



การศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง 3 มิติที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพระยะใกล้ด้วย
ด้วยกล้องแอคชั่นและกล้องแบบคอมแพค

COMPARATIVE STUDY OF ACCURACY OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OBTAINED FROM
CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY USING ACTION CAMERA AND COMPACT CAMERA

นิยม เชาว์เครือ¹, ชาติชาย ไวยสุระสิงห์^{2*}, ปิยะวัชร ฝอยทอง², ปริญญ์ จินดาประเสริฐ³ และชุตินา ไวยสุระสิงห์⁴

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² รองศาสตราจารย์, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ ศาสตราจารย์, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ อาจารย์, คณะศิลปศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

*Correspondent author, E-mail: fcecw@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการเปรียบเทียบการใช้กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นและแบบคอมแพคสำหรับการย้อนรอยสร้างแบบจำลองสามมิติของวัตถุใด ๆ ด้วยเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ โดยใช้แบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ที่เสนอแนะโดย Abdel-Aziz [1] ซึ่งได้มีการใช้สัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีถึงระดับ K3 ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมีระดับความถูกต้องประมาณ ± 8.7 เซนติเมตร ในขณะที่กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคมีความถูกต้องที่สูงถึง ± 0.2 เซนติเมตร ซึ่งนับเป็นความแตกต่างทางความถูกต้องในระดับที่มีนัยสำคัญที่สูงมาก และผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ได้บ่งชี้ถึงข้อเสนอของการศึกษาวิจัยในอนาคตที่ควรที่จะพัฒนาแบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีให้มีค่าความระบุดของการปรับแก้ที่สูงขึ้นเพื่อให้ในอนาคตกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นสามารถมาใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรมต่อไป ในขณะที่ผลการวิจัยยังพบต่อไปว่า กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคสามารถให้ความถูกต้องที่สูงมาก ซึ่งสะท้อนว่า หากกล้องถ่ายภาพได้รับการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบอย่างเหมาะสมจะให้ผลลัพธ์ในเชิงวิศวกรรมที่น่าสนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไปได้

คำสำคัญ: การวัดสอบกล้องดิจิทัล; แบบจำลองสามมิติ; ความเพี้ยนของเลนส์; พารามิเตอร์การบิดภาพภายใน

ABSTRACT

For 3D object-model reconstruction using close-range photogrammetric technique, this research study compared the applicability of action and compact cameras by employing the lens distortion model established by Abdel-Aziz [1] up to the K3 radial distortion coefficient level. The findings demonstrate that the action camera exhibited an accuracy level of ± 8.7 centimeters, while the

Niyom Chaokhruea¹, Chattichai Waisurasingha^{2*}, Piyawat Foytong², Prinya Chindaprasit³ and Chutima Waisurasingha⁴

¹ Master Student in Civil Engineering Program, Fac. of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

² Associate Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Fac. of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

³ Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Fac. of Engineering, Khon Kaen University, Thailand.

⁴ Lecturer, Faculty of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

compact camera reached an accuracy level of ± 0.2 centimeters. The notable variation in accuracy levels highlights the considerable discrepancy between the two categories of cameras. Future research should prioritize the development of a more precise radial lens distortion model to improve the amount of rectification. These developments will enhance the use of action cameras in engineering applications. This is consistent with the suggestions of Litchi et al. [2]. Furthermore, the research emphasizes that compact cameras have the potential to attain outstanding precision. This suggests that by implementing suitable measures to remove systematic errors, these cameras may provide useful engineering outcomes and be used in diverse practical situations.

KEYWORDS: Camera Calibration; 3D Model; Lens Distortion; Interior Orientation Parameters

1. บทนำ

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 ที่กล้องถ่ายภาพดิจิทัลถูกวางตลาดครั้งแรกโดยบริษัทโซนี่ (Sony) ภายใต้ชื่อรุ่น "Sony Mavica" เป็นกล้องบันทึกภาพนิ่งในรูปแบบดิจิทัลบนแผ่นดิสก์แม่เหล็ก จนถึงวันนี้ คิดเป็นระยะเวลามากกว่าสี่ทศวรรษที่มีการเปิดตัวการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลให้กับผู้บริโภค โดยนับเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญที่ทำให้เกิดการปรับโฉมของงานสำรวจด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry) ที่เดิมเน้นไปที่การใช้กล้องผลิตเพื่อการรังวัดบนภาพถ่าย (Metric Camera) มาเป็นการใช้กล้องแบบที่ไม่ได้ผลิตสำหรับการรังวัดบนภาพถ่าย (Non-metric Camera) ผ่านการผสมผสานร่วมกันระหว่างกระบวนการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ (Camera Calibration) และเทคโนโลยีทางด้านการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ที่ทำให้การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบการจัดวางภาพภายใน (Interior Orientation Parameters: IOP) ที่เป็นกลุ่มค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการนำไปวิเคราะห์หาค่าพิกัดและการย้อนรอยสร้างแบบจำลองสามมิติของวัตถุ (3D Object-model Reconstruction) ขึ้นมาได้อย่างลงตัว ส่งผลให้กล้องดิจิทัลที่มีอยู่ทั่วไปในท้องตลาดซึ่งเป็นกล้องดิจิทัลแบบ Non-metric Camera สามารถนำประยุกต์ใช้กับงานสำรวจด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry) ได้เป็นอย่างดี [3]

