Maximum score	Mean	S.D.	t	df	Sig. (2-tailed)
Before using Centralized System	34	5.000	3.369	.692	4.563	34	.000*
After using Centralized System	34	5.000	4.157	.660			

* p < .05

จากตารางที่ 2 พบว่ากลุ่มตัวอย่างจำนวน 34 คน มีระดับความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยกลุ่มตัวอย่างมีระดับความพึงพอใจหลังการใช้งานสูงกว่าก่อนการใช้งาน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.157

7. สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

1) คุณภาพระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชาการแฟ้มแฟ้มและคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน โดยรวมมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับดี ค่าเฉลี่ย 4.38

2) ความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยกลุ่มตัวอย่างมีระดับความพึงพอใจหลังการใช้งานสูงกว่าก่อนการใช้งาน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.157

8. อภิปรายผลการวิจัย (Discussion)

เทคนิค Geometry Cache นำไปสู่การสร้างอัลกอริทึม GPU Cache สามารถอภิปรายผลการวิจัย ดังนี้

1) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชาการแฟ้มแฟ้มและคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน โดยใช้เทคนิคการแคชแบบ Batch-based และการแบ่งจุดข้อมูลออกเป็นชุดย่อย เพื่อให้สามารถเรียกใช้ข้อมูลซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับงานของ Kerbl et al. (2018) และที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการลดการคำนวณซ้ำซ้อนและเพิ่มการใช้ Vertex Reuse บน GPU สมัยใหม่ ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า การแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดย่อยช่วยลดภาระในการประมวลผลแบบครั้งเดียว (Bulk Processing) ของ GPU และเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงหน่วยความจำ (Memory Access Locality) ส่งผลให้การประมวลผลมีความต่อเนื่องและรวดเร็วมากขึ้น อีกทั้ง การนำแนวคิด Vertex Reuse มาใช้ยังช่วยลดจำนวนครั้งในการคำนวณจุดยอดซ้ำ ส่งผลให้ระบบที่พัฒนามีประสิทธิภาพในระดับดี โดยเฉพาะด้านการทำงาน (ค่าเฉลี่ย 4.39) และการออกแบบ (ค่าเฉลี่ย 4.38) ทำให้เห็นว่าการสังเคราะห์แนวคิดด้าน Geometry Cache, Batch-based Processing และ Vertex Reuse สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันได้อย่างเหมาะสมในบริบทของการพัฒนาเครื่องมือสำหรับทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันที่ใช้สร้างงานวิชาการแฟ้มแฟ้มและคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน

2) ความพึงพอใจก่อนและหลังการใช้งานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 โดยกลุ่มตัวอย่างมีระดับความพึงพอใจหลังการใช้งานสูงกว่าก่อนการใช้งาน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.157 เนื่องจากระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชาการแฟ้มแฟ้มและคอมพิวเตอร์

แอนิเมชันได้รับการออกแบบโดยอ้างอิงจากความต้องการของผู้เชี่ยวชาญในสายงานวิชวลเอฟเฟกต์และแอนิเมชัน โดยระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบไฟล์มาตรฐาน .PAS สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชัน ทำให้ผู้ทดลองใช้สามารถรับรู้ได้ถึงระยะเวลาและทรัพยากรที่ลดลงในการผลิตงานสื่อเกี่ยวกับวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน และรองรับการทำงานข้ามแอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์ ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงเป็นการออกแบบระบบที่สอดคล้องกับกระบวนการทำงานจริง (Workflow-based Design) ช่วยลดภาระในการเรียนรู้และการปรับตัวของผู้ใช้งาน ส่งผลให้เกิดประสบการณ์การใช้งานที่ดีขึ้น ซึ่งการออกแบบโดยประยุกต์แนวคิดการใช้ Geometry Cache เพื่อจัดเก็บข้อมูลแบบย่อขนาดและเรียกใช้งานซ้ำได้นั้น สอดคล้องกับงานของ Li et al. (2020) และการประมวลผลแบบเฟรมซ้ำโดยไม่พึ่งโครงสร้างลำดับขั้น ทำให้ผู้ใช้งานรับรู้ได้ถึงความสามารถในการจัดการข้อมูลจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามแนวทางของ Schütz et al. (2020) อีกทั้ง การที่ระบบสามารถลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลระหว่างเฟรมและรองรับการแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ มีส่วนสำคัญซึ่งส่งผลต่อความง่ายและอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน จึงทำให้ระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองการใช้งานในอุตสาหกรรมและการเรียนการสอนเกี่ยวกับด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชันได้ ซึ่งองค์ความรู้จากงานวิจัยที่มีการสังเคราะห์ข้อมูลจากความต้องการของผู้ใช้จริง มีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จของการออกแบบและพัฒนาระบบ

