

การประยุกต์ใช้กระบวนการรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้สำหรับการวัดละเอียดสูง



นาย ชาทิชาย ไวยสุระสิงห์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

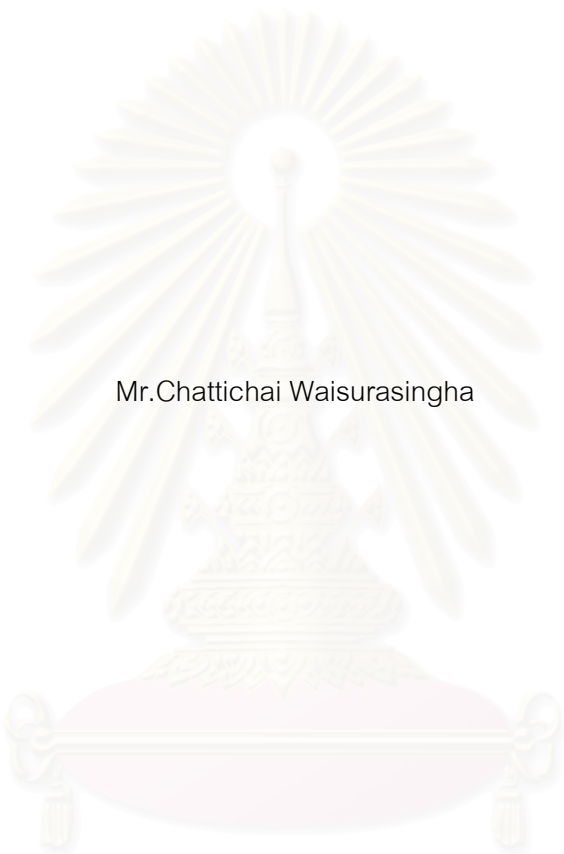
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1365-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR HIGH PRECISION MEASUREMENT



Mr.Chattichai Waisurasingha

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1365-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้กระบวนการรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้สำหรับการวัด
 ละเอียดสูง

โดย นายชาติชาย ไวยสุระสิงห์

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้มหาวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สวัสดิ์ชัย เกรียงไกรเพชร)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์)

นาย ชชาติชาย ไวยสุระสิงห์ : การประยุกต์ใช้การรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้สำหรับงาน
 รังวัดความละเอียดสูง. (APPLICATION OF CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY
 FOR HIGH PRECISION MEASUREMENT) อ. ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย
 เยี่ยงวีรชน อ. ที่ปรึกษาร่วม: รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ จำนวน 113 หน้า
 ISBN 974-17-1365-7

การวิจัยนี้ได้นำเอาการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้มาประยุกต์เข้ากับการวัดความ
 ละเอียดสูงที่ความถูกต้องในเกณฑ์ 20 - 80 ไมครอน เพื่อการศึกษากระบวนการนำกล้องถ่ายภาพ
 ดิจิตอลความละเอียดสูงที่มีขายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด (ความละเอียดจุดภาพ 3 ล้านจุดภาพขึ้นไป)
 โดยงานวิจัยนี้ใช้กล้องโซนี่ รุ่น เอส 75 (SONY S-75) มาเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ขึ้นงาน
 ตามกรณีศึกษาที่กำหนดขึ้นจากกรรมวิธีการวัดสอบกล้อง กรรมวิธีการเก็บข้อมูลและจำนวน
 ตำแหน่งถ่ายภาพแบบสมมาตร 4 ตำแหน่งและ 8 ตำแหน่ง

ผลลัพธ์ที่ได้ แสดงถึง การวัดความละเอียดสูงความถูกต้องในระดับ 80 ไมครอนด้วยการ
 วัดจากการสำรวจด้วยภาพถ่าย โดยปัจจัยที่มีผลให้ความถูกต้องของการวัดขนาดให้อยู่ในระดับที่
 ต้องการได้แก่ จำนวนตำแหน่งถ่ายภาพ กรรมวิธีในการวัดสอบกล้อง วิธีการวัดพิกัดภาพ ความถูกต้อง
 ของพิกัดหมุดบังคับภาพ ชนิดของเป้า การควบคุมแสงในการถ่ายภาพ

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา 2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370275121 MAJOR Survey Engineering

KEY WORD: Digital Close Range Photogrammetry / High Precision Measurement / Pre Camera Calibration / Self Camera Calibration / Inverse Camera Calibration

CHATTICHAJ WAISURASINGHA: APPLICATION OF CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR HIGH PRECISION MEASUREMENT. THESIS ADVISOR: ASST.PROF VICHAI YIENGVEERACHON THESIS COADVISOR: : ASSOC.PROF VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 113pp ISBN 974-17-1365-7

This thesis investigated the procedure for high precision measurement using digital close range photogrammetry. A consumer grade digital camera type , Sony S-75 is used. In order to archive accuracy of 20-80 micron of the object dimension, several configurations were done: number of photographs, methods of camera calibration, data acquisition technique and symmetrical exposure stations.

The outcome indicates the produce result of case study that the accuracy obtainable not more than 80 micron in dimension measures by digital close range photogrammetry. The main features of winning case studies are: number of camera exposure stations, type of camera calibrations, type of control and tie points marking, accuracy of control points, type of targets and lighting environment control.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ...Survey Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study... Survey Engineering ... Advisor's Signature.....

Academic Year 2003..... Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จลงได้ ข้าพเจ้ารู้สึกสำนึกถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความสะดวกในการทำงาน จึงขอขอบคุณถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องและให้ความสะดวกในการทำงาน จึงขอขอบพระคุณ คุณพรทิพย์ โพทะยะ คุณกำธร คล้ายสงคราม และคุณพิชัย ศรีพรหม เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ซึ่งให้ความร่วมมือในเรื่องของเครื่องมือเป็นอย่างมาก

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอย่างสูงแก่ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ ท่านรองศาสตราจารย์ สวัสดิ์ชัย เกரியงไกรเพชร และท่านอาจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ ที่ได้สละเวลาในการอ่าน ตรวจสอบข้อบกพร่องและแนะนำสิ่งต่างๆซึ่งควรแก้ไขในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสุดแก่ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม ที่ได้ให้ความรู้ในเรื่องราวของงานวัดความละเอียดสูงและแนวคิดต่างๆอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

และท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอกราบแทบเท้าด้วยความรู้สึกสำนึกในพระคุณอย่างสูงที่สุดแก่ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชัย เยี่ยงวีรชน ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่เปรียบเสมือนพ่อครูที่ประสิทธิ์ประสาทวิชา และเป็นທີ່ปรึกษาที่ให้แนวความคิด คำแนะนำ ช่วยเรียบเรียง ตรวจสอบ ปรับปรุงวิธีการเขียน ให้แรงบันดาลใจ ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่างๆที่มีในระหว่างงานค้นคว้าและงานเขียนให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยตลอด จนสำเร็จขึ้นเป็นวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ชาติชาย ไวยสุระสิงห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

ช
หน้า

| | |
|---|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย..... | 3 |
| 1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย..... | 3 |
| 1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 4 |
| 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 6 |
| 1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย..... | 7 |
| | |
| 2. การวิเคราะห์กรณีศึกษา..... | 8 |
| 2.1 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย..... | 8 |
| 2.2 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย..... | 10 |
| 2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 14 |
| | |
| 3. การรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้สำหรับงานรังวัดความละเอียดสูง..... | 15 |
| 3.1 วิเคราะห์ระบบการรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้ในทางทฤษฎี..... | 15 |
| 3.2 การออกแบบกรณีศึกษาสำหรับงานวิจัย..... | 15 |
| 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... | 17 |
| 3.4 การดำเนินงานเก็บข้อมูลสำหรับงานวิจัย..... | 18 |

| | |
|---|-----|
| 4. วิเคราะห์ผลการวิจัย..... | 27 |
| 4.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลโดยโฟโต้ไมเคิลเลอร์..... | 27 |
| 4.2 โฟโต้ไมเคิลเลอร์ให้ผลลัพธ์ที่ใช้พิจารณา..... | 28 |
| 4.3 ผลการวิจัยชิ้นงานที่ 1..... | 30 |
| 4.4 ผลการวิจัยชิ้นงานที่ 2..... | 60 |
| 4.5 ผลการวิจัยชิ้นงานที่ 3..... | 70 |
| 4.6 สรุปเปรียบเทียบผลการวิจัยทั้ง 3 ชิ้นงาน..... | 80 |
| 5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 82 |
| 5.1 สรุปขั้นตอนของการวิจัย..... | 82 |
| 5.2 สรุปผลการคำนวณสำหรับการวัดสอบกล่องก่อนออกงาน..... | 84 |
| 5.3 สรุปผลการคำนวณสำหรับการวัดสอบกล่องในตัวแบบทั่วไป..... | 86 |
| 5.4 สรุปผลการคำนวณสำหรับการวัดสอบกล่องในตัวแบบอินเวอร์ส..... | 88 |
| 5.5 สรุปผลการคำนวณกรณีศึกษาวิจัย..... | 90 |
| 5.6 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน..... | 91 |
| 5.7 ข้อเสนอแนะ..... | 91 |
| รายการอ้างอิง..... | 92 |
| ภาคผนวก | 94 |
| ก สรุปหลักการทำงานของโปรแกรมโฟโต้ไมเคิลเลอร์..... | 95 |
| ก.1 หลักการทั่วไป..... | 96 |
| ก.2 หลักการวัดสอบกล่อง..... | 99 |
| ก.3 หลักการคำนวณพิกัดฉากสามมิติ..... | 102 |
| ข ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของกล่อง Sony –S 75..... | 103 |
| ค ตารางความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่ทดสอบกับชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน..... | 106 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 107 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

ญ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปรายละเอียดในแต่ละกรณีศึกษา..... | 17 |
| ตารางที่ 3.2 ค่าพิกัดหมุดบังคับภาพถ่าย..... | 21 |
| ตารางที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบภาพภายในที่ได้จากการปรับแก้ก่อนออกงาน..... | 24 |
| ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง..... | 33 |
| ตารางที่ 4.2 ตารางระยะตรวจสอบที่คำนวณได้จากการวัดพิกัดโดยตรง..... | 35 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าต่างระหว่างระยะตรวจสอบกับระยะที่ได้จากการคำนวณในแต่ละกรณี..... | 36 |
| ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของในแต่ละกรณีศึกษา | 36 |
| ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..... | 49 |
| ตารางที่ 4.6 ค่าต่างระหว่างระยะตรวจสอบกับระยะที่ได้จากการคำนวณในแต่ละกรณี..... | 50 |
| ตารางที่ 4.7 ค่าความถูกต้อง..... | 51 |
| ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ ชิ้นงานที่ 2 ถ่าย 4 ตำแหน่ง..... | 63 |
| ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ ชิ้นงานที่ 2 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..... | 67 |
| ตารางที่ 4.10 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ ชิ้นงานที่ 3 ถ่าย 4 ตำแหน่ง..... | 72 |
| ตารางที่ 4.11 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ ชิ้นงานที่ 3 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..... | 77 |
| ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง (Root Sum Square)..... | 80 |
| ของค่าพิกัดซึ่งเป็นผลลัพธ์ในโฟโต้โมเดลเลอร์ | |
| ตารางที่ ค.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน X ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน ถ่าย 4 ตำแหน่ง..... | 107 |
| ตารางที่ ค.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Y ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน ถ่าย 4 ตำแหน่ง..... | 108 |
| ตารางที่ ค.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Z ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน ถ่าย 4 ตำแหน่ง..... | 109 |
| ตารางที่ ค.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน X ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน | |

สารบัญตาราง (ต่อ)

ฎ

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| ถ้าย 8 ตำแหน่ง..... | 110 |
| ตารางที่ ค.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Y ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน | |
| ถ้าย 8 ตำแหน่ง..... | 111 |
| ตารางที่ ค.6 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Z ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน | |
| ถ้าย 8 ตำแหน่ง..... | 112 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ฎ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานการวัดสอบกลิ้งก่อนออกงาน..... | 8 |
| รูปที่ 2.2 แผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานการวัดสอบกลิ้งในตัวด้วยกรรมวิธีแบบทั่วไป..... | 9 |
| รูปที่ 2.3 แผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานการวัดสอบกลิ้งในตัวด้วยกรรมวิธีแบบอินเวอร์ส..... | 10 |
| รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีจากจุดรวมแสงไปยังจุดบนภาพและวัตถุ..... | 11 |
| รูปที่ 3.1 หมุดบังคับที่ติดไว้บนผิวโต๊ะโคออดิเนตกราฟ วิลด์ เอ9..... | 18 |
| รูปที่ 3.2 ภาพแสดงตำแหน่งหมุดควบคุมบนโต๊ะโคออดิเนตกราฟ วิลด์ เอ9..... | 19 |
| รูปที่ 3.3 แผ่นวัดสอบที่กำหนดขึ้นโดยโฟโต้โมเดลเลอร์..... | 22 |
| รูปที่ 3.4 แผ่นประมาณขนาด..... | 22 |
| รูปที่ 3.5 ภาพร่างการถ่ายภาพแผ่นประมาณขนาด..... | 23 |
| รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายแผ่นวัดสอบในแต่ละมุม..... | 23 |
| รูปที่ 3.7 ภาพร่างสถานีถ่ายภาพ..... | 24 |
| รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ 1..... | 25 |
| รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ 2..... | 25 |
| รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ 3..... | 26 |
| รูปที่ 4.1ก ผังรายละเอียดแต่ละกรณีศึกษาของชิ้นงานศึกษาที่ถ่าย4ตำแหน่ง..... | 27 |
| รูปที่ 4.1ข ผังรายละเอียดแต่ละกรณีศึกษาของชิ้นงานศึกษาที่ถ่าย8ตำแหน่ง..... | 27 |
| รูปที่ 4.1ค แสดงตัวอย่างของตารางผลลัพธ์ในโฟโต้โมเดลเลอร์..... | 28 |
| รูปที่ 4.2ก ภาพถ่ายชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะทั่วไป..... | 30 |
| รูปที่ 4.2ข ภาพถ่ายชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ4 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะจำเพาะ..... | 30 |
| รูปที่ 4.2ค แสดงตำแหน่งหมายเลขจุดบนชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน..... | 30 |
| รูปที่ 4.3ก กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนX..... | 31 |
| รูปที่ 4.3ข กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนY..... | 31 |
| รูปที่ 4.3ค กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนZ..... | 32 |
| รูปที่ 4.3ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง..... | 32 |
| รูปที่ 4.4 รูประยะตรวจสอบ..... | 35 |
| รูปที่ 4.4ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 1 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง...37 | 37 |
| รูปที่ 4.4ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 2 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง...38 | 38 |
| รูปที่ 4.4ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 3 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง...38 | 38 |

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.4ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 4 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง...39 | 39 |
| รูปที่ 4.4จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 5 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง...39 | 39 |
| รูปที่ 4.4ฉ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 6 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง...40 | 40 |
| รูปที่ 4.5ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 1.....41 | 41 |
| รูปที่ 4.5ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 2.....41 | 41 |
| รูปที่ 4.5ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 3.....42 | 42 |
| รูปที่ 4.5ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 4.....42 | 42 |
| รูปที่ 4.5จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 5.....43 | 43 |
| รูปที่ 4.5ฉ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 6.....43 | 43 |
| รูปที่ 4.6ก ภาพถ่ายชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะทั่วไป.....46 | 46 |
| รูปที่ 4.6ข ภาพถ่ายชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะจำเพาะ.....46 | 46 |
| รูปที่ 4.7ก กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนX.....47 | 47 |
| รูปที่ 4.7ข กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนY.....47 | 47 |
| รูปที่ 4.7ค กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนZ.....48 | 48 |
| รูปที่ 4.7ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง.....48 | 48 |
| รูปที่ 4.8ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 1 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..52 | 52 |
| รูปที่ 4.8ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 2 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..52 | 52 |
| รูปที่ 4.8ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 3 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..53 | 53 |
| รูปที่ 4.8ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 4 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..53 | 53 |
| รูปที่ 4.8จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 5 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..54 | 54 |
| รูปที่ 4.8ฉ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 6 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง..54 | 54 |
| รูปที่ 4.9ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 1.....55 | 55 |
| รูปที่ 4.9ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 2.....56 | 56 |
| รูปที่ 4.9ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 3.....56 | 56 |
| รูปที่ 4.9ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 4.....57 | 57 |
| รูปที่ 4.9จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 5.....57 | 57 |
| รูปที่ 4.9ฉ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 6.....58 | 58 |
| รูปที่ 4.10ก กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกนX.....61 | 61 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานวัดความละเอียดสูง(High Precision Measurement) ต้องการความถูกต้องของการวัดขนาด ในระดับ 20-70ไมครอน โดยในภาคอุตสาหกรรมมีความจำเป็นที่จะต้องใช้การวัดที่เหมาะสมกับความถูกต้องดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นการวัดเพื่อการออกแบบแม่พิมพ์หรือการวัดเพื่อตรวจสอบคุณภาพในการผลิต

งานวัดขนาดที่ต้องการความละเอียดสูงนั้นควรมีกระบวนการที่สามารถวัดขนาดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุโดยตรง (Non – Touchable Metrology) ซึ่งกระบวนการวัดเช่นนี้วิธีการหนึ่งที่ใช้วัดในปัจจุบันคือ การใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner) ทำการกวาดสแกนโดยกวาดตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ แล้วประมวลผลเป็นพื้นผิวเชิงเลข (Digital Surface Model) เพื่อนำไปพิจารณาขนาดตามกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่อไป

ปัญหาของการวัดโดยใช้เลเซอร์สแกนเนอร์คือ การเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากเนื่องจากอุปกรณ์มีราคาค่อนข้างสูงตลอดจนถึงขั้นตอนการสแกนพื้นผิววัตถุจะมีความคลาดเคลื่อนแฝงอันเกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวสแกนเนอร์

ด้วยเหตุที่กล่าวมา วิธีการวัดขนาดวัตถุบนภาพนิ่งซึ่งถ่ายในระยะใกล้ (Off-Line Digital-Close-Range Photogrammetry) จึงเป็นอีกทางเลือกที่ควรศึกษาถึงกระบวนการวัดบนภาพนิ่งซึ่งถ่ายในระยะใกล้ด้วยกล้องดิจิตอลความละเอียดสูงที่มีขายอยู่ในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากกล้องดิจิตอลที่มีขายในปัจจุบันมีราคาถูกลงพร้อมกับความละเอียดในการถ่ายภาพที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงควรศึกษาเพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับความถูกต้องที่ได้รับจากกระบวนการวัดด้วยวิธีการนี้ในแง่ของงานวัดภาคอุตสาหกรรม

สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงแนวทางการนำกล้องดิจิตอลความละเอียดสูง (ประมาณ3ล้านจุดภาพขึ้นไป) ที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาด มาใช้ในงานวัดความละเอียดสูงด้วยเทคนิคการสำรวจจริงวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ โดยวิเคราะห์ความถูกต้องในการวัดขนาดภายใต้กระบวนการการถ่ายภาพ สภาวะแวดล้อมการถ่ายภาพและหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ออกแบบไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบกระบวนการรังวัดในงานรังวัดภาพถ่ายระยะใกล้สำหรับงานวัดความละเอียดสูงในระดับ20-80ไมครอน

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และหาข้อสรุปถึงความเป็นไปได้ของกระบวนการวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ซึ่งถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลความละเอียดสูงทั่วไปที่มีขายในปัจจุบันที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 3 ล้านจุดภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการวัดสอบกล้องความละเอียดสูงโดยวิธีวัดสอบก่อนออกงาน(Camera Pre-calibration) กระบวนการวัดสอบกล้องในตัว (Self-Camera Calibration) ด้วยกรรมวิธีแบบทั่วไป (General Method) และกรรมวิธีแบบอินเวอร์ส (Inverse Camera Calibration) ใช้กล้องดิจิทัลความละเอียดสูง 3 ล้านจุดภาพสำหรับการถ่ายภาพ และประมวลผลในโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์โปร 4.0 (Photomodeler Pro 4.0)

1.3.2 วิเคราะห์การแพร่ของความคลาดเคลื่อน(Error Propagation) ในงานรังวัด โดยจะวิเคราะห์เริ่มจากแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนตามขั้นตอนของงานวัดโดยกล่าวในส่วนแนวความคิดและสมมติฐานที่ใช้ในการวิจัยในส่วนต่อไป

1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระทบในการวัดชิ้นงาน อันได้แก่ มาตรฐานภาพถ่ายจำนวนสถานีถ่ายภาพ การวางตัวทางเรขาคณิตของภาพถ่าย จำนวนและการกระจายของเป้าสภาวะแสง พื้นที่ทำงาน

1.3.4 ในการวิจัยจะใช้ชิ้นงานที่มีขนาดไม่เกินลูกบาศก์ที่ขนาด200x200x200มิลลิเมตร

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 งานวิจัยเป็นงานวิจัยที่ศึกษาแนวทางประยุกต์ใช้งานรังวัดบนภาพดิจิทัลซึ่งถ่ายในระยะใกล้ (Digital Close Range Photogrammetry) ในงานวัดความละเอียดสูงในระดับ20-80ไมครอน

1.4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจจะอำนวยความสะดวก

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

1.5.1 เครื่องโคออดิเนโตกราฟ วิลด์ เอ 9 (Coordinatograph Wild A9) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดจุดควบคุมทางราบไม่สามารถวัดระยะทางราบให้ได้ในความละเอียดที่ดีกว่า10ไมครอน

1.5.2 งานควบคุมทางดิ่งใช้การวัดระดับด้วยกล้องระดับN3ร่วมกับไม้ระดับอินวาในการรังวัดให้ความละเอียดถูกต้องอยู่ในระดับ 20 ไมครอน ซึ่งภาวะแวดล้อมในการวัดระดับมิได้ควบคุมปัจจัยของความสั่นสะเทือนจากการเดินเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่จำกัดในการวิจัย

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

1.6.1 การรังวัดบนภาพถ่ายดิจิทัลระยะใกล้ (Digital-Close-Range Photogrammetry) เป็นงานรังวัดบนภาพถ่ายภาคพื้นดินซึ่งถ่ายในระยะวัดไม่เกิน300เมตร (Atkinson,1980)

1.6.2 งานวัดละเอียดสูง(High Precision Measurement) เป็นงานวัดที่ต้องการความละเอียดสูงกว่า100ไมครอนสำหรับงานอุตสาหกรรม

1.6.3 กล้องดิจิทัลความละเอียดสูง(High Resolution Digital Camera) คือ กล้องคอมแพคดิจิทัลที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งให้ความละเอียดในการบันทึกภาพถ่าย 3 ล้านจุดภาพขึ้นไป โดยแต่ละจุดภาพมีขนาดไม่เกิน 5 ไมครอน

1.6.4 การจัดภาพภายใน(Interior Orientation) คือ การจัดวางภาพถ่ายดิจิทัลให้มีลักษณะทางเรขาคณิตเช่นเดียวกันกับตัวรับแสงหรือซีซีดี(CCD)ที่อยู่ในกล้องดิจิทัลขณะถ่ายภาพนั้น โดยอาศัยองค์ประกอบดังนี้ 1)จุดมุขยสำคัญ(Principle Point) 2)ความยาวโฟกัส(Focal Length) 3) ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส(Tangential Lens Distortion) 4)ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี(Radial Lens Distortion)

1.6.5 ความเพี้ยนตามแนวรัศมี(Radial Lens Distortion) คือ ความเพี้ยนจากการผลิตเลนส์ให้มีรูปร่างทางเรขาคณิตตรงตามทฤษฎีได้ไม่สมบูรณ์(วิชัย,2529)

1.6.6 ความเพี้ยนตามแนวสัมผัส(Tangential Lens Distortion) คือ ความเพี้ยนที่เกิดจากการประกอบติดตั้งเลนส์ต่างๆในกล้องถ่ายภาพไม่สามารถที่จะทำให้แกนทัศน(Optical Axis) ของเลนส์แต่ละอันอยู่ในแนวเดียวกันได้จริง

1.6.7 การวัดสอบกล้อง(Camera-Calibration) เป็นการหาองค์ประกอบภาพภายในอันได้แก่ ความยาวโฟกัส จุดมุขยสำคัญของภาพ ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีและตามแนวสัมผัส เพื่อทำให้ภาพที่ถ่ายสามารถนำสร้าง (reconstruction) สภาวะขณะที่ถ่ายภาพและแก้ความเพี้ยนของเลนส์ (Brown, 1971)

1.6.8 ระบบพิกัดภาพถ่าย(Photo Coordinate) คือ ระบบพิกัดฉากสามมิติของภาพใดๆเป็นระบบพิกัดฉากมือขวา มีศูนย์กำเนิดที่จุดมุขยสำคัญ(Principle Point) โดยแกนxและแกนyวางตัวอยู่ในระนาบของภาพ และแกน z อยู่ในทิศทางของแกนกล้องถ่ายภาพ ซึ่งจะมีการหมุนและเลื่อนแกนเพื่อให้เข้ากับระบบพิกัดอ้างอิงในภายหลัง

1.6.9 ระบบพิกัดภาพดิจิทัล(Digital Image Coordinate) คือ ระบบพิกัดฉากสองมิติของภาพดิจิทัลใดๆเป็นระบบพิกัดมือซ้าย มีศูนย์กลางกำเนิดอยู่มุมซ้ายบน(Upper Left)ของภาพนั้นๆ

1.6.10 ระบบพิกัดอ้างอิง(Reference Coordinate System) หมายถึง ระบบพิกัดหลักที่ใช้ในงานวิจัย โดยเป็นระบบพิกัดที่ยึดอยู่กับที่ไม่มีการหมุน หรือเปลี่ยนแปลงระหว่างการวิจัย

1.6.11 การจัดองค์ประกอบภาพภายนอก(Exterior Orientation)คือ การจัดตำแหน่งและการวางตัวของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลขณะถ่ายภาพนั้นๆ

1.6.12 หมุดบังคับ(Control Point) คือ จุดที่ทราบค่าพิกัดในระบบพิกัดอ้างอิงทำหน้าที่บังคับภาพถ่าย

1.6.13 หมุดโยงยึด(Tie Point)คือ จุดที่ไม่ทราบค่าพิกัดในระบบพิกัดอ้างอิงทำหน้าที่โยงยึดภาพในโครงข่ายให้แข็งแรง(Network Strengthening)

1.6.14 เป้าโดยธรรมชาติ (Natural Target) หมายถึง เป้าที่เป็นลักษณะเด่นของชิ้นงาน เช่น มุมที่ชัดเจน การตัดกันของสีที่วัตถุที่ชัดเจน และอื่นๆที่ชัดเจนในการหมายตำแหน่ง

1.6.15 เป้าที่สร้างขึ้น (Signalized Target) หมายถึง เป้าที่สร้างขึ้นบนชิ้นงานเพื่อช่วยเสริมจำนวนจุดร่วม (Tie Point)

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้กระบวนการวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ โดยใช้กล้องดิจิทัลที่มีอยู่ในท้องตลาดในการวัดความละเอียดสูง

1.7.2 ได้ข้อสรุปในแง่ความถูกต้องที่ควรจะได้รับจากวิธีการรังวัดด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ภายใต้สภาวะการถ่ายภาพและหมุดควบคุมที่ออกแบบมา

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ศึกษารวบรวมเกี่ยวกับแนวคิด ทฤษฎี รวมไปถึงการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้

1.8.1.1 แนวคิดในกระบวนการวัดสอบกล้อง (Concept of Camera Calibration)

1.8.1.1.1 กระบวนการการวัดสอบกล้องก่อนออกงาน (Camera Pre-calibration)

1.8.1.1.2 กระบวนการวัดสอบกล้องแบบในตัว (Self Camera Calibration)

1.8.1.2 ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส

1.8.1.3 การปรับแก้สภาวะเชิงร่วมเส้น (Bundle Adjustment)

1.8.1.4 ทฤษฎีความคลาดเคลื่อน (Theory of Error)

1.8.2 กำหนดกรรมวิธีที่ใช้ในการรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้สำหรับงานรังวัดที่ต้องการความละเอียดสูง ซึ่งจะแบ่งโดยสังเขปดังนี้

1.8.2.1 กรรมวิธีในการวัดสอบกล้อง

1.8.2.2 กรรมวิธีในการถ่ายภาพ อันได้แก่

1.8.2.2.1 จำนวนสถานีและตำแหน่งโดยประมาณของสถานี

1.8.2.2.2 มาตรฐานของภาพถ่าย และระยะฐานระหว่างสถานีถ่ายภาพ

1.8.2.2.3 จำนวนภาพต่อสถานี

1.8.2.2.4 สภาพแสง

1.8.3 วิเคราะห์ความต้องการของกรรมวิธีโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความละเอียดถูกต้องของการวัดภาคทฤษฎีปัจจัยอันมีผลต่อความละเอียดถูกต้องได้แก่

1.8.3.1 ความถูกต้องของหมุดควบคุม

1.8.3.2 ขนาดของจุดภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล

1.8.3.3 ความถูกต้องในการวัดพิกัดภาพบนภาพ

1.8.3.3.1 ความถูกต้องในการวัดด้วยมือ (Manual Reference)

1.8.3.3.2 ความถูกต้องในการวัดแบบอัตโนมัติ (Automatic Reference)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.8.3.4 อัตราส่วนระหว่างระยะฐานต่อระยะลึก(Base-Depth Ratio)

1.8.3.5 จำนวนสถานีถ่ายภาพ (Camera Station)

1.8.3.6 จำนวนภาพต่อสถานี (Image per Station)

1.8.4 จัดแบ่งกรณีศึกษาโดยวินิจฉัยถึงความคลาดเคลื่อนในการวัดออกเป็นกรณีต่างๆ เพื่อออกแบบกระบวนการเก็บและประมวลผลข้อมูล

1.8.4.1 กรณีวินิจฉัยข้อมูลในสภาวะทั่วไป (General Data)

1.8.4.1.1 ประมวลผลแบบก่อนออกงาน

1.8.4.1.2 ประมวลผลแบบวัดสอบในตัวด้วยกรรมวิธีทั่วไป

1.8.4.1.3 ประมวลผลแบบวัดสอบในตัวด้วยกรรมวิธีอินเวอร์ส

1.8.4.2 กรณีวินิจฉัยข้อมูลในสภาวะจำเพาะ(Specific Data)

1.8.4.2.1 ประมวลผลแบบก่อนออกงาน

1.8.4.2.2 ประมวลผลแบบวัดสอบในตัวด้วยกรรมวิธีทั่วไป

1.8.4.2.3 ประมวลผลแบบวัดสอบในตัวด้วยกรรมวิธีอินเวอร์ส

1.8.5 จัดเตรียมข้อมูลที่ใช้และเครื่องมือที่ใช้ในวิจัย

1.8.5.1 ข้อมูลขั้นต่ำที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์อย่างน้อยต้องมี ดังนี้

1.8.5.1.1 พิกัดจุดควบคุม (Ground Control Point) อย่างน้อย8จุด

1.8.5.1.2 พิกัดภาพจุดควบคุม (Image Control Point)

1.8.5.1.3 ภาพดิจิทัลถ่ายอย่างน้อย8สถานี โดยถ่ายอย่างน้อย1ภาพต่อสถานี

1.8.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน นี้ คือ

1.8.5.2.1 กล้องถ่ายภาพดิจิทัลโซนี่ เอส75(Sony S-75) ความละเอียดกว่า 3 ล้านจุดภาพ

1.8.5.2.2 เครื่องโคออดิเนโตกราฟวิลด์ เอ9วัดและกล้องระดับN3

1.8.5.2.3 ซอฟต์แวร์สำหรับประมวลโฟโต้โมเดลเลอร์โปร 4.0 ขึ้นไป

1.8.5.2.4 อุปกรณ์แสงไฟสำหรับการถ่ายภาพ

- 1.8.6 ดำเนินการตามเก็บข้อมูลกระบวนการที่ออกแบบในแต่ละกรณี
- 1.8.7 ประมวลผลข้อมูลในแต่ละกรณีที่ได้ออกแบบไว้
- 1.8.8 วิเคราะห์ผลลัพธ์ในแต่ละกรณีศึกษา
- 1.8.9 สรุปเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ พร้อมข้อเสนอแนะ เขียน และพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ วางแผนที่จะนำเสนอผลงานวิจัย โดยการนำเสนอผลงานต่อคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

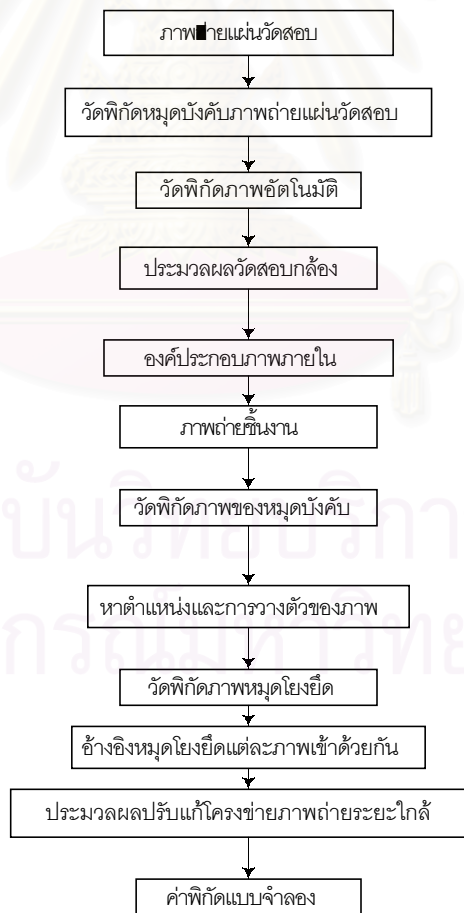
เอกสารและงานวิจัยที่ใช้ในการออกแบบกรณีศึกษา

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 แนวคิดที่ใช้ในการกระบวนการวัดสอบกล้อง

กระบวนการวัดสอบกล้อง สำหรับการวิจัยนี้ ใช้ 2 แนวความคิด ซึ่งจะได้อธิบายโดยสรุป ดังนี้

2.1.1.1 กระบวนการวัดสอบกล้องก่อนออกงาน (Camera Pre-Calibration) เป็นกระบวนการวัดสอบกล้องก่อนการทำงานเพื่อหาค่าความยาวโฟกัส จุดมูขยที่สำคัญ ความเพี้ยนของเลนส์ และ ขนาดภาพ ค่าเหล่านี้ใช้ในการจัดองค์ประกอบภาพภายใน (Brown, 1971) เพื่อคำนวณหาพิกัดของหมุดที่ต้องการทราบค่า ตามขั้นตอนในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานการวัดสอบกล้องก่อนออกงาน

2.1.1.2 กระบวนการวัดสอบกล้องแบบในตัว (Self-Camera Calibration) เป็นกระบวนการที่นำค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความยาวโฟกัส (Focal length) จุดมูขยที่สำคัญเคลื่อน (Principle Point Displacement) และความเพี้ยนของเลนส์ (Lens Distortion) เข้ามาเป็นพารามิเตอร์เสริม (Additional Parameters) ในการกระบวนการปรับแก้ และโดยการทำนี้จะแยกการกระบวนการออกเป็น 2 กรณีย่อย ดังนี้

2.1.1.2.1 กรรมวิธีแบบทั่วไป (General Method)(ภาคผนวก ก)

2.1.1.2.2 กรรมวิธีอินเวอร์ส (Inverse Camera Method)(ภาคผนวก ก)

2.1.1.3 กรรมวิธีแบบทั่วไป (General Method) โดยใช้ค่าเริ่มต้นจากกระบวนการวัดสอบกล้องก่อนการทำงานมาเป็นค่าประมาณเริ่มต้นในการปรับแก้ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 แผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานการวัดสอบกล้องในตัวด้วยกรรมวิธีแบบทั่วไป

2.1.1.4 กรรมวิธีกล้องอินเวอร์ส (Inverse Camera Method) เป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์กล้องถ่ายรูปไปพร้อมกับกระบวนการจับวัตถุบนภาพถ่ายระยะใกล้โดยกระบวนการนี้จะต้องกำหนดค่าความยาวโฟกัสเริ่มต้นให้กับขั้นตอนการปรับแก้ ตามรูปที่ 2.3

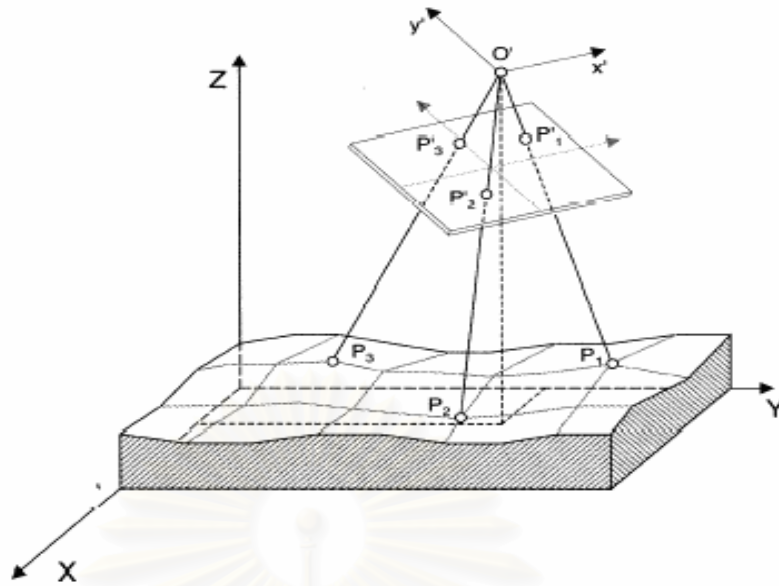


รูปที่ 2.3 แผนผังขั้นตอนแสดงการทำงานการวัดสอบกล้องในตัวด้วยกรรมวิธีแบบอินเวอร์ส

2.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

2.2.1 สภาวะเชิงร่วมเส้น(Collinearity Condition)

