

การประยุกต์ใช้เลนส์ตาปลาในการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้เพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2386-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF USING FISH-EYE LENS IN CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY
FOR ARCHITECTURAL CONSERVATION

Mr. Peera Yomwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Survey Engineering

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2005

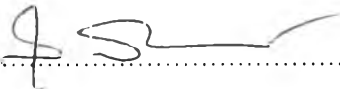
ISBN 974-14-2386-1


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เลนส์ตาปลาในการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้เพื่อ งานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม
โดย	นาย กิระ ยมวัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

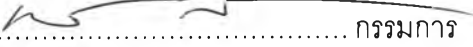

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธิพงษ์ วิญญูประดิษฐ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด พละการ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

นาย กิระ ชมวัน : การประยุกต์ใช้เลนส์ตาปลาในการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้เพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม. (APPLICATION OF USING FISH-EYE LENS IN CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR ARCHITECTURAL CONSERVATION) อ. ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เขียงวีรชน, จำนวนหน้า 109 หน้า. ISBN 974-14-2386-1

การใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลในงานรังวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้โดยทั่วไป ในบางครั้งมีข้อจำกัดทางด้านพื้นที่คือ ไม่สามารถวัดในระยะใกล้และให้ได้มุมการวัดที่ครอบคลุมมากๆ โดยการถ่ายภาพน้อยครั้งจึงไม่สามารถทำการถ่ายภาพได้สะดวก โดยเฉพาะงานด้านการอนุรักษ์สถาปัตยกรรมและโบราณสถานที่มีพื้นที่จำกัด จึงมีแนวคิดในการนำเลนส์ตาปลาที่สามารถบันทึกภาพมุมกว้างโดยรอบมาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว แต่เลนส์ตาปลาต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างไปจากเลนส์ปกติ และยังมีได้ถูกนำมาใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายอย่างกว้างขวาง จึงมีงานวิจัยและทฤษฎีของเลนส์ตาปลาโดยเฉพาะจำนวนน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาหาความถูกต้องและกรรมวิธีการการวัดด้วยเลนส์ตาปลาเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เลนส์ตาปลาในงานสำรวจด้วยภาพระยะใกล้เพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม ซึ่งมีความละเอียดถูกต้องประมาณ 1:50 หรือ ± 10 มิลลิเมตร โดยงานวิจัยนี้ใช้เลนส์ตาปลา Nikon รุ่น FC-E8 ร่วมกับกล้อง Nikon รุ่น Coolpix5000 มาเก็บข้อมูลจากสนามวัดสอบ 2 สนาม ได้แก่ สนามวัดสอบในห้องทดลอง และสนามวัดสอบเพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม ส่วนผลลัพธ์ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคไลต์สแควร์ซึ่งเขียนการคำนวณในโปรแกรม Mathematica แสดงค่าความถูกต้องโดยใช้ค่าเศษเหลือของจุดตรวจสอบซึ่งแบ่งเป็น ค่าเศษเหลือในระบบพิกัดภาพถ่าย และค่าเศษเหลือในระบบพิกัดวัตถุ

ผลการวิจัยจากสนามวัดสอบในห้องทดลองซึ่งใช้เป้าที่สร้างขึ้น พบว่า จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่เหมาะสม คือ อย่างน้อย 14 จุด ซึ่งให้ค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดภาพประมาณ 0.6 จุดภาพ ส่วนผลการวิจัยจากสนามวัดสอบเพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรมซึ่งใช้เป้าธรรมชาติ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลองของเลนส์ตาปลามากที่สุด คือ ระยะถ่ายภาพหรือมาตราส่วนภาพถ่าย โดยที่ระยะถ่ายภาพ 2 เมตร ให้ค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุประมาณ 4.7 มิลลิเมตร แต่ที่ระยะถ่ายภาพ 5 เมตร ให้ค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุประมาณ 7.7 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าในแต่ละคู่ภาพค่าความถูกต้องของจุดตรวจสอบจะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นจากจุดกลางพื้นที่ โดยค่าเศษเหลือของจุดตรวจสอบในรัศมี 8 เมตร จากจุดกลางพื้นที่จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 10 มิลลิเมตร

ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ.....

ปีการศึกษา 2548...

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....


