การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่าโดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ
OLD BUILDING INFORMATION MODELING CREATION BY 3D POINT CLOUD

เจษฎาพร ศรีภักดี[1*] รัตติกาล ฐานแพร่[2] ขวัญสิรี ศิริอำมาต[3] และธีรภัทร์ ทะนุก้ำ[4]
Jedsadaporn Sreepakdee[1*] , Rattikan Thanphrae[2], Kwansiree Siriammat[3] and Teerapat Tanukam[4]

สังกัด (สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา)[1*,2,3,4]
*Corresponding author. E-mail:jedsadaporn@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับอาคารเก่าโดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิตินั้น มีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติจาก Laser Scanner สร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โดยมีการเปรียบเทียบกับการสำรวจอาคารโดยใช้ตลับเมตร เทปวัดระยะ และเลเซอร์วัดระยะ รวมทั้งหาจุดแข็งและจุดอ่อนในการใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โดยในงานวิจัยได้ใช้ จาก Laser scanner เก็บข้อมูลมิติอาคาร ทั้งหมด 8 ตำแหน่ง และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเป็นข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ และนำมาสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารในโปรแกรม Autodesk Revit 2021 ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ ในการสำรวจข้อมูลอาคารแล้วนำมาสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารได้ ระดับความละเอียดเท่ากับ LOD 300 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการสำรวจข้อมูลอาคารแบบอื่นๆพบว่า ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ จะมีการกระจายตัวของชุดข้อมูลที่มากกว่าการวัดแบบอื่นเล็กน้อย โดยจุดแข็งในการใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติในการสำรวจอาคารนั้นคือมีความรวดเร็วและปลอดภัย สำหรับจุดอ่อนคือราคาสูง

คำสำคัญ: แบบจำลองสารสนเทศอาคาร เมฆจุด 3 มิติ อาคารเก่า

Abstract

Building information modeling for old building by 3D point cloud main objective was applying 3D point cloud data from laser scanner to create building information models. Compared to surveying buildings using tape measure and laser distance meter. Include find strengths and weaknesses in using 3D point cloud data to create building information models. In the research, the laser scanner was used to collect building dimensions in all 8 locations and the collected data was processed into 3D point cloud data and used to create building information models in Autodesk Revit 2021 program. From the research results, it was found that when using 3D point cloud data to survey building data, it can then be used to create building information models. The resolution level is LOD 300. Compared to other building surveys, the 3D point cloud data is slightly more distributed than other measurements. The strength of using 3D point cloud data in building surveys is that it is fast and safe. As for the weak point is the high price.

Keywords: Building information modeling, 3D Point cloud, Old Building

บทนำ

“อาคารเก่า”พบได้ในย่านหรือชุมชนดั้งเดิมซึ่งมีอยู่มากมายในประเทศไทยโดยถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ยืนยันคุณค่าทางประวัติศาสตร์ สังคม วัฒนธรรม และความเก่าแก่ของย่านชุมชนนั้นๆ และเป็นมรดกทางกายภาพที่มีความหมายทางจิตใจต่อผู้อยู่อาศัยในชุมชนแสดงออกถึงวิถีชีวิตและคติความเชื่อของคนในท้องถิ่น ภูมิปัญญาในเชิงช่างของบรรพบุรุษรวมถึงเทคโนโลยีการก่อสร้างและทรัพยากรที่หาได้ในแต่ละยุคสมัยจากการสำรวจอาคารและสิ่งปลูกสร้างเก่าแก่มากมายที่มีเอกลักษณ์และลักษณะทางศิลปสถาปัตยกรรมที่โดดเด่นเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เพียงพอจะยืนยันคุณค่าของชุมชนดั้งเดิม อย่างไรก็ดีอาคารเก่าในชุมชนเมืองกำลังอยู่ในสภาวะวิกฤต เนื่องจากมีสภาพที่เสื่อมโทรมตามกาลเวลายากต่อการดูแลรักษาให้ดำรงอยู่ ส่งผลให้มีจำนวนลดน้อยลงและถูกรื้อถอนหรือดัดแปลงจนสูญเสียบูรณภาพของอาคารดั้งเดิม โดยมิได้ดำเนินการอนุรักษ์ตามหลักวิชาการและยังไม่มีการรวบรวมและจัดระเบียบข้อมูลอาคารดังกล่าวไว้อย่างเป็นระบบ (นราธิป, 2557)

เมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2562 หัวหน้าคณะรักษาความสงบแห่งชาติ (คสช.) ได้คำสั่งหัวหน้าคณะรักษาความสงบแห่งชาติที่ 6/2562 เรื่อง“มาตรการส่งเสริมและพัฒนามาตรฐานการประกอบธุรกิจโรงแรมบางประเภท” มาตรา 44 มีประเด็นหลักที่สำคัญมากๆ คือ อนุญาตให้ผู้ที่เป็นอาคารเก่าเป็นโรงแรมสามารถทำกิจการโรงแรมในพื้นที่ผังเมืองห้ามทำโรงแรมได้โดยต้องได้รับใบอนุญาตการเปลี่ยนแปลงการใช้งานอาคารก่อนกฎหมายปี 2559 หมดอายุซึ่งกฎหมายนี้จะหมดอายุภายใน วันที่ 18 สิงหาคม 2564 ข้อนี้เป็นประเด็นหลักที่สำคัญที่สุดจึงได้มีการออกกฎหมายเพื่อดึงโรงแรมเถื่อนเหล่านี้ให้เข้าระบบให้มากที่สุด โดยเฉพาะกรณีที่เปลี่ยนอาคารเก่าประเภทอื่นมาเป็นโรงแรมจำนวนมาก วันที่ 19 สิงหาคม 2559 ได้มีการออกกฎกระทรวงว่าด้วยการเปลี่ยนอาคารประเภทอื่นเป็นโรงแรม หรือ ในวันที่ 12 มิถุนายน 2562 ได้มี 14 เรื่องการปลดล็อคผังเมืองสำหรับผู้ที่ทำโรงแรมขนาดเล็กในพื้นที่ห้ามทำโรงแรม

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร(Building Information Modeling,BIM)เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ในปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะ แบบจำลองสารสนเทศอาคารนอกจากจะเป็นแบบจำลองแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์รายละเอียดของตัวอาคารได้อย่างแม่นยำอีกด้วยซึ่ง แบบจำลองสารสนเทศอาคารเป็นเครื่องมือที่ช่วยในด้านการออกแบบ การทำแบบ วิเคราะห์วัสดุที่ใช้ เช่น เสา หน้าต่าง หรือองค์ประกอบต่างๆของอาคาร เป็นต้น ดังนั้น แบบจำลองสารสนเทศอาคารจึงสามารถสร้างข้อมูลรายละเอียดของอาคารได้ การได้มาของข้อมูลในการสร้างแบบจำลองสามมิตินั้นมีหลายวิธี ซึ่งหนึ่งในวิธีนั้นคือการได้มาของข้อมูลในรูปแบบของรูปภาพ โดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ จาก Laser Scanner ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลอาคารที่มีขนาดใหญ่ได้

จากการศึกษารวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเห็นได้ว่า การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยการบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับมีผลอย่างมากต่อความครบถ้วนและความถูกต้องของแบบจำลองสามมิติของโบราณสถาน นอกจากนี้แบบจำลองสามมิติของโบราณสถานจากการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับนั้นสามารถสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารโบราณสถานได้(ญาสุมินท์,2563) ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติสามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับสถาปัตยกรรมไทยได้(กวีไกร,2562) การเก็บข้อมูลแบบพอยท์คลาวด์สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพงานก่อสร้างได้(ศักดินนท์ และวัชระ,2564) โดยสามารถเขียนโปรแกรมให้มีการทำงานร่วมกันระหว่างแบบจำลองสารสนเทศอาคารและข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ(Jingbin L., Dong X., Juha H., Yifan L. ,2021) โดยการเขียนโปรแกรมนั้นทำให้แสดงข้อมูลได้ทันที(Christopher R., Carl H. ,2021) ซึ่งสามารถที่จะนำมาใช้ในการติดตามงานก่อสร้าง รวมทั้งการจำลองแบบสารสนเทศอาคารที่สร้างเสร็จแล้ว(Pingbo T., Daniel H., Burcu A., Robert L., Alan L., 2010)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่า โดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ จาก Laser Scanner กรณีศึกษาอาคารโรงฝึกงานก่อสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าการวัดระหว่างที่ได้จากข้อมูลเมฆจุด 3 มิติกับการวัดรูปแบบอื่นๆ
3. เพื่อหาค่าจุดแข็งและจุดอ่อนในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่า โดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ

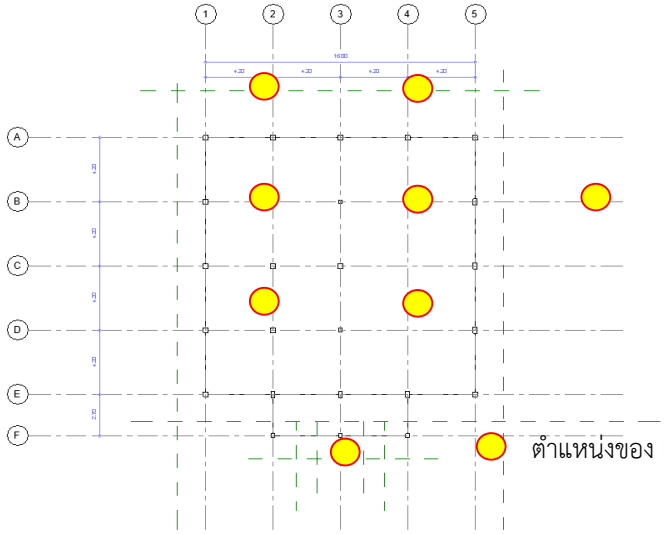
กรอบแนวคิดการวิจัย

ตัวแปรต้น รูปแบบการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่า
ตัวแปรตาม ข้อมูลแบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่า

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เก็บข้อมูลมิติอาคารจาก Laser scanner รุ่น Trimble X7 Scanner มีลักษณะดังภาพที่ 1 โดยตั้งตำแหน่งของ Laser scanner ทั้งหมด 8 ตำแหน่งดังภาพที่ 2

ภาพที่ 1 ภาพ Laser scanner รุ่น Trimble X7 Scanner

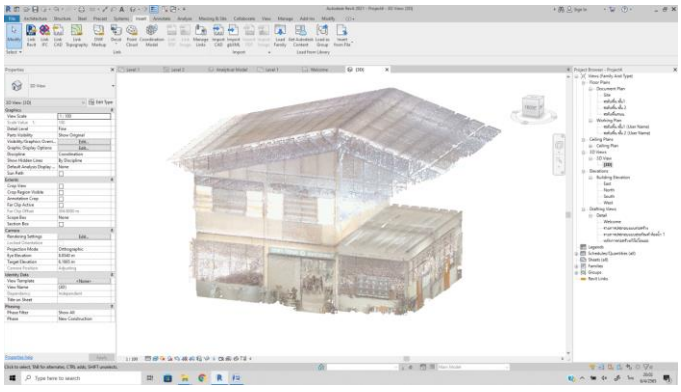


ภาพที่ 2 ภาพตำแหน่งของ Laser scanner

2. นำข้อมูลที่ได้จาก Laser scanner มาประมวลผลจะได้รูปแบบดังภาพที่ 3

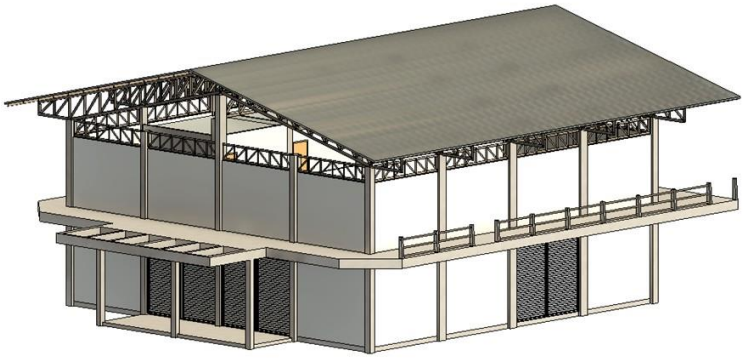
ภาพที่ 3 ภาพจาก Laser scanner ที่ประมวลผลแล้ว

3. นำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเป็น ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติแล้วนำเข้าสู่โปรแกรม Autodesk Revit 2021 เพื่อสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารดังภาพที่ 4



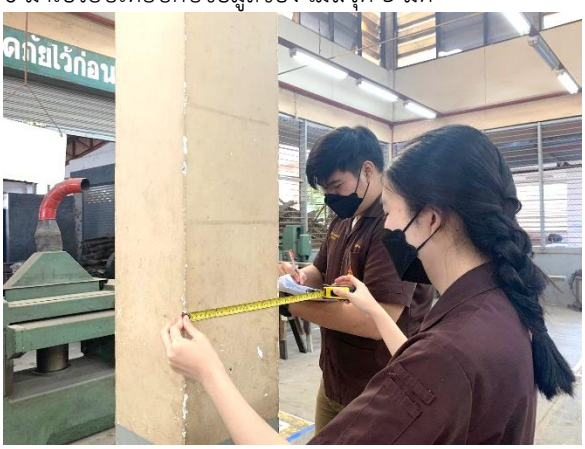
ภาพที่ 4 ภาพข้อมูลเมฆจุด 3 มิติในโปรแกรม Autodesk Revit 2021

4. สร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดย โปรแกรม Autodesk Revit 2021 ได้แบบจำลองสารสนเทศอาคารดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ภาพแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