การสำรวจด้วยภาพถ่าย ตำแหน่งของจุดภาพบนภาพถ่าย และจุดวัตถุหรือชิ้นงาน ต่างก็มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยระบบพิกัดภาพถ่ายก็ดี ระบบพิกัดอ้างอิงก็ดี สามารถจะเชื่อมโยงกันด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างรังสีแสงจากจุดบนวัตถุไปยังจุดรวมแสง(Perspective Center) และรังสีแสงจากจุดเดียวกันบนภาพถ่ายไปยังจุดรวมแสงเป็นแนวเส้นตรงเดียวกัน (ดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีจากจุดรวมแสงไปยังจุดบนภาพและวัตถุ (Luhman, 2000)

จากความสัมพันธ์นี้ สามารถที่จะแปลงค่าพิกัดด้วยการใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ที่เรียกว่า สมการสถานะเชิงร่วมเส้น (Collinearity Equation) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{S} \begin{bmatrix} -x_0 \\ R - y_0 \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

กำหนด X, Y, Z แทน พิกัดจุดใดๆบนชิ้นงานในระบบพิกัดอ้างอิง

X_0, Y_0, Z_0 แทน ตำแหน่งจุดศูนย์กลางทัศนในระบบพิกัดอ้างอิง

S แทน มาตรฐานระหว่างระบบพิกัดอ้างอิงและระบบพิกัดภาพ

R แทน เมตริกซ์การหมุนจากระบบพิกัดภาพไปสู่ระบบพิกัดอ้างอิง

x, y แทน พิกัดจุดเดียวกันบนภาพในระบบพิกัดภาพถ่าย

x_0, y_0 แทน พิกัดจุดमुखสำคัญของภาพถ่ายในระบบพิกัดภาพถ่าย

f แทน ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

2.2.2 ความคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบ(Systematic Error)

ความคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบของการรังวัดด้วยภาพถ่ายได้แก่ ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี และความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส

สมการความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots + k_n r^{2n+1} \quad (2.2)$$

กำหนด $k_1, k_2 \dots k_n$ แทน ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี

$\square r$ แทน ความคลาดเคลื่อนตามแนวรัศมี

r แทน ระยะตามแนวรัศมีของเลนส์

n แทน จำนวนเต็มบวก

สมการความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส

$$\Delta x = P_1 (r^2 + 2 \overline{xy}^2) + 2P_2 \overline{xy} \quad (2.3)$$

$$\Delta y = P_2 (r^2 + 2 \overline{xy}^2) + 2P_1 \overline{xy}$$

กำหนด P_1, P_2 แทน ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส

$$\text{เมื่อ } r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

2.2.3 การหายจุดบนภาพด้วยวิธีศูนย์กลางถ่วงความเข้ม

การหายจุดศูนย์กลางด้วยวิธีจุดศูนย์กลางถ่วงความเข้ม(Intensity Weight Centroid Method)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (2.4)$$

กำหนด \bar{x}, \bar{y} แทน ตำแหน่งของจุดหมายกลางเป้า หน่วย มิลลิเมตร

x_i, y_i แทน ค่าพิกัดภาพดิจิทัล หน่วย มิลลิเมตร

g_i แทน ค่าความสว่างจุดภาพ

และ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการหายจุดด้วยวิธีศูนย์กลางถ่วงความเข้ม (Luhman, 2000)

$$\sigma_{XM} = \frac{1}{\sum g_i} \sqrt{\sum (X_i - X_M)^2} \cdot \sigma_g \quad (2.5)$$

$$\sigma_{YM} = \frac{1}{\sum g_i} \sqrt{\sum (Y_i - Y_M)^2} \cdot \sigma_g \quad (2.6)$$

ดังนั้น การหายจุดด้วยวิธีอัตโนมัติ จะถูกต้องเพียงใดขึ้นอยู่กับความคมชัดของภาพ

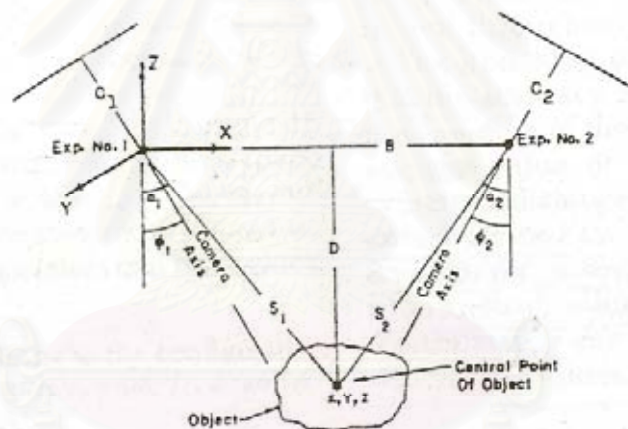
2.2.4 การหาจุดโยงยึดด้วยวิธีอัตโนมัติ

กระบวนการที่ใช้ในการหาจุดโยงยึดด้วยวิธีอัตโนมัติโดยอาศัยหลักการจับคู่ภาพเหมือนกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Matching) เพื่อหาตำแหน่งจุดร่วม (Tie Point) เดียวกันในแต่ละภาพ (Forlani, Guissani และ Scaioni, 1996)

2.2.5 ทฤษฎีความคลาดเคลื่อน

ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ มีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ดังต่อไปนี้

- ความละเอียดของจุดภาพที่ใช้ในการเก็บมูล
- ความถูกต้องแม่นยำในการหาตำแหน่งจุดภาพ
- อัตราส่วนระหว่างระยะฐานต่อระยะลึก
- มุมคอนเวอร์เจนซ์ของกล้อง



รูปที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบของการถ่ายภาพที่สมมาตร (Karara, 1974)

สามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ (Karara, 1974) ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{D}{C} \frac{(+t \alpha_n \phi_{an})}{(+t \alpha_n \phi_{an})} \sigma_x$$

$$\sigma_y = \frac{D}{C} \frac{s \phi_c}{(+t \alpha_n \phi_{an})} \sigma_x \quad (2.8)$$

$$\sigma_z = \frac{D/C}{B/D} \sqrt{2} \frac{(+t \alpha_n \phi_{an})}{(+t \alpha_n \phi_{an})} \sigma_x$$

จากรูปที่ 2.5 และ สมการที่ 2.8

σ_x แทนความถูกต้องในการวัดพิกัดภาพ

$\phi = \phi_1 = \phi_2$ เป็นมุมครึ่งหนึ่งของมุมคอนเวอร์เจนท์

$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \tan^{-1}(B/2D)$ มุมศูนย์กลางวัตถุ

$C = C_1 = C_2$ แทนความยาวโฟกัส

$D = D_1 = D_2$ แทนระยะถ่ายภาพ

B แทนระยะฐานของการถ่ายภาพ

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 หมวดดังนี้

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวัดสอบกล้องแบบนอนเมตริก (Non-Metric)

Linkwitz (1972) ได้เสนอเอกสารเชิงวิพากษ์ถึงการวัดสอบกล้อง โดยเสนอสมมติฐานเรื่องของการใช้แผ่นวัดสอบชนิดแผ่นราบ (2D) สามารถหาค่าประกอบภาพภายในเช่นเดียวกับการใช้แผ่นวัดสอบชนิดแผ่นที่มีส่วนยื่นออกมา (3D)

Karara (1974) ได้วิจัยเกี่ยวกับความถูกต้องทางตำแหน่งในงานวัดบนภาพถ่ายซึ่งถ่ายด้วยกล้องทั่วไป (Non-Metric) พบว่า ภาพถ่ายจากกล้องเหล่านี้สามารถใช้ในการรังวัดบนภาพถ่ายได้โดยการเพิ่มพารามิเตอร์ลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้าไปแก้ความเพี้ยนของเลนส์ และประเมินความถูกต้องจากงานวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้จากคู่ภาพที่ถ่ายแบบคอนเวิร์จเชิงสมมาตร (Symmetry Convergent)

Fraser (1997) เสนอเอกสารทางวิชาการเรื่อง การวัดสอบกล้องดิจิทัลด้วยตัวเอง (Digital Camera Self-calibration) ได้สรุปถึงความสำคัญและพารามิเตอร์ในการวัดสอบกล้องด้วยตัวเอง (Additional Parameter)

2.3.2 งานวิจัยทางด้านการวัดในงานอุตสาหกรรมด้วยภาพถ่ายระยะใกล้

Fedak ได้วิจัยความถูกต้องทางตำแหน่งของการวัดสามมิติในการใช้กล้องราคาถูก (Consumer-Grade) และการใช้เป้าสะท้อนจากงานสำรวจ ซึ่งสรุปให้เห็นถึงความถูกต้องในการวัดบนภาพถ่ายด้วยกล้อง Fujifilm MX-2900 ให้ความถูกต้องทางตำแหน่ง 1:10000 โดยการใช้เป้าสะท้อนจากงานสำรวจ

Pappa, Giersch และ Quagliaroli ได้วิจัยในเรื่องของการวัดงานเสาอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตรด้วยกล้องราคาถูก โดยวิเคราะห์กระบวนการวัดบนภาพถ่ายจากวัตถุไปสู่ CAD

Fraser (1999) ได้วิจัยในเรื่องของความสมบูรณ์ของการวัดบนภาพถ่ายสำหรับงานอุตสาหกรรมและความสำรวจในงานวิศวกรรม โดยพบว่า การวัดบนเปลือกหอย (Shell) ขนาด 160 มิลลิเมตร ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับ 30 ไมครอน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิเคราะห์ระบบการรังวัดบนภาพถ่ายระยะใกล้ในทางทฤษฎี

ในการวิจัยได้ดำเนินการถ่ายภาพด้วยกล้องโซนี่ เอส75(Sony S-75) ซึ่งมีความละเอียดจุดภาพ 0.0034 มิลลิเมตร มาตราส่วนภาพถ่ายเท่ากับ 1:100 อัตราส่วนระยะฐานต่อระยะวัตถุ เท่ากับ 2 โดยระยะฐานมีค่าเท่ากับ 1 เมตร ระยะวัตถุเท่ากับ 0.5 เมตรโดยประมาณ แทนค่าในสมการที่ 2.8 จะได้ความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positional Accuracy) เท่ากับ 0.036 มิลลิเมตร

3.2 การออกแบบกรณีศึกษาสำหรับงานวิจัย

จากแนวคิดและทฤษฎีที่กล่าวมาไว้ในบทที่ 2 พิจารณาประเด็นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อ กำหนดกรณีศึกษาได้ ดังนี้

3.2.1 กรรมวิธีการวัดสอบกล้อง

(จากข้อ 2.1.1) สามารถแบ่งในการวัดสอบออกเป็น 3 กรรมวิธี ได้แก่

- ก) การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน
- ข) การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป
- ค) การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส

3.2.2 กรรมวิธีการเก็บข้อมูลภาพ

ในบทที่ 2 (จากข้อที่ 2.2.3 และข้อที่ 2.2.4) ได้กล่าวถึงแนวคิดในการวัดพิกัดภาพของหมุดบังคับ และหมุดโยงยึดตามลำดับ โดยแนวคิดดังกล่าว ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบคุณลักษณะข้อมูล ตามกรรมวิธีเก็บข้อมูล (Data Acquisition) สำหรับใช้ในงานวิจัย โดยรายละเอียดต่างๆมีดังนี้

3.2.2.1 หมุดบังคับและหมุดโยงยึดภาพ ออกแบบเป้า (Target) เป็น 2 ประเภท คือ 1) เป้าธรรมชาติ 2) เป้าสร้างขึ้น (ตามข้อ 1.6.6 และ 1.6.7) โดยกรรมวิธีในการวัดพิกัดภาพของหมุดบังคับและหมุดโยงยึด แบ่งได้เป็น 3 กรรมวิธี ดังนี้

3.2.2.1.1 การวัดด้วยมือ (Point Marking) เป็นการวัดพิกัดภาพของหมุดบังคับและหมุดโยงยึด ณ จุดที่มีลักษณะเป็นจุดเด่นและชี้ชัด (Well Identify Point) หรือเป้าธรรมชาติ (ดั่งนิยาม ข้อ 1.6.6) โดยการหมายตำแหน่งด้วยวิธีการนี้ให้ความถูกต้อง $\frac{1}{3}$ จุดภาพ

3.2.2.1.2 การวัดโดยใช้ศูนย์ถ่วง (Sub Pixel Target Marking) เป็นการวัดพิกัดภาพของหมุดบังคับประเภทเป้าสร้างขึ้น (หลักการวัด ตามข้อที่ 2.2.3) โดยการหมายตำแหน่งด้วยวิธีการนี้ให้ความถูกต้อง $\frac{1}{3}$ จุดภาพ

3.2.2.1.3 การวัดโดยอัตโนมัติ (Automatic Target Marking) เป็นการวัดพิกัดภาพของหมุดโดยยึดประเภทเป้าสร้างขึ้น (หลักการวัด ตามข้อที่ 2.2.4) โดยการหมายตำแหน่งด้วยวิธีการนี้ให้ความถูกต้อง $\frac{1}{3}$ จุดภาพ

จากกรรมวิธีที่ใช้ในการวัดพิกัดภาพ จะเห็นว่า การวัดโดยใช้ศูนย์ถ่วงและการวัดโดยอัตโนมัติ อาศัยค่าความสว่าง(Brightness Value) ของจุดภาพ เป็นองค์ประกอบในการคำนวณหาตำแหน่งศูนย์กลางเป้า ดังนั้น หากภาพถ่ายมีความสว่าง (Brightness) และความคมชัด (Contrast) ของภาพที่ดีจะทำการคำนวณตำแหน่งศูนย์กลางเป้าแม่นยำ อาจกล่าวอีกนัยได้ว่า การควบคุมคุณภาพเชิงคลื่นแสง (Radiometric Quality) เป็นปัจจัยสำคัญในการคำนวณจุดศูนย์กลางของเป้าทั้งแบบศูนย์ถ่วงและแบบอัตโนมัติ

ด้วยเหตุนี้ กรรมวิธีการถ่ายภาพขึ้นงานจึงแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1) การถ่ายภาพโดยการไม่ควบคุมแสง โดยใช้สภาพแสงสว่างปกติของห้องปฏิบัติการซึ่งมีระดับค่าความสว่างที่ (g_a) 125 – 145 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความเข้มแสง (σ_{g_a}) อยู่ระหว่าง 18 - 40

2) การถ่ายภาพโดยการควบคุมแสง ด้วยอุปกรณ์แสงไฟสำหรับการถ่ายภาพเพื่อให้เกิดความสว่างครอบคลุมชิ้นงานอย่างทั่วถึงและไม่มีแสงเงาเกิดขึ้น ดังนั้น ภาพถ่ายที่ได้จะมีค่าความสว่างของจุดภาพที่เข้มและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความเข้มแสงน้อยๆ (Schenk, 1999) ข้อมูลภาพถ่ายที่ถ่ายได้จากห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยมีระดับค่าความสว่างที่ (g_a) 79-86 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความเข้มของแสงอยู่ระหว่าง 20 – 26

ดังนั้น การออกแบบกรณีศึกษาอาศัยกรรมวิธีการวัดสอบกล่องและกรรมวิธีการเก็บข้อมูลภาพจึงออกแบบกรณีศึกษาออกเป็น 6 กรณี ดังตารางที่ 3.1

| รายละเอียด กระบวนการ | การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน (Camera Pre-calibration) | | การวัดสอบกล้องในตัว(Self Camera Calibration) | | | |
|---------------------------------|--|---------------|--|---------------|-----------------------|---------------|
| | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | แบบทั่วไป (Genera) | | แบบอินเวอร์ส(Inverse) | |
| | | | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 |
| หมุดบังคับ | เป้าสร้างขึ้น | เป้าสร้างขึ้น | เป้าสร้างขึ้น | เป้าสร้างขึ้น | เป้าสร้างขึ้น | เป้าสร้างขึ้น |
| หมุดโยงยึด | เป้าธรรมชาติ | เป้าสร้างขึ้น | เป้าธรรมชาติ | เป้าสร้างขึ้น | เป้าธรรมชาติ | เป้าสร้างขึ้น |
| การวัดพิกัดภาพ ของหมุดบังคับ | วัดมือ | ศูนย์ถ่วง | วัดมือ | ศูนย์ถ่วง | วัดมือ | ศูนย์ถ่วง |
| การวัดพิกัดภาพ ของหมุดโยงยึด | วัดมือ | อัตโนมัติ | วัดมือ | อัตโนมัติ | วัดมือ | อัตโนมัติ |
| การควบคุมแสง | ไม่ควบคุม | ควบคุม | ไม่ควบคุม | ควบคุม | ไม่ควบคุม | ควบคุม |

ตารางที่ 3.1 ตารางสรุปรายละเอียดในแต่ละกรณีศึกษา

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 กล้องถ่ายภาพดิจิทัล

ใช้กล้อง Sony S75 ความละเอียด 3 ล้านจุดภาพ ขนาดจุดภาพ 3.45 ไมครอน (ภาคผนวก ข)

3.3.2 อุปกรณ์ควบคุมแสง

ใช้โคมไฟ Ellinchrom ขนาด500Wsสำหรับการควบคุมแสงในการถ่ายภาพ

3.3.3 โคออดิเนโตกราฟ

เครื่องวัดพิกัดทางราบโคออดิเนโตกราฟ Wild A9 ความละเอียดถูกต้อง10ไมครอน

3.3.4 กล้องระดับและไม้ระดับอินวา

กล้องระดับWild N3และไม้ระดับอินวา วดพิกัดทางตั้งความละเอียดถูกต้อง 20 ไมครอน

3.3.5 ซอฟต์แวร์โฟโตโมเดลเลอร์

ซอฟต์แวร์สำหรับทำงานรังบนภาพถ่ายระยะใกล้ ใช้วัดสอบกล้อง หาตำแหน่งและการวางตัวของกล้องและคำนวณหาพิกัดฉากสามมิติของจุดใดๆ (ภาคผนวก ก)

