ระบบนำเสนอในรูปแบบสามมิติตามเวลาจริงสำหรับองค์ความรู้ทางสถาปัตยกรรมจากหลากหลายที่มากรณีศึกษา: วัดศรีชุม จังหวัดสุโขทัย

Real-Time 3D Presentation System for Heterogeneous Architectural Knowledge, Case Study: Wat Sri-Chum, Sukhothai

ชาวี บุษยรัตน์ พฤฒิพร ลพเกิด และ ม.ล. วโรดม ศุขสวัสดิ

Chawee Busayarat, Prittiporn Lopkerd and M.L. Varodom Suksawaddi

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12121

Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University, Pathumthani 12121, Thailand

E-mail: cha_v_mek@hotmail.com

บทคัดย่อ

วัดศรีชุมในจังหวัดสุโขทัยเป็นพื้นที่ทางโบราณคดีที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นหนึ่งในสัญลักษณ์ของอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย อุโมงค์ภายในมณฑปของวัดนั้นมีคุณค่าทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมที่ความสำคัญในหลายแง่มุม แต่ปัจจุบันประชาชนทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงได้ เนื่องจาก อาจจะไปทำความเสียหายให้กับจารึกบนผนังและเพดานภายในอุโมงค์

ในโครงการนี้ เราได้ทำการเก็บสภาพปัจจุบันของวัดศรีชุมไว้รูปแบบของข้อมูลดิจิตอลด้วยสแกนเนอร์เลเซอร์ และใช้ข้อมูลเหล่านี้อ้างอิงในการสร้างแบบจำลองสามมิติ แบบจำลองนี้จะปรากฏอยู่ในสภาพแวดล้อมเสมือนบนระบบสารสนเทศออนไลน์ที่เราได้พัฒนาขึ้น เพื่อให้ผู้เข้าใช้งานระบบสามารถเข้าชมอาคารได้โดยไม่ไปทำลายจารึกในอาคารจริง ระบบที่ถูกสร้างนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการเข้าถึงความรู้ทางโบราณคดีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัดศรีชุม เช่น ข้อมูลเชิงพื้นที่และรูปทรง ข้อมูลเชิงพรรณนาบรรยาย และข้อมูลเชิงภาพของวัดและจารึกสลักในอุโมงค์ ผู้ใช้ของระบบนี้สามารถโต้ตอบกับฉากสามมิติแบบเรียลไทม์ที่ถูกเชื่อมโยงเข้ากับฐานข้อมูลภายในและภายนอกระบบ ระบบนี้สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มความรู้ทางวัฒนธรรมประวัติศาสตร์และสถาปัตยกรรมไทย รวมถึงใช้ในการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืนได้อีกด้วย

Abstract

Sri Chum temple in Sukhothai is an important archeological site of Thailand and one of the symbols of Sukhothai historical park. The tunnel has been found inside of the Mandapa (the temple's central building) and has significant historical and cultural values in many aspects but inaccessible for general public due to fragility of iconography and inscriptions engraved on the tunnel's wall and ceiling.

In this project, the current state of Sri Chum temple was digitized by 3D laser scanner. These collected data are used as referential information to create an enriched architectural 3D model. This model can be visualized through virtual environment in on-line information system. System user can navigate in 3D space and observe the 3D model without damaging engraved inscriptions in real building. This system can be used

as a tool to access to archeological knowledge and information related to Sri Chum temple. This includes spatial, morphological, descriptive and visual information of the temple and engraved inscriptions in the restricted tunnel. The user can interact with real-time 3D scene that links to the interior and exterior database. The developed system can be used to enrich Thai cultural, historical and architectural knowledge, as well as in sustainable tourism.

คำสำคัญ (keywords)

โบราณสถาน (Historical Architecture)
การสร้างอาคารขึ้นบนโลกเสมือน (Virtual Reconstruction)
เกมเอ็นจิ้น (Game Engine)
สารสนเทศสามมิติ (3D Information)
การโต้ตอบแบบเรียลไทม์ (Real-Time Interactive)
ฐานข้อมูลทางสถาปัตยกรรม (Architectural Database)
สื่อบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต (Online Media)

1. บทนำ

แหล่งโบราณสถานเป็นสถานที่น่าศึกษา น่าเรียนรู้ เพื่อสืบทอดความภาคภูมิใจในภูมิปัญญาและความสามารถของบรรพบุรุษ เป็นหลักฐานแสดงความเจริญของชนชาติแต่โบราณ และเป็นอนุสรณ์ทั้งในแง่ประวัติศาสตร์และวัฒนธรรม โบราณสถานจึงเป็นสมบัติวัฒนธรรมที่มีค่าของชาติ ประชากรในชาติทุกคนจึงมีหน้าที่ดูแลรักษารวมถึงศึกษาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ตระหนักถึงคุณค่าแห่งมรดกทางวัฒนธรรม (Buranaut & Kirdsiri, 2014, pp. 1-20) แต่การที่จะเข้าใจถึงความสำคัญนี้ได้ผู้ที่ต้องการจะศึกษาองค์ความรู้ด้านนี้จะต้องมีช่องทางในการเข้าถึงข้อมูลของโบราณสถานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ (De Luca, 2006)

ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 (พ.ศ. 2555–2559) ได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาคนและสังคมไทยให้มีคุณภาพ มีโอกาสเข้าถึงทรัพยากร และได้รับประโยชน์จากการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอย่างเป็นธรรม รวมทั้งสร้างโอกาสทางเศรษฐกิจด้วยฐานความรู้ เทคโนโลยี นวัตกรรม และความคิดสร้างสรรค์ บนพื้นฐานการผลิตและการบริโภคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมและโบราณสถานนั้น ก็นับเป็นทรัพยากรทางปัญญาประเภทหนึ่งซึ่งสาธารณชนควรจะเข้าถึงได้โดยทั่วถึง ข้อมูลเหล่านี้ล้วนมีที่มาที่หลากหลาย ถูกบันทึกไว้ในรูปแบบที่แตกต่างกัน มีกระบวนการในการจัดการที่ต่างกัน และมีความสัมพันธ์ต่อกันอย่างซับซ้อน ข้อมูลเหล่านี้ ได้แก่ ข้อมูลเชิงอักษรหรือข้อมูลพรรณนาบรรยาย ข้อมูลเชิงตัวเลขหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวัด ข้อมูลที่เป็นภาพสองมิติ และในปัจจุบัน ข้อมูลอีกหนึ่งประเภทที่มีบทบาทสำคัญในการศึกษาสถาปัตยกรรมก็คือข้อมูลสามมิติ

ด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าขึ้นมาก แบบจำลองสามมิติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมถูกผลิตขึ้นมากมายด้วยโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีข้อจำกัดน้อยลง เข้าถึงได้ง่ายขึ้น และราคาถูกลง แบบจำลองสามมิติเหล่านี้ถูกผลิตขึ้นทั้งในสถานศึกษา องค์กร หรือหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อใช้ในการศึกษาสถาปัตยกรรมในหลากหลายแง่มุม เนื่องจากข้อมูลสามมิตินั้นสามารถนำเสนอมุมมองที่สร้างให้เกิดความเข้าใจด้านรูปทรงและพื้นที่ได้มากกว่าภาพสองมิติมาก

เทคโนโลยีและวิธีการในการเก็บข้อมูลสามมิติของอาคารที่ต้องการจะอนุรักษ์ก็ถูกพัฒนาไปมากเช่นกัน หนึ่งในวิทยาการในการสำรวจและเก็บข้อมูลทางกายภาพของสถาปัตยกรรมให้เที่ยงตรงและมีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบันก็คือเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลทางกายภาพของอาคารด้วยสแกนเนอร์สามมิติ ซึ่งทำให้การเก็บข้อมูลสามมิติของอาคารในสภาพปัจจุบันเพื่อนำมาศึกษาได้ง่ายขึ้นมาก ทั้งยังเปิดโอกาสให้เราสร้างแบบจำลองจากอาคารจริง (Reality-based Modeling) ขึ้นในสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) เพื่อการศึกษาและอนุรักษ์อาคารในโลกจริงได้

ข้อมูลและองค์ความรู้ทางด้านสถาปัตยกรรมโบราณที่กล่าวมาข้างต้น มีทั้งความหลากหลายและซับซ้อน แม้ทุกวันนี้เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตจะช่วยให้การกระจายองค์ความรู้สู่สาธารณะชนได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว แต่ในปัจจุบันสื่อในการกระจายความรู้ด้านโบราณสถานไทยที่ใช้ประโยชน์จากข้อมูลสามมิติอย่างเต็มที่ มีระบบแบบแผนและครอบคลุมข้อมูลได้หลากหลายประเภท ก็ยังมีไม่มากนักหรือแทบไม่มีเลย ทำให้องค์ความรู้เหล่านี้ถูกละเลยเมื่อบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวกหรือมีประสิทธิภาพเพียงพอ

เมื่อพิจารณาถึงความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้น (ความจำเป็นในการจัดเก็บข้อมูลของโบราณสถานที่มีคุณค่า ความสามารถในการแสดงผลเป็นข้อมูลสามมิติ และความต้องการที่จะกระจายความรู้ในวงกว้างผ่านทางอินเตอร์เน็ต) คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความเป็นไปได้ที่จะนำเทคโนโลยีเกมเอนจิ้นสามมิติ (3D Game Engine) แบบออนไลน์ ที่สามารถสร้างระบบแสดงผลสามมิติบนบราวเซอร์ของผู้ใช้งานได้โดยตรงมาใช้ในการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือน และพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อเผยแพร่สภาพแวดล้อมเสมือนนี้ประกอบเข้ากับข้อมูลหรือองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับโบราณสถานไทยผ่านทางสื่ออินเตอร์เน็ตให้นักท่องเที่ยวหรือบุคคลที่สนใจได้สัมผัสกับโบราณสถานผ่านการใช้งานอินเตอร์เน็ต ส่งผลให้เป็นการนำความรู้ทางประวัติศาสตร์และทางเทคโนโลยีเข้ามาผสมผสาน ตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 11 รวมทั้งปกป้องความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ระหว่างการเข้าชม โบราณสถานในสถานที่จริง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตราย บาดเจ็บ หรือทำให้โบราณสถานเสียหาย อีกทั้งผู้รับชมยังสามารถเข้าถึงข้อมูลที่ไม่สามารถรับชมได้ในโลกจริงได้อีกด้วย

คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลทางกายภาพอาคารของวัดศรีชุม จังหวัดสุโขทัย ซึ่งเป็นแหล่งโบราณสถานสำคัญของเมืองสุโขทัย สภาพอาคารในปัจจุบันแม้จะมีส่วนที่ชำรุดเสียหายแต่ก็มีความงดงามจนกลายเป็น

สัญลักษณ์หนึ่งของเขตพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ และอุโมงค์วัดศรีชุมนั้น ก็มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์และคุณค่าทางวัฒนธรรมต่อคนไทยในหลายแง่มุม แต่เป็นที่น่าเสียดายอย่างยิ่งที่คนทั่วไปไม่สามารถเข้ามาเที่ยวชมหรือศึกษาพื้นที่นี้ได้ ลักษณะทางกายภาพและข้อจำกัดของวัดศรีชุมเช่นนี้ จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำเสนอข้อมูลผ่านทางระบบสารสนเทศแบบจำลองสามมิติเพื่อสร้างเป็นสภาพแวดล้อมเสมือน ซึ่งเป็นการใช้ศักยภาพของระบบสารสนเทศให้ผู้ใช้งานระบบเข้าเยี่ยมชมอาคารในโลกเสมือนได้โดยไม่รบกวนอาคารจริง อีกทั้งยังนำเสนอข้อมูลที่บุคคลทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงได้ให้กลายเป็นองค์ความรู้อันเป็นสาธารณะ

2. วัตถุประสงค์ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ มีเป้าหมายที่จะผลิตระบบสารสนเทศต้นแบบที่มีประสิทธิภาพในการจัดเก็บและนำเสนอข้อมูลทางโบราณสถาน สามารถนำเสนอข้อมูลหลากหลายประเภทรวมถึงข้อมูลสามมิติที่เกี่ยวข้องกับอาคาร ในรูปแบบที่ทันสมัยและเข้าถึงได้ง่าย โดยฐานข้อมูลของระบบสามารถใช้ในการจัดเก็บข้อมูลทางสถาปัตยกรรมหลากหลายประเภท ซึ่งผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางสามารถใช้งานระบบนี้ในการอนุรักษ์เพื่อเก็บรักษาข้อมูลของอาคารไว้ในรูปแบบดิจิตอล และระบบอินเตอร์เฟสออนไลน์ที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปใช้ในการเผยแพร่ข้อมูลทางสถาปัตย-กรรมให้แก่ผู้ที่มีความสนใจในองค์ความรู้ทางด้านนี้ ไม่ว่าจะเป็นบุคคลทั่วไป ผู้เชี่ยวชาญ หรือนักศึกษาในสาขาต่าง ๆ เช่น สถาปัตยกรรมหรือโบราณคดี รวมถึงสร้างให้เกิดความตระหนักถึงคุณค่าของมรดกทางวัฒนธรรมของชาติ ผู้ใช้งานระบบจะสามารถศึกษาสถาปัตยกรรมไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากระบบเป็นสื่อบนอินเตอร์เน็ต ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและบ่อยครั้งตามที่ต้องการ

3. กรอบแนวคิดในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานประยุกต์ประเภทการพัฒนาทดลอง โดยมีตัวแปรต้นเป็นระบบสารสนเทศต้นแบบที่สามารถจัดเก็บและนำเสนอข้อมูลทางสถาปัตยกรรมได้หลากหลายประเภท ซึ่งตัวแปรตามในงานวิจัยนี้คือประสิทธิภาพในการเข้าถึงและศึกษาข้อมูลทางสถาปัตยกรรมไทย รวมถึงการทำความเข้าใจต่อข้อมูลของมรดกทางวัฒนธรรม โดยพิจารณาในแง่ความรวดเร็ว ความถูกต้องครบถ้วน และความสะดวกในการปรับแก้ไขข้อมูล

4. วิธีและขั้นตอนของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประยุกต์ประเภทการพัฒนาทดลอง ที่มุ่งเน้นการสร้างและพัฒนานวัตกรรมซึ่งเป็นสื่อดิจิตอลเพื่อใช้จัดเก็บและเผยแพร่ความรู้ทางโบราณสถาน โดยตัวงานวิจัยจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

4.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

– จากการค้นคว้าเอกสาร เช่น หนังสือ บทความต่าง ๆ และรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อทำความเข้าใจเบื้องต้นกับองค์ความรู้ทางสถาปัตยกรรมและโบราณสถาน รวมถึงความสัมพันธ์ของข้อมูลแต่ละประเภทที่มีความเกี่ยวเนื่องกับอาคาร

– จากการเก็บข้อมูลทางกายภาพจากอาคารจริงในสถานที่จริงด้วยเทคโนโลยีใหม่ในปัจจุบัน และผลิตแบบจำลองสามมิติของวัดศรีชุม

4.2 การออกแบบและผลิตระบบสารสนเทศต้นแบบแบบปฏิสัมพันธ์ ทันทีบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต

เพื่อใช้นำเสนอและจัดการข้อมูลของโบราณสถานอย่างมีประสิทธิภาพ การพัฒนาระบบนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนสำคัญ ได้แก่

– การพัฒนาระบบฐานข้อมูลออนไลน์ ที่สามารถจัดเก็บข้อมูลได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งข้อมูลเชิงอักษร ข้อมูลเชิงตัวเลข ข้อมูลเชิงภาพ และข้อมูลสามมิติ

– การพัฒนาส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (interface) ที่สามารถนำเสนอข้อมูลสามมิติให้ผู้ใช้งานสามารถสำรวจดูอาคารได้ในแบบปฏิสัมพันธ์ทันที (real-time interactive) รวมถึงนำเสนอข้อมูลประเภทอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาคารด้วย

5. ทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

โครงการวิจัยนี้เป็นการรวมองค์ความรู้แบบสหสาขาวิชาชีพ ทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจึงมีที่มาที่หลากหลาย ได้แก่

5.1 การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ศึกษา: วัดศรีชุม จังหวัดสุโขทัย

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้เลือกวัดศรีชุม จังหวัดสุโขทัย เป็นพื้นที่ศึกษาขั้นต้นสำหรับการสร้างระบบต้นแบบเพื่อนำเสนอสารสนเทศสามมิติออนไลน์ เนื่องจากวัดศรีชุมเป็นแหล่งโบราณสถานสำคัญของเมือง

สุโขทัย สภาพปัจจุบันแม้จะมีส่วนที่ชำรุดเสียหายแต่ก็มีความงดงามจนกลายเป็นสัญลักษณ์หนึ่งของเขตพื้นที่อุทยานและเมืองสุโขทัย ส่วนอุโมงค์วัดศรีชุมนั้นมีความสำคัญทางประวัติศาสตร์และคุณค่าทางวัฒนธรรมต่อคนไทยในหลายแง่มุม ได้แก่

1. เป็นบริเวณที่ค้นพบแผ่นสลักชาดกจำนวนมาก รวมถึงภาพสลักพระพุทธบาท ซึ่งนับได้ว่าเป็นรากฐานของจิตรกรรมไทยที่มีอายุเก่าแก่ที่สุดเท่าที่เคยได้ค้นพบ

2. เป็นบริเวณที่ค้นพบหลักศิลาจารึกหลักที่ 2 ซึ่งมีความสำคัญต่อการแสดงถึงอัตลักษณ์ของคนในชาติไทย และเป็นหลักฐานยืนยันการกำเนิดของภาษาไทย

3. เป็นที่มาของตำนาน “พระพูดได้” ในสมัยอยุธยา เมื่อครั้งสมเด็จพระนเรศวรมหาราชนำทัพเสด็จมาปราบเมืองศรีสัชนาลัยและได้มีการมาชุมนุมทัพที่วัดศรีชุม ด้วยการรบ ในครั้งนั้นเป็นการรบระหว่างคนไทยด้วยกัน ทำให้เหล่าทหารไม่มีกำลังใจในการรบไม่อยากรบ สมเด็จพระนเรศวรจึงได้วางแผนสร้างกำลังใจให้กับทหาร โดยการให้ทหารคนหนึ่งปีนบันไดในอุโมงค์ขึ้นไปทางด้านหลังองค์พระ และพูดให้กำลังใจแก่เหล่าทหาร ทำให้ทหารเกิดกำลังใจที่จะต่อสู้

แม้ว่าอุโมงค์ในกำแพงมณฑปวัดศรีชุมจะมีเรื่องราวและคุณค่าทางประวัติศาสตร์ แต่เป็นที่น่าเสียดายอย่างยิ่งที่ปัจจุบันคนทั่วไปไม่สามารถเข้ามาเที่ยวชมหรือศึกษาพื้นที่นี้ได้ เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ต้องขออนุญาตก่อนเข้าใช้งานและทำเรื่องผ่านส่วนราชการเท่านั้น เนื่องจากผู้เข้าชมอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับภาพสลักที่ผนังหรือตัวอาคาร รวมถึงสภาพทางกายภาพของอาคารที่ไม่เหมาะสมให้เข้าเยี่ยมชม เช่น ทางเดินที่คับแคบ อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้เข้าชมได้

ลักษณะทางกายภาพและข้อจำกัดของวัดศรีชุมเช่นนี้ จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำเสนอข้อมูลผ่านสภาพแวดล้อมเสมือนสามมิติ ซึ่งจะเป็นการใช้ศักยภาพของระบบสารสนเทศให้บุคคลทั่วไปได้ใช้เป็นสื่อกลางเข้าเยี่ยมชมอาคารโลกเสมือน และนำเสนอข้อมูลของอุโมงค์ที่คนทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงได้ โดยไม่รบกวนอาคารจริง เป็นนำเสนอข้อมูลที่น่าสนใจได้อย่างหลากหลายและตอบสนองความต้องการของผู้เข้าชมได้อย่างตรงจุดอีกด้วย

5.1.1 ตำแหน่งที่ตั้งวัดศรีชุม

วัดศรีชุมตั้งอยู่นอกกำแพงเมืองเก่าสุโขทัย อยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของบริเวณกำแพงเมืองเก่า วัดนี้สร้างมาตั้งแต่เมื่อใดไม่ปรากฏหลักฐานที่แน่ชัด ภายในวัดศรีชุมมีอาคารทรงมณฑปหลังใหญ่เป็นอาคารประธานและเป็นแกนกลางของวัด มีวิหารตั้งอยู่ด้านหน้ามณฑปหลังใหญ่ และยังมีวิหารหลังย่อมลงมาที่ในแนวแกนยังมีมณฑปเล็กประกอบอยู่ด้วย อีกทั้งยังมีเจดีย์รายอยู่ขั้นกลางระหว่างแนวแกนอีกด้วย

จากหลักฐานศิลาจารึกหลักที่ 1 ที่ค้นพบที่เนินปราสาท มีจารึกที่เกี่ยวข้องกับวัดศรีชุม กล่าวว่า “เบื้องตีนนอนเมืองสุโขทัยมี ตลาดปสาน มีพระอจนะ มีปราสาท มีป่าหมากพร้าว ป่าหมากลาง มีไร่มีนา มีถิ่นมีฐาน มีบ้านใหญ่บ้านเล็ก...” (Coedès, 1983) เป็นที่ยอมรับกันว่าพระอจนะ ที่กล่าวถึงในจารึกนั้น คือ พระพุทธรูปปูนปั้นรูปปางมารวิชัยขนาดใหญ่ที่วัดศรีชุมนั้นเอง ส่วนชื่อ “วัดศรีชุม” นั้นปรากฏในเอกสารที่เก่าแก่ที่สุด คือ พระราชพงศาวดารกรุงศรีอยุธยา กล่าวกันว่าในปลายรัชสมัย สมเด็จพระมหาธรรมราชา (Panjuntumard & Chakkraphatdiphong, 1964)

5.1.2 อาคารทรงมณฑป

อาคารทรงมณฑปหลังใหญ่ของวัดศรีชุม เป็นอาคารทรงสี่เหลี่ยมเกือบจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่วนฐานเป็นฐานเขียงซ้อนกัน 3 ชั้น และต่อด้วยฐานบัวคว่ำ ถัดไปมีลูกแก้วอกไก่คาด และมีหน้ากระดานยาวไปจรดบัวหงายจนถึงแนวสุดของผนังกำแพงมณฑป มีประตูทรงสูงอยู่ทางด้านทิศตะวันออก ลักษณะคล้ายคลึงกับมณฑปของวัดตระพังทองหลางที่อยู่ในเขตกำแพงเมืองเก่า และอาคารมณฑปวัดตึก แต่อาคารมณฑปนี้มีลักษณะแปลกกว่ามณฑปหลังอื่น ๆ คือ มีอุโมงค์อยู่ภายในกำแพงผนัง ทำเป็นทางเดินสลับบันไดไต่ขึ้นไปสู่บริเวณช่องด้านข้างผนังช่องหลังองค์พระ และช่องด้านบนของหลังคาสุดของแนวผนังสามารถเดินขึ้นไปสู่ส่วนยอดสุดของอาคารได้ จากรูปทรงอาคาร และการวางผังดังกล่าวเป็นไปได้ว่ารับอิทธิพลมาจากศิลปะลังกา สมัยโปโลนนารุวะ หรือศิลปะพม่าที่เมืองพุกาม (H.S.H. Prince Diskul, 1985) สำหรับอุโมงค์ที่อยู่ภายในผนังอาคารทรงมณฑปหลังใหญ่นี้ อาจทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่ง และได้กลายเป็นเงื่อนไขสำคัญที่สัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างที่เป็นวัสดุก่อสร้างของกำแพง และหลังคาที่สันนิษฐานว่าเป็นโครงสร้างไม้ได้ดังนี้

1. ความจำเป็นที่ต้องสร้างผนังอาคารให้หนา และมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะให้อุโมงค์ที่อยู่ภายในไม่พังทลายและอาคารสามารถตั้งอยู่ได้ รวมทั้งการสร้างองค์ประกอบในการตกแต่ง ได้แก่ ฐานเขียง ฐานปัทม์

2. มีแผ่นหินที่มีภาพสลักลายเส้น ซึ่งแผ่นหินนี้ทำหน้าที่เป็นเหมือนคานถ่ายน้ำหนักกระจายไปสู่อิฐข้างเคียง ในลักษณะของขื่อรับน้ำหนักส่วนบน ซึ่งแผ่นหินแต่ละจุดจะมีขนาดไม่เท่ากันโดยเฉพาะตรงมุมจะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งโดยทั่วไปตรงมุมจะเป็นจุดที่รับน้ำหนักมากอยู่แล้ว

3. ลักษณะของอุโมงค์ที่เล็ก และแคบ ขนาดเพียงพอแค่หนึ่งคนเดินผ่านเท่านั้น เพื่อให้ช่องนั้นไม่เป็นภาระต่อโครงสร้างที่เป็นวัสดุก่อ รวมทั้งการทำเป็นอุโมงค์แนวเฉียงขึ้นจากผนังด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านหนึ่งด้วย อุโมงค์นี้ถูกวางแผนออกแบบและสร้างขึ้นมาพร้อมกับการสร้างอาคาร รวมถึงแผ่นศิลาจารึกลายเส้นทั้งหมดได้ถูกติดตั้งพร้อมกัน ขนาดของภาพนั้นพอดีกับช่องเพดานและมุมช่องเพดาน

5.1.3 พระอจนะ

ศิลาจารึกหลักที่ 1 สมัยพ่อขุนรามคำแหง กล่าวถึงพระอจนะ ซึ่งเป็นพระพุทธรูปปางมารวิชัย ที่ประดิษฐานอยู่ภายในมณฑปวัดศรีชุม คำว่า “อจนะ” มีผู้ให้ความหมายพระอจนะว่าหมายถึงคำในภาษาบาลีว่า “อจละ” ซึ่งแปลว่า “ผู้ไม่หวั่นไหว มั่นคง” “ผู้ที่ควรแก่การเคารพกราบไหว้” พระอจนะเป็นพระพุทธรูปปางมารวิชัย ขัดสมาธิราบ วัสดุปูนปั้น แกนในก่ออิฐและศิลาแลง หน้าตักกว้าง 11.30 เมตร สูง 15 เมตร องค์พระพุทธรูปมีขนาดใหญ่เต็มวิหาร ศิลปะแบบสุโขทัย องค์พระได้มีการบูรณะเมื่อปี พ.ศ. 2496 เนื่องจาก องค์เดิมได้ชำรุดไปมาก พระพักตร์ใช้ต้นแบบจากพระพุทธรูปสำริดภายในวัด ร่างขึ้นโดย อาจารย์เขียน ยิ้มศิริ และนายบุญธรรม พูลสวัสดิ์ ผู้ปั้นองค์พระ ภายในมณฑปมีการย่อมุมของผนังอย่างสวยงาม และเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับผนัง โดยมีหน้าที่รับโครงสร้างของหลังคาไปในตัว