เทคโนโลยีกล้องถ่ายภาพดิจิทัลได้มีวิวัฒนาการอย่างต่อเนื่องและได้มีการนำมาใช้ในวงการวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย [4] สำหรับประเทศไทยนั้น มีงานวิจัยที่ปรากฏเป็นเอกสารครั้งแรกคืองานวิจัยของ Waisurasingha [5] ได้นำเอากล้องถ่ายภาพดิจิทัลมาทำการวัดสอบและทดลองในการทดสอบขีดความสามารถในการใช้งานด้านการสำรวจด้วยภาพถ่าย โดยใช้กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพครุ่น SONY S-75 มีความละเอียดของจุดภาพ 3.34 ล้านจุดภาพ ในการรังวัดพิกัดฉาก 3 มิติของวัตถุจากการสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ (Digital Close-range Photogrammetry) ที่วิเคราะห์วัตถุขนาดไม่เกิน 20 เซนติเมตร ที่ระยะถ่ายภาพไม่เกิน 1 เมตร เพื่อศึกษาถึงขีดความสามารถในการวัดค่าพิกัดฉาก 3 มิติของวัตถุ และนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ พบว่า มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่สูงถึง ± 80 ไมครอน ภายใต้ห้องทดลองที่มีการควบคุมปัจจัยแวดล้อมอันได้แก่ แสง อุณหภูมิและความสั่นสะเทือน ทั้งนี้ [5] ได้นำเสนอถึงวิธีการวัดสอบกล้องถ่ายภาพแบบก่อนออกงาน (Pre-camera Calibration) ที่ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Fraser [3] ด้วยการถ่ายภาพแผ่นวัดสอบจำนวน 12 ตำแหน่งถ่ายภาพ ที่มีการกระจายอยู่รอบและเหนือแผ่นวัดสอบที่สร้างจากกระดาษ A4 ชนิดคุณภาพสูง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้คือ พารามิเตอร์การจัดวางภาพภายใน (Interior Orientation Parameters: IOP) ซึ่งประกอบด้วย (1) ความยาวโฟกัส (Focal length) (2) ค่าพิกัด x และ y ของจุดมยุขสำคัญ (Principal Point) บนระนาบภาพ (3) ขนาดฉากรับภาพ (4) ขนาดของจุดภาพ และ (5) ความเพี้ยนของเลนส์ทั้งในแนวรัศมีและแนวสัมผัส โดยผลลัพธ์ของงานวิจัยที่ได้นี้มี

ความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของการนำกล้องแบบ Non-metric Camera มาใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่าย ในการศึกษาภายหลัง จากนั้น Yomwan [6] ได้มีการประยุกต์วิธีการวัดสอบกล้องถ่ายภาพแบบก่อนออกงาน โดยในการวัดสอบกล้องที่ใช้เลนส์ตาปลาในการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้เพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม ทั้งนี้ในการศึกษาของ Waisurasingha [5] และ Yomwan [6] ยังคงเป็นการศึกษากล้องที่มีความละเอียดของจุดภาพอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 10 ล้านจุดภาพ

ในเวลาต่อมา อุตสาหกรรมกล้องถ่ายภาพดิจิทัลได้มีการพัฒนาให้กล้องถ่ายภาพมีความละเอียดที่สูงกว่า 10 ล้านจุดภาพ ซึ่งมีผลอย่างยิ่งต่อการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ ที่ผ่านมา Chuayhan [7] ได้มีการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคที่มีความละเอียดสูงกว่า 10 ล้านจุดภาพในการสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ที่ระยะการถ่ายภาพประมาณ 3-10 เมตร สามารถให้ความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์กับการอนุรักษ์สถาปัตยกรรมไทยในรูปแบบสร้างแบบจำลองสามมิติ นอกจากนี้ยังมีการศึกษา Sansuttawijit [8] ได้ประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ในการรังวัดโครงสร้างอาคารด้วยกล้องดิจิทัล Nikon รุ่น 3100D ซึ่งเป็นกล้องแบบ Single Lens Reflex (SLR) ที่มีความละเอียดสูงกว่า 10 ล้านจุดภาพ อย่างไรก็ตาม กล้องในแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ในช่วงเวลาที่ผ่านมานั้นจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เก็บมุมมองการถ่ายภาพได้ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น (Action Camera) ได้มีการผลิตขึ้นมาพร้อมกับคุณสมบัติหลัก ๆ ที่สำคัญคือ ความสามารถเก็บภาพได้มุมกว้าง ด้วยตัวกล้องที่มีขนาดเล็กและกะทัดรัดซึ่งสะดวกต่อการพกพา ที่นับเป็นคุณสมบัติสำคัญที่สามารถนำไปใช้พัฒนาต่อออกเป็นเครื่องมือสำหรับการสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลในหลากหลายรูปแบบ หนึ่งกล้องเหล่านี้มีขีดความสามารถในการถ่ายภาพที่ยาวถึง 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่นานเพียงพอสำหรับการใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ จากที่กล่าวมานั้นจะเห็นว่า กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นนี้เป็นกล้องอีกหนึ่งชนิดที่มีความน่าสนใจต่อการนำมาประยุกต์ใช้งานสำรวจด้วยภาพถ่ายเพื่อการย้อนรอยสร้างแบบจำลองสามมิติ แต่ทว่า ยังคงมีงานวิจัยจำนวนน้อยมากทางด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายที่ศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งานสร้างแบบจำลองสามมิติ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจอย่างยิ่งที่จะนำเอาภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองสามมิติในเชิงการเปรียบเทียบระยะที่เป็นผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น (Action Camera) กับผลลัพธ์จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค (Compact Camera) โดยศึกษาเปรียบเทียบภายใต้แบบจำลองการปรับแก้ความเพี้ยนของเลนส์ด้วยซอฟต์แวร์ที่มีอยู่ท้องตลาดปัจจุบัน

3. ขอบเขตในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้กรณีศึกษาในการสำรวจด้วยภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ที่ระยะการถ่ายภาพไม่เกิน 5 เมตร ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกเป็นอาคารป้อมยามรักษาความปลอดภัยที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมูแสดงในรูปที่ 1 (ก) ซึ่งตั้งอยู่ ณ บริเวณหอพักแพทย์ ในพื้นที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เป็นดังนี้เพราะเป็นรูปทรงแบบกล่องที่มีโครงสร้างทางกายภาพไม่สลับซับซ้อน สามารถที่จะใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความเพี้ยนของเลนส์ได้อย่างชัดเจน อนึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ผู้วิจัยได้มีการ

ใช้จอโทรทัศน์แบบ LED ดังรูปที่ 1 (ข) มาสร้างเป็นแผ่นวัดสอบโดยการฉายไฟล์แผ่นวัดสอบที่เป็นตารางหมากรุกขึ้นไปบนจอภาพ ที่สำคัญขอบเขตของการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่มีความละเอียดอยู่ระหว่าง 10 – 12 ล้านจุดภาพ ดังนั้น จึงได้มีการเลือกใช้กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นรุ่น GoPro Hero 8 Black ที่มีความละเอียด 12 ล้านจุดภาพ ดังรูปที่ 1 (ค) และกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคชั่นรุ่น Canon PowerShot S95 ดังรูปที่ 1 (ง) ที่มีความละเอียด 10 ล้านจุดภาพ ทั้งนี้ผู้วิจัยต้องการให้ได้ผลลัพธ์ที่สร้างจากภาพถ่ายดิจิทัลที่มีความละเอียดของข้อมูลภาพถ่ายดิจิทัลที่มาวิเคราะห์ใกล้เคียงกัน อีกทั้งกล้องทั้งสองรุ่นนี้ก็มีคุณลักษณะสำคัญประการหนึ่งคือ มีความกะทัดรัด เล็ก และใช้งานได้นาน ตลอดจนสามารถถ่ายภาพได้ในทุกสภาวะ



รูปที่ 1 (ก) อาคารป้อมยามรักษาความปลอดภัยที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับการใช้ในการศึกษา (ข) แผ่นวัดสอบที่สร้างขึ้นจากจอ LED (ค) กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นรุ่น GoPro 8 Hero Black และ (ง) กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคชั่นรุ่น Canon PowerShot S95

4. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

4.1 ค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบการจัดวางภาพภายใน (Interior Orientation Parameters: IOP)

การนำเอากล้องถ่ายภาพที่ใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกล้องแบบ Non-metric Camera มาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการสำรวจด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry) นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบการจัดวางภาพภายใน (Interior Orientation Parameters: IOP) ซึ่งก็คือ ค่าคุณสมบัติเฉพาะของกล้องแต่ละตัว ที่สามารถพิจารณาด้วยกระบวนการวัดสอบกล้อง (Camera Calibration) และในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์จำนวนมากที่สามารถจะวิเคราะห์ค่า IOP ออกมาได้ โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้กระบวนการวัดสอบสำหรับการศึกษานี้คือ โปรแกรม Agridsoft Metashape ซึ่งสามารถให้ค่า IOP เพื่อส่งต่อไปใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรม Photomodeler ทั้งนี้ ค่า IOP อันประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่อไปนี้

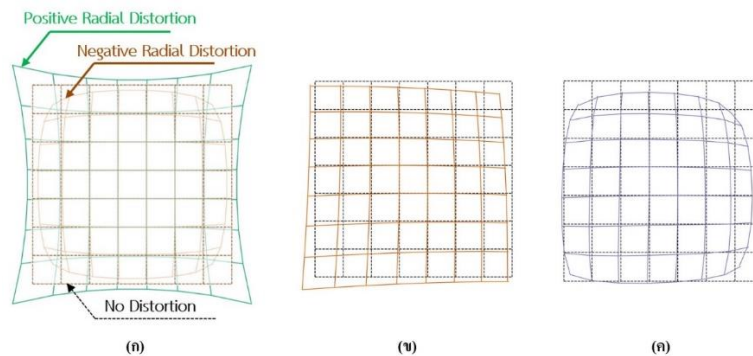
(1) ค่าความยาวโฟกัสของเลนส์ (Focal Length: f) - ระยะทางจากจุดศูนย์กลางการฉาย (Projection Center) ไปยังตำแหน่งที่แสงเดินทางเป็นเส้นตรงตามแนวแกนทัศน (Optical Axis) แล้วตกตั้งฉาก ณ ฉากรับภาพ ซึ่งตำแหน่งนี้จะเรียกว่า จุดमुखสำคัญ (Principal Point)

(2) ค่าตำแหน่งของจุดमुखสำคัญ (Principal Point) - ระยะทางตั้งฉากจากที่วัดจากมุมซ้ายบนของฉากรับภาพ โดยเป็นระยะทางตามแนวแกน X และแกน Y ซึ่งในบทความนี้จะอ้างถึงเป็น X_p และ Y_p ตามลำดับ