3.3.6 ชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย

ใช้ชิ้นงาน 3 ชิ้น ได้แก่ 1) แผ่นเหล็กติดหมุดตรวจสอบ (Check Point) 2) กระจกมองข้างรถยนต์ 3) เครื่องดูดผงมีลวดลายจุด

3.4 การดำเนินการเก็บข้อมูลสำหรับงานวิจัย

3.4.1 การวัดสอบเครื่องมือวัดพิกัดทางราบ โคออดิเนโตกราฟ วิลด์ เอ9 (Wild A9)

3.4.1.1 ปรับระดับโคออดิเนโตกราฟ

3.4.1.1.1 ทำการอ่านค่าไม้ระดับที่แต่ละมุมโต๊ะแล้วบันทึกไว้

3.4.1.1.2 นำค่าไม้ระดับมาเฉลี่ยเลือกค่าที่ใกล้เคียงค่าเฉลี่ยมากที่สุดเป็นค่าอ้างอิง

3.4.1.1.3 ปรับขาโต๊ะโคออดิเนโตกราฟปรับขาให้อ่านค่าไม้ระดับเท่ากับค่าอ้างอิง

3.4.1.1.4 วนซ้ำตามข้อที่3.4.1.1.1 จนถึงข้อ3.4.1.1.3 จนกว่าจะอ่านค่าไม้ระดับได้ใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง

หมายเหตุ ขณะทำการปรับโต๊ะแล้วสุดท้ายให้ปรับเพิ่มขนาดระยะห่างให้มากขึ้นจากนั้นทำตามเริ่มข้อที่3.4.1.1.1ไปจนเสร็จกระบวนการ

3.4.1.2 วัดสอบเครื่องมือวัดพิกัดทางราบโคออดิเนโตกราฟ วิลด์ เอ9 (Wild A9)

วัดสอบแผ่นกริดกระจกขนาด 10x10 มิลลิเมตร จำนวน 10x10 ช่อง โดยวัดมุมขนาดกริดกระจายตลอดแนวแกน X และแกน Y เพื่อตรวจสอบการความถูกต้องในการวัดพิกัดทางราบ โดยผลการวัดสอบในการวัดระยะแตกต่างจากแผ่นกริดโดยเฉลี่ย 0.011 มิลลิเมตร

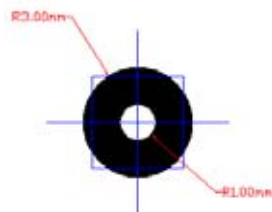
3.4.2 หมุดบังคับในงานวิจัย

ได้ออกแบบหมุดบังคับมีลักษณะดังรูปที่3.1 โดยอาศัยปัจจัยดังนี้

3.4.2.1 มาตรฐานภาพถ่าย(S)

3.4.2.2 ขนาดของจุดภาพ (Px)

3.4.2.3 จำนวนจุดภาพที่ต้องการให้ปรากฏบนภาพถ่าย (n) จากคู่มือโฟโตโมเดลเลอร์ (Online help) ได้ออกแบบให้รัศมีวงเล็ก (R) 1 มิลลิเมตร และรัศมีวงใหญ่ (R) 3 มิลลิเมตร

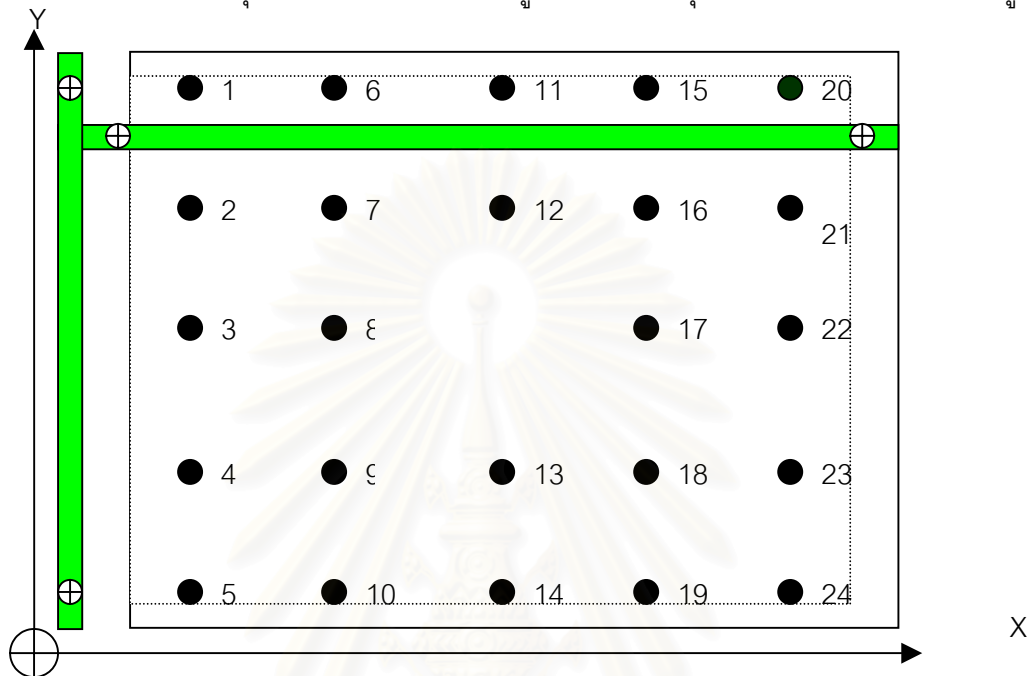


รูปที่3.1 หมุดบังคับที่ติดไว้บนผิวโต๊ะโคออดิเนโตกราฟ วิลด์ เอ9

3.4.3 การกำหนดตำแหน่งหมุดบังคับภาพบนโต๊ะโคออดิเนตกราฟ

3.4.3.1 ติดหมุดบังคับ เป็นกริดตารางขนาด200x200 มม.

3.4.3.2 ติดหมุดบังคับตามตำแหน่งดังรูปที่3.2 โดยหมุดบังคับที่ติดมีลักษณะตามรูปที่3.1



รูปที่3.2 ภาพแสดงตำแหน่งหมุดควบคุมบนโต๊ะโคออดิเนตกราฟ วิลด์ เอ9

3.4.4 วัดพิกัดหมุดบังคับภาพบนโต๊ะโคออดิเนตกราฟ

ดำเนินการวัดพิกัดหมุดบังคับบนโต๊ะโคออดิเนตกราฟ วิลด์ เอ9 ดังที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่3.1 ดังนี้

3.4.4.1 การทดสอบค่าสถิติในการวัด

3.4.4.1.1 การวัดค่าพิกัดXและY ดำเนินการจัดตำแหน่งของจุดบนโต๊ะจำนวน100 ครั้ง แล้วหาค่าเชิงสถิติได้ดังนี้

ค่า $\sigma_x = 0.006$ มิลลิเมตร

ค่า $\sigma_y = 0.009$ มิลลิเมตร

3.4.4.1.2 การวัดค่าพิกัดZดำเนินการอ่านค่าไม้ระดับจำนวน100ครั้ง แล้วหาค่าเชิงสถิติได้ดังนี้

ค่า $\sigma_z = 0.02$ มิลลิเมตร

3.4.4.2 วัดพิภักหมุดบังคับทางราบ

3.4.4.2.1 ตรวจจสอบและตั้งค่าไมโครมิเตอร์ที่ (0, 0)

3.4.4.2.2 เล็งกล้องตั้งกำหนดศูนย์กำเนิดที่จุดหมายเลข5 ให้ค่าพิภักเป็น (0, 0) มิลลิเมตร

3.4.4.2.3 หมุนกล้องเล็ง (Telescope) ไปหมุดบังคับ แล้วอ่านและบันทึกค่าพิภักทางXและY

3.4.4.2.4 ซ้ำกลั้บมาอ่านค่า ณ จุดศูนย์กำเนิดอีกครั้ง (หมุดหมายเลข 5) อ่านและบันทึกค่าพิภักทางแกนXและแกนY

3.4.4.2.5 กระทำการวัดซ้ำตามข้อ 3.4.4.2.1 ถึง 3.4.4.2.4 ทั้งสิ้น 5 ครั้ง

3.4.4.2.6 หาค่าเฉลี่ยการวัดหมุดบังคับ แล้วหาค่าต่างระหว่างค่าสังเกตกับค่าเฉลี่ยที่วัดได้ และพิจารณาค่าต่างที่เกินกว่าระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ95หรือ 20 ไมครอน ตัดออกแล้ววัดพิภักทางราบตามข้อ 3.4.4.2.1 ถึง 3.4.4.2.4 ใหม่

3.4.4.2.7 กระทำตามข้อ3.4.4.2.6 จนกว่าค่าต่างระหว่างค่าพิภักที่วัดมากับค่าเฉลี่ยอยู่เกณฑ์ข้างต้น

3.4.4.3 วัดพิภักหมุดบังคับทางตั้ง

3.4.4.3.1 ภายหลังจากการตั้งเครื่องมือ กำหนดค่าระดับจุดหมายเลข1 เป็น 0.000 มิลลิเมตร อ่านค่าไม้ระดับ

3.4.4.3.2 อ่านค่าบนไม้ระดับที่หมุดบังคับหมุดละ 5 ครั้ง

3.4.4.3.3 หาค่าเฉลี่ยของค่าไม้ระดับ

3.4.4.3.4 คำนวณค่าต่างระหว่างค่าสังเกตกับค่าเฉลี่ยที่วัดได้ และพิจารณาค่าต่างที่เกินกว่าระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ95 หรือ 30 ไมครอน ตัดออกแล้ววัดตามข้อ 3.4.4.3.1 ถึง 3.4.4.3.3

3.4.4.3.5 กระทำตามข้อ3.4.4.3.4 จนกว่าค่าต่างระหว่างค่าพิภักทางตั้งที่วัดมากับค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ข้างต้น

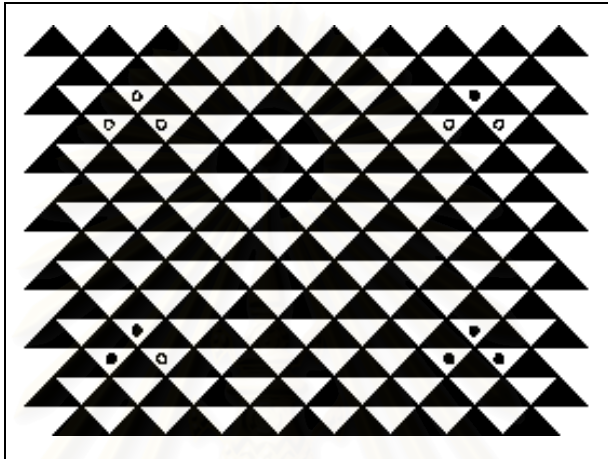
ตารางที่ 3.2 ค่าพิกัดหมุดบังคับภาพถ่าย

| หมุดบังคับ | ค่าพิกัดX | ค่าพิกัดY | ค่าพิกัดZ |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0.244 | 799.444 | 0.000 |
| 2 | 0.406 | 599.844 | 0.390 |
| 3 | 0.669 | 399.728 | 0.616 |
| 4 | 0.218 | 200.007 | 0.500 |
| 5 | 0.016 | 0.005 | 0.502 |
| 6 | 200.609 | 799.543 | -0.087 |
| 7 | 200.562 | 600.036 | 0.346 |
| 8 | 200.623 | 399.976 | 0.608 |
| 9 | 200.428 | 200.136 | 0.540 |
| 10 | 200.544 | -0.024 | 0.505 |
| 11 | 399.517 | 799.692 | -0.034 |
| 12 | 399.858 | 600.311 | 0.385 |
| 13 | 399.880 | 199.722 | 0.602 |
| 14 | 399.359 | -0.018 | 0.543 |
| 15 | 600.979 | 799.821 | 0.026 |
| 16 | 600.180 | 599.839 | 0.461 |
| 17 | 600.834 | 400.267 | 0.689 |
| 18 | 601.008 | 200.340 | 0.640 |
| 19 | 600.383 | 0.085 | 0.588 |
| 20 | 801.034 | 799.855 | 0.096 |
| 21 | 800.653 | 600.187 | 0.546 |
| 22 | 800.563 | 400.411 | 0.785 |
| 23 | 800.996 | 200.226 | 0.680 |
| 24 | 800.739 | -0.023 | 0.665 |

3.4.5 การวัดสอบกล้องก่อนออกงานตามวิธีของซอฟต์แวร์

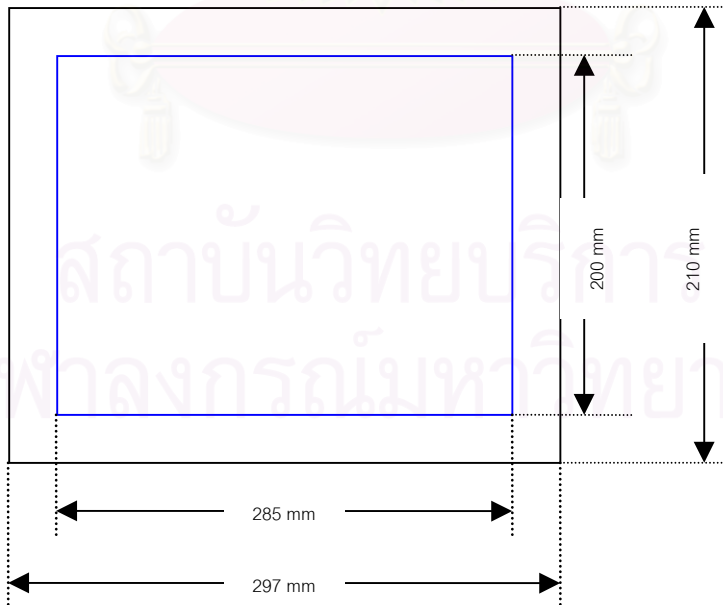
3.4.5.1 พิมพ์แผ่นวัดสอบและแผ่นประมาณขนาด

3.4.5.1.1 พิมพ์แผ่นวัดสอบลักษณะตามแบบในรูปที่ 3.3 (แบบแผ่นวัดสอบเป็นแบบมากำหนดขึ้นโดยซอฟต์แวร์โฟโตโตรีโมเดลเลอร์) ลงบนกระดาษCanon PR101 ที่ความละเอียด 2400*1200 จุดต่อนิ้ว



รูปที่ 3.3 แผ่นวัดสอบที่กำหนดขึ้นโดยโฟโตโตรีโมเดลเลอร์

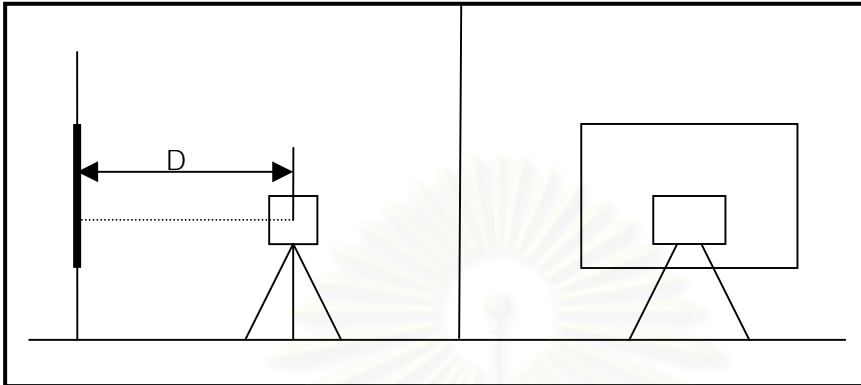
3.4.5.1.2 พิมพ์แผ่นประมาณขนาด ตามแบบในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 200x285 มม. ด้วยความละเอียดในการพิมพ์เช่นเดียวกับข้อ 3.3.4.1.2



รูปที่ 3.4 แผ่นประมาณขนาด

3.4.5.2 การหาค่าประมาณพารามิเตอร์เริ่มต้น

3.4.5.2.1 ถ่ายภาพประมาณเริ่มต้น พร้อมวัดระยะถ่ายภาพ และบันทึกค่าความยาวโฟกัสที่ใช้ในการถ่ายภาพ



รูปที่ 3.5 ภาพร่างการถ่ายภาพแผ่นประมาณขนาด

3.4.5.3 การถ่ายภาพแผ่นวัดสอบ

3.4.5.3.1 ถ่ายภาพแผ่นวัดสอบ 10 ใบดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายแผ่นวัดสอบในแต่ละมุม

3.4.5.4 ประมวลผลภาพถ่าย

3.4.5.4.1 นำภาพถ่ายในรูปที่ 3.6 ประมวลผลด้วยโมดูลวัดสอบกล้อง (Camera Calibrator)

3.4.5.4.2 ประมวลผลปรับแก้จนได้ค่าประมาณที่ดีที่สุด (Best Estimation)

3.4.5.4.3 ผลลัพธ์การปรับแก้กล้องเพื่อใช้ประกอบการประมวลผลในลำดับต่อไป

ดังนี้

| Focal Length (mm) | Format Size W (mm) | Format Size H (mm) | Principle Point X (mm) | Principle Point Y (mm) | K1 | K2 | P1 | P2 |
|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 7.098900 | 6.980000 | 5.260400 | 3.415500 | 2.610500 | 0.004185 | 0.000081 | 0.000334 | 0.000010 |

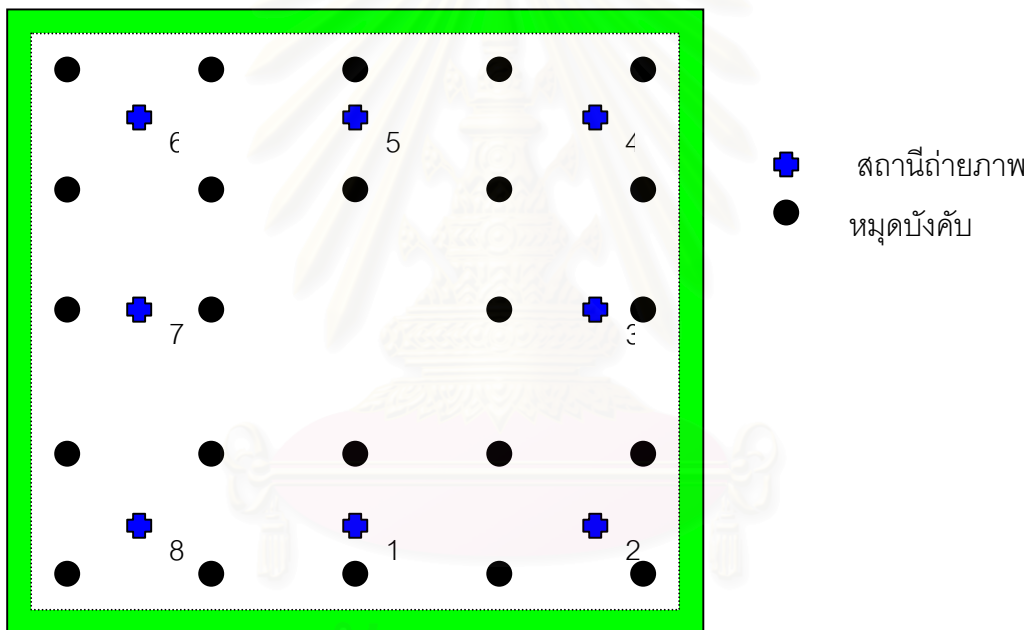
ตารางที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบภาพภายในที่ได้จากการปรับแก้ก่อนออกงาน