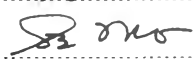
4570469821: MAJOR Survey Engineering

KEY WORD: Fish-Eye Lens / Close Range Photogrammetry / Camera Calibration / Architectural Conservation

PEERA YOMWAN : APPLICATION OF USING FISH-EYE LENS IN CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR ARCHITECTURAL CONSERVATION. THESIS ADVISOR: ASST. PROF.VICHAH YIENGVEERACHON, 109 pp. ISBN 974-14-2386-1

The use of a digital camera in general close range photogrammetry sometimes has a limited capability in covering the area of interest. The major disadvantage is that it cannot measure in short range and get a wide-angle view by taking a few photographs, especially for the architectural conservation and the ancient remains. Fish-eye lens, which are extensive angle of view, can solve such problem. However, there are very few researches and theories about the fish-eye lens since it uses different mathematical model from regular lens and it is not widely used in photogrammetry. Therefore the main purpose of this research is to study accuracy and process of fish-eye measurement for the way of application on using fish-eye lens in close range photogrammetry for architectural conservation. The accuracy achievable on a 1:50 survey is ± 10 mm. This research used Nikon FC-E8 (fish-eye lens) with Nikon Coolpix 5000 (camera) for photo taking. The tests are taken in 2 fields, in lab room and in test field for architectural conservation, which results of both fields are processed by Least Square Technique in Mathematica. The accuracy will be shown by residual of check points.

The outcome from the test field in lab room, which used signalized target, indicates the appropriate control point numbers to be at least 14 control points which gives the average photo coordinate residual to be about 0.6 pixels. Whereas the outcome from the test field for architectural conservation, which used natural target, indicates that photo taking distance or photo scale has the most influential on fish-eye model. The average object coordinate residual, which take photo at 2 meters, is approximately 4.7 millimeters. While the average object coordinate residual is about 7.7 millimeters when taking photo at 5 meters. In short, the check point's accuracy of each image pair will decrease when the distance from center of area increases. The check points' residuals, which in 8 meters radial from center of area, are less than ± 10 millimeters.

Department Survey Engineering Student's signature 
Field of study Survey Engineering Advisor's signature 
Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เขียววีรชน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้เป็นทุกสิ่งทุกอย่างในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทั้งริเริ่มแนวความคิด ให้ความรู้ คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา และตรวจสอบปรับปรุงวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในงานวิจัย จนสำเร็จขึ้นเป็นวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทธิพงษ์ วิทยุประดิษฐ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด พละการ และ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ที่ให้คำแนะนำสำหรับการศึกษาวิจัย รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไข เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

และท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาผู้ให้กำเนิดชีวิตและให้สิ่งที่ดีที่สุดแก่ชีวิตข้าพเจ้าตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย.....	ง
บทคัดย่ออังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การสำรวจด้วยภาพในงานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม.....	5
2.2 เรายาคณิตของเลนส์ตาปลาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 ทฤษฎีของการวัดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ใช้ในงานวิจัย.....	9
2.3.1 กระบวนการวัดสอบกล้องในตัว.....	9
2.3.2 องค์ประกอบความเพี้ยนของเลนส์.....	10
2.4 แบบจำลองเลนส์ตาปลาของงานวิจัยนี้.....	11
2.5 หลักการและทฤษฎีของการปรับแก้ลิสต์สแควร์.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 การวิเคราะห์กรณีศึกษา.....	18
3.2 สรุปการออกแบบกรณีศึกษา.....	22
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.4 การดำเนินงานเก็บข้อมูลสำหรับงานวิจัย.....	27

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้	38
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเลนส์ตาปลา	38
4.2 ค่าเศษเหลือของพิกัดภาพกรณี 1-4	46
4.3 ค่าเศษเหลือของพิกัดภาพกรณี 7-8	57
4.4 ค่าเศษเหลือของพิกัดวัตถุกรณี 5-8	66
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	85
5.1 คำนำ	85
5.2 สรุปผลตามปัจจัยที่เป็นตัวแปรในงานวิจัยนี้	86
5.3 สรุปผลความถูกต้องของการประยุกต์ใช้เลนส์ตาปลาในงานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม	88
5.4 สรุปกรรมวิธีที่เหมาะสมของการประยุกต์ใช้เลนส์ตาปลาในงานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม	90
5.5 ปัญหาและอุปสรรคของงานวิจัย	91
5.6 ข้อเสนอแนะ	92
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก การเขียนการคำนวณบนโปรแกรม Mathematica 5.0	94
ภาคผนวก ข ค่าพิกัดวัตถุของเป้าจากกล้องประมวลผลรวม TCR 405	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	109