9. ข้อเสนอแนะงานวิจัย (Recommendation)

จากการออกแบบและพัฒนาระบบศูนย์กลางสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลการเคลื่อนไหวของจุดเรขาคณิตในโมเดล 3 มิติ สำหรับงานด้านวิชวลเอฟเฟกต์และคอมพิวเตอร์แอนิเมชัน มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบไฟล์มาตรฐาน .PAS สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชัน อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมมีการใช้ซอฟต์แวร์ 3 มิติที่หลากหลาย เช่น Autodesk Maya, Houdini, Cinema4D, Blender, Foundry Nuke และ 3DsMax ดังนั้น การพัฒนาต่อยอดควรขยายการรองรับซอฟต์แวร์ให้ครอบคลุมมากขึ้น รองรับผู้ใช้หลายกลุ่ม และนำข้อมูลป้อนกลับจากผู้มาปรับปรุงระบบอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในสถานการณ์ที่หลากหลาย
2. งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการผลิตงานในอุตสาหกรรมภาพยนตร์และแอนิเมชัน เพื่อลดเวลาในการผลิตและเพิ่มความเข้ากันได้ของไฟล์งานในซอฟต์แวร์ที่แตกต่างกัน งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาและเปรียบเทียบเทคนิคใหม่ ๆ ที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ ควบคู่กับเทคนิคดั้งเดิม เพื่อเลือกใช้หรือผสมผสานแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการพัฒนาเครื่องมือดังกล่าว

10. การเปิดเผยการใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Declaration of Generative AI)

ผู้เขียนขอประกาศว่า ได้ใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (ChatGPT) เพื่อช่วยปรับปรุงและทำให้ถ้อยคำในบางประโยคชัดเจนยิ่งขึ้นเท่านั้น ไม่ได้ใช้เพื่อสร้างข้อมูลวิจัย ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล หรือสรุปผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนได้ตรวจทาน แก้ไข และรับผิดชอบต่อนเนื้อหาสุดท้ายของต้นฉบับนี้ทั้งหมด

11. การแสดงบทบาทผู้เขียน (CRediT Author Statement)

Ninlagarn Boobpachote: Conceptualization, Methodology, Software, Investigation, Resources

Sittisak Rattanaprapawan: Validation, Data Curation

Punyarat Rungsoongnern: Formal Analysis, Writing-Original Draft, Writing-Review & Editing

Orathai Suttijak: Supervision

All authors read and approved the final manuscript.

12. เอกสารอ้างอิง (References)

- Boyd, R. J., Powney, G. D., & Pescott, O. L. (2023). We Need to Talk About Nonprobability Samples. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(6), 521-531. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.01.001>