3.4.6 การถ่ายภาพชิ้นงาน

3.4.6.1 มาตรฐาน 1:100

3.4.6.2 ตำแหน่งถ่ายภาพชิ้นงาน จำนวน 8 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งกล้องถ่ายภาพดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 ภาพร่างสถานีถ่ายภาพ

แบ่งเป็น 3 ชุด สถานี

3.4.6.2.1 ชุด 4 ตำแหน่งถ่ายภาพ จำนวนภาพ 4 ภาพ สถานี 1,3,5,7

3.4.6.2.2 ชุด 4 ตำแหน่งถ่ายภาพ จำนวนภาพ 8 ภาพ สถานี 1-8

3.4.6.2.3 อัตราส่วนระยะฐานต่อระยะลึก (Base Depth Ratio) สำหรับคู่สถานีต่อ

ไปนี้

3.4.6.2.3.1 สถานีที่ 1 กับ สถานีที่ 3 ประมาณ 2

3.4.6.2.3.2 สถานีที่ 3 กับ สถานีที่ 5 ประมาณ 2

3.4.6.2.3.3 สถานีที่ 5 กับ สถานีที่ 7 ประมาณ 2

3.4.6.2.3.4 สถานีที่ 7 กับ สถานีที่ 1 ประมาณ 2

3.4.6.2.3.5 สถานีที่ 2 กับ สถานีที่ 4 ประมาณ 2.5

3.4.6.2.3.6 สถานีที่ 4 กับ สถานีที่ 6 ประมาณ 2.5

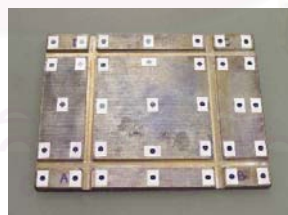
3.4.6.2.3.7 สถานีที่ 6 กับ สถานีที่ 8 ประมาณ 2.5

3.4.6.2.3.8 สถานีที่ 8 กับ สถานีที่ 1 ประมาณ 2.5

3.4.6.3 ถ่ายภาพชิ้นงาน 2 ชิ้น ดังนี้ แผ่นเหล็กติดหมุดตรวจสอบ กระจกมองข้างรถยนต์ และ เครื่องดูคดผงลายจุด

3.4.7 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

3.4.7.1 ชิ้นงานที่ 1 แผ่นเหล็กติดหมุดตรวจสอบที่ทราบพิกัด ดังรูปที่ 3.8 มีขนาด 150x150x15 มิลลิเมตรโดยประมาณ มีลักษณะความหนาสม่ำเสมอผิวเรียบในระดับเดียวกัน



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ 1

3.4.7.2 ชิ้นงานที่ 2 กระจกมองข้างรถยนต์ ดังรูปที่ 3.8 มีขนาด 120x150x30 มิลลิเมตร โดยประมาณ มีลักษณะผิวมีลาดชันเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานที่ 2

3.4.7.3 ชิ้นงานที่ 3 เครื่องดูดผงลายจุด ดังรูปที่ 3.8 มีขนาด 50x100x500 มิลลิเมตรโดยประมาณ มีลักษณะผิวมีความลาดชันค่อนข้างมาก



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ 3

ชิ้นงานตัวอย่างทั้งสามชิ้นจะนำมาทำการประมวลผลตามกรณีศึกษาที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 และสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานที่ 1 (รูปที่ 3.8) เป็นชิ้นงานแม่แบบมาตรฐาน (Standard Master Piece) สำหรับตรวจสอบความถูกต้องในการวัดขนาดของระยะที่ได้จากการคำนวณจากพิกัดที่ได้วิธีการวัดตรงเทียบกับระยะที่ได้จากการคำนวณจากพิกัดที่ได้จากงานสำรวจด้วยภาพถ่าย

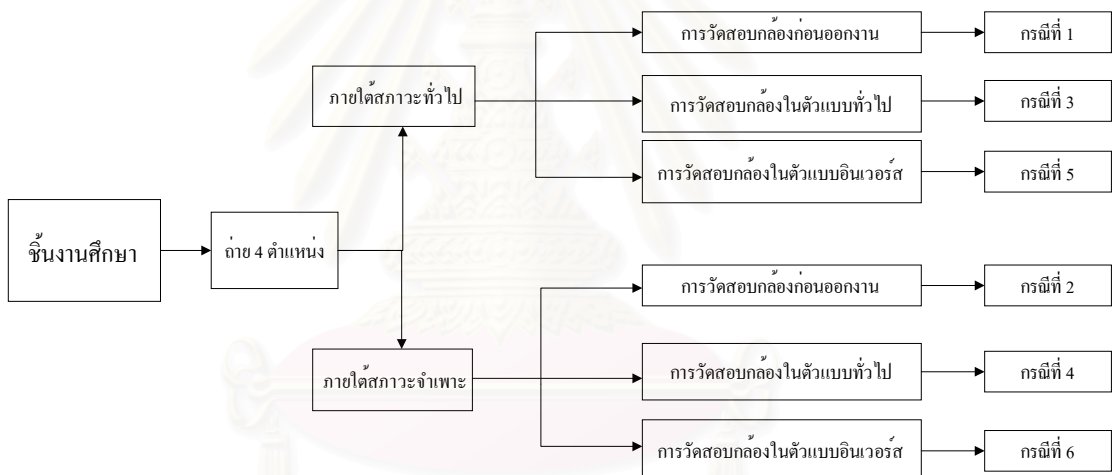
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

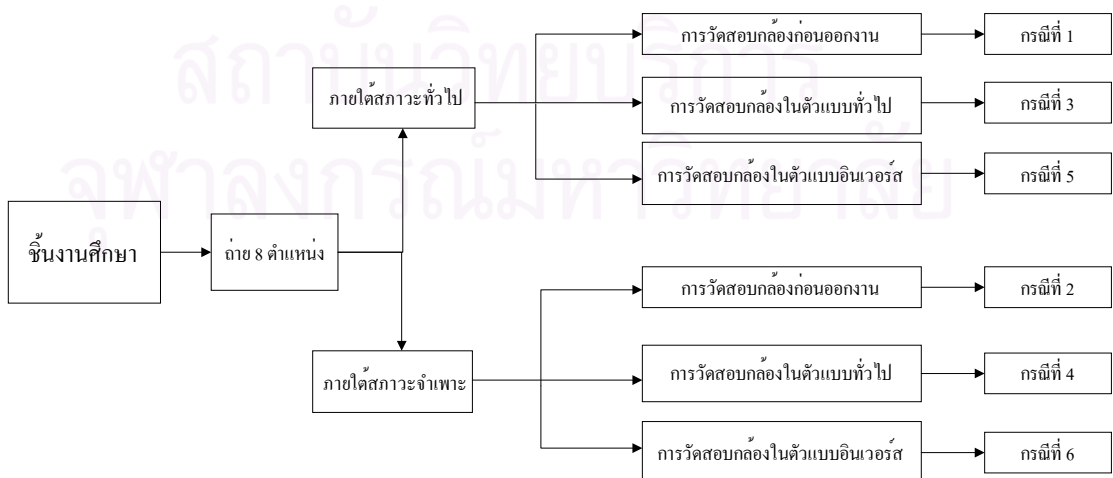
วิเคราะห์ผลการวิจัย

ผลลัพธ์และตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยโฟโต้โมเดลเลอร์ได้แสดงไว้ในข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลจะแยกพิจารณาความละเอียดถูกต้องของชิ้นงานศึกษาที่ 1, 2 และ 3 ตามข้อ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ โดยในแต่ละชิ้นงานแยกการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง และ 2) การถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง และได้สรุปผลลัพธ์เป็นตารางเปรียบเทียบ ขนาดความละเอียดถูกต้อง

การพิจารณาข้อมูลภาพถ่ายที่ 4 และ 8 ตำแหน่งของชิ้นงานศึกษาแต่ละชิ้น แบ่งกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถสรุปเป็นผังการประมวลผลแต่ละกรณีศึกษาได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1ก และ 4.1ข ตามลำดับ



รูปที่ 4.1ก ผังรายละเอียดแต่ละกรณีศึกษาของชิ้นงานศึกษาที่ถ่าย 4 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.1ข ผังรายละเอียดแต่ละกรณีศึกษาของชิ้นงานศึกษาที่ถ่าย 8 ตำแหน่ง

4.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลโดยโฟโตโมเดลเลอร์

โฟโตโมเดลเลอร์ใช้หลักการคำนวณปรับแก้ค่าเศษเหลือกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Adjustment Computation) ในการประมวลผล โดยค่าเศษเหลือ (Residual) ของพิกัดภาพของหมุดบังคับและหมุดโยงยึดภาพจะถูกสรุปเป็นค่าน้ำหนักหนึ่งหน่วยมาตรฐาน (Standard Unit Weight) และใช้ค่านี้นำมาคำนวณซ้ำจนกระทั่งค่าน้ำหนักหนึ่งหน่วยมาตรฐานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ค่าน้ำหนักหนึ่งหน่วยมาตรฐานที่คำนวณได้ จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 จึงจะยอมรับว่าผลการคำนวณที่ได้มีความถูกต้องในขั้นนี้ (Photomodeler Online help) โดยค่านี้เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบไครส์แคิร์ฟที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ 6 กรณีย่อย คือ

4.1.1 กรณีการถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง

4.1.2 กรณีการถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง

โดยแต่ละกลุ่มมี 6 กรณีย่อยดังแสดงในตารางที่ 3.1

4.2 ตัวอย่างผลลัพธ์จากโฟโตโมเดลเลอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ความหมายของค่าต่างๆใช้ในการพิจารณาได้ ดังนี้

4.2.1 ค่าพิกัด X, Y, Z เป็นค่าพิกัดที่อยู่ในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ เป็นค่าพิกัดที่อยู่ในระบบพิกัดเดียวกับระบบพิกัดของหมุดบังคับที่ใช้ในการทำงาน

4.2.2 ค่าความละเอียดถูกต้อง (Precision) ในโฟโตโมเดลเลอร์ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ทางตำแหน่งของแต่ละแนวแกน ดังนี้

4.2.2.1 ค่าความละเอียดถูกต้อง X (X Precision) คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางแกน X ของพิกัด X ที่ได้จากการประมวลผล

4.2.2.2 ค่าความละเอียดถูกต้อง Y (Y Precision) คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางแกน Y ของพิกัด Y ที่ได้จากการประมวลผล

4.2.2.3 ค่าความละเอียดถูกต้อง Z (Z Precision) คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางแกน Z ของพิกัด Z ได้จากการประมวลผล

4.2.3 ค่า Largest Residual เป็นค่าสำหรับตรวจสอบความถูกต้องในการหมายหรือวัดพิกัด

ภาพ โดยที่จุดใดมีขนาด Largest Residual สูงแสดงถึงความผิดพลาดในการวัดพิกัดภาพที่มากตามไปด้วย

4.2.4 ค่า RMS Residual เป็นค่ายืนยันความละเอียดถูกต้องเฉลี่ยของการวัดพิกัดภาพ โดยจุดใดมีค่า RMS Residual มากนั้นหมายถึง ค่าความถูกต้องโดยรวมของการวัดพิกัดภาพจะแย่ตามไปด้วย

4.2.5 ค่า Tightness เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการตัดกันของรังสีแสงของจุดจุดหนึ่งจากทุกภาพถ่ายว่าเป็นจุดเดียวกันหรือไม่ ถ้ามีค่ามาก หมายถึง รังสีแสงตัดกันไม่ดี ถ้ามีค่าน้อย หมายถึง การรังสีแสงตัดกันที่ดี ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วควรมีค่าเป็นศูนย์

4.2.6 ชนิดของจุดในตาราง(TYPE) ได้แก่ จุดชนิดมุมบังคับภาพในตารางมีค่าเป็น control และ จุดชนิดมุมโดยยึดภาพในตารางมีค่าเป็น regular

4.2.7 ค่า Use in Processing บอถึงมุมนี้ใช้ในการคำนวณหรือไม่ ถ้าเป็นมุมที่ใช้ในการคำนวณ มีค่าเป็น Yes กับ มุมที่ไม่ใช้ในการคำนวณมีค่าเป็น No

| id | Largest Residual (pixels) | RMS Residual (pixels) | Tightness (%) | Tightness (mm) | Type | Use in Processing | X (mm) | X Precision | Y (mm) | Y Precision | Z (mm) | Z Precision |
|----|---------------------------|-----------------------|---------------|----------------|---------|-------------------|------------|-------------|----------|-------------|-----------|-------------|
| 1 | 0.451873 | 0.218405 | 0.030452 | 0.152259 | Regular | yes | 281.194235 | 0.024543 | 316.8266 | 0.024782 | 13.179545 | 0.040220 |
| 2 | 0.376430 | 0.205366 | 0.028843 | 0.143217 | Regular | yes | 315.514217 | 0.024538 | 317.0253 | 0.024610 | 13.139409 | 0.039662 |
| 3 | 0.348926 | 0.205107 | 0.029136 | 0.145679 | Regular | yes | 343.188308 | 0.024534 | 317.9119 | 0.024511 | 13.127471 | 0.039339 |
| 4 | 0.257345 | 0.172261 | 0.023727 | 0.118635 | Regular | yes | 396.958497 | 0.024534 | 318.3093 | 0.024423 | 13.107216 | 0.039090 |
| 5 | 0.403302 | 0.198301 | 0.029058 | 0.145290 | Regular | yes | 454.728684 | 0.024540 | 318.3404 | 0.024483 | 13.106378 | 0.039215 |
| 6 | 0.482692 | 0.221311 | 0.032550 | 0.162752 | Regular | yes | 480.053449 | 0.024540 | 319.2066 | 0.024559 | 13.114171 | 0.039436 |
| 7 | 0.499477 | 0.240657 | 0.036348 | 0.181740 | Regular | yes | 513.786323 | 0.024544 | 319.6937 | 0.024707 | 13.132332 | 0.039890 |
| 8 | 0.343670 | 0.177629 | 0.025001 | 0.125005 | Regular | yes | 280.450789 | 0.024450 | 348.6761 | 0.024767 | 13.152813 | 0.040002 |
| 9 | 0.214740 | 0.142397 | 0.018063 | 0.090314 | Regular | yes | 314.063787 | 0.024439 | 349.7912 | 0.024590 | 13.112654 | 0.039451 |
| 10 | 0.279467 | 0.175607 | 0.023813 | 0.119066 | Regular | yes | 341.103020 | 0.024433 | 350.2816 | 0.024488 | 13.087538 | 0.039137 |
| 11 | 0.244230 | 0.154586 | 0.016536 | 0.082678 | Regular | yes | 396.539241 | 0.024437 | 347.9938 | 0.024394 | 13.063784 | 0.038845 |
| 12 | 0.309499 | 0.171730 | 0.021338 | 0.106690 | Regular | yes | 453.544835 | 0.024439 | 352.0246 | 0.024451 | 13.069811 | 0.038981 |
| 13 | 0.278227 | 0.161312 | 0.020972 | 0.104859 | Regular | yes | 479.682951 | 0.024449 | 351.1991 | 0.024532 | 13.084680 | 0.039216 |
| 14 | 0.411677 | 0.202313 | 0.032031 | 0.160155 | Regular | yes | 514.026086 | 0.024461 | 351.5320 | 0.024688 | 13.103169 | 0.039677 |
| 15 | 0.282561 | 0.164230 | 0.019013 | 0.095063 | Regular | yes | 296.074985 | 0.024387 | 404.1787 | 0.024628 | 13.101575 | 0.039677 |
| 16 | 0.213789 | 0.130327 | 0.022560 | 0.112798 | Regular | yes | 340.474462 | 0.024376 | 402.5064 | 0.024440 | 13.056417 | 0.039099 |
| 17 | 0.451643 | 0.209649 | 0.032442 | 0.162211 | Regular | yes | 396.846622 | 0.024374 | 404.4008 | 0.024339 | 13.054152 | 0.038796 |
| 18 | 0.222582 | 0.146048 | 0.017100 | 0.085498 | Regular | yes | 452.571291 | 0.024389 | 405.3170 | 0.024398 | 13.033250 | 0.038949 |
| 19 | 0.243980 | 0.147563 | 0.021203 | 0.106013 | Regular | yes | 494.655534 | 0.024409 | 404.2552 | 0.024546 | 13.059120 | 0.039259 |
| 20 | 0.289267 | 0.162489 | 0.029639 | 0.148197 | Regular | yes | 513.534450 | 0.024419 | 404.3701 | 0.024640 | 13.069538 | 0.039633 |
| 21 | 0.248863 | 0.173912 | 0.021959 | 0.109794 | Regular | yes | 279.564519 | 0.024457 | 456.1762 | 0.024660 | 13.117903 | 0.040324 |
| 22 | 0.234999 | 0.165752 | 0.020521 | 0.102606 | Regular | yes | 312.958751 | 0.024454 | 457.0805 | 0.024487 | 13.089024 | 0.039785 |
| 23 | 0.251052 | 0.163800 | 0.020170 | 0.100850 | Regular | yes | 339.479950 | 0.024452 | 456.1031 | 0.024390 | 13.068432 | 0.039462 |
| 24 | 0.218390 | 0.144033 | 0.018863 | 0.094315 | Regular | yes | 382.569751 | 0.024469 | 460.5179 | 0.024290 | 13.038095 | 0.039199 |

รูปที่ 4.1ค แสดงตัวอย่างของตารางผลลัพธ์ในโฟโต้โมเดลเลอร์

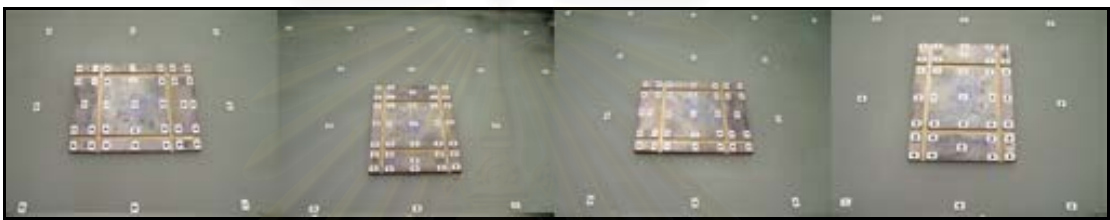
จากผลลัพธ์ในโฟโต้โมเดลเลอร์ ดังตารางในรูปที่ 4.1ค พิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งของแต่ละกรณีศึกษา โดยแสดงตารางสรุปค่าค่าต่ำสุด (Min) ค่าสูงสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าขนาดความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Squares) ของค่า X, Y และ Z Precision ซึ่งจะได้แยกพิจารณาตามชิ้นงานและจำนวนสถานีถ่ายภาพ