5.1.4 พระวิหารวัดศรีชุม

เป็นวิหารหลวงมี 6 ห้อง ปรากฏในศิลาจารึกว่า “เบื้องตีนนอน” อยู่ทางทิศเหนือ จะมีพระพุทธรูปใหญ่ “เบื้องหัวนอน” จะอยู่ทางทิศใต้

5.1.5 วิหารและมณฑปเล็ก

มีลักษณะคล้ายคลึงกับวิหารและมณฑปหลักแต่มีขนาดเล็กกว่ามาก พระพุทธรูปภายในเป็นแบบปางมารวิชัย รูปแบบศิลปะแบบสุโขทัย ที่ได้รับอิทธิพลมาจากศิลปะขอม

5.1.6 ภาพชาดกในอุโมงค์

จากการศึกษาพบว่า ภาพจารึกลายเส้นเรื่องชาดกที่อยู่ภายในอุโมงค์ทั้งหมดส่วนใหญ่เรียงเป็นลำดับ และมีด้วยกันทั้งหมด 100 เรื่อง โดยเริ่มต้นเรื่องที่ 1 ตอน “อปัณณกชาดก” ที่แผ่นหินบริเวณผนังด้านทิศใต้ แล้วเรียงกันไปจนถึงเรื่องที่ 100 ในอุโมงค์ผนังด้านทิศเหนือ อย่างไรก็ตามก็ยังมีแผ่นภาพจารึกลายเส้นอีกจำนวนหนึ่งที่ชำรุดลบเลือนจนไม่อาจจะตีความได้

รูปแบบศิลปะ ซึ่งเป็นศิลปะต่างประเทศที่แสดงอิทธิพลอย่างเด่นชัดในภาพจารึกลายเส้นเรื่องชาดกของวัดศรีชุม ได้แก่ ศิลปะลังกาเกี่ยวข้องตั้งแต่ชื่อชาดก ภาษาที่ใช้เป็นบาลี รวมทั้งเรื่องเครื่องประดับตกแต่งของบุคคล ศิลปะพม่าเกี่ยวในเรื่องเครื่องประดับของบุคคล รูปต้นไม้ โดยเฉพาะลายกนกเหมือนกนกพม่ามาก ศิลปะเขมรเกี่ยวข้องกับเครื่องประดับบุคคลและสัตว์ และศิลปะจีนเกี่ยวข้องในเรื่องลายช่อดอกไม้ที่พื้นหลังและลายก้านขด ซึ่งเหมือนลายเครื่องปั้นดินเผาของจีนในสมัยราชวงศ์ซ่ง และราชวงศ์หยวน ซึ่งอิทธิพลศิลปะจีนน่าจะเข้ามาในสมัยราชวงศ์หยวน ประมาณพุทธศตวรรษที่ 19 ซึ่งอยู่ในช่วงยุคสมัยสุโขทัย พอดี (Prombun, 1982) อิทธิพลของศิลปะลังกายังเป็นรูปแบบหลักซึ่งมีมาก่อนยุคสุโขทัย เนื่องจากมีงานปูนปั้นที่วัดพระพายหลวง หลายชิ้นเป็นหลักฐานชิ้นสำคัญ ซึ่งวัดพระพายหลวงนั้นเป็นแหล่งเกิดอารยธรรมของกลุ่มศิลปะสุโขทัย อีกทั้งยังมีลักษณะเกี่ยวข้องกับศิลปะเขมร ศิลปะพม่า และศิลปะมอญแบบหริภุญไชยด้วย (Leksukhum, 1986) การกำหนดอายุด้านรูปแบบศิลปะของภาพจารึกลายเส้นเรื่องชาดก แม้ว่าจะแตกต่างจากการกำหนดอายุของอักษรประกอบภาพชาดกตามการศึกษาของ ศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ณ นคร ซึ่งกล่าวว่าอักษรประกอบในภาพนั้นควรมีอายุหลัง พ.ศ. 1935 (Krabuansang, 1977, p. 42) มาแล้ว แต่ได้ให้ความคิดเห็นเพิ่มเติมว่าช่วงเวลาที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ยังอยู่ในช่วง 50 ปี ซึ่งถือว่าสอดคล้องกัน (Fine Art Department,1983a) ดังนั้น ที่กล่าวว่าภาพจารึกลายเส้นเรื่องชาดกของวัดศรีชุมมีอายุราวปลายพุทธศตวรรษที่ 19 จึงมีความเป็นไปได้

5.2 การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับสำรวจสถาปัตยกรรมและการจัดเก็บข้อมูลทางกายภาพของอาคารในรูปแบบของข้อมูลดิจิตอล

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีและเทคนิคในการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลทางกายภาพของสถาปัตยกรรมได้ถูกพัฒนา

ไปมาก ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพ ความสะดวกรวดเร็ว ความแม่นยำและความสมจริงต่อสภาพอาคาร (Barber, Mills & Bryan, 2001) การเก็บข้อมูลสามมิติของสภาพอาคารในปัจจุบันนั้นเป็นแนวทางหนึ่งในการอนุรักษ์สถาปัตยกรรมที่มีคุณค่า โดยสามารถนำข้อมูลที่จัดเก็บมาได้มาใช้เป็นเอกสารอ้างอิงต่อการบูรณะอาคารในอนาคต เทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ การใช้สแกนเนอร์สามมิติ (3D laser scanner) (Boehler, Heinz, Marbs & Siebold, 2002) และการสร้างแบบจำลองขึ้นจากภาพถ่าย (Photo-modeling) ซึ่งใช้ประโยชน์จากกระบวนการคำนวณมุมมองของภาพถ่ายบนพื้นที่สามมิติที่เรียกว่าโฟโต้แกรมเมทรี (Photogrammetry) (Debevec, Taylor & Malik, 1996, pp. 11-20) (Hartley & Zisserman, 2004) และการสร้างแบบจำลองอัตโนมัติด้วยข้อมูลจากภาพถ่าย (Image-based Meshing) (Frey, Sarter & Gautherie, 1994, pp. 2735-2753) (Young, et al., 2008)

โครงงานวิจัยต่าง ๆ ในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการเก็บข้อมูลทางกายภาพของอาคาร สามารถเลือกใช้เทคนิคใดเทคนิคหนึ่งหรือใช้ทั้งสองประเภทร่วมกันเพื่อการสร้างผลลัพธ์ที่ตอบสนองความต้องการที่แตกต่างกันออกไป (Remondino, Guarnieri & Vettore, 2005, pp. 216-225)

5.2.1 การใช้สแกนเนอร์สามมิติ

การสแกนสามมิติด้วยเลเซอร์เป็นเทคนิคในการวัดระยะและจัดเก็บข้อมูลเชิงรูปทรงของอาคารที่ใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติความเชื่อมโยงของเครือข่ายแสงเลเซอร์ หมายถึง การใช้เครื่องมือในการวัดผ่านการยิงแสงเลเซอร์ไปยังพื้นผิวอาคาร แล้วคำนวณตำแหน่งและทิศทางของพื้นผิวที่วัดได้จากระยะเวลาหรือความเหลื่อมล้ำของคลื่นเลเซอร์ เพื่อบันทึกค่าสามมิติเอาไว้ในในระบบเมตริก แสงเลเซอร์ที่ใช้เป็นลำแสงที่มีขนาดเล็ก มีการเบี่ยงเบนน้อย (low-divergence beam) และสามารถระบุความยาวคลื่นได้ง่าย เมื่อเครื่องสแกนเนอร์สามมิติทำการยิงแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มข้นน้อยไปยังพื้นผิวอาคารและทำการตรวจจับแสงที่สะท้อนออกมาด้วยเซนเซอร์ที่มีความไวสูง และบันทึกเวลาในการเดินทางไปกลับของแสงไว้ (Fontana, et al., 2003) เมื่อนำผลของการวัดมารวมเข้าด้วยกัน จะปรากฏเป็นจุดที่วัดได้จำนวนมากในพื้นที่สามมิติ เราเรียกผลลัพธ์นี้ว่าพอยต์คลาวด์ (Point cloud) ซึ่งมีเค้าโครงรูปทรงเหมือนกับอาคารในโลกจริง แต่ละจุดจะถูกบันทึกค่าตำแหน่งตามแกน x y และ z เอาไว้ ในกรณีที่อาคารที่ทำการสแกนมีรูปทรงที่ซับซ้อน หรือขนาดใหญ่มาก ผู้สำรวจจะต้องทำการสแกนหลายครั้ง จากนั้นจึงนำผลลัพธ์จากสแกนมารวมเข้าด้วยกัน (Beraldin, Picard, El-Hakim, Godin, Valzano & Bandiera, 2005, pp. 108-118) เพื่อให้ได้รูปทรงของอาคารที่ครบถ้วนหรือเพียงพอที่จะทำการต่อได้

สำหรับเครื่องสแกนเนอร์ในปัจจุบัน นอกจากจะสามารถบันทึกข้อมูลสามมิติของอาคารได้แล้ว ยังสามารถบันทึกสีของพื้นผิวอาคารจริงได้อีกด้วย โดยการถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิตอลที่ถูกสอดแทรกไว้ในสแกนเนอร์ จากนั้นจึงนำค่าสีแต่ละพิกเซลฉายเข้าไปยังพอยต์คลาวด์ที่มีมุมมองที่ตรงกัน (Fontana, et al., 2004)

ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องสแกนเนอร์เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการสำรวจอาคารแบบเดิมแล้วมีความแตกต่างกันมาก ทั้งในแง่ความละเอียด ความถูกต้อง อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ก็มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก ง่ายต่อการทำงานในที่โล่ง และเหมาะสำกับการสำรวจอาคารโบราณสถานที่ละเอียดอ่อนหรือบอบบาง เนื่องจากการใช้แสงเลเซอร์จะไม่ไปสร้างผลกระทบใด ๆ เข้ากับอาคารที่สำรวจ ซึ่งแตกต่างจากการสำรวจอาคารแบบเดิมที่ต้องการแตะต้องสัมผัสตัวอาคาร พอยต์คลาวด์ที่ได้มาจากการสแกนก็เปิดโอกาสให้เราสามารถสำรวจ ศึกษา จัดเก็บ นำเสนอ หรือผลิตซ้ำได้โดยที่ไม่ไปรบกวนอาคารจริงอีก

5.2.2 การใช้เทคนิคโฟโต้แกรมเมทรี

โฟโต้แกรมเมทรี หมายถึง กระบวนการในการวัดระยะวัตถุที่ปรากฏอยู่บนภาพถ่ายผ่านการคำนวณทางเรขาคณิตชั้นสูง สามารถสืบค้นประวัติขององค์ความรู้ทางด้านนี้ไปถึงยุคเรอเนซองค์ (Gürer & Yücel, 2005, pp. 84-96) มีการนำใช้ได้ในหลากหลายวงการรวมถึงการศึกษาสถาปัตยกรรมโบราณด้วย กระบวนการโฟโต้แกรมเมทรีมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันที่เทคโนโลยีภาพถ่ายดิจิตอลที่ทำให้การเก็บข้อมูลด้วยภาพถ่ายเป็นเรื่องง่ายและสะดวกรวดเร็วขึ้นมาก จนได้รับการยอมในวงกว้างว่าสามารถนำมาใช้งานในการเก็บข้อมูลอาคารที่มีคุณค่าได้ดี เนื่องจากสามารถทำงานได้สะดวกรวดเร็ว เคลื่อนย้ายสะดวก ไม่ต้องใช้ความรู้เฉพาะทางมากนัก มีราคาถูก แม้ว่าเมื่อเทียบกับเครื่องสแกนเนอร์สามมิติแล้ว ในแง่ของความถูกต้องของผลลัพธ์จะยังเป็นรองอยู่ แต่ก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจและใช้งานได้ดี (Hanke & Grussenmeyer, 2002) โฟโต้แกรมเมทรียังเป็นกระบวนการที่เหมาะในการเก็บข้อมูลทางกายภาพของสถาปัตยกรรมที่มีรายละเอียดบนพื้นผิวอาคารสูง ดั่งเช่นอาคารโบราณสถานอีกด้วย

ขั้นตอนในการคำนวณด้านโฟโต้แกรมเมทรีมีอยู่หลากหลายวิธี แล้วแต่ความต้องการและผลลัพธ์ที่ต่างกันออกไป โดยมากมักเกี่ยวข้องกับการการวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อแปลงข้อมูลของภาพสองมิติที่วัดไม่ได้ให้เป็นข้อมูลที่วัดได้ (Metric Information) ซึ่งจะต้องผ่านการคำนวณหลายขั้นตอน ได้แก่

– การหาองค์ประกอบที่เหมือนกันในแต่ละภาพ (Feature Recognition) เพื่อเปรียบเทียบระยะในการวัดคำนวณหาตำแหน่งในพื้นที่สามมิติเพื่อสร้างจุดอ้างอิง

– การคำนวณเพื่อหาตำแหน่งและทิศทางของมุมมองภาพในพื้นที่สามมิติ (Camera Calibration) เพื่อช่วยให้เราสามารถรู้ได้ว่าแต่ละภาพถูกถ่ายด้วยมุมมองเช่นไร (Debevec, et al., 1996) (Hartley & Zisserman, 2004)

– การสร้างแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยการสร้างโครงข่ายผิวแบบจำลองจากจุดอ้างอิง (Image-based Meshing) (Frey, Sarter & Gautherie, 1994, pp. 2735-2753) (Young, et al., 2008)

– การสร้างพื้นผิวของแบบจำลองด้วยการฉายภาพถ่ายจากมุมมองที่คำนวณมาได้เข้าสู่แบบจำลอง (Texture Projection) (Fitzner & Heinrichs, 2002)

5.3 การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองสามมิติจากสถาปัตยกรรมในโลกจริง