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนการปรับแก้ด้วยสมการค่าสังเกต.....	16
ตารางที่ 3.1 ขนาดจุดภาพอย่างคร่าวๆ ในระบบพิกัดวัตถุเมื่อเทียบกับบริเวณกลางภาพ.....	22
ตารางที่ 3.2 กรณี 1-4 วัดจากสนามวัดสอบในห้องทดลองเพื่อวิเคราะห์จำนวนจุดควมคุม ภาพถ่ายที่เหมาะสมกับแบบจำลองเลนส์ตาปลา.....	23
ตารางที่ 3.3 กรณี 5-8 วัดจากสนามวัดสอบเพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรมเพื่อวิเคราะห์ ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเลนส์ตาปลา.....	23
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดจำเพาะเลนส์ตาปลา Nikon FC-E8 (Nikon Corp, 2001).....	24
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดจำเพาะกล้องดิจิทัล Nikon Coolpix 5000 (Nikon Corp, 2001).....	25
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดจำเพาะกล้องประมวลผลรวม Leica รุ่น TCR 405 (Leica Corp, 2003).....	26
ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการวัดพิกัดวัตถุของเป้าจากสนาม วัดสอบในห้องทดลองซึ่งใช้ในกรณี 1-4.....	32
ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการวัดพิกัดวัตถุของเป้าจากสนาม วัดสอบเพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรมซึ่งใช้ในกรณี 5-8.....	33
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเลนส์ตาปลากรณี 1-4.....	40
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเลนส์ตาปลากรณี 5-8.....	44
ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติของเศษเหลือกรณี 1.....	47
ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของเศษเหลือกรณี 2.....	49
ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของเศษเหลือกรณี 3.....	51
ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของเศษเหลือกรณี 4.....	53
ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของค่าพิกัดภาพของจุดตรวจสอบกรณี 1-4.....	56
ตารางที่ 4.8 ค่าเศษเหลือเฉลี่ยในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบบริเวณต่างๆ จากกรณี 3.....	57
ตารางที่ 4.9 ค่าทางสถิติของเศษเหลือกรณี 7 ภาพซ้าย.....	58
ตารางที่ 4.10 ค่าเศษเหลือเฉลี่ยพิกัดภาพในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบบริเวณต่างๆ จากกรณี 7.....	60
ตารางที่ 4.11 ค่าทางสถิติของเศษเหลือกรณี 8 ภาพซ้าย.....	61
ตารางที่ 4.12 ค่าเศษเหลือเฉลี่ยพิกัดภาพในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบบริเวณต่างๆ จากกรณี 8.....	61
ตารางที่ 4.13 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของค่าพิกัดภาพของจุดตรวจสอบกรณี 7 และ 8.....	62
ตารางที่ 4.14 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของพิกัดภาพของจุดตรวจสอบ กรณี 5.....	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบ โดยสัมพันธ์กับพื้นที่ตามแนวรัศมีที่เทียบกับจุดกลางรูปภาพของกรณี 5	69
ตารางที่ 4.16 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของพิกัดภาพของจุดตรวจสอบ กรณี 6	69
ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบ โดยสัมพันธ์กับพื้นที่ตามแนวรัศมีที่เทียบกับจุดกลางรูปภาพของกรณี 6	72
ตารางที่ 4.18 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของพิกัดภาพของจุดตรวจสอบ กรณี 7	72
ตารางที่ 4.19 ตารางแสดงค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบ โดยสัมพันธ์กับพื้นที่ตามแนวรัศมีที่เทียบกับจุดกลางรูปภาพของกรณี 7	75
ตารางที่ 4.20 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของพิกัดภาพของจุดตรวจสอบ กรณี 8	75
ตารางที่ 4.21 ตารางแสดงค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบ โดยสัมพันธ์กับพื้นที่ตามแนวรัศมีที่เทียบกับจุดกลางรูปภาพของกรณี 8	78
ตารางที่ 4.22 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของค่าพิกัดวัตถุของจุดตรวจสอบกรณี 5 และ 6	79
ตารางที่ 4.23 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของค่าพิกัดวัตถุของจุดตรวจสอบกรณี 6 และ 7	80
ตารางที่ 4.24 ค่าทางสถิติของเศษเหลือของค่าพิกัดวัตถุของจุดตรวจสอบกรณี 7 และ 8	82
ตารางที่ 4.25 ค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุของจุดตรวจสอบในทิศทางต่างๆ ของกรณี 5-8	83