4.3 ผลการวิจัยชิ้นงานที่ 1 (ชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (Standard Master Piece))

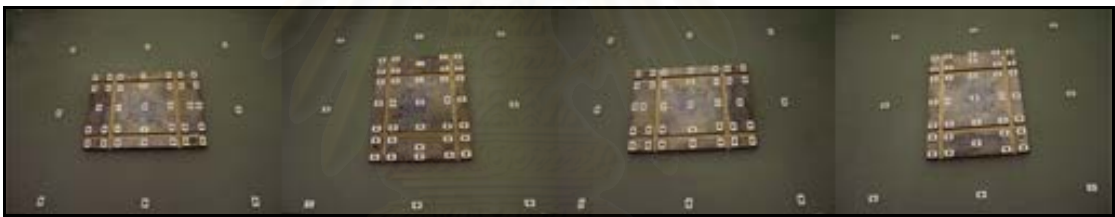
4.3.1 ภาพถ่ายชุด4ตำแหน่ง

4.3.1.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งที่คำนวณได้ของชิ้นงานที่1

เป็นการถ่ายภาพทั้งหมด 4 สถานี ที่สถานีหมายเลข 2,4,6,8 (ดังแสดงในบทที่3) มีจุดควบคุมจำนวน 8 จุด มีจุดที่ต้องการทราบค่าพิสัยจำนวน 34 จุด มีอัตราส่วนระยะฐานถ่ายภาพต่อระยะกล้องถึงวัตถุ (Base Depth Ratio) ประมาณ 2 โดยการถ่ายภาพจะแยกถ่ายเป็นสภาวะทั่วไปและสภาวะจำเพาะ ดังรูปที่ 4.1ก ถ่ายภาพภายใต้สภาวะทั่วไป (General Condition) และ ถ่ายภาพภายใต้สภาวะจำเพาะ (Specific Condition) ดังรูปที่ 4.1ข โดยตำแหน่งจุด 34 จุด ดังรูปที่ 4.2ค



รูปที่ 4.2ก ภาพถ่ายชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะทั่วไป



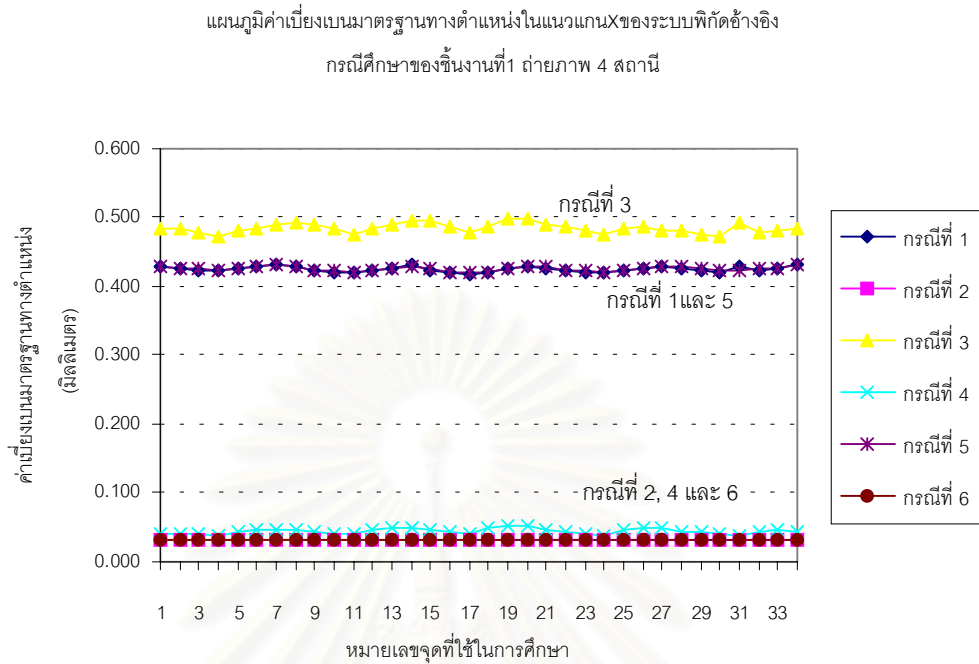
รูปที่ 4.2ข ภาพถ่ายชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะจำเพาะ



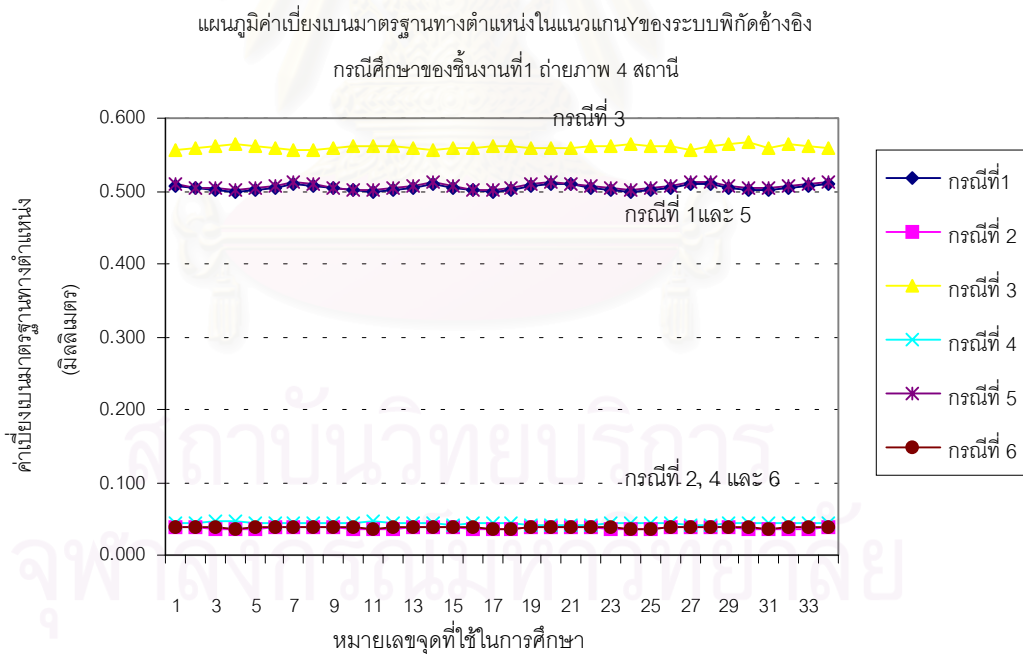
รูปที่ 4.2ค แสดงตำแหน่งหมายเลขจุดบนชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน

เมื่อนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Precision) ทางตำแหน่งของแต่ละจุดที่ได้จากการปรับแก้ มาแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบขนาดทั้ง 6 กรณีศึกษา (รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.1) ตามแกน X, แกน Y, แกน Z และ ขนาดของค่าความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) ดังแสดง

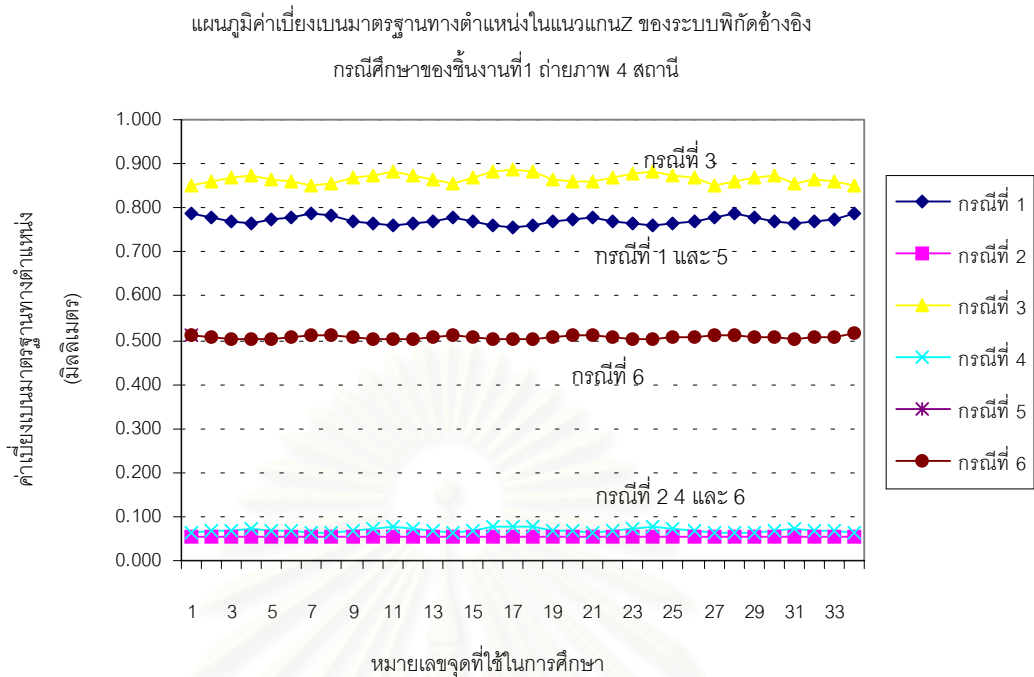
ในรูปที่ 4.3ก-ง ตามลำดับ



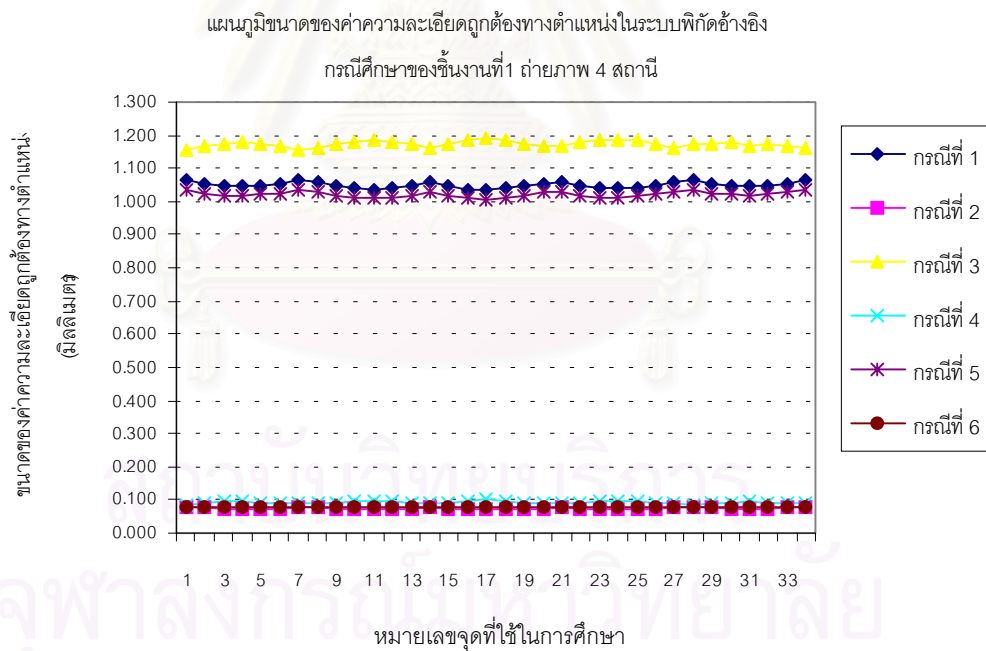
รูปที่ 4.3ก กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกน X



รูปที่ 4.3ข กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกน Y



รูปที่ 4.1ค กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกน Z



รูปที่ 4.3ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Square)

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถสรุปส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคำนวณค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Square) ในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 4.1

| | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 1 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.499 | 0.507 | 0.503 |
| Y Precision | 0.498 | 0.511 | 0.504 |
| Z Precision | 0.756 | 0.787 | 0.772 |
| Root – Sum - Square | 1.033 | 1.065 | 1.050 |
| กรณีที่ 2 | | | |
| X Precision | 0.037 | 0.037 | 0.037 |
| Y Precision | 0.037 | 0.037 | 0.037 |
| Z Precision | 0.053 | 0.053 | 0.054 |
| Root – Sum - Square | 0.074 | 0.076 | 0.075 |
| กรณีที่ 3 | | | |
| X Precision | 0.556 | 0.566 | 0.561 |
| Y Precision | 0.555 | 0.566 | 0.560 |
| Z Precision | 0.849 | 0.889 | 0.866 |
| Root – Sum - Square | 1.001 | 1.001 | 1.004 |
| กรณีที่ 4 | | | |
| X Precision | 0.042 | 0.046 | 0.044 |
| Y Precision | 0.042 | 0.046 | 0.043 |
| Z Precision | 0.062 | 0.072 | 0.069 |
| Root – Sum - Square | 0.087 | 0.100 | 0.092 |
| กรณีที่ 5 | | | |
| X Precision | 0.500 | 0.509 | 0.505 |
| Y Precision | 0.500 | 0.514 | 0.506 |
| Z Precision | 0.713 | 0.743 | 0.729 |
| Root – Sum - Square | 1.005 | 1.037 | 1.021 |
| กรณีที่ 6 | | | |
| X Precision | 0.037 | 0.037 | 0.037 |
| Y Precision | 0.037 | 0.038 | 0.037 |
| Z Precision | 0.058 | 0.061 | 0.060 |
| Root – Sum - Square | 0.078 | 0.081 | 0.080 |

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้เมเตอร์

ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการคำนวณทางแกน X และ Y มีค่าใกล้เคียงกันขณะที่ความถูกต้องทางแกน Z ประมาณ 1.5 เท่า ทั้ง 34 จุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) กรณีที่ 2, 4 และ 6 มีค่าต่ำกว่า 0.1 มม. ในขณะที่กรณีที่ 1, 3, 5 มีค่าประมาณ 1 มม.

2) กรณีที่ 2 และ 6 ให้มีค่าความละเอียดถูกต้อง (Precision) ทางตำแหน่งใกล้เคียงกันส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.07-0.08 มม. และมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.092 มม.

3) กรณีที่ 1, 3 และ 5 ให้ค่าความละเอียดถูกต้อง (Precision) ทางตำแหน่งเฉลี่ย 01.050, 1.004 และ 1.021 มม.

จากผลข้างต้น จะเห็นว่า

1) กรณีที่ 2, 4 และ 6 เป็นการวัดพิกัดภาพหมุดบังคับแบบศูนย์ถ่วงและวัดหมุดโยงยึดแบบอัตโนมัติ จึงทำค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องดีกว่า กรณีที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นวัดพิกัดภาพด้วยมือ

2) สำหรับการวัดพิกัดภาพแบบอัตโนมัติกรณีที่ 2 และ 6 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

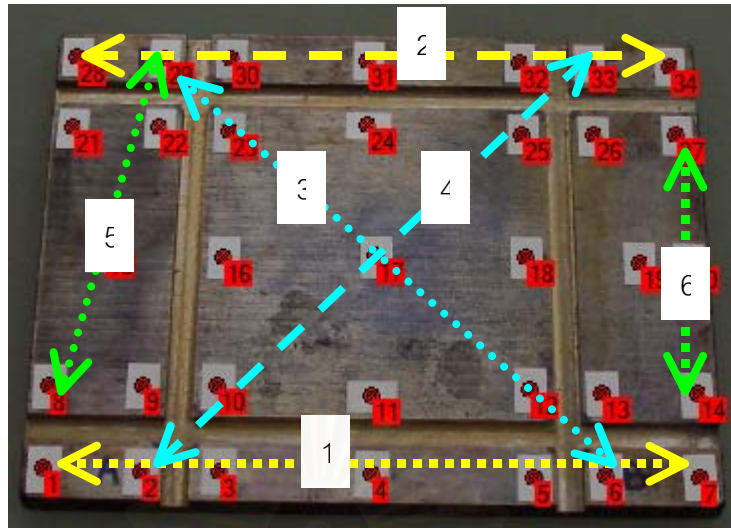
3) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 2 และ 6 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกล่องในตัว

4) สำหรับการวัดพิกัดภาพด้วยมือ กรณีที่ 1 และ 5 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

5) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 1 และ 5 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกล่องในตัว

4.3.1.2 ความความถูกต้องของระยะที่ได้ในแต่ละกรณี

เนื่องจากจุดทั้ง 34 จุด ของชิ้นงานที่ 1 สามารถทำการวัดค่าพิกัดได้โดยวิธีเดียวกับการวัดค่าพิกัดหมุดบังคับ จึงให้สามารถคำนวณระยะจากพิกัดที่ได้จากการวัดตรงเพื่อไว้ใช้ในการตรวจสอบ โดยใช้ระยะดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นระยะตรวจสอบสำหรับชิ้นงานมาตรฐาน



รูปที่ 4.2 รูประยะตรวจสอบ

| ระยะที่ใช้ตรวจสอบ | ขนาดระยะ |
|-------------------|-------------------|
| ระยะที่ 1 | 233.007 มิลลิเมตร |
| ระยะที่ 2 | 231.953 มิลลิเมตร |
| ระยะที่ 3 | 238.705 มิลลิเมตร |
| ระยะที่ 4 | 238.746 มิลลิเมตร |
| ระยะที่ 5 | 143.908 มิลลิเมตร |
| ระยะที่ 6 | 108.581 มิลลิเมตร |

ตารางที่ 4.2 ตารางระยะตรวจสอบที่คำนวณได้จากการวัดพิกัดโดยตรง

เมื่อนำระยะสำหรับตรวจสอบชิ้นงานมาตรฐานเปรียบเทียบกับระยะที่คำนวณขึ้นจากค่าพิกัดที่ได้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์ในแต่ละกรณีศึกษาที่ได้แบ่งตามตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 จะได้ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของระยะดังแสดงในตารางที่ 4.3 และได้นำค่าความแตกต่างในแต่ละกรณีศึกษานี้มาพิจารณาโดยคำนวณเป็นค่าความถูกต้อง (Accuracy) ดังแสดงเป็นตารางเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.4

| ชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง | ค่าต่างระยะตรวจสอบกับระยะคำนวณ (มิลลิเมตร) | | | | | |
|-----------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 |
| ระยะที่ 1 | 0.233 | 0.391 | 0.048 | 0.099 | -0.425 | 1.497 |
| ระยะที่ 2 | 0.343 | 0.423 | 0.142 | 0.097 | -0.451 | 1.452 |
| ระยะที่ 3 | 0.355 | 0.470 | 0.114 | 0.119 | -0.489 | 1.543 |
| ระยะที่ 4 | 0.315 | 0.455 | 0.079 | 0.097 | -0.481 | 1.509 |
| ระยะที่ 5 | 0.083 | 0.254 | -0.073 | 0.040 | -0.410 | 0.885 |
| ระยะที่ 6 | 0.074 | 0.183 | -0.027 | 0.045 | -0.170 | 0.687 |