5. ทำการสำรวจระยะต่างๆของอาคารด้วยวิธีการอื่นๆเช่น ตลับเมตร เทปวัดระยะ และ เลเซอร์วัดระยะทางดังภาพที่ 6 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของ เมฆจุด 3 มิติ



ภาพที่ 6 ภาพการสำรวจระยะด้วยตลับเมตร

สรุปผลการวิจัย

1. แบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่า โดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ จาก Laser Scanner พบว่าข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ สามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารได้ โดยมีเกณฑ์ของระดับความละเอียดเท่ากับ LOD 300 คือ จะมีปริมาณ ขนาดรูปร่าง ตำแหน่ง และทิศทางที่แน่นอน โดย มีพื้นที่ใช้สอยอาคารทั้งหมด 587.16ตารางเมตร จากข้อมูลสารสนเทศอาคาร

2. ค่าเปรียบเทียบค่าการวัดระหว่างที่ได้จากข้อมูลเมฆจุด 3 มิติกับการวัดรูปแบบอื่น ๆ

2.1 ขนาดเสา โดยการวัดขนาดของเสา โดยใช้ ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ และ ตลับเมตร เป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลซึ่งได้ผลดังตารางที่ 1 เห็นได้ว่าขนาดเสาจากการสำรวจทั้ง 2 วิธีมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกลุ่มของการวัดโดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ มีค่าการกระจายของข้อมูลสูงสุดโดยพิจารณาจากค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 1 ขนาดเสา

ตำแหน่ง	การวัดขนาดเสาโดยตลับเมตร (ม.)		การวัดขนาดเสาโดยข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ (ม.)	
	กว้าง	หนา	กว้าง	หนา
ขนาดเสา C1 0.25 x 0.25ม.				
B3	0.253	0.254	0.256	0.255
D3	0.250	0.253	0.257	0.256
ค่าเฉลี่ย	0.252	0.254	0.256	0.256
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	0.002	0.001	0.001	0.001
ขนาดเสา C2 0.25x 0.40ม.				
C5	0.256	0.392	0.256	0.411
D5	0.254	0.380	0.260	0.403
E2	0.254	0.40	0.257	0.400
E3	0.257	0.40	0.255	0.420
E4	0.252	0.397	0.253	0.402
ค่าเฉลี่ย	0.255	0.394	0.256	0.407
ค่าส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	0.002	0.008	0.003	0.008
ขนาดเสา C3 0.30x 0.30ม.				
A3	0.301	0.301	0.320	0.304
A4	0.303	0.301	0.331	0.309
E1	0.300	0.303	0.311	0.310
E5	0.305	0.304	0.300	0.307
ค่าเฉลี่ย	0.302	0.302	0.316	0.308
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	0.002	0.002	0.013	0.003

2.1 ระยะห่างเสา การวัดระยะห่างของเสาใช้เครื่องมือวัด ได้แก่ เทปวัดระยะ เลเซอร์วัดระยะ และข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลตามตารางที่ 2 เห็นได้ว่าระยะห่างเสาจากการสำรวจทั้ง 3 วิธีมีระยะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกลุ่มของการวัดโดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ มีค่าการกระจายของข้อมูลสูงสุดโดยพิจารณาจากค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2 ระยะห่างเสา

ตำแหน่ง	ระยะห่าง (ม.)		
	เทปวัดระยะ	เลเซอร์วัดระยะ	ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ
A3-A4	4.23	4.24	4.21
A4-A5	4.22	4.23	4.25
E2-E3	4.23	4.23	4.24
E3-E4	4.23	4.21	4.24

A3-B3	4.21	4.22	4.22
A5-B5	4.23	4.23	4.22
B3-C3	4.22	4.24	4.24
B5-C5	4.21	4.22	4.24
ค่าเฉลี่ย	4.22	4.23	4.23
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	0.009	0.011	0.014

2.2 ความสูงเสา การวัดความสูงของเสา โดยใช้เครื่องมือวัด ได้แก่ เลเซอร์วัดระยะ และ ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลตามตารางที่ 3 เห็นได้ว่าระยะห่างเสาจากการสำรวจทั้ง 2 วิธีมีระยะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกลุ่มของการวัดโดยใช้เลเซอร์วัดระยะ มีค่าการกระจายของข้อมูลสูงสุดโดยพิจารณาจากค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเกิดจากการวัดระยะในแนวดิ่งที่มีความผิดพลาดสูง