(3) ขนาดของเฟรมที่เป็นฉากรับภาพ (Sensor Frame Size) และขนาดของจุดภาพ (Pixel Size) - ขนาดความกว้างและความยาวของฉากรับภาพ ซึ่งในที่นี้จะอ้างถึงเป็น F_w และ F_h แทน ความยาวในแนวแกน X และแกน Y ตามลำดับของเซนเซอร์ที่ใช้เป็นฉากรับภาพ ซึ่งเมื่อทราบขนาดของเฟรมที่เป็นฉากรับภาพแล้วจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าขนาดของจุดภาพ (Pixel Size) เพื่อ

ใช้ในการวิเคราะห์โดยนำจำนวนจุดภาพทางกว้างและยาวไปวิเคราะห์ร่วมกับขนาดของความกว้างและยาวของฉากรับภาพ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดเป็นจัตุรัส (ด้านกว้างเท่ากับด้านยาว)

(4) ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ (Coefficient of Lens Distortion) ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามข้อเสนอแนะของ [1] ที่ได้แยกความเพี้ยนของเลนส์ออกเป็น 2 ส่วนคือ ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี (Radial Lens Distortion) และความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส (Tangential Lens Distortion) ที่มีลักษณะของพฤติกรรมความเพี้ยนดังแสดงในรูปที่ 2 และรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 ลักษณะวัตถุบนภาพถ่ายที่มีความเพี้ยนของเลนส์ (ก) ตามแนวรัศมี และ (ข) แนวเส้นสัมผัส ซึ่งเมื่อนำมารวมกันแล้วจะเกิดเป็น (ค) ความเพี้ยนของเลนส์ที่เกิดขึ้นตามปกติ (ดัดแปลงจาก [9])

4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี (Coefficient of Radial Lens Distortion) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการที่ 1 เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ความเพี้ยนของเลนส์ที่เกิดขึ้นจากความโค้งงอของผิวเลนส์ไว้ในลักษณะของค่าแก้ไขของความคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบ (Systematic Error) ทั้งนี้ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีสามารถเกิดได้ใน 2 ลักษณะคือ ความเพี้ยนเชิงบวก (Positive Distortion) ที่มีลักษณะของเส้นตรงตามแนวขอบแอ่นพุงเข้าหากรอบของฉากรับภาพ และความเพี้ยนเชิงลบ (Negative Distortion) ที่มีลักษณะที่เกิดขึ้นในทางตรงข้ามดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีสมการความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี [2] สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta r_x &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8 + k_5 r^{10} + k_6 r^{12}) \\ \Delta r_y &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8 + k_5 r^{10} + k_6 r^{12})\end{aligned}\quad (1)$$

โดยที่ $\Delta r_x, \Delta r_y$ = ค่าแก้ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีแนวแกน X และ Y ตามลำดับ

r = ระยะตามแนวรัศมีของเลนส์ ซึ่งพิจารณาได้จาก $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_6$ = สัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี

x, y = พิกัดภาพถ่ายที่วัดจากตำแหน่งศูนย์กลางภาพ

4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส (Coefficient of Tangential Lens Distortion) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในสมการที่ 2 เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ความเพี้ยนของเลนส์ที่เกิดขึ้นจากสภาวะความไม่สมมาตรของเลนส์ ซึ่งเกิดขึ้นได้จาก

หลากหลายสาเหตุ เช่น คุณภาพการผลิตเลนส์ที่ให้ผลลัพธ์การผลิตที่มีรัศมีความโค้งไม่สม่ำเสมอ รวมถึงความไม่ขนานระหว่างเลนส์และฉากรับภาพ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งในขั้นตอนการผลิต หรือการใช้งานเป็นเวลานาน ผลลัพธ์จะก่อให้เกิดการเอียงศูนย์ของตำแหน่งต่าง ๆ ของจุดภาพดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีสมการความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัสนั้น [3] สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta p_x &= p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_1xy \\ \Delta p_y &= p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1xy\end{aligned}\quad (2)$$

โดยที่ $\Delta p_x, \Delta p_y$ = ค่าความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัสทิศทางแกน x และ y ตามลำดับ
 p_1, p_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส

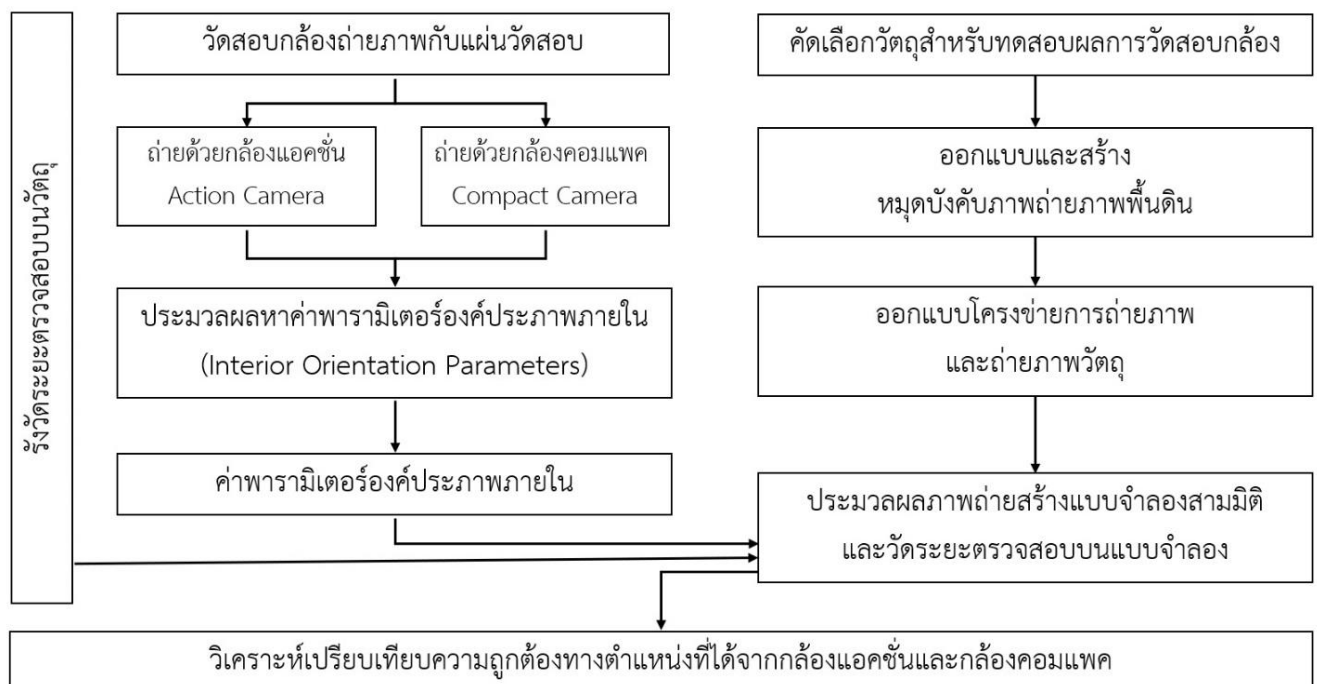
5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตามรูปที่ 3 มีรายละเอียดดังนี้

5.1. การวัดสอบกล้องถ่ายภาพแบบก่อนออกงาน

5.1.1. กำหนดลักษณะของแผ่นวัดสอบและขนาดของแผ่นวัดสอบกล้องถ่ายภาพ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้การฉายภาพของแผ่นวัดสอบลงบนจอ LED ขนาด 40 นิ้ว ทำให้มีขนาดของแผ่นวัดสอบเป็น 88.5x49.6 เซนติเมตร

5.1.2. ออกแบบโครงข่ายการถ่ายภาพแผ่นวัดสอบ โดยกำหนดรูปแบบของตำแหน่งถ่ายภาพ ระยะถ่ายภาพ และทิศทางการวางตัวของกล้องถ่ายภาพ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้มีการออกแบบถ่ายในรูปแบบที่เป็นวงกลมขนานกับแผ่นวัดสอบกล้องถ่ายภาพ และถ่ายภาพ ณ ตำแหน่งเหนือแผ่นวัดสอบ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

5.1.3.ดำเนินการถ่ายภาพ ซึ่งได้ข้อมูลภาพแผ่นวัดสอบ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ และได้ภาพถ่ายดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเน้นไปที่การควบคุมสภาพแสง ณ ห้องทดลอง และอุณหภูมิ ณ ขณะถ่ายภาพให้มีอุณหภูมิคงที่ (26°C) ทั้งนี้ได้มีการออกแบบให้ถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นและแบบคอมแพค เพื่อหาค่า IOP ของกล้องถ่ายภาพแต่ละตัว



รูปที่ 4 ภาพถ่ายการวัดสอบด้วย (ก) กล้องดิจิทัลแบบแอคชั่น และ (ข) กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค

5.1.4.ดำเนินการประมวลผลข้อมูลภาพของแผ่นวัดสอบกล้องถ่ายภาพของกล้องถ่ายภาพแต่ละตัว (กล้องดิจิทัลแบบแอคชั่น และ กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค) และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการถ่ายภาพแผ่นวัดสอบในรูปแบบของค่า IOP ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

5.1.5.ส่งออกข้อมูลค่า IOP ของกล้องดิจิทัลแบบแอคชั่น และกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค เพื่อใช้ในการประมวลผลในขั้นตอนต่อไป

5.2 คัดเลือกวัตถุที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกป้อมขามตามรูปที่ 1(ก) ดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

5.3 การสร้างหมุดควบคุมภาพถ่าย มีรายละเอียดดังนี้

5.3.1.การรังวัดพิกัดทางราบ ใช้งานวงรอบควบคุมคู่ไปกับงานรังวัดแบบเล็งสัดักเพื่อใช้ในการสร้างพิกัดทางราบของหมุดควบคุมภาพถ่าย

5.3.2.การรังวัดพิกัดทางตั้ง ใช้งานถ่ายภาพระดับเกณฑ์งานชั้นที่ 3 ควบคุมคู่ไปกับรังวัดตรีโกณมิติเพื่อใช้ในการสร้างพิกัดทางตั้งของหมุดควบคุมภาพถ่าย

5.4 การออกแบบโครงข่ายการถ่ายภาพเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และผู้วิจัยได้ทำการถ่ายภาพรอบตัววัตถุแบบวงกลมในเบื้องต้นแล้วนำมาคัดกรองเอามุมที่ดีที่สุดที่ครอบคลุมทุกมุมของการถ่ายภาพจำนวน 8 ภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพเป็นรูปร่างกลมรอบวัตถุด้วยกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น