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	4
รูปที่ 2.1 มุมรับภาพของเรตินาระนาบและเรตินาทรงกลม (Bakstein and Pajdla, 2002)	6
รูปที่ 2.2 ความแตกต่างการฉายของเลนส์ปกติ (ภาพซ้าย) และเลนส์ตาปลา (ภาพขวา) (Ellen Schwalbe, 2005).....	6
รูปที่ 2.3 ค่าเศษเหลือของการวัดสอบเลนส์ตาปลาในงานวิจัยของ (Hynek Bakstein and Tomas Pajdla, 2002).....	7
รูปที่ 2.4 การใช้กระจกและเลนส์ตาปลารุ่นต่างๆที่ใช้หาแบบจำลองการฉายในงานวิจัยของ (Pajdla, 2003).....	8
รูปที่ 2.5 แบบจำลองการฉายเลนส์ตาปลาในงานวิจัยของ (Ellen Schwalbe, 2005).....	8
รูปที่ 2.6 ค่าเศษเหลือของการวัดสอบเลนส์ตาปลาในงานวิจัยของ (Ellen Schwalbe, 2005).....	9
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนของการวัดสอบเลนส์ตาปลา.....	10
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของระบบค่าพิกัดต่างๆ ในแบบจำลองเลนส์ตาปลา.....	11
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างวัตถุกับจุดภาพในระบบพิกัดกล้อง4000.....	14
รูปที่ 2.10 การเขียนการคำนวณและวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้.....	17
รูปที่ 3.1 ภาพเลนส์ตาปลา Nikon FC-E8 (Nikon Corp, 2001).....	24
รูปที่ 3.2 ภาพกล้องดิจิตอล Nikon Coolpix 5000 (Nikon Corp, 2001).....	24
รูปที่ 3.3 ภาพกล้องประมวลผลรวม Leica รุ่น TCR 405 (Leica Corp, 2003).....	26
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายกรณี 1-4.....	27
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายกรณี 5-6 ภาพซ้ายและขวา ตามลำดับ.....	27
รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายกรณี 7 ภาพซ้ายและขวา ตามลำดับ.....	28
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายกรณี 8 ภาพซ้ายและขวา ตามลำดับ.....	28
รูปที่ 3.8 แสดงการวัดมุมตั้งและระยะทางของพิกัดวัตถุของเป้าในทางตั้ง.....	29
รูปที่ 3.9 แสดงการวัดมุมและระยะทางของพิกัดวัตถุของเป้าในทางราบ.....	29
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ความคลาดเคลื่อนทางมุมกับระยะทาง (วิชัย, 2547).....	30
รูปที่ 3.11 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจากมุมและระยะทาง (วิชัย, 2547).....	31
รูปที่ 3.12 ค่าพิกัดวัตถุทางราบของเป้าจากสนามวัดสอบในห้องทดลอง จำนวน 61 จุด.....	34
รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายกรณี 1-4.....	35
รูปที่ 3.14 ค่าพิกัดวัตถุของเป้าจากสนามวัดสอบเพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรมจำนวน 121 จุด.....	36
รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบกรณี 5-8.....	36