ตารางที่ 4.3 ค่าต่างระหว่างระยะตรวจสอบกับระยะที่ได้จากการคำนวณในแต่ละกรณี จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า

กรณีที่ 1 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.355 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.074 มม.
 กรณีที่ 2 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.470 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.183 มม.
 กรณีที่ 3 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.142 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.027 มม.
 กรณีที่ 4 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.119 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.040 มม.
 กรณีที่ 5 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.489 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.170 มม.
 กรณีที่ 6 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 1.543 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.687 มม.

| ชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง | ค่าความถูกต้อง (Accuracy) (1:X) | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 |
| ระยะที่ 1 | 999 | 596 | 4890 | 2358 | 548 | 156 |
| ระยะที่ 2 | 676 | 549 | 1631 | 2399 | 514 | 160 |
| ระยะที่ 3 | 673 | 508 | 2086 | 2006 | 488 | 155 |
| ระยะที่ 4 | 757 | 525 | 3038 | 2471 | 497 | 158 |
| ระยะที่ 5 | 1739 | 566 | 1963 | 3576 | 351 | 163 |
| ระยะที่ 6 | 1469 | 594 | 4083 | 2399 | 639 | 158 |

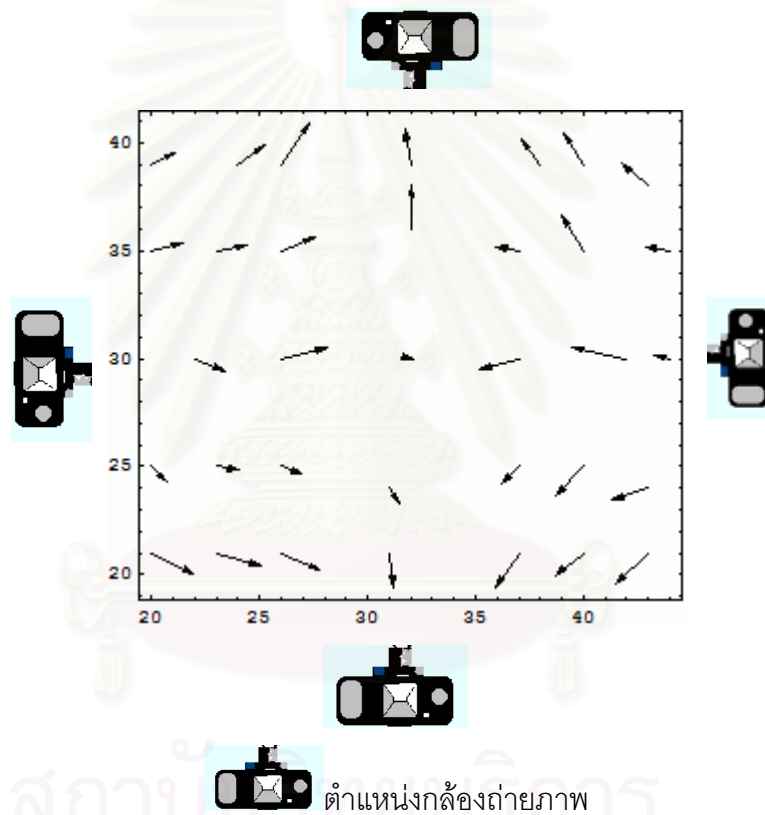
ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของในแต่ละกรณีศึกษา จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า

กรณีที่ 1 มีค่าความถูกต้องสูงสุด 1:1739 และมีค่าความถูกต้องต่ำสุด 1:673
 กรณีที่ 2 มีค่าความถูกต้องสูงสุด 1:596 และมีค่าความถูกต้องต่ำสุด 1:594
 กรณีที่ 3 มีค่าความถูกต้องสูงสุด 1:4890 และมีค่าความถูกต้องต่ำสุด 1:1631
 กรณีที่ 4 มีค่าความถูกต้องสูงสุด 1:3576 และมีค่าความถูกต้องต่ำสุด 1:2006

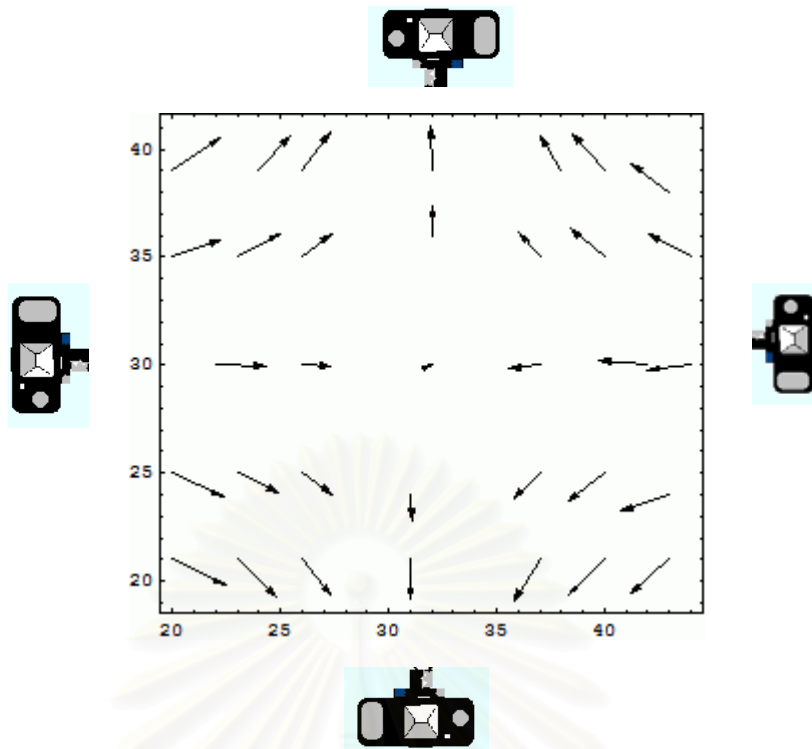
กรณีนี้ 5 มีค่าความถูกต้องสูงสุด 1:639 และมีค่าความถูกต้องต่ำสุด 1:351
กรณีนี้ 6 มีค่าความถูกต้องสูงสุด 1:163 และมีค่าความถูกต้องต่ำสุด 1:155

4.3.1.3 ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบของชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง

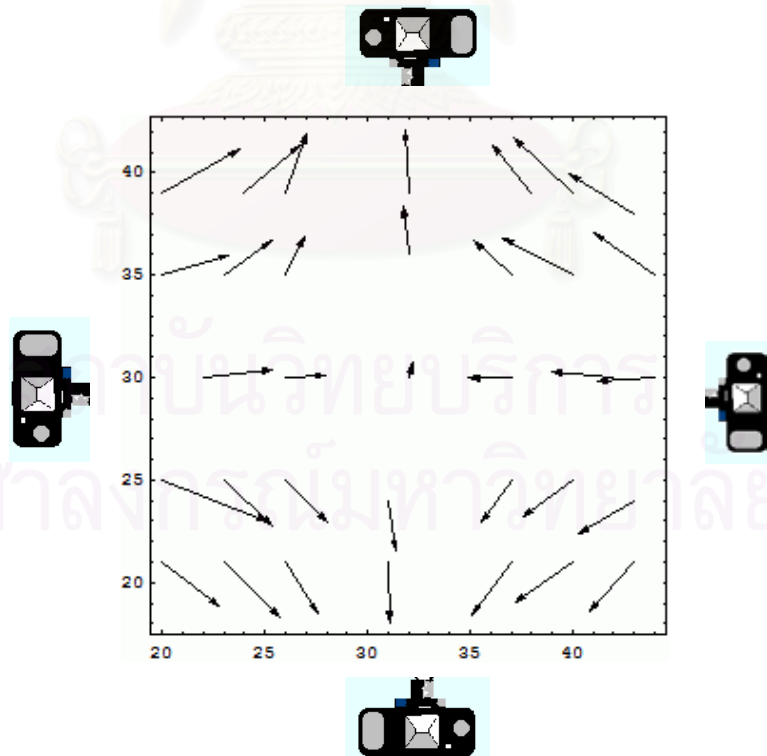
นำค่าพิกัดฉากในระบบพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยโฟโตโมเดลเลอร์มาแปลงเป็นค่าพิกัดในระบบพิกัดเดียวกับระบบพิกัดที่วัดตรงชั้นงานตรวจสอบมาตรฐานเพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่คำนวณได้จากโฟโตโมเดลเลอร์เมื่อเทียบกับค่าพิกัดที่วัดได้โดยตรง (ภาคผนวก ค) ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนวิเคราะห์เป็นสนามเวกเตอร์ (Vector Field) ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทิศทางราบ ดังรูปที่ 4.4ก-ข



รูปที่ 4.4ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีนี้ 1 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง
จากรูปที่ 4.4ก เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 1 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะทั่วไปด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกล้องก่อนออกงาน) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชั้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชั้นงานมีขนาดใหญ่

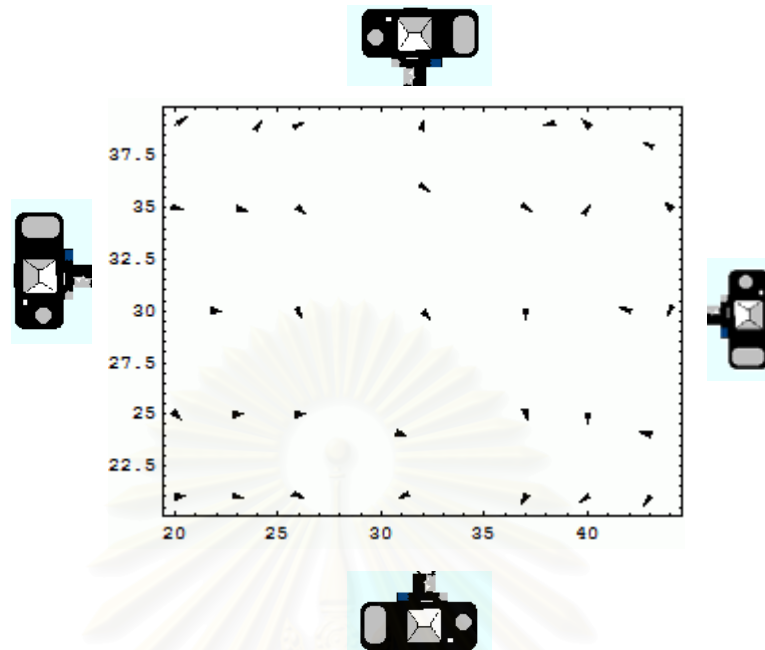


รูปที่ 4.4ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าฟังก์ชันทางราบกรณีศึกษาที่ 2 ขึ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง
 จากรูปที่ 4.4ข เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าฟังก์ชันทางราบกรณีศึกษาที่ 2 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะจำเพาะด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกลิ้งก่อนออกงาน) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางขึ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางขึ้นงานมีขนาดใหญ่



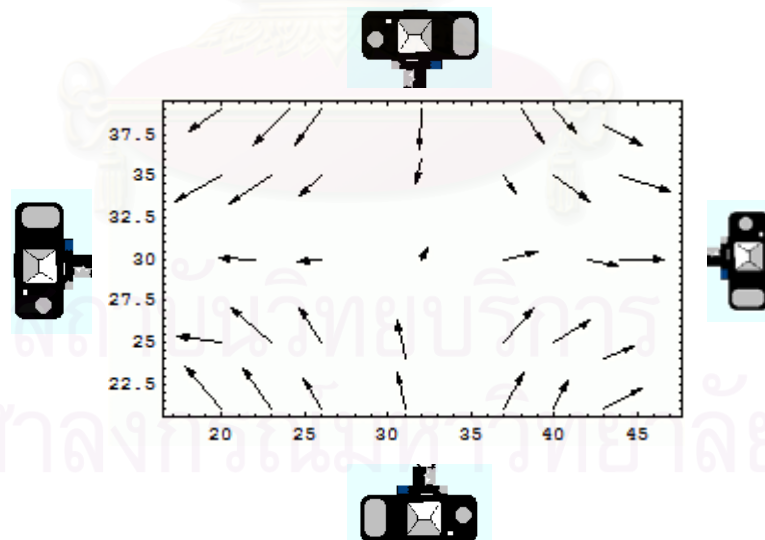
รูปที่ 4.4ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าฟังก์ชันทางราบกรณีศึกษาที่ 3 ขึ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง
 จากรูปที่ 4.4ค เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของค่าฟังก์ชันทางราบกรณีศึกษาที่ 3 (ประมวลผลข้อมูลในสถานะทั่วไปด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกลิ้งตัวแบบทั่วไป) จะ

เห็นว่า ขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่



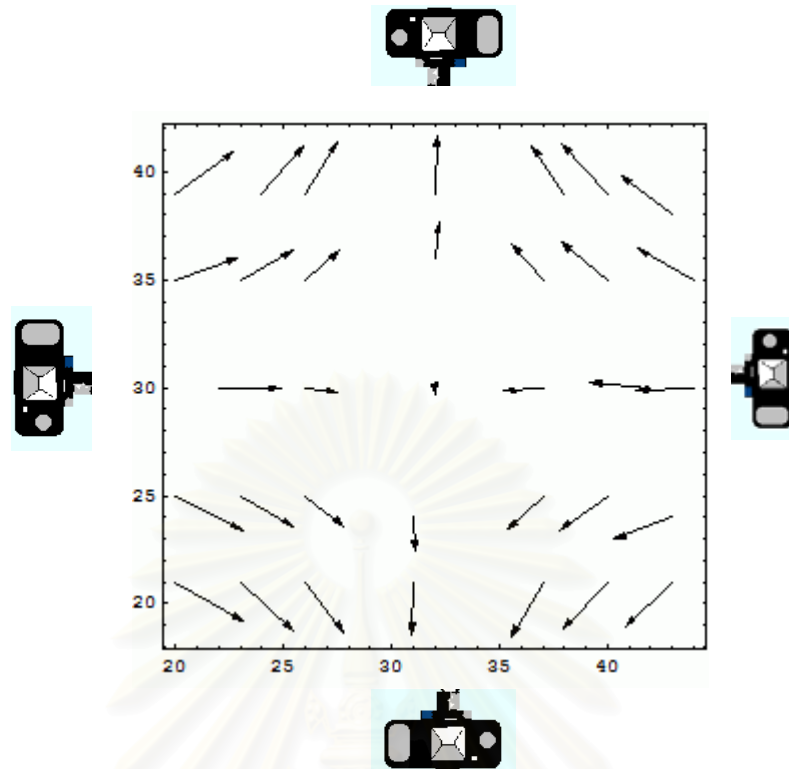
รูปที่ 4.4 แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที 4 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.4 เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 4 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะจำเพาะด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกลิ้งตัวแบบทั่วไป) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางและตรงขอบมีขนาดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.4จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที 5 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.4จ เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 5 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะทั่วไปด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกลิ้งตัวแบบอินเวอร์ส) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.4ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าฟังก์ชันทางราบกรณีที 6 ขึ้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.4ค เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าฟังก์ชันทางราบกรณีศึกษาที่ 6 (การประมวลผลข้อมูลในสภาวะจำเพาะด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกล่องตัวแบบอินเวอร์ส) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางขึ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางขึ้นงานมีขนาดใหญ่

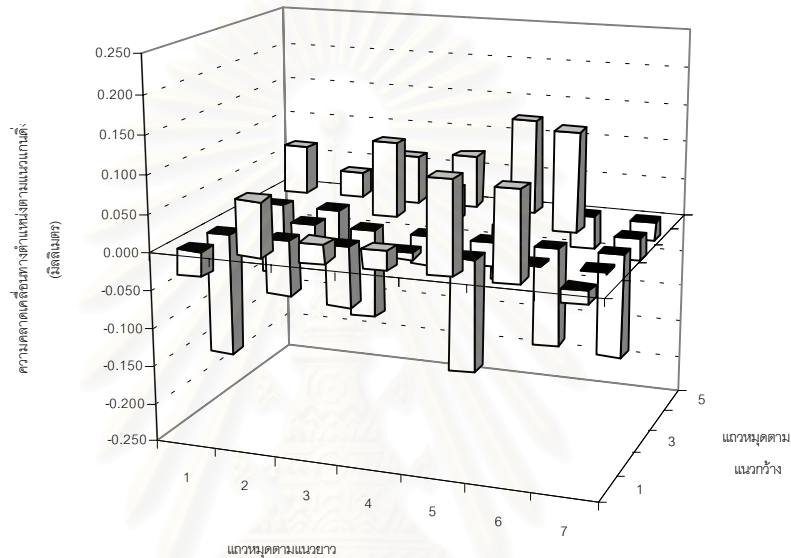
ลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนค่าฟังก์ชันทางราบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4ก – 4.4 ค ค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจุดของกระบวนการวัดสอบกล่องในตัวแบบทั่วไปภายใต้สภาวะจำเพาะจะมีขนาดเล็กกว่าการวัดแบบสภาวะทั่วไปและมีมีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันทุกจุด กรณีอื่นๆ มีขนาดความคลาดเคลื่อนของจุดบริเวณตรงกลางน้อยและบริเวณขอบๆมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.1.4 แสดงค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้งของชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง

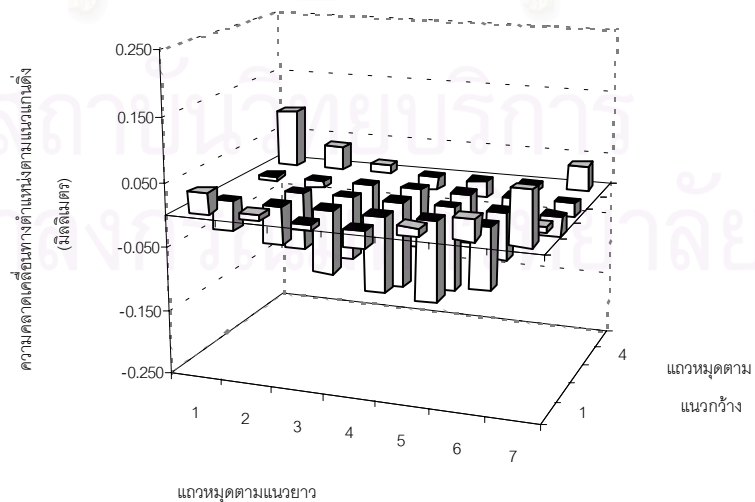
ลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางแกนนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5ก – 4.5 ข ค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการวัดแบบสภาวะไม่จำเพาะจะมีขนาดใหญ่กว่าการวัดแบบสภาวะจำเพาะและมีเฉลี่ยใกล้เคียงกันทุกจุด