ในปัจจุบันแบบจำลองสามมิติถูกใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการจดบันทึกสภาพปัจจุบันของอาคารที่มีคุณค่าถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับนักวิจัยหรือผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์อาคาร และถูกใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญของการสร้างสื่อเพื่อสื่อสารกับประชาชนทั่วไปที่มีความสนใจที่จะศึกษาอาคาร แบบจำลองสามมิติที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมถูกผลิตขึ้นมากมายด้วยโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีข้อจำกัดน้อยลง เข้าถึงได้ง่ายขึ้น และราคาถูกลง แบบจำลองสามมิติเหล่านี้ถูกผลิตขึ้นทั้งในสถานศึกษา องค์กร หรือหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อใช้ในการศึกษาสถาปัตยกรรมในแง่ต่าง ๆ เนื่องจาก ข้อมูลสามมิตินั้นสามารถนำเสนอมุมมองที่สร้างให้เกิดความเข้าใจด้านรูปทรงและพื้นที่ได้มากกว่าภาพสองมิติมาก อีกทั้งยังง่ายต่อการแก้ไขดัดแปลงให้ทันสมัย รวมถึงเอื้อต่อการทำงานร่วมกันแบบออนไลน์

กระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติโดยการใช้ประโยชน์จากพอยต์คลาวด์ที่ได้มาจากเครื่องสแกนเนอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

5.3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติจากพอยต์คลาวด์แบบอัตโนมัติ (Automatic Mesh Generation)

หมายถึง การสร้างรูปทรงด้วยการคำนวณหาตำแหน่งจุดที่ใกล้เคียง (Neighborhood Point) และสร้างโพลีกอน (Polygon) ขึ้นจากโครงข่ายสามเหลี่ยม (Triangulation) (Edelsbrunner, 2001) (Frey, Sarter & Gautherie, 1994, pp. 2735-2753) แบบจำลองสามมิติที่ถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการนี้จะมีความใกล้เคียงกับรูปทรงอาคารในโลกจริงให้มากที่สุดและมีรายละเอียดสูงมาก เราสามารถควบคุมปริมาณโพลีกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากจำนวนจุดที่ถูกนำไปคำนวณ หากมีจำนวนจุดมากโพลีกอนก็จะมากตามไปด้วย ดังนั้น หากต้องการแบบจำลองที่มีขนาดไฟล์ที่เล็กลงพอยต์คลาวด์จะต้องถูกนำไปจัดการ เพื่อกำจัดจุดที่ไม่ต้องการเสียก่อน (Frey & George, 2000) อีกทั้งเมื่อทำการสร้างรูปทรงเสร็จแล้วยังต้องทำการตรวจสอบว่ามีส่วนใดที่ขาดหายไปเนื่องจากมีจุดบอดในขั้นตอนการสแกนหรือไม่

แบบจำลองที่ถูกสร้างด้วยกระบวนการนี้เหมาะกับการสร้างแบบจำลองของอาคารหรือส่วนของอาคารที่มีรูปทรงอิสระหรือซับซ้อนมาก ๆ เช่น หัวเสาหรืองานปูนปั้นตกแต่งอาคาร เพื่อประหยัดเวลาในการสร้างแบบ และไฟล์ที่ใช้เก็บแบบจำลองจะมีขนาดใหญ่เนื่องจากมีโพลีกอนจำนวนมาก

5.3.2 การสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้พอยต์คลาวด์เป็นข้อมูลอ้างอิง

การสร้างแบบจำลองแบบนี้เป็นกระบวนการสร้างรูปทรงด้วยโปรแกรมประยุกต์สามมิติ โดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลที่วัดได้ของพอยต์คลาวด์เป็นจุดอ้างอิง การจัดการกับพอยต์คลาวด์ก่อนที่จะนำมาใช้อ้างอิงในกระบวนการนี้สามารถทำได้หลายประเภท เช่น ทำการสุ่มตัวอย่างให้จำนวนจุดน้อยลง (Smith & Sritharan, 1988, pp. 359-369) การคัดเลือกจุดที่เป็นขอบเหลี่ยมมุมของอาคาร ด้วยอัลกอริทึมที่คำนวณหาความไม่ต่อเนื่องของจุด (García-Cortés, Ordóñez Galán, Argüelles-Fraga & Menéndez Díaz, 2012, pp. 595-598) ของพื้นผิวหรือระนาบจุด หรือตัดแยกระนาบจุดตามแกนเพื่อแสดงเส้นขอบของรูปทรง การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ด้วยโปรแกรมสามมิติทั่วไปในท้องตลาด ผ่านการโอนถ่ายไฟล์พอยต์คลาวด์ให้เป็นไฟล์สามมิติมาตรฐานเพื่อนำไปใช้งานในโปรแกรมสามมิติและสร้างแบบจำลองได้ กระบวนการนี้แม้จะใช้เวลาสร้างแบบจำลองมากกว่าและมีความเที่ยงตรง

ต่ออาคารต้นแบบน้อยกว่าการสร้างแบบจำลองด้วยกระบวนการอัตโนมัติ เนื่องจากเป็นการสร้างแบบจำลองด้วยมือ (Manual Modeling) แต่ก็มีข้อดีกว่าในหลาย ๆ แง่ เช่น สามารถควบคุมระดับของรายละเอียดได้ ตัวแบบจำลองที่ได้มาจะมีไฟล์ที่มีขนาดเล็กกว่ามาก เหมาะที่จะนำไปใช้แสดงผลในระบบสารสนเทศออนไลน์ เพราะเสียเวลาในการดาวน์โหลดจากเซิร์ฟเวอร์น้อยกว่า

5.4 การศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการนำเสนอข้อมูลทางสถาปัตยกรรมผ่านระบบสารสนเทศอินเตอร์แอคทีฟ

ทุกวันนี้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ในกระบวนการเก็บ จัดการและแสดงผลข้อมูลต่าง ๆ ของสถาปัตยกรรม ได้เปิดโอกาสให้เราสามารถสร้างและแบ่งปันองค์ความรู้ในหลาย ๆ ด้าน รวมถึงด้านมรดกทางวัฒนธรรม การแปลงมรดกทางวัฒนธรรมเหล่านี้ให้กลายเป็นข้อมูลดิจิตอล (Digitization) แล้วนำเสนอเผยแพร่ต่อสาธารณะชน ก่อให้เกิดการพัฒนาในวงการสารสนเทศและสร้างการเข้าถึงข้อมูลทางวัฒนธรรมอย่างเท่าเทียม งานวิจัยและโครงการจำนวนมากให้ความสนใจในการเผยแพร่ความรู้ทางสถาปัตยกรรมผ่านสื่อบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต เนื่องจากเป็นสื่อที่เข้าถึงสาธารณะชนที่กว้าง รวดเร็ว และสะดวกที่สุดในปัจจุบัน ทุกวันนี้มีโครงการวิจัยมากมายที่การใช้แบบจำลองสามมิติเพื่อนำเสนอองค์ความรู้ทางสถาปัตยกรรม โบราณสถาน หรือมรดกทางวัฒนธรรม เช่น

Livio De Luca et al. (De Luca, 2010) ได้นำเสนอโครงการ NUBES ซึ่งเป็นระบบสารสนเทศที่ใช้ประโยชน์จากแบบจำลองสามมิติของอาคารอนุรักษ์ในหลากหลายแนวทาง โดยมุ่งเน้นผู้ใช้งานไปที่ผู้เชี่ยวชาญทางอาคารอนุรักษ์มากกว่าบุคคลทั่วไป ระบบสามารถแสดงผลแบบจำลองสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ทันที ที่สามารถเลือกประเภทภาพเสนอ (Representation) ได้หลากหลายภายในแบบจำลองชิ้นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นพอยต์คลาวด์ แบบจำลองสามมิติแบบโพลีกอน ทั้งแบบที่มีและไม่มีพื้นผิว (Texture) อีกทั้งยังกำหนดระดับรายละเอียดได้ รวมถึงสามารถจัดการกับแบบจำลองเพื่อเข้าถึงข้อมูลเพิ่มเติม เช่น วัดระยะอาคารหรือสร้างระนาบรูปตัดเพื่อดูรูปทรงอาคารในมุมมองสองมิติ

ชาวี บุษยรัตน์ และคณะ (Busayarat, De Luca, Véron & Florenzano, 2010) ได้พัฒนาระบบออนไลน์ที่เน้นความสำคัญในการเชื่อมต่อความสัมพันธ์ระหว่างภาพถ่ายสองมิติกับแบบจำลองสามมิติ โดยผู้ใช้งานสามารถเคลื่อนกล้องในฉากสามมิติเพื่อสืบค้นภาพที่มีมุมมองใกล้เคียงกับมุมมองของผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งานเลือกภาพที่ต้องการแล้ว ระบบจะเคลื่อนกล้องของผู้ใช้งานอย่างอัตโนมัติไปยังมุมมองของภาพที่ถูกเลือก อีกทั้งแต่ละภาพในฐานข้อมูลยังถูกเชื่อมกับข้อมูลเชิงความหมาย (Semantic) ขององค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม ผ่านการฉายภาพแบบเวคเตอร์ (Vector Rendering) ของแบบจำลองสามมิติซ้อนเข้าบนภาพถ่ายสองมิติ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถค้นหาภาพได้จากเกณฑ์ในเชิงมิติที่ว่าง (Spatial Criteria) และในเชิงความหมาย (Semantic Criteria)

Chiara Stefani et al. (Stefani, et al., 2008) ได้สร้างระบบที่ให้ความสนใจเรื่องความเปลี่ยนแปลงสภาพของสถาปัตยกรรมไปตามเวลา งานวิจัยนี้ถูกพัฒนาขึ้นที่จะใช้กับอาคารโบราณสถานที่มีการเปลี่ยนแปลง ซ่อมแซม ต่อเติมหรือดัดแปลงสภาพอาคารโดยระบบจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสามมิติของอาคารและแผนภูมิของเวลา (timeline chart) เริ่มต้นตั้งแต่เวลาที่อาคารถูกสร้างขึ้นจนถึงปัจจุบัน ผู้ใช้งานระบบสามารถเลือกดูตำแหน่งเวลาที่ต้องการ ระบบจะแสดงผลโดยการดาวน์โหลดแบบจำลองสภาพอาคารที่ตรงกับเวลาที่เลือก และแสดงผลได้ในลักษณะต่าง ๆ ตามเกณฑ์ เช่น แบบที่แตกต่างกันตามแต่ผู้สันนิษฐาน ความแน่ใจหรือไม่แน่ใจของผู้สันนิษฐาน หรือชิ้นส่วนของอาคารนั้น ๆ ยังหลงเหลือหรือไม่ในปัจจุบัน

Noah Snavely et al. (Snavely, Seitz & Szeliski, 2006, pp. 835-846) นำเสนอระบบ Photosynth ที่ใช้การคำนวณหามุมมองของภาพถ่ายจำนวนมากด้วยกระบวนการทางโฟโต้แกรมเมทรีขั้นสูงเพื่อสร้างพอยต์คลาวด์ของอาคารขึ้นบนพื้นที่สามมิติ แล้วเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานสามารถเคลื่อนที่กล้องไปมาระหว่างมุมมองของภาพแต่ละภาพได้ โครงการนี้เป็นงานวิจัยที่เน้นความสำคัญไปที่การท่องเที่ยวเสมือน (Virtual Tourism) โดยพัฒนาระบบให้ความง่ายต่อการเข้าถึงของบุคคลทั่วไป เนื่องจากต้องการภาพถ่ายจำนวนมากมาเป็นข้อมูลดิบ และภาพถ่ายอาคารสำคัญตามสถานที่ท่องเที่ยวสำคัญก็เป็นแหล่งข้อมูลที่มีอยู่อย่างมหาศาลบนเครือข่ายอินเตอร์เน็ต อีกทั้งระบบยังรองรับการสื่อสารในแบบ Social Media ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้ผู้ใช้งานมีปฏิ–สัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

Virtual Museum เป็นแนวทางพัฒนาการท่องเที่ยวประเภทหนึ่งที่เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานเข้าเที่ยวชมพิพิธภัณฑ์หรือสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

หลากหลายโครงการที่มีเป้าหมายนี้เลือกที่จะใช้แบบจำลองสามมิติของอาคารและ Web3D เป็นสื่อในการพัฒนาระบบ โดยมากมีวิธีการใช้งานทั่วไปที่ใกล้เคียงกัน คือ สามารถเคลื่อนกล้องเพื่อเดินชมส่วนต่าง ๆ ของพิพิธภัณฑ์ได้ เมื่อเจอวัตถุจัดแสดงที่สนใจก็สามารถคลิกเพื่อชมหรืออ่านรายละเอียดที่เกี่ยวข้องได้ (Corcoran, Demaine, Picard, Dicaire, Louis-Guy & Taylor, 2002) โครงการลักษณะนี้มีอยู่หลากหลาย ส่วนมากเน้นการใช้งานที่เข้าใจได้ง่าย แสดงผลรวดเร็ว และกำลังเป็นที่สนใจในวงการงานวิจัยเป็นวงกว้าง ระบบอาจพัฒนาผ่านเกมเอนจิ้นสามมิติหรือจัดแสดงผ่านเกมออนไลน์ที่ใช้งานอยู่ก่อนแล้ว (เช่น เกม Second Life เป็นต้น) (Oberlander, Karakatsiotis, Isard & Androutsopoulos, 2008, pp. 749-753) (Urban, Marty & Twidale, 2007)