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างการหมายตำแหน่งของเป่าจากสนามวัดสอบในห้องทดลอง.....	37
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างการหมายตำแหน่งของเป่าจากสนามวัดสอบเพื่องานอนุรักษ์สถาปัตยกรรม ..	38
รูปที่ 4.1 กราฟของค่ารัศมีภาพถ่าย (R) กรณี 1-4.....	41
รูปที่ 4.2 กราฟของค่า xh กรณี 1-4.....	42
รูปที่ 4.3 กราฟของค่า yh กรณี 1-4.....	42
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการแกว่งตัวของค่ารัศมีภาพถ่าย (R) กรณี 5-8.....	45
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการแกว่งตัวของค่า xh กรณี 5-8.....	45
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการแกว่งตัวของค่า yh กรณี 5-8.....	46
รูปที่ 4.7 หมายเลขของจุดตรวจสอบกรณี 1-4.....	46
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน x ของจุดตรวจสอบกรณี 1.....	47
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน y ของจุดตรวจสอบกรณี 1.....	48
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือในทิศทางรวมของ จุดตรวจสอบกรณี 1.....	48
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน x ของ จุดตรวจสอบกรณี 2.....	49
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน y ของ จุดตรวจสอบกรณี 2.....	50
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือในทิศทางรวมของ จุดตรวจสอบกรณี 2.....	50
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน x ของ จุดตรวจสอบกรณี 3.....	51
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน y ของ จุดตรวจสอบกรณี 3.....	52
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือในทิศทางรวมของ จุดตรวจสอบกรณี 3.....	52
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน x ของ จุดตรวจสอบกรณี 4.....	53
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือทางแกน y ของ จุดตรวจสอบกรณี 4.....	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงทิศทางการกระจายตัวของค่าเศษเหลือในทิศทางรวมของ จุดตรวจสอบกรณี 4	54
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดภาพกรณี 1-4	56
รูปที่ 4.21 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือของพิกัดภาพของจุดตรวจสอบกรณี 3 ในบริเวณต่างๆ	57
รูปที่ 4.22 หมายเลขของจุดตรวจสอบกรณี 5-8	58
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าเศษเหลือทางแกน x ของจุดตรวจสอบกรณี 7 ภาพซ้าย	59
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าเศษเหลือทางแกน y ของจุดตรวจสอบกรณี 7 ภาพซ้าย	59
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าเศษเหลือในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบกรณี 7 ภาพซ้าย	60
รูปที่ 4.25 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือพิกัดภาพของจุดตรวจสอบกรณี 7 ภาพซ้าย	61
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าเศษเหลือทางแกน x ของจุดตรวจสอบกรณี 8 ภาพซ้าย	62
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าเศษเหลือทางแกน y ของจุดตรวจสอบกรณี 8 ภาพซ้าย	62
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าเศษเหลือในทิศทางรวมของจุดตรวจสอบกรณี 8 ภาพซ้าย	63
รูปที่ 4.29 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือพิกัดภาพของจุดตรวจสอบกรณี 8 ภาพซ้าย	65
รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบค่าเศษเหลือพิกัดภาพกรณี 7-8 (ภาพซ้าย)	65
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน X ของจุดตรวจสอบกรณี 5	67
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Y ของจุดตรวจสอบกรณี 5	67
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Z ของจุดตรวจสอบกรณี 5	67
รูปที่ 4.34 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุในทางราบของจุดตรวจสอบกรณี 5	69
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน X ของจุดตรวจสอบกรณี 6	70
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Y ของจุดตรวจสอบกรณี 6	70
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Z ของจุดตรวจสอบกรณี 6	71
รูปที่ 4.38 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุในทางราบของจุดตรวจสอบกรณี 6	71
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน X ของจุดตรวจสอบกรณี 7	73
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Y ของจุดตรวจสอบกรณี 7	73
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Z ของจุดตรวจสอบกรณี 7	74
รูปที่ 4.42 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุในทางราบของจุดตรวจสอบกรณี 7	74
รูปที่ 4.43 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน X ของจุดตรวจสอบกรณี 8	76
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Y ของจุดตรวจสอบกรณี 8	76
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุทางแกน Z ของจุดตรวจสอบกรณี 8	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.46 เวกเตอร์แสดงค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุในทางราบของจุดตรวจสอบกรณี 8	77
รูปที่ 4.47 กราฟเปรียบเทียบค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุกรณี 5-6	79
รูปที่ 4.48 กราฟเปรียบเทียบค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุกรณี 6-7	81
รูปที่ 4.49 กราฟเปรียบเทียบค่าเศษเหลือพิกัดวัตถุกรณี 7-8	82
รูปที่ 4.50 กราฟเปรียบเทียบค่าเศษเหลือเฉลี่ยของพิกัดวัตถุของจุดตรวจสอบ กรณี 5-8	84