5.5 การประมวลผลภาพถ่าย โดยดำเนินการรังวัดพิกัดและประมวลภาพด้วยโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ (Photomodeler) พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองสามมิติ พร้อมทั้งวิเคราะห์ตำแหน่งต่าง ๆ บนวัตถุ และวัดระยะสำหรับตรวจสอบความถูกต้อง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับระยะอ้างอิง (Reference Distance) ที่ได้จากการวัดตรง (Direct Measurement) สำหรับตรวจสอบความถูกต้อง

5.6 วิเคราะห์ความถูกต้องทางตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นและแบบคอมแพค

6. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

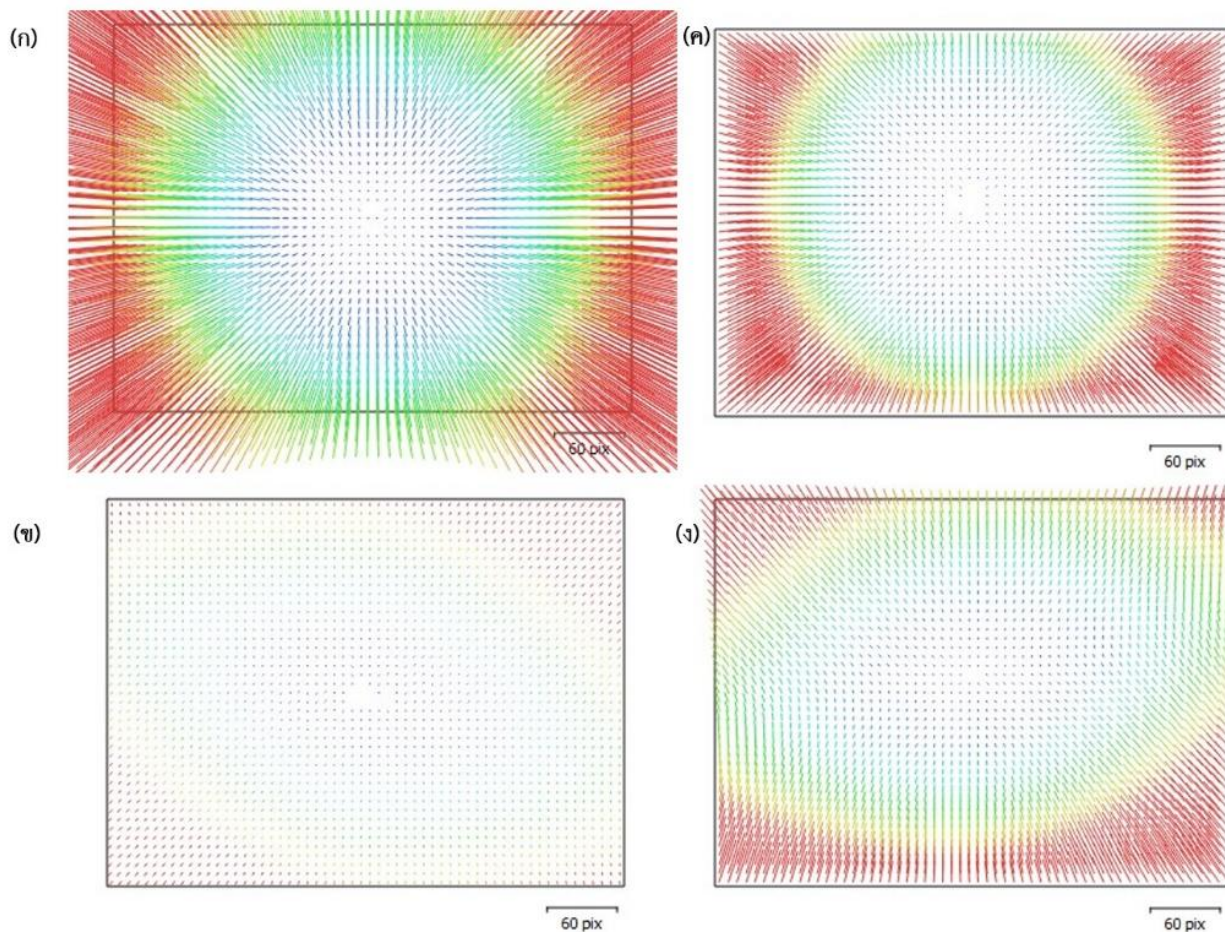
6.1 ผลการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ (Camera Calibration)

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดสอบกล้องถ่ายภาพด้วยชุดวัดสอบมาตรฐานที่เป็นตารางหมากรุกที่มาพร้อมกับโปรแกรม Agisoft Metashape เพื่อหาค่า IOP โดยทำการถ่ายภาพแผ่นวันสอบในมุมมองที่หลากหลายดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ซึ่งถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น และแบบคอมแพค ตามลำดับ ซึ่งมีผลการวัดสอบกล้องถ่ายภาพกล้องดิจิทัลแบบแอคชั่นและกล้องถ่ายภาพกล้องคอมแพค ในการทดลองโดยมีองค์ประกอบของกล้องในลักษณะขององค์ประกอบภาพถ่าย (พารามิเตอร์ IOP) ในดังแสดงในตารางที่ 1 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการวัดสอบกล้องถ่ายภาพกล้องดิจิทัลแบบแอคชั่นและกล้องถ่ายภาพกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค

รายละเอียดและพารามิเตอร์ IOP	กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น	กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค
ยี่ห้อ (Brand)	GoPro	Canon
รุ่น (Model)	GoPro 8 Hero Black	PowerShot S95
ความยาวโฟกัสที่ใช้ (Focal Length: f)	3.05451 mm	6.14923 mm
จุดमुखยสำคัญ (Principal Point)	Xp = 3.456 mm, Yp = 2.626 mm	Xp = 3.627 mm, Yp = 2.492 mm
ขนาดของเซ็นเซอร์รับภาพด้านกว้าง (Format Width: Fw)	6.925 mm	7.309 mm
ขนาดของเซ็นเซอร์รับภาพด้านกว้าง (Format Height: Fh)	5.192 mm	5.563 mm
สัมประสิทธิ์ความเพี้ยนตามแนวรัศมี (Radial Distortion)		
K1	0.0327878	0.0026826
K2	0.000534444	0.000165732
K3	9.12992×10^{-5}	5.43476×10^{-6}
สัมประสิทธิ์ความเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส (Decentering Distortion)		
P1	0.000115432	0.000248249
P2	-0.000519888	0.00146418

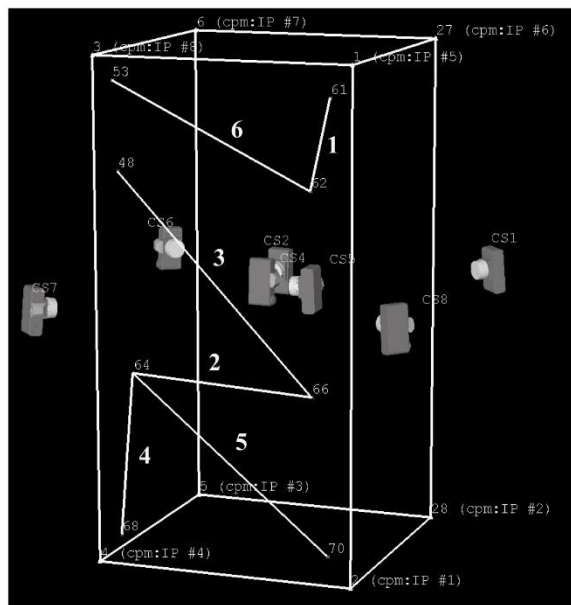
ทั้งนี้ผลลัพธ์ของการวัดสอบที่แสดงถึงความเพี้ยนของเลนส์ในรูปแบบของเวกเตอร์ที่เกิดจากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นและแบบคอมแพค ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยจะเห็นว่า กล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมีความเพี้ยนของเลนส์ในแนวรัศมีที่สูงมากกว่ากล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคมาก ในขณะที่กล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคมีความเพี้ยนของเลนส์ในแนวสัมผัสที่สูงกว่ากล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น



รูปที่ 7 ผลลัพธ์ของการวัดสอปกล้องในเชิงเวกเตอร์แสดงถึง (ก) ความเพี้ยนของเลนส์ในแนวนอน และ (ข) ในแนวตั้งของกล้อง Action Camera ขณะที่ (ค) ความเพี้ยนของเลนส์ในแนวนอน และ (ง) ในแนวตั้งของกล้อง Compact Camera

6.2 ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง 3 มิติ

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติของป้อมยาม ดังรูปที่ 8 แล้วได้ทำการเปรียบเทียบขนาดความยาวของวัตถุที่วัดได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบที่ได้จากการรังวัดระยะอ้างอิงกับระยะที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายบนวัตถุจำนวน 6 ระยะ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 8 ตัวอย่างของผลลัพธ์ที่เป็นเส้นโครงของขอบป้อมขามที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ



รูปที่ 9 ระยะอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงระยะ

ตารางที่ 1 ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (Root Mean Square Error: RMSError) ของผลลัพธ์จากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่น

ระยะที่	ระยะจริง (m)	ระยะจากการรังวัดด้วยภาพถ่าย (m)	คลาดเคลื่อน (m)
1	0.367	0.399	-0.032
2	1.052	1.003	+0.049
3	1.420	1.203	+0.217
4	0.742	0.734	+0.008
5	1.291	1.182	+0.109
6	1.115	1.032	+0.083
ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (Root Mean Square Error: RMSError)			±0.087

ตารางที่ 2 ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (Root Mean Square Error: RMSError) ของผลลัพธ์จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพค

ระยะที่	ระยะจริง (m)	ระยะจากการรังวัดด้วยภาพถ่าย (m)	คลาดเคลื่อน (m)
1	0.367	0.368	-0.001
2	1.052	1.048	+0.003
3	1.420	1.416	+0.003
4	0.742	0.742	+0.002
5	1.291	1.290	+0.001
6	1.115	1.114	+0.001
ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (Root Mean Square Error: RMSError)			±0.002