- Cholodenko, A. (2024). The Animation of Cinema. *Semiotic Review*, 10(Animation).
<https://doi.org/10.71743/S3P4X084>
- Domke, J., Vatai, E., Gerofi, B., Kodama, Y., Wahib, M., Podobas, A., Mittal, S., Pericàs, M., Zhang, L., Chen, P., Drozd, A., & Matsuoka, S. (2023). At the Locus of Performance: Quantifying the Effects of Copious 3D-Stacked Cache on HPC Workloads. *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization*, 20(4), 57. <https://doi.org/10.1145/3629520>
- Jia, H., & Sundar, S. S. (2024). Vivid and Engaging: Effects of Interactive Data Visualization on Perceptions and Attitudes about Social Issues. *Digital Journalism*, 12(8), 1205-1229.
<https://doi.org/10.1080/21670811.2023.2250815>
- Jiang, R., Wang, L., & Tsai, S.-B. (2022). An Empirical Study on Digital Media Technology in Film and Television Animation Design. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 5905117.
<https://doi.org/10.1155/2022/5905117>
- Jimeno, J. B., & Prado, N. I. (2024). Quality Leadership and Management, Technology-Based Instruction, Work Attitude and Teachers' Performance in the New Normal. *International Journal of Multidisciplinary: Applied Business and Education Research*, 5(1), 251-284.
<https://doi.org/10.11594/ijmaber.05.01.24>
- Jones, N. (2023). Far from Houdini: The 'Magic' of the VFX Breakdown. *Animation*, 18(1), 42-58.
<https://doi.org/10.1177/17468477231155541>
- Kenzel, M., Kerbl, B., Tatzgern, W., Ivanchenko, E., Schmalstieg, D., & Steinberger, M. (2018). On-the-fly Vertex Reuse for Massively-Parallel Software Geometry Processing. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1(2), 28. <https://doi.org/10.1145/3233303>
- Kerbl, B., Kenzel, M., Ivanchenko, E., Schmalstieg, D., & Steinberger, M. (2018). Revisiting The Vertex Cache: Understanding and Optimizing Vertex Processing on the modern GPU. *Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1(2), 29. <https://doi.org/10.1145/3233302>
- Li, L., Qiao, X., Lu, Q., Ren, P., & Lin, R. (2020). Rendering Optimization for Mobile Web 3D Based on Animation Data Separation and On-Demand Loading. *IEEE Access*, 8, 88474-88486.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993613>
- Morales, J. (2024). What is Waterfall Model: Complete Definition, Pros, and Cons. MindOnMap.
<https://www.mindonmap.com/blog/what-is-waterfall-model>
- Pardeshi, A. S., & Karbhari, V. B. (2019). Recent Trends in VFX (Virtual Effects) and SFX (Special Effects). *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8(7), 882-884.
- Rungsoongnern, A., Tirakoat, S., & Kaenampornpan, M. (2024). Efficiency and Effectiveness of the Blender Extension to 3D Modelling for Metaverse. *The Journal of Social Communication Innovation*, 12(1), 62-71. (In Thai)
- Rungsoongnern, A., Tirakoat, S., & Kaenampornpan, M. (2025). Innovative Techniques for 3D Model Optimization in the Metaverse. *Science & Technology Asia*, 30(4), 323-332.
<https://doi.org/10.14456/scitechasia.2025.87>
- Rungsoongnern, P., & Chaityasit, S. (2022). The Designs and Development of 3D Fantasy Model for Study the Composition in the Old Town of Nakhon Ratchasima. *Journal of Fine Arts, Chiang Mai University*, 13(1), 144-168. (In Thai)

- Schütz, M., Mandlbürger, G., Otepka, J., & Wimmer, M. (2020). Progressive Real-Time Rendering of One Billion Points Without Hierarchical Acceleration Structures. *Computer Graphics Forum*, 39(2), 51-64. <https://doi.org/10.1111/cgf.13911>
- VIVERSE Team. (2024). Overcome Challenges of Real-time Rendering in 3D with Polygon Streaming. VIVERSE. <https://www.news.viverse.com/post/overcome-challenges-of-real-time-rendering-in-3d-with-polygon-streaming>
- Wyman, N. J., Park, M. A., Baker, P., & Chawner, J. R. (2021, January 11-15 & 19-21). A Framework for Mesh-Geometry Associativity During Mesh Adaptation. *AIAA Scitech 2021 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1900>
- Zhang, C., Lu, H., & Chen, C. W. (2025). Caching Optimization in User-Centric Networks: A Stochastic Geometry Perspective. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 74(5), 8187-8200. <https://doi.org/10.1109/tvt.2025.3527725>