6. การสำรวจพื้นที่ศึกษาและเก็บข้อมูลทางกายภาพของอาคาร

โครงการวิจัยต่าง ๆ ที่ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลของอาคารในปัจจุบัน สามารถใช้เทคโนโลยีรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างผลลัพธ์ที่ตอบสนองกับความต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในแง่ต่าง ๆ แล้ว ทั้งขนาดของอาคาร รายละเอียดของรูปทรง รวมถึงระยะเวลาในสำรวจ ทางคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องสแกนเนอร์สามมิติเป็นอุปกรณ์ในการบันทึกข้อมูลด้านรูปทรงของอาคาร และใช้เทคนิคโฟโต้แกรมเมทรีในการสร้างพื้นผิวของแบบจำลองอาคาร

6.1 การสำรวจพื้นที่และเก็บข้อมูลเชิงรูปทรงของอาคารด้วยสแกนเนอร์สามมิติ

ในปัจจุบัน การเก็บข้อมูลทางกายภาพของอาคารโบราณสถานสามารถใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น สแกนเนอร์สามมิติ ทำให้การเก็บข้อมูลสามารถทำได้รวดเร็วและเที่ยงตรงต่อสภาพอาคารจริง รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการนำเสนอข้อมูลที่สูงมาก ทางคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องสแกนเนอร์สามมิติ Faro Focus 3D เป็นอุปกรณ์ในการบันทึกข้อมูลทางในเชิงรูปทรงของวัดศรีชุม (รูปที่ 1) และได้ลงพื้นที่และเก็บข้อมูลภาคสนามใช้เวลาทั้งสิ้น 2 วัน ทำการสแกนทั้งหมด 39 ตำแหน่ง

รูปที่ 1 การเก็บข้อมูลด้านรูปทรงอาคารด้วยสแกนเนอร์สามมิติ

6.2 พอยต์คลาวด์จากการสแกนอาคารด้วยสแกนเนอร์สามมิติ

พอยต์คลาวด์ คือ ผลลัพธ์จากการสแกนอาคารด้วยสแกนเนอร์สามมิติที่มีระยะและขนาดตรงตามสัดส่วนของอาคารจริง สแกนเนอร์สามมิติที่ทางคณะผู้วิจัยเลือกใช้สามารถเก็บข้อมูลของอาคารและสร้างพอยต์คลาวด์ที่ประกอบไปด้วย ข้อมูลเชิงพื้นที่สามมิติ (Spatial Data – ค่าตำแหน่ง X Y และ Z บนพื้นที่สามมิติ) และข้อมูลของพื้นผิวอาคาร (ข้อมูลสีในฟอร์แมท RGB และค่าความเข้มแสงของแต่ละจุด ซึ่งเกิดจากการซ้อนทับ Pixel จากภาพถ่ายแบบพาโนรามาลงบนพอยต์คลาวด์) ผลลัพธ์จากการสแกนวัดศรีชุมได้พอยต์คลาวที่มีปริมาณประมาณ 189 ล้านจุด (รูปที่ 2)

พอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนนี้ยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้ทันที เนื่องจากมีปริมาณจุดจำนวนมากมีจุดที่ไม่จำเป็น และตำแหน่งที่จุดซ้อนทับกันมากเกินไป ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ จุดจากการสแกนเหล่านี้จะต้องผ่านการจัดการเสียก่อน โดยการคัดเลือกจุดที่เอื้อประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองสามมิติ ทำการสุ่มตัวอย่างด้วยเกณฑ์ทางพื้นที่

รูปที่ 2 มุมมองสามมิติของพอยต์คลาวด์จากการสแกนวิหารหลวงภายในวัดศรีชุม

สามมิติ (Tri-dimensional Spatial Sampling) แล้วทำการตัดแบ่งกลุ่มจุดออกเป็นชุด ๆ เพื่อให้สามารถส่งออกไปทำงานบนโปรแกรมสามมิติอื่น ๆ ได้ โดยพอยต์คลาวด์เหล่านี้จะถูกบันทึกไว้ในไฟล์ ASCII ที่สามารถเปิดอ่านได้ ผ่านโปรแกรมประยุกต์สามมิติทั่วไปที่มีความสามารถในการอ่านไฟล์สามมิติ

6.3 การเก็บข้อมูลพื้นผิวอาคารด้วยภาพถ่ายดิจิตอล

คณะผู้วิจัยใช้ภาพถ่ายดิจิตอลรายละเอียดสูงในการเก็บข้อมูลด้านพื้นผิวอาคาร เพื่อใช้ในเทคนิคโฟโต้แกรมเมทรีสำหรับการสร้างพื้นผิวอาคารในแบบจำลองสามมิติที่เที่ยงตรงถูกต้องต่อสภาพอาคารจริง ภาพถ่ายเหล่านี้ใช้เก็บข้อมูลอาคารผ่านเกณฑ์ในการถ่ายภาพด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เอื้อประโยชน์ต่อการคำนวณเรขาคณิตชั้นสูง ภาพทั้งหมดจึงต้อง ถูกถ่ายขึ้นใหม่ทั้งหมด เราไม่สามารถใช้ภาพถ่ายทั่วไปมาคำนวณได้ เนื่องจากภาพเหล่านั้นไม่มีองค์ประกอบในภาพที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึมที่ใช้คำนวณ Camera Calibration เกณฑ์ในการถ่ายภาพสำหรับการใช้เทคนิคโฟโต้แกรมเมทรี ได้แก่

– ภาพถ่ายที่ใช้จะต้องถูกถ่ายขึ้นรอบ ๆ อาคาร โดยให้แต่ละภาพมีองค์ประกอบของอาคารในภาพก่อนหน้าปรากฏอยู่ไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของภาพ

– ภาพถ่ายที่ใช้จะต้องในแนวเดียวกัน (แนวตั้งหรือแนวนอน) ทั้งหมด

– ภาพถ่ายจะต้องถูกถ่ายโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภาพในกล้องให้เหมือนกันทุกภาพ เช่น ระยะซูม ค่าความไวแสง (ISO) ความกว้างรูรับแสง ความไวของชัตเตอร์

– ภาพถ่ายจะต้องมีค่าแสงที่พอดี ไม่สว่างมากเกินไป (Over Exposure) หรือมืดมากเกินไป (Under Exposure)

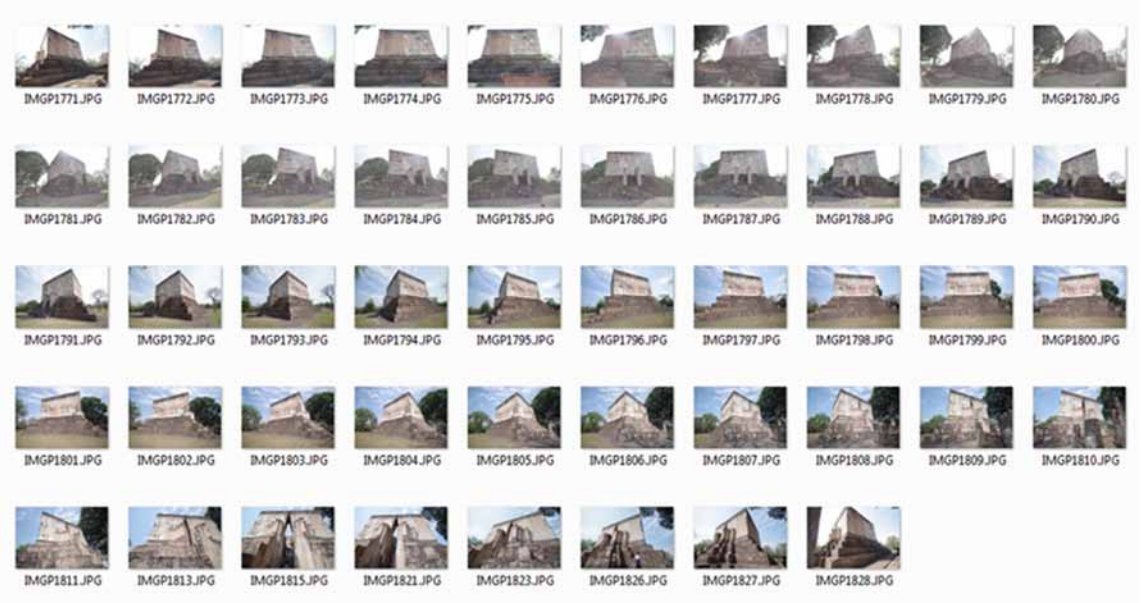
– ภาพถ่ายจะต้องอยู่ในโฟกัสหรือไม่สั่นไหว

เกณฑ์ในการถ่ายภาพเหล่านี้จะช่วยให้อัลกอริทึมในโปรแกรมโฟโต้แกรมเมทรีคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของกล้องในพื้นที่สามมิติได้ง่ายและถูกต้องมากขึ้น รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างภาพภาพวัดศรีชุมที่คณะผู้วิจัยได้ถ่ายขึ้นตามเกณฑ์ดังกล่าว

7. การสร้างแบบจำลองสามมิติ

7.1 การสร้างรูปทรงแบบจำลองของอาคารโดยรวม

ในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองสามมิติของวัดศรีชุม ทางคณะผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกกระบวนการสร้างแบบจำลองโดยใช้พอยต์คลาวด์เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสร้างรูปทรงอาคาร (อ่านรายละเอียดที่ 5.3.2) กระบวนการนี้แม้จะใช้เวลาสร้างแบบจำลองมากกว่าการสร้างแบบจำลองด้วยกระบวนการอัตโนมัติแต่ก็มีข้อดีในหลายด้าน เช่น สามารถควบคุมระดับของรายละเอียดได้ดีกว่าตัวแบบจำลองที่ได้จะมีไฟล์ที่มีขนาดเล็กกว่ามาก เหมาะที่จะนำไปใช้แสดงผลสามมิติแบบเวลาจริง (Real-Time) ในระบบ



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพถ่ายดิจิตอลเพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวอาคารบนแบบจำลองสามมิติด้วยกระบวนการโฟโต้แกรมเมทรี

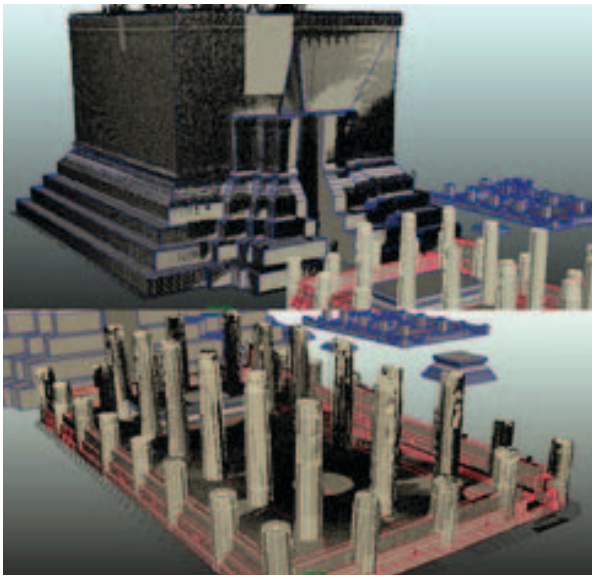
สารสนเทศออนไลน์ เนื่องจากใช้เวลาในการดาวน์โหลดจากเซิร์ฟเวอร์และเรนเดอร์น้อยกว่า

พอยต์คลาวด์ที่ได้รับการจัดการแบ่งเป็นส่วน ๆ แล้วจะถูกนำเข้าสู่โปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลองสามมิติ สำหรับขั้นตอนการสร้างรูปทรงอาคารนี้ คณะผู้วิจัยเลือกใช้เฉพาะพารามิติเตอร์ด้านตำแหน่งของจุด โดยไม่ได้นำพารามิเตอร์ด้านสีและความเข้มแสงของจุดเข้ามาใช้ด้วย เพื่อความสะดวกในการทำงานกับไฟล์ขนาดใหญ่ของพอยต์คลาวด์ การสร้างแบบจำลองใช้ประโยชน์จากมุมมอง Orthogonal ในการกำหนดสัดส่วน ความกว้าง ความยาว และความสูงอาคารในขั้นต้น และใช้มุมมอง Perspective ในการสร้างรายละเอียดให้กับแบบจำลอง ในการสร้างรายละเอียด จนได้แบบจำลองที่มีรูปทรงใกล้เคียงกับพอยต์คลาวด์ให้มากที่สุด ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4

7.2 การสร้างพื้นผิวแบบจำลอง

การสร้างพื้นผิวแบบจำลองวัดศรีชุม คณะผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคโฟโต้แกรมเมทรีเพื่อค้นหาอ้างอิงตำแหน่งมุมมองของกล้องในพื้นที่สามมิติ เป็นการแปลงข้อมูลภาพถ่ายสองมิติให้กลายเป็นข้อมูลสามมิติที่วัดได้ (Tri-Dimensional Metric Information) (อ่านรายละเอียดที่ 5.2.2) โดยโปรแกรมประยุกต์ที่เลือกใช้ สามารถสร้างแบบจำลองแบบอัตโนมัติจากการทำ Automatic Meshing ได้ แต่ผลลัพธ์ที่ได้จะมีปริมาณโพลีกอนมากเกินกว่าที่จะแสดงผลสามมิติแบบ Real-Time บนสื่อออนไลน์ได้ อีกทั้งคุณภาพแบบจำลองที่ได้มานั้นยังแตกต่างจากสภาพอาคารจริงมากเกินไป (รูปที่ 5) เนื่องจากเป็น กระบวนการที่ต้องทำการแปลงข้อมูลในสองขั้นตอน จากข้อมูลสามมิติให้เป็นสองมิติ (รูปทรงสามมิติของอาคารในโลกจริงไปสู่ภาพถ่ายสองมิติ) และแปลงข้อมูลสองมิติคืนมาให้เป็นสามมิติ (การค้นหาจุดอ้างอิงและตำแหน่งของกล้องในพื้นที่สามมิติผ่านการคำนวณด้วยกระบวนการ Camera Calibration)