จากตารางที่ 1 และ 2 จะเห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นจะให้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (RMSError) ในการวัดระยะบนดู่ยามีขนาด 2.4x1.5 เมตร อยู่ที่ ±0.087 เมตร หรือ ±8.7 เซนติเมตร ในขณะที่ผลลัพธ์จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคจะให้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (RMSError) อยู่ที่ ±0.001 เมตร หรือ 0.1 เซนติเมตร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ความแม่นยำของเลนส์ที่อยู่ในกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นนั้นมีความแม่นยำที่สูงมาก และหากวิเคราะห์เฉพาะระยะจะพบว่า มีระยะที่ 3 และ 5 ซึ่งเป็นระยะที่พาดข้ามในแนวทแยงที่พาดจากด้านหนึ่งของวัตถุไปยังอีกด้านหนึ่งของวัตถุ จะมีความคลาดเคลื่อนที่สูงมากในระดับ ±10 – 20 เซนติเมตร ซึ่งนับว่าสูงมาก และยิ่งไปกว่านั้น หากนำมาเปรียบเทียบกับกล้องผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคแล้วจะพบว่า ระยะที่รังวัดบนภาพถ่ายมีความถูกต้องที่สูงกว่ามาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในระดับไม่เกิน ±0.2 เซนติเมตร ที่เป็นดังนี้เพราะความโค้งของเลนส์ที่ใช้ในกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมีความโค้งที่สูงมาก แต่ไม่ถึงกับเป็นระดับเลนส์ตาปลา (Fish Eye Lens) อย่างไรก็ตาม ซอฟต์แวร์ในปัจจุบันที่นำมาใช้งานนั้นจะยังคงวัดได้ถึงระดับสัมประสิทธิ์ K3 ซึ่งในอนาคตหากต้องการนำเอากล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นถ่ายภาพแบบแอคชั่นมาใช้งานในการสำรวจด้วยภาพถ่ายจำเป็นต้องมีการพัฒนาแบบจำลองความแม่นยำของเลนส์ตามแนวรัศมีในระดับสัมประสิทธิ์ที่สูงขึ้นซึ่งอาจจะต้องมีจำนวนสัมประสิทธิ์ที่สูงถึงค่า K4 และ K5 พร้อมทั้งซอฟต์แวร์ที่มีการรองรับการปรับแก้ค่าพิกัดภาพถ่ายด้วยสัมประสิทธิ์ที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่หากวิเคราะห์เฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ความแม่นยำตามแนวเส้นสัมผัส จะพบว่า ค่าที่ได้จากกล้องทั้งสองแบบมีความใกล้เคียงกันมากจนอาจจะเรียกได้ว่ามี

ผลกระทบต่อค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งในระดับที่ไม่ต่างกันมากนัก โดยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ขอเสนอแนะให้การวิจัยครั้งต่อไปควรจะมีการพัฒนาแบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีที่มีความละเอียดของค่าสัมประสิทธิ์ตามข้อเสนอแนะของ Litchi et al. [2] ที่สูงขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำเอาข้อมูลจากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมาใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคตได้

7. สรุปผลการวิจัย

การนำกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมาทำการประยุกต์ใช้งานนับเป็นความท้าทายเนื่องจากเลนส์ที่มีอยู่ในกล้องรุ่นที่นำมาใช้ปฏิบัติงานเป็นกล้องที่มีความเพี้ยนของเลนส์ในระดับที่สูงมาก ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาโดยวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการวัดระยะบนภาพถ่ายจากแบบจำลองสามมิติ ผ่านการรังวัดบนภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคพบว่า ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระยะที่ได้จากแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุที่ผลิตขึ้นจากข้อมูลภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นมีความถูกต้องอยู่ที่ระดับ ± 8.7 เซนติเมตร ในขณะที่ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพแบบคอมแพคมีความถูกต้องอยู่ที่ระดับ ± 0.2 เซนติเมตร สะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้ม 2 ประเด็นดังนี้

- (1) ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระยะที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพแบบแอคชั่นหากมีการปรับแก้ด้วยแบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีที่ระดับ K3 จะยังให้ความถูกต้องที่ระดับต่ำมาก ดังนั้นการศึกษาวิจัยในอนาคตควรจะต้องเพิ่มการวิเคราะห์ไปถึงระดับ K5 ต่อไป
- (2) ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของระยะที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากภาพถ่ายแบบคอมแพคมีความถูกต้องที่สูงมากเมื่อมีการใช้แบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีถึงระดับ K3 ซึ่งเป็นระดับความถูกต้องที่สูงมาก และเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรม การศึกษาในอนาคตก็ควรนำเอาผลลัพธ์นี้ไปปรับใช้งานได้เช่นกัน

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิทยานิพนธ์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และขอกราบขอบพระคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจากศูนย์วิจัยพัฒนามูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdel-Aziz, Y. I. Lens distortion and close range. *Photogrammetric Engineering*, 1986, 39 (6), pp. 611 – 615.
- [2] Lichti, D. D., Tredoux, W., Maalek, R., Helmholtz, P. and Radovanovic, R. Modelling extreme wide-angle lens cameras. *Photogrammetric Record*, 2021, 36 (176), pp. 360 - 380. doi:10.1111/phor.12389
- [3] Fraser, C. S. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1997, 52 (4), pp. 149–159. doi:10.1016/s0924-2716(97)00005-1
- [4] Kenarsari, A. E., Vitton, S. J. and Beard, J. E. Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics*, 2017, 74, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.jterra.2017.06.001

- [5] Waisurasingha, C. Investigated study of close range photogrammetry for high precision measurement, 2004, 31 (4), pp. 377-394.
- [6] Yomwan, P. Application of using fish-eye lens in close range photogrammetry for architectural conservation. Bangkok: Chulalongkorn University, 2005.
- [7] Chuayhan, W. 3D Model Reconstruction of North-eastern Thai Architecture Using Digital Close-range Photogrammetry Technique. Khon Kean: Khon Kean University, 2011.
- [8] Sansuttawijit, P. Application of Close-range Photogrammetry to Measure Building Structure. Khon Kean: Khon Kean University, 2014.
- [9] Luhmann, T. Robson, S. Kyle, S. and Boehm, J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter, 2019. DOI: 10.1515/9783110607253