ตารางที่ 3 ความสูงเสา

ตำแหน่ง	เลเซอร์วัดระยะ (ม.)	3D LaserScanner (ม.)
A2	3.50	3.50
A3	3.49	3.48
A4	3.52	3.52
B2	3.47	3.47
B3	3.48	3.49
C2	3.46	3.49
C3	3.49	3.49
D2	3.54	3.52
D3	3.46	3.44
E2	3.45	3.48
E3	3.46	3.47
E4	3.46	3.48
ค่าเฉลี่ย	3.48	3.49
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	0.027	0.022

3. จุดแข็งและจุดอ่อนในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารเก่า โดยใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ จากการทดลองพบว่า จุดแข็งของการสำรวจอาคารด้วยข้อมูล เมฆจุด 3 มิติ คือ สามารถสำรวจข้อมูลอาคารได้ในตำแหน่งที่เข้าถึงยากเช่น โครงสร้างหลังคาโดยไม่ต้องทำการติดตั้งนั่งร้านทำให้มีความรวดเร็วและปลอดภัย สำหรับจุดอ่อนในการสำรวจอาคารด้วยข้อมูล เมฆจุด 3 มิติ คือ เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจมีราคาสูงทั้งอุปกรณ์สำรวจ คอมพิวเตอร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โดยจุดเด่นของการใช้ตลับเมตร เทปวัดระยะ และเลเซอร์วัดระยะคือ มีราคาที่ถูก สามารถวัดได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่พิเศษเพิ่มเติม แต่มีข้อจำกัดในบริเวณที่เข้าถึงยากเช่นโครงสร้างหลังคาที่ไม่สามารถวัดได้ในการใช้ข้อมูล

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลงานวิจับพบว่าการใช้ข้อมูลเมฆจุด 3 มิติ มาสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารนั้นสามารถทำได้ โดยข้อมูลที่ได้มาจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับการวัดในรูปแบบอื่นๆทำให้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ กวีไกร(2562) ซึ่งได้บอกไว้ในงานวิจัยว่า ข้อมูลกลุ่มเมฆจุด 3 มิติสามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับสถาปัตยกรรมไทยได้ โดยที่จุดเด่นในการใช้ ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ นั้นคือ มีความรวด เร็ว และปลอดภัย แต่เหมาะกับอาคารที่ไม่มีความซับซ้อนมาก เพราะถ้าอาคารมีความซับซ้อนจะต้องทำการตั้งจุดของLaser scanner ให้ครอบคลุมพื้นที่

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยใช้ข้อมูลกลุ่มเมฆจุด 3 มิติ นั้นมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. เพิ่มประสิทธิภาพของจำนวนจุดเมฆ 3 มิติหรือเพิ่มความละเอียดเพื่อให้ แบบจำลองสารสนเทศอาคารมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ควรมีการเก็บข้อมูลวัสดุของอาคารร่วมด้วยเพื่อเพิ่มความละเอียด(LOD) ของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายวิชชุ อาหาสิเม ผู้จัดการส่วนบริหารที่ดิน บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ผู้ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

นราธิป ทับทัน. (2557). การจัดทำฐานข้อมูลอาคารที่ควรค่าแก่การอนุรักษ์ในชุมชนเมืองขลุง จังหวัดจันทบุรี. *วารสาร สถาบัน วัฒนธรรม และ ศิลปะ*, 16(1), 31-46.

ญาสุมินท์ ใจกว้าง. (2563). *การสร้างแบบจำลองสามมิติของโบราณสถานสำหรับแบบจำลองสารสนเทศอาคารโบราณสถาน(H-BIM) ด้วยการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาภูมิศาสตร์). มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

กวีไกร ศรีหิรัญ. (2555). การสร้างข้อมูลองค์ประกอบสถาปัตยกรรมไทยในแบบจำลองสารสนเทศอาคารจากข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติที่ได้จากเทคโนโลยีเลเซอร์สแกน. *วารสารวิชาการสถาปัยกรรมศาสตร์*, 70(2563), 55-66.

ศักดินนท์ นพฤทธิ์ และวัชระ เพียรสุภาพ. (2564). การประยุกต์ใช้ข้อมูลพอยท์คลาวด์เพื่อสนับสนุนการตรวจสอบคุณภาพ. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Jingbin L., Dong X., Juha H., Yifan L. (2021). A Survey of Applications With Combined BIM and 3D Laser Scanning in the Life Cycle of Buildings. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING, VOL. 14, 2021, 5627-5637.

Christopher R., Carl H. (2021). Automated shape and pose updating of building information model elements from 3D point clouds. Automation in Construction 124 (2021), 1-14.

Pingbo T., Daniel H., Burcu A., Robert L., Alan L. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. Automation in Construction 19 (2010), 829-843.