แบบจำลองที่โปรแกรมผลิตขึ้นด้วยกระบวนการ Automatic Meshing จะถูกใช้งานเพื่ออ้างอิงชุดข้อมูลเข้า



รูปที่ 4 การสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้พอยต์คลาวด์เป็นข้อมูลอ้างอิงด้านรูปทรง

รูปที่ 5 การสร้างแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยกระบวนการโฟโต้แกรมเมทรี

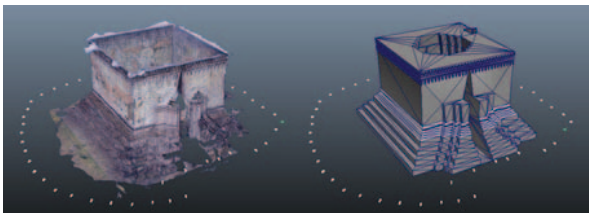
กับแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นจากพอยต์คลาวด์ ซึ่งมีจำนวนโพลีกอนน้อยกว่าและทำงานง่ายกว่า ส่วนพารามิเตอร์ของกล้องที่ได้จากการคำนวณด้วยกระบวนการโฟโต้แกรมเมทรีจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการฉายภาพถ่ายดิจิตอลลงบนพื้นผิวแบบจำลอง

จากรูปที่ 6 ภาพด้านซ้ายคือแบบจำลองที่ได้จากกระบวนการทางโฟโต้แกรมเมทรี จุดสีขาวรอบอาคารคือตำแหน่งและทิศทางของกล้องจากแต่ละภาพที่ใช้ในการคำนวณ คณะผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลชุดนี้มาประกอบเข้ากับแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้พอยต์คลาวด์เป็นข้อมูลอ้างอิงด้านรูปทรง (ภาพด้านขวา) และใช้เทคนิคการฉายภาพถ่ายดิจิตอลลงบนพื้นผิวแบบจำลองอาคาร (Texture Mapping) ผ่านมุมมอง Perspective Projection ของกล้องแต่ละตัว (รูปที่ 7)

แบบจำลองที่เป็นผลลัพธ์สุดท้ายจากกระบวนการนี้จะมีความใกล้เคียงกับอาคารในโลกจริงมากทั้งในแง่รูปทรงและพื้นผิว และมีขนาดไฟล์ที่ไม่มากเกินไป เหมาะสมแก่การแสดงผลออนไลน์แบบปฏิสัมพันธ์ทันที (รูปที่ 8)

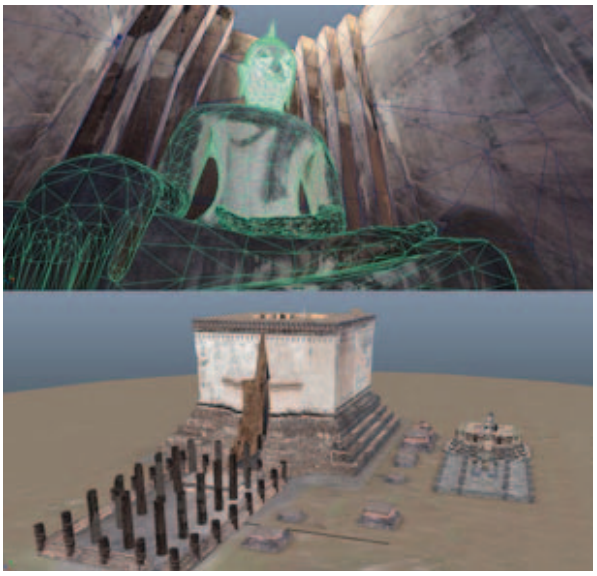
7.3 การสร้างแบบจำลองของอุโมงค์ภายในมณฑปวัดศรีชุม

เนื่องจากอุโมงค์วัดศรีชุมมีลักษณะเป็นช่องทางแคบ ทำให้ไม่สามารถติดตั้งเครื่องสแกนเนอร์สามมิติภายในอุโมงค์ได้ อีกทั้งยังมีปริมาณแสงที่น้อยมาก ทำให้การเก็บข้อมูลทางกายภาพด้วยการถ่ายภาพก็ไม่สามารถทำได้เช่นกัน คณะผู้วิจัยจึงต้องสร้างแบบจำลองของอุโมงค์โดย



รูปที่ 6 การโอนถ่ายกล้องบนพื้นที่สามมิติจากแบบจำลองที่สร้างด้วยกระบวนการโฟโต้แกรมเมทรีไปยังแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยการอ้างอิงรูปทรงของพอยต์คลาวด์

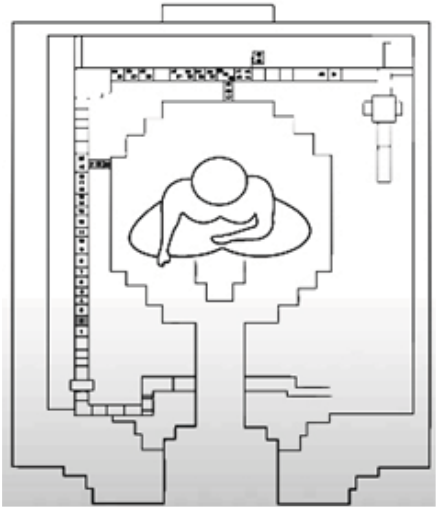
รูปที่ 7 เทคนิคการฉายภาพถ่ายดิจิตอลลงบนพื้นผิวแบบจำลองผ่านมุมมองแบบ Perspective Projection



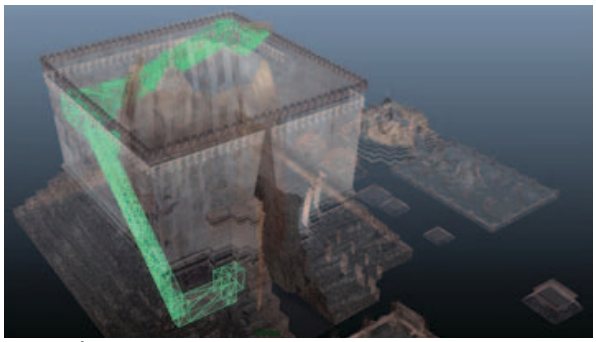
รูปที่ 8 แบบจำลองสามมิติของวัดศรีชุมในสภาพปัจจุบัน

อ้างอิงจากผังพื้นในเอกสารวัดศรีชุม ในประชุมจารึก ภาคที่ 8 จารึกสุโขทัย (Fine Art Department, 2005b) (รูปที่ 9)

ความสูงของแบบจำลองอุโมงค์แต่ละช่วงถูกอ้างอิงกับตำแหน่งพอยต์คลาวด์ของช่องหน้าต่างที่เชื่อมต่อกับอุโมงค์ แบบจำลองโครงสร้างอุโมงค์นี้ถูกตัดแบ่งส่วนตามตำแหน่งของจารึกชาดกต่าง ๆ และพระพุทธบาทที่ปรากฏบนผนังและเพดาน (รูปที่ 10) และจัดแยกจารึกแต่ละชิ้นตามเอกสารการประชุมจารึก ภาคที่ 8 จารึกสุโขทัย กรมศิลปากร (Fine Art Department, 1983b)



รูปที่ 9 ผังพื้นแสดงแนวอุโมงค์ในมณฑปวัดศรีชุม



รูปที่ 10 แบบจำลองสามมิติของอุโมงค์ในมณฑปวัดศรีชุม

รูปที่ 11 อินเตอร์เฟสของระบบ 3DISTA

8. การพัฒนาระบบสารสนเทศสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ทันที

ระบบต้นแบบที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น มีเป้าหมายเพื่อจัดเก็บข้อมูลทางสถาปัตยกรรม ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลกายภาพในรูปแบบของแบบจำลองสามมิติและสองมิติ และข้อมูลในแง่อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัดศรีชุม จังหวัดสุโขทัย เพื่อเป็นการอนุรักษ์อาคารที่มีคุณค่าและเก็บข้อมูลเหล่านี้ไว้ในรูปแบบของสารสนเทศดิจิตอล และเพื่อใช้ศึกษาประสิทธิภาพในการรับรู้และเข้าใจข้อมูลทางโบราณสถานไทยรวมถึงสร้างความตระหนักในคุณค่าของมรดกทางวัฒนธรรมให้แก่ผู้ใช้งาน รวมถึงศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อการศึกษาโบราณสถานผ่านระบบสารสนเทศสามมิติบนสื่อออนไลน์ ซึ่งบุคคลทั่วไปสามารถรับชมข้อมูลได้ผ่านทางบราวเซอร์ โดยคณะผู้วิจัยได้ให้ชื่อระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ว่า 3DISTA (3D Information System for Thai Architecture) รูปที่ 11 แสดงหน้าแรกของระบบนี้

8.1 ข้อมูลภายในระบบ

ข้อมูลและองค์ความรู้ทางด้านสถาปัตยกรรมอนุรักษ์ควรเปิดโอกาสให้บุคคลทั่วไปเข้าถึงได้นั้น มีทั้งความหลากหลาย ซับซ้อน และหลากที่มา ข้อมูลเหล่านี้ ได้แก่

8.1.1 ข้อมูลเชิงพรรณนาบรรยาย (Descriptive Information) หมายถึง เอกสารหรือคำอธิบายต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรม สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

– ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับองค์รวมของสถาปัตยกรรม เช่น ประวัติที่ถูกจดบันทึกในจารึกต่าง ๆ รูปแบบการก่อสร้าง ที่มาของรูปแบบเชิงกายภาพ รูปแบบการเลือกสถานที่ตั้ง การจัดวางผังในระดับผังเมือง และรูปแบบการจัดวางผังภายในอาคาร เป็นต้น

– ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบย่อยของสถาปัตยกรรม เช่น รายละเอียดวัสดุที่ใช้ประโยชน์ใช้สอยของแต่ละพื้นที่ รวมถึงการเข้าใจในคำศัพท์ต่าง ๆ (semantic information) ที่ใช้เรียกองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม ซึ่งเป็นหนึ่งในความรู้ขั้นพื้นฐานที่สุดที่จะใช้ทำความเข้าใจในตัวสถาปัตยกรรมเอง

8.1.2 ข้อมูลเชิงตัวเลข (numerical information) เช่น ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวัดระยะ ไม่ว่าจะเป็นความยาว ความกว้าง ความสูงหรือสัดส่วนของอาคาร ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเวลา หรือข้อมูลเชิงพื้นที่ เช่น ค่าละติจูด ลองติจูด ซึ่งบอกตำแหน่งอาคารอ้างอิงกับระบบภูมิศาสตร์โลก (GIS)

8.1.3 ข้อมูลที่เป็นภาพสองมิติ (visual information) เช่น ภาพวาด ภาพถ่าย ภาพเขียนทางสถาปัตยกรรม เช่น ผัง รูปด้าน รูปตัด รวมถึงรูปแทนข้อมูลแบบอื่น ๆ เช่น แผนภาพ (diagram) แผนภูมิ (chart, graph)

8.1.4 ข้อมูลสามมิติ เช่น พอยต์คลาวด์จากการสแกนอาคาร หรือแบบจำลองสามมิติ ที่ถูกสร้างขึ้นผ่านเทคนิคหรือวิธีต่าง ๆ

ข้อมูลเหล่านี้ต้องพึ่งพาการจัดการฐานข้อมูลอย่างมีระบบและใช้กระบวนการที่เหมาะสมในการบริหารจัดการ ระบบที่จะทำหน้าที่ในการนำเสนอข้อมูลเหล่านี้จะต้องรองรับการนำเสนอที่หลากหลายได้อย่างครอบคลุม

8.2 โครงสร้างและฐานข้อมูลของระบบ

ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยสองส่วนประกอบหลัก

8.2.1 ฐานข้อมูล MySQL ใช้เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอาคารทั้งหมด ทั้งข้อมูลสองมิติ ข้อมูลสามมิติ ข้อมูลเชิงพรรณนาบรรยาย เป็นฐานข้อมูลออนไลน์ที่เข้าถึงและจัดการได้ง่าย สามารถทำการอัพเดทข้อมูลให้ทันสมัยได้ตลอดเวลา และนำเสนอองค์ความรู้แบบไดนามิก อีกทั้งยังสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งเชิงพื้นที่และเวลา (spatio-temporal information) ได้อีกด้วย

8.2.2 อินเตอร์เฟส เป็นสื่อกลางในการสื่อสารข้อมูลกับผู้ใช้งานระบบ แสดงผลบนบราวเซอร์ของผู้ใช้งาน ประกอบไปด้วย 2 ส่วนย่อย

– หน้า PHP สำหรับนำเสนอข้อมูลเชิงอักษร และข้อมูลสองมิติ (ภาพถ่าย ภาพวาด ภาพเขียนทางสถาปัตยกรรม) และใช้เป็นตัวกลางสื่อสารข้อมูลกับฐานและฉากสามมิติ ภาษา PHP นั้น เป็นภาษาทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายบนอินเตอร์เน็ต มีบราวเซอร์ที่รองรับมากมายใช้นำเสนอข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Dynamic Information) ผ่านการสื่อสารไปยังเซิร์ฟเวอร์ได้เป็นอย่างดี

– ฉากสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ทันที สำหรับการนำเสนอแบบจำลองอาคาร พัฒนาด้วย Virtools DEV ซึ่งเป็นภาษาในการพัฒนาระบบบนเกมเอนจิ้นสามมิติ 3DVIA Virtools ซึ่งรองรับหรือทำงานกราฟิกแบบตอบสนองทันที มีความสามารถในการแสดงผลแบบสองมิติและสามมิติ สามารถจัดการกับฐานข้อมูลทั้งภายในและภายนอกระบบได้ มีศักยภาพในการนำเสนอวัตถุสามมิติผ่านทางบราวเซอร์เพื่อสร้างเป็นสื่อออนไลน์ได้ เปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานระบบเดินเข้าชมอาคารแบบ Walkthrough พร้อมทั้งมีปฏิสัมพันธ์กับแบบจำลอง โดยผู้ใช้งานระบบสามารถดาวน์โหลด 3DVIA Player ซึ่งเป็น Plug-in บนบราวเซอร์มาใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

องค์ประกอบทั้งสามสามารถสื่อสารกันได้ผ่านทางคำสั่งด้วยภาษาเฉพาะทางคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 12) การสื่อสารระหว่างฐานข้อมูล MySQL กับหน้า PHP จะใช้ภาษาสอบถามเชิงโครงสร้าง SQL เป็นสื่อกลาง ซึ่งเป็นภาษาสอบถามที่นิยมมากที่สุดของการจัดการ สร้าง แก้ไข และเรียกใช้ฐานข้อมูล ส่วนการสื่อสารระหว่างหน้า PHP กับฉากสามมิติจะใช้ JavaScript ในการส่งค่าตัวแปรและคำสั่งปฏิบัติการ

8.3 การใช้งานระบบ

การทำงานของระบบที่คณะวิจัยพัฒนาขึ้น ได้คำนึงถึงรูปแบบการใช้งานที่เหมาะสม เข้าใจง่ายและเอื้อประโยชน์ให้แก่ผู้ใช้งานระบบได้เข้าถึงข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด แบ่งการใช้งานระบบเป็น 5 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่

8.3.1 การควบคุมกล้อง

ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการควบคุมกล้องได้ 2 แบบ เพื่อประสิทธิภาพในการรับชมอาคารในสิ่งแวดล้อมเสมือนและความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูล (รูปที่ 13)

– การควบคุมกล้องแบบ Walkthrough เป็นการควบคุมกล้องแบบมุมมองบุคคลที่หนึ่ง (First-person perspective) แสดงผลจากมุมมองของตัวละครของผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมเสมือน โดยใช้คีย์บอร์ดควบคุมการเคลื่อนที่ของกล้องและใช้เมาส์ควบคุมทิศทางของกล้อง การควบคุมกล้องแบบนี้จะสร้างความรู้สึกเสมือนว่าผู้ใช้งานระบบได้เข้าไปเดินรับชมอาคารเสมือนด้วยมุมมองที่ใกล้เคียงการมองอาคารในโลกจริง อีกทั้งยังมีลักษณะคล้ายกับการควบคุมกล้องในเกมคอมพิวเตอร์สามมิติทั่วไป ทำให้ผู้ใช้งานที่มีประสบการณ์ในการเล่นเกมมาก่อนสามารถเข้าใจการใช้งานได้ไม่ยากนัก

– การควบคุมกล้องแบบ Camera Orbit เป็นการควบคุมมุมมองโดยให้กล้องโคจรรอบและหันหาวัตถุที่เลือกผ่านใช้การคลิกและลากเมาส์ ผู้ใช้งานระบบสามารถเลือกวัตถุในฉากสามมิติตามต้องการ ระบบจะทำการเคลื่อนที่เป้าหมายกล้องไปยังวัตถุที่เลือกโดยอัตโนมัติ และทำการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของกล้องผ่านค่าตำแหน่งสองมิติของเมาส์ การควบคุมกล้องแบบนี้มีลักษณะคล้ายการทำงานบนโปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติทั่วไป ผู้ใช้งานระบบที่เคยใช้งานโปรแกรมลักษณะนี้ (เช่น นักศึกษาในสาขา

วิชาสถาปัตยกรรม หรือสถาปนิก) จะสามารถทำความเข้าใจได้ดี อีกทั้งเป็นการควบคุมกล้องที่ช่วยให้เข้าถึงข้อมูลที่ต้องการได้รวดเร็ว แต่ไม่ได้เน้นความเสมือนจริงในด้านมุมมองการรับชม

ผู้ใช้งานระบบสามารสับเปลี่ยนวิธีควบคุมกล้องทั้งสองไปมาได้ตามต้องการผ่านปุ่ม Camera Mode บนหน้าจอ และควบคุมความกว้างขององศามุมมอง (Angle of view) ผ่านแถบเลื่อน (slider bar)

8.3.2 การแสดงผลแบบจำลองสามมิติ

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบในส่วนการแสดงผลให้ผู้ใช้งานระบบสามารถเลือกการนำเสนอแบบจำลองได้สามรูปแบบตามความต้องการ โดยผู้ใช้งานระบบสามารถคลิกเลือกรูปแบบต่าง ๆ ได้ผ่านปุ่มบนหน้าอินเตอร์เฟส รูปแบบทั้งสาม ได้แก่

– การแสดงผลแบบจำลองสามมิติแบบปรกติ แสดงผลแบบจำลองแบบทึบตัน พร้อมด้วยพื้นผิวของแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นจากภาพถ่าย (Texture Mapping) เหมาะสำหรับการนำเสนออาคารที่เสมือนจริง ให้ผู้ใช้งานระบบได้สำรวจอาคารในสภาพปัจจุบัน (รูปที่ 14 ภาพซ้าย)

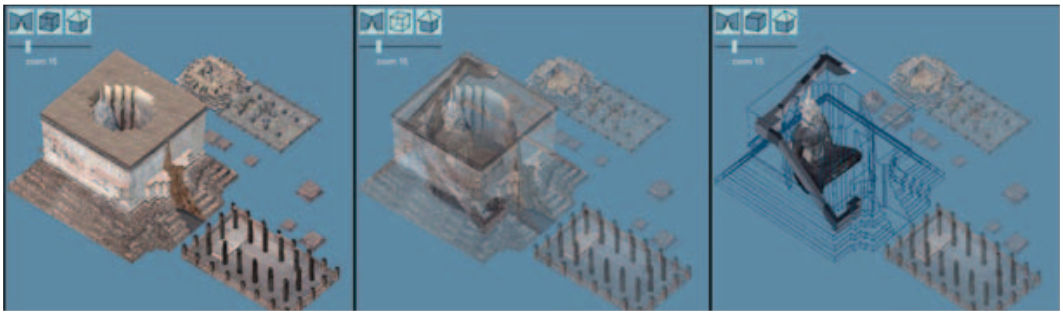
– การแสดงผลแบบจำลองสามมิติแบบโปร่งแสง (Transparent) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างภายในอาคาร (เช่น ช่องทางของอุโมงค์ที่ซ่อนอยู่ในมณฑป) กับรูปทรงอาคารภายนอก (รูปที่ 14 ภาพกลาง)

– การแสดงผลแบบจำลองสามมิติแบบโครงร่างไวร์เฟรม (Wireframe) ใช้เพื่อนำเสนอโครงสร้างภายในและภายนอกอาคาร โดยให้ความสำคัญกับโครงสร้างภายในมากกว่าภายนอก การแสดงผลแบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้งานระบบได้สำรวจช่องอุโมงค์ได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 14 ภาพขวา)

8.3.3 การแสดงรายละเอียดของอาคารแต่ละส่วน

การใช้งานส่วนนี้ของระบบเป็นกระบวนการใช้ข้อมูลสามมิติให้เป็นช่องทางในการเข้าถึงข้อมูลทางสถาปัตยกรรมประเภทอื่น ๆ เช่น ข้อมูลเชิงความหมายและข้อมูลเชิงอักษรขององค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม เมื่อผู้ใช้ระบบเอาเมาส์วางตามส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลองสามมิติของอาคาร ระบบจะเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลและแสดงชื่อขององค์ประกอบของอาคารนั้น ๆ ตามตำแหน่งของเมาส์อย่างอัตโนมัติ เมื่อผู้ใช้ระบบคลิกเลือกอาคารส่วนต่างๆ เพื่อเปิดดูข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอาคารส่วนนั้น ๆ จากฐานข้อมูล ฉากสามมิติจะเปลี่ยนสีพื้นผิวของอาคารส่วนที่ถูกเลือก และส่งคำสั่ง JavaScript ไปยังหน้า PHP เพื่อเชื่อมต่อไปยังฐานข้อมูลผ่านภาษา SQL ระบบจะตอบรับโดยนำเสนอข้อมูลที่เชื่อมโยงกันสองประเภท ได้แก่ ข้อมูลเชิงอักษรและข้อมูลภาพสองมิติบนหน้าอินเตอร์เฟส เนื้อหาที่นำเสนอจะเกี่ยวข้องกับอาคารส่วนที่เลือก เช่น ประวัติ ลักษณะทางกายภาพ สภาพปัจจุบัน ความสำคัญ ฯลฯ (รูปที่ 15)

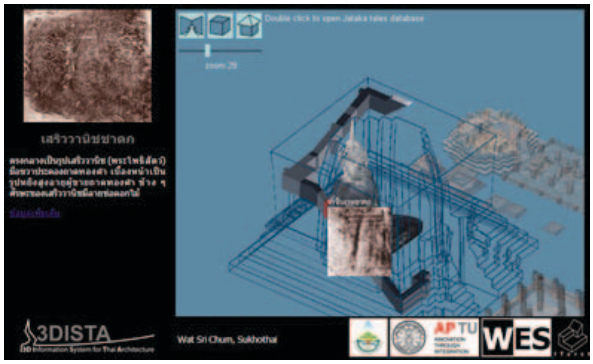
รูปที่ 13 การควบคุมกล้องบนพื้นที่สามมิติแบบ Walkthrough (ซ้าย) และ Camera Orbit (ขวา)



รูปที่ 14 การแสดงผลแบบจำลองสามมิติแบบปรกติ แบบโปรงแสง และแบบโครงร่างไวร์เฟรม

8.3.4 การแสดงรายละเอียดของอุโมงค์

จารึกชาดกต่าง ๆ และจารึกรอยพระพุทธบาทบนแผ่นหินดินดานที่ผนังและเพดานอุโมงค์วัดศรีชุม มีทั้งสิ้น 52 ชิ้น แบบจำลองอุโมงค์วัดศรีชุมได้ถูกตัดแบ่งส่วนตามช่วงของจารึกเหล่านี้ คณะผู้วิจัยได้จัดทำฐานข้อมูลภายในระบบที่เชื่อมต่อกับจารึกแต่ละชิ้น โดยเมื่อผู้ใช้งานระบบเอาเมาส์วางตามส่วนต่าง ๆ ของอุโมงค์ที่มีจารึกอยู่ ระบบจะทำการดาว์นโหลดภาพของจารึกแต่ละชิ้นจากฐานข้อมูลและแสดงผลที่ตำแหน่งเมาส์บนอินเตอร์เฟสสามมิติอย่างอัตโนมัติ เมื่อผู้ใช้งานระบบคลิกเลือกจารึกชาดกที่ต้องการ ฉากสามมิติจะส่งคำสั่ง JavaScript ไปยังหน้า PHP เพื่อเชื่อมต่อไปยังฐานข้อมูล ระบบจะนำเสนอภาพและข้อมูลของชาดกที่เลือกบนหน้าเวบ ข้อมูลเหล่านี้ ได้แก่ ชื่อชาดก คำอธิบายภาพ และเนื้อหาชาดกโดยสังเขป (รูปที่ 16) การใช้งานในส่วนนี้ยังเชื่อมต่อไปยังฐานข้อมูลภายนอกระบบได้อีกด้วย ซึ่งผู้ใช้งานระบบสามารถคลิกเพื่อเปิดอ่านข้อมูลเชิงลึกของแต่ละจารึกที่เลือกบนฐานข้อมูลจารึกในประเทศไทย ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร องค์การมหาชน



รูปที่ 16 รูปแบบการใช้งานเพื่อนำเสนอรายละเอียดของอุโมงค์และจารึกชาดก

8.3.5 การแสดงแบบจำลองภาพสันนิษฐานของอาคาร

การใช้งานส่วนนี้ของระบบ ผู้ใช้งานระบบสามารถคลิกที่ปุ่มบนอินเตอร์เฟสสามมิติเปิดปิดแบบจำลองของภาพสันนิษฐานอาคารได้ตามต้องการ โดยแบบจำลองของภาพสันนิษฐานจะซ้อนทับอยู่บนสภาพปัจจุบันของอาคาร การแสดงผลของพื้นผิวสามมิติจะขึ้นอยู่กับวิธีควบคุมกล้องของผู้ใช้งาน กล่าวคือ เมื่อผู้ใช้งานอยู่ในวิธีควบคุมกล้องแบบ Walkthrough ระบบจะนำเสนอแบบจำลองของส่วนสันนิษฐานด้วยพื้นผิวแบบโปร่งแสง และเมื่อผู้ใช้งานอยู่ในวิธีควบคุมกล้องแบบ Camera Orbit ระบบจะนำเสนอแบบจำลองของส่วนสันนิษฐานด้วยพื้นผิวแบบทึบแสง ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมและง่ายต่อการรับชมสภาพอาคารที่ถูกซ้อนทับกันอยู่ ในระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นนี้ ทางคณะผู้วิจัยได้เลือกภาพสันนิษฐานวัดศรีชุมจาก ศาสตราจารย์ ดร. สันติ เล็กสุขุม เป็นแนวทางทดลองความเป็นไปได้และทราบถึงประสิทธิภาพในการสื่อสารข้อมูลเมื่อทำการซ้อนทับภาพสันนิษฐานเข้ากับสภาพอาคารจริงในปัจจุบัน (รูปที่ 17)

ในอนาคตทางผู้วิจัยมุ่งหวังจะนำภาพสันนิษฐานสภาพวัดศรีชุมจากหลากหลายผู้เชี่ยวชาญหลากหลายที่มานำเสนอ โดยใช้รูปแบบการแสดงผลแบบซ้อนชั้น (layer) เพื่อสร้างความเข้าใจต่อรูปทรงทางสถาปัตยกรรมในอดีตให้แก่ผู้ใช้งานได้มากที่สุด

รูปที่ 17 รูปแบบการใช้งานเพื่อนำเสนอภาพสันนิษฐานของอาคาร

9. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

รายงานผลการวิจัยนี้ได้นำเสนอ ทบทวนและประยุกต์ใช้กระบวนการในการเก็บและจัดการข้อมูลทางสถาปัตยกรรมด้วยเทคโนโลยีใหม่ เพื่อเป็นการอนุรักษ์อาคารที่มีคุณค่าและเก็บข้อมูลเหล่านี้ไว้ในรูปแบบของสารสนเทศดิจิตอล และพัฒนาระบบแสดงข้อมูลของโบราณสถานไทยโดยใช้วัดศรีชุมเป็นพื้นที่ทดลองสำหรับระบบต้นแบบ ระบบสารสนเทศสามมิติแบบมีปฏิสัมพันธ์ทันที ซึ่งเป็นผลลัพธ์นี้เป็นตัวแปรต้นของงานวิจัยที่สามารถนำเสนอข้อมูลที่มีความหลากหลายทั้งที่มาและรูปแบบ สำหรับรูปแบบการใช้งานต่าง ๆ ภายในระบบได้ถูกออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับรู้และเข้าใจข้อมูลทางโบราณสถานไทยอันเป็นตัวแปรตามของงานวิจัย โดยมีเป้าหมายที่จะสร้างความตระหนักในคุณค่ามรดกทางวัฒนธรรมให้แก่ผู้ใช้งาน ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการนี้สามารถตอบรับกับจุดประสงค์และกรอบความคิดของงานวิจัยได้ และทางคณะผู้วิจัยได้มองเห็นแนวทางที่สามารถพัฒนาต่อไปได้ในการวิจัยในอนาคต ดังนี้

9.1 ข้อเสนอแนะในแง่การขยายขอบเขตพื้นที่โครงการ

ในขั้นตอนการลงพื้นที่เก็บข้อมูลทางกายภาพ ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการสแกนและเก็บข้อมูลด้วยภาพถ่ายโบราณสถานสองแห่งในเขตอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย คือวัดศรีชุมและวัดมหาธาตุ โดยที่วัดศรีชุมได้ถูกคัดเลือกให้เป็นพื้นที่ทดลองสำหรับระบบต้นแบบ แต่วัดมหาธาตุเองก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน เนื่องจาก เป็นวัดหลวงโบราณขนาดใหญ่ที่สำคัญของกรุงสุโขทัยมาแต่อดีต นับเป็นโบราณสถานที่สำคัญและมีสิ่งปลูกสร้างมากที่สุดของสุโขทัย โดยมีเจดีย์รายนับได้ถึง 200 องค์ อีกทั้งยังมีส่วนที่เป็นกรุพระโบราณที่ขุดค้นพบพระองค์สำคัญปัจจุบันถูกเก็บรักษาไว้ที่พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติรามคำแหง ลักษณะทางกายภาพเช่นนี้ จึงทำให้วัดมหาธาตุมีความน่าสนใจที่จะถูกนำมาใช้เป็นโครงการต่อไปในอนาคต โดยสามารถใช้แบบจำลองสามมิติมานำเสนอสภาพอาคารและกรุที่ประกอบขึ้นใหม่บนสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Reconstruction) เป็นการใช้แนวความคิดในการแสดงข้อมูลที่คนทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงได้ผ่านแบบจำลองสามมิติเช่นเดียวกับวัดศรีชุม และหากงานวิจัยนี้มีพื้นที่โครงการและข้อมูลเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ไม่จำกัดเฉพาะวัดศรีชุมและวัดมหาธาตุ แต่อาจรวมถึงโบราณสถานอื่นในเขตสุโขทัย ระบบที่พัฒนาขึ้นก็จะเป็นฐานข้อมูลด้านองค์ความรู้ทางโบราณสถานที่สำคัญ และเป็นตัวอย่างหรือแนวทางนำร่องที่ดีในการที่หน่วยงานต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการท่องเที่ยวจะได้นำรูปแบบการจำลองงานสถาปัตยกรรมไปพัฒนาและยกระดับการท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ของสถาปัตยกรรม โบราณสถานและพื้นที่ที่เป็นมรดกทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมของชาติต่อไป

9.2 ข้อเสนอแนะในแง่การนำเสนอรูปแบบข้อมูล

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำเสนอข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอาคารได้หลากหลาย แต่ในอนาคตทางคณะผู้วิจัยยังคาดหวังว่าจะสามารถพัฒนาระบบที่สามารถนำเสนอประเภทข้อมูลที่ครอบคลุมได้มากขึ้น การนำเสนอข้อมูลดังกล่าว ได้แก่

- การนำเสนอรูปแบบสันนิษฐานจากหลากหลายที่มาหรือหลากหลายผู้เชี่ยวชาญทางโบราณคดี โดยใช้รูปแบบการแสดงผลแบบซ้อนชั้น (layer) เพื่อสร้างความเข้าใจต่อรูปทรงทางสถาปัตยกรรมในอดีตให้แก่ผู้ใช้งานได้มากที่สุด
- การนำเสนอข้อมูลเชิงความหมายของแต่ละองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม ซึ่งต้องพึ่งพาเทคนิคการแยกส่วนแบบจำลอง และสร้างฐานข้อมูลคำศัพท์ทางสถาปัตยกรรมไทยประเพณี
- การนำเสนอข้อมูลด้านภูมิศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งอาคารบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ซึ่งเป็นแนวทางการศึกษาที่ได้รับความสนใจในวงกว้าง อีกทั้งยังมีเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น Google Maps ที่มี API หรือส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์มารองรับเพื่อเชื่อมต่อและเรียกใช้งานได้
- การนำเสนอข้อมูลด้านการวัดระยะอาคาร แบบจำลองอาคารที่สร้างขึ้นนั้นอ้างอิงจากพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนอาคารจริง ทำให้ระยะและสัดส่วนของอาคารนั้นสามารถวัดได้เทียบเท่ากับการสำรวจอาคารจริง รวมถึงยังสามารถทำการวัดระยะต่าง ๆ ที่ไม่สามารถทำในโลกจริงได้อีกด้วย รูปแบบการใช้งานเช่นนี้จะสามารถเอื้อประโยชน์ให้แก่ผู้ที่ต้องการศึกษาอาคารโบราณสถานได้อย่างมาก

References

Barber, D., Mills, J. & Bryan, P. (2001). Laser scanning and photogrammetry: 21st century metrology. *CIPA international symposium, 18-21 September 2001*. Germany: University of Potsdam.

Beraldin, J. A., Picard, M., El-Hakim, S. F., Godin, G., Valzano, V. & Bandiera, A. (2005). Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment. *Proceedings of SPIE, 5665*, 108-118.

Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A. & Siebold, M. (2002). 3D Scanning software: An introduction. *CIPA WG 6 international workshop on scanning for cultural heritage recording, 1-2 September 2002*. Corfu, Greece,

Buranaut, I. & Kirdsiri, K. (2014). พุทธศาสนสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา [Buddhism Vernacular Architecture in Songkhla Lake Basin]. *Journal of Architecture/Planning Research and Studies, 11*(1), 1-19.

Busayarat, C., De Luca, L., Véron, P. & Florenzano, M. (2010). Semantic annotation of heritage building photos based on 3D spatial referencing. *Proceedings of Focus K3D conference on Semantic 3D Media and Content, 11-12 February 2010*. Sophia Antipolis - Méditerranée, France.

Coedès, G. (1983). *ประชุมศิลาจารึก ภาคที่1* [Stone inscription conference Part 1]. Bangkok: Bannakit Publishing.

Corcoran, F., Demaine, J., Picard, M., Dicaire, Louis-Guy & Taylor, J. (2002). INUIT3D: An interactive virtual 3D web exhibition. *Proceedings of the Museums & Web Conference, 17-20 April 2002*. Boston, MA.

De Luca, L. (2006). Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural Méthodes, formalismes et outils pour l'observation dimensionnée d'édifices. *MIAjournal, 0*(1), 131-142.

De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., VéRon, P. & Florenzano, M. (2010). Semantic 3D media and content: A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage. *Proceedings of Focus K3D conference on Semantic 3D Media and Content, 11-12 February 2010*. INRIA Sophia Antipolis - Méditerranée, France.

Debevec, P. E., Taylor, C. J. & Malik, J. (1996). Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach. *SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 11-20.

H.S.H. Prince Diskul, S. (1985). *ศิลปะในประเทศไทย* [Arts in Thailand]. Bangkok: Amarin Printing.

Edelsbrunner, H. (2001). *Geometry and topology for mesh generation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Fine art Department. (1983a). *จารึกสมัยสุโขทัย* [Inscriptions in Sukhothai era]. Bangkok: Author.

Fine art Department. (2005b). *ประชุมจารึก ภาคที่ 8 จารึกสุโขทัย* [Inscription conference Part 8: Sukhothai inscriptions]. Bangkok: Author.

Fitzner, B. & Heinrichs, K. (2002). Damage diagnosis at stone monuments-weathering forms, Damage categories and damage indices. *Proceedings of the International Conference on Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network, Prague, The Karolinum Press*, 11-56.

Fontana, R., Gambino, M. C., Gianfrate, G., Greco, M., Marras, L. & Materazzi, M. et al. (2003). Time of flight laser scanner for architectural and archaeological applications. *Proceedings of SPIE*, 185-193.

Fontana, R., Gambino, M. C., Mazzotta, C., Greco, M., Pampaloni, E. & Pezzati, L. (2004). High-resolution 3D survey of artworks. *Proceedings of SPIE*, 719-726.

Frey, P., Sarter, B. & Gautherie, M. (1994). Fully automatic mesh generation for 3-D domains based upon voxel sets. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, 37*(16), 2735-2753.

Frey, P. J. & George, P. L. (2000). *Mesh generation: Application to finite elements*. France: Hermes Science.

García-Cortés, S., Ordóñez Galán, C., Argüelles-Fraga, R. & Menéndez Díaz, A. (2012). Automatic detection of discontinuities from 3D point clouds for the stability analysis of jointed rock masses. *Proceeding of the Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference*, 595-598.

Gürer, T.K. & Yücel, A. (2005). A study on the architectural representation as a paradigm (Turkish). *Journal of ITU, 4*(1), 84-96.

Hanke, K. & Grussenmeyer, P. (2002). Architectural photogrammetry. *Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Comm. 5*. Corfu: Greece.

Hartley, R. I. & Zisserman, A. (2004). *Multiple view geometry*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Krabuansang, S. (1977). ภาพชาดกในอุโมงค์ วัดศรีชุม เมืองสุโขทัยเก่า [Jataka inscriptions in the tunnel of Sri Chum temple, ancient Sukhothai]. *Silpakorn University Journal, 1*, 42.

Leksukhum, S. (1986). *วัตถุปูนปั้นที่ขุดค้นได้จากวัดพระพายหลวง จังหวัดสุโขทัยระหว่าง พ.ศ. 2528-2529* [Stucco objects excavated from the Phra Phai Luang temple in Sukhothai between 2528-2529 B.E.]. Bangkok: The James H.W. Thompson Foundation.

Oberlander, J., Karakatsiotis, G., Isard, A., & Androutsopoulos, I. (2008). Building an adaptive museum gallery in second life. In *Proceedings for Museums and the Web 2008: The international conference for culture and heritage on-line*, 749-753.

Panjuntumard, J. & Chakkraphatdiphong, J. (1964). *พระราชพงศาวดารกรุงศรีอยุธยาฉบับพันทานุมาศ (เจิม) กับพระจักรพรรดิพงศ์ (จาด)* [Royal chronicle of Ayutthaya kingdom by Panjuntumard (Choem) and Chak kraphatdiphong (Chat)]. Phranakhon: Khlang Witthaya.

Prombun, S. (1982). *ความสัมพันธ์ในระบบบรรณาการระหว่างจีนกับไทย* [Relationship between China and Thailand in tributary system]. Bangkok: Thai Watana Panich.

Remondino, F., Guarnieri, A. & Vettore, A. (2005). 3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning?. *Proceedings of SPIE, 5665*, 216-225.

Smith, P. W. & Sritharan, S. S. (1988). Theory of harmonic grid generation. *Complex Variables, Theory and Application: An International Journal, 10*(4), 359-369.

Snavely N. et al. (2006). Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH Proceedings. 25*(3). 835-846.

Snavely, N., Seitz, S. & Szeliski, R. (2006). Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 25*(3), 835-846.

Stefani, C., Luca, L. D. & Véron, P. (2008). Time indeterminacy and spatio-temporal building transformations: An approach for architectural heritage understanding. *Proceedings of IDMME-Virtual Concept 2008, 10–13 October 2008*. Beijing, China.

Urban, R., Marty, P. & Twidale, M. (2007). *A second life for your museum: 3D Multi-User virtual environments and museums*. Illinois, USA: Archives & Museum Informatics. .

Young, P. G., Beresford-West, T. B. H., Coward, S. R. L., Notarberardino, B., Walker, B. & Abdul-Aziz, A. (2008). An efficient approach to converting 3D image data into highly accurate computational models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, 366*, 3155-3173.