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้ง กรณีที่ 1



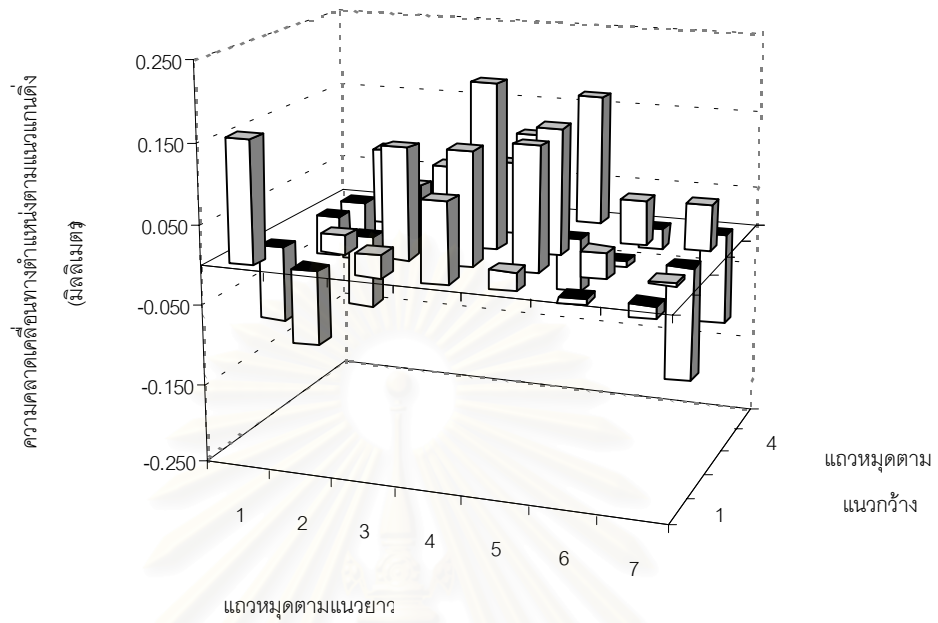
รูปที่ 4.5ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้งกรณีที่ 1

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางตั้ง กรณีที่ 2



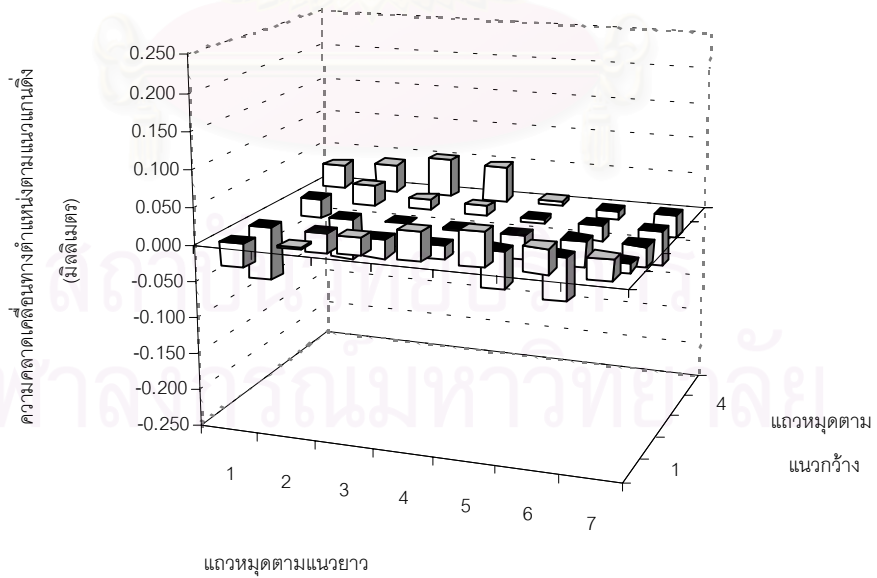
รูปที่ 4.5ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้งกรณีที่ 2

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 3



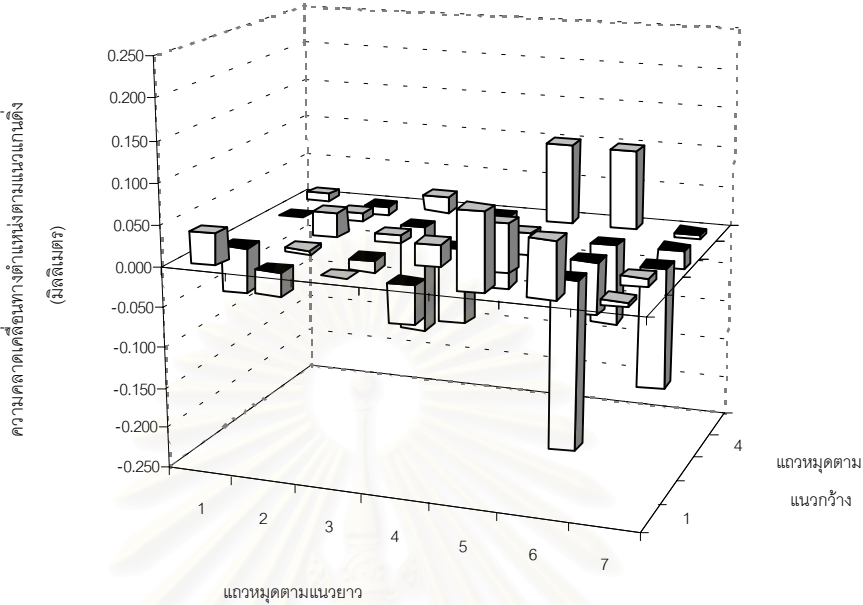
รูปที่ 4.5ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีนี้ที่ 3

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 4



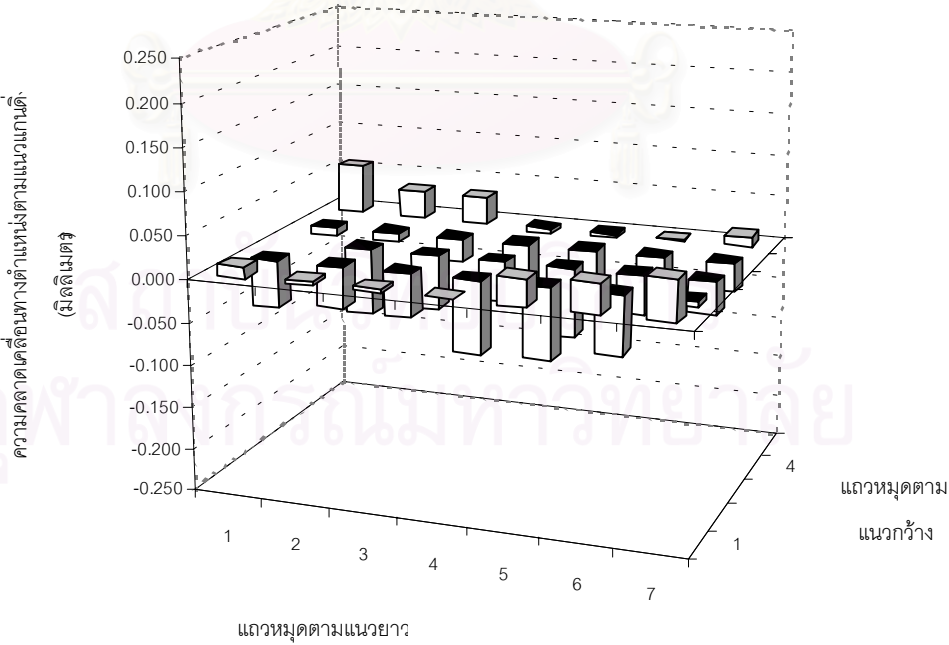
รูปที่ 4.5ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีนี้ที่ 4

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 5



รูปที่ 4.5จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 5

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 6



รูปที่ 4.5ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 6

4.3.1.5 สรุปผลการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไป (กรณีศึกษาที่ 1,3 และ 5)

4.3.1.5.1 ผลสรุปทางด้านความละเอียดถูกต้อง(Precision)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 กรณีศึกษาที่ 5 และกรณีศึกษาที่ 3 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.504 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางดิ่ง 0.772 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยมีค่า 0.560 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางดิ่ง 0.889 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องก่อนออกงานให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดในขณะที่การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.3.1.5.2 ผลสรุปทางด้านความถูกต้องในการวัดขนาด

เมื่อเรียงลำดับของความถูกต้องในการวัดขนาดจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 3 กรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 5 โดยค่าต่างของระหว่างระยะตรวจสอบเทียบกับระยะที่คำนวณ ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ค่าต่างของกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความต่างทางการวัดขนาดใกล้เคียงระยะตรวจสอบที่สุด ให้ค่าต่างที่มากที่สุดจากการเปรียบเทียบระยะ 0.142 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไปให้ความถูกต้องสูงที่สุดในขณะที่การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์สทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.3.1.6 สรุปผลการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ (กรณีศึกษาที่ 2, 4 และ 6)

4.3.1.6.1 ผลสรุปทางด้านความละเอียดถูกต้อง(Precision)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.1

จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 2 กรณีศึกษาที่ 6 และกรณีศึกษาที่ 4 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงสุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.037 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.053 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยมีค่า 0.044 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.069 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องก่อนออกงานให้ความละเอียดถูกต้องสูงสุดเทียบกับการวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุดแต่ต่างกันโดยเฉลี่ย 0.007 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนราบ และ 0.016 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนตั้ง

4.3.1.6.2 ผลสรุปทางด้านความถูกต้องในการวัดขนาด

เมื่อเรียงลำดับของความถูกต้องในการวัดขนาดจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 4 กรณีศึกษาที่ 2 และกรณีศึกษาที่ 6 โดยค่าต่างของระหว่างระยะตรวจสอบเทียบกับระยะที่คำนวณ ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ค่าต่างของกรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความต่างทางการวัดขนาดใกล้เคียงระยะตรวจสอบที่สุด ให้ค่าต่างที่มากที่สุดจากการเปรียบเทียบระยะ 0.114 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไปให้ความถูกต้องในการวัดระยะสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะที่คำนวณได้จากพิกัดที่ทราบค่า ในขณะที่การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์สทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.3.1.7 สรุปผลการการประมวลผลจากการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไปเปรียบเทียบกับถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ จากข้อที่4.3.1.5.1 และจากข้อที่ 4.3.1.6.1 ความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะจำเพาะให้ความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะ 10 เท่าและค่าต่างระยะระหว่างระยะตรวจสอบที่คำนวณได้จากพิกัดที่ได้จากการวัดโดยตรงเปรียบเทียบกับระยะที่คำนวณได้จากพิกัดที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายแต่ละกรรมวิธีในการถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง

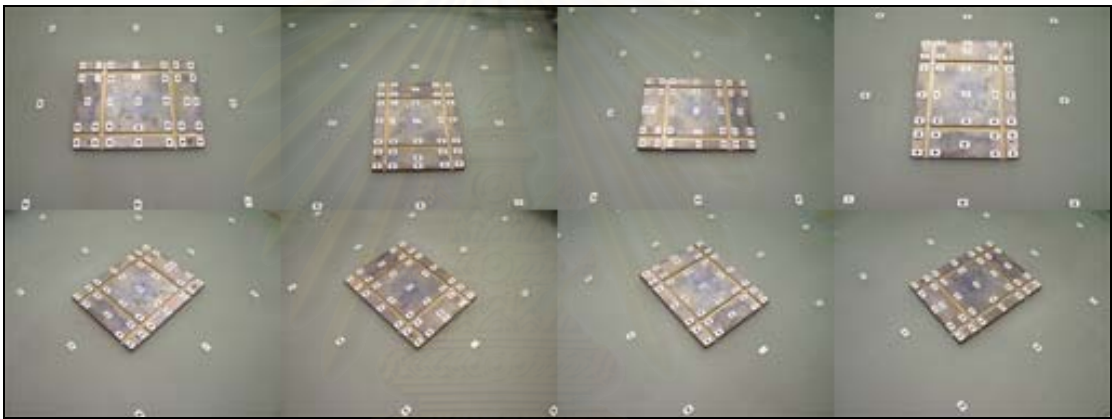
จะเห็นว่า วิธีการประมวลผลในกรณีที่ 4 หรือการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในการวัดขนาดสูงที่สุดเท่ากับ0.114มิลลิเมตรและมีการ

ความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.44 มิลลิเมตร ความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.69 มิลลิเมตร

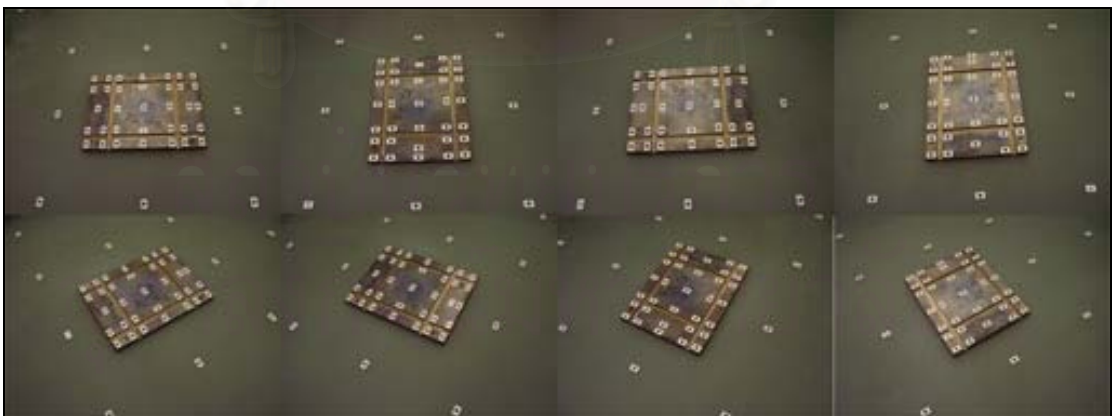
4.3.2 ภาพถ่ายชุด 8 ตำแหน่ง

4.3.2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งที่คำนวณได้ของชิ้นงานที่ 1

เป็นการถ่ายภาพทั้งหมด 8 สถานี ที่สถานีหมายเลข 1-8 (ดังแสดงในบทที่ 3) มีจุดควบคุมจำนวน 8 จุด มีจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดจำนวน 34 จุด มีอัตราส่วนระยะฐานถ่ายภาพต่อระยะกล้องถึงวัตถุ (Base Depth Ratio) ประมาณ 2 โดยการถ่ายภาพจะแยกถ่ายเป็นสภาวะทั่วไปและสภาวะจำเพาะ ดังรูปที่ 4.5ก ถ่ายภาพภายใต้สภาวะทั่วไป (General Condition) และ ถ่ายภาพภายใต้สภาวะจำเพาะ (Specific Condition) ดังรูปที่ 4.5ข โดยตำแหน่งจุด 34 จุด ดังรูปที่ 4.5ค



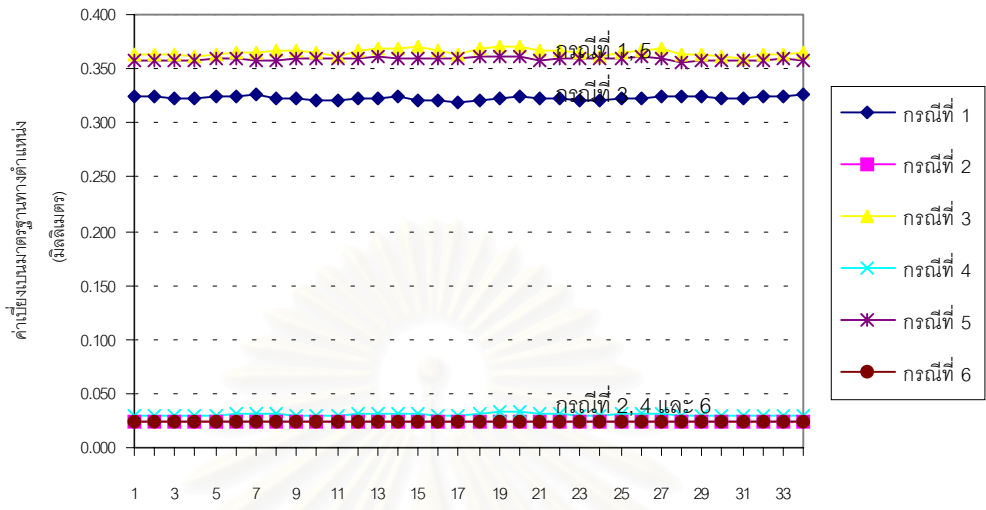
รูปที่ 4.6ก ภาพถ่ายชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะทั่วไป



ที่ 4.6ข ภาพถ่ายชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง ถ่ายภาพภายใต้สภาวะจำเพาะ

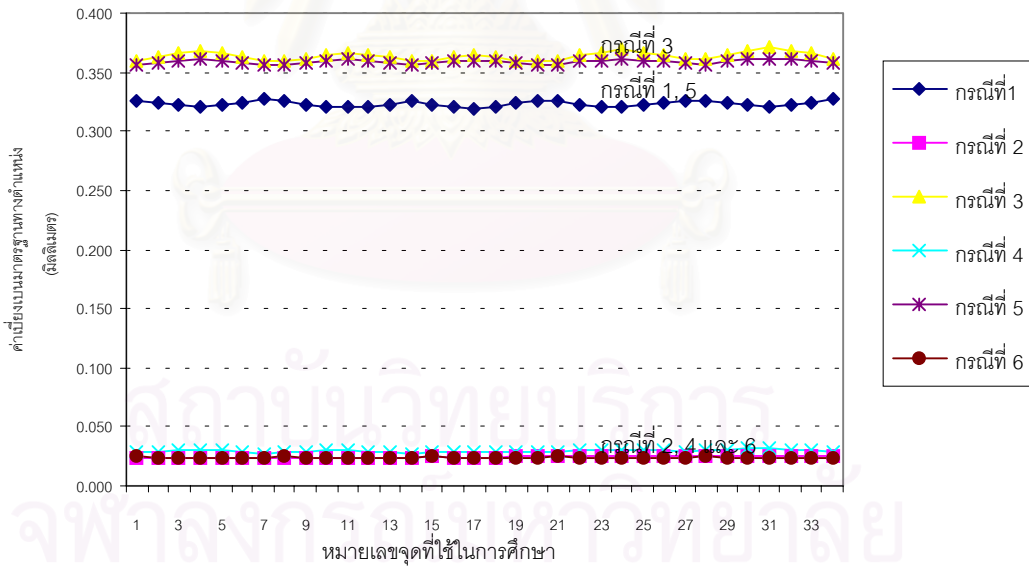
เมื่อนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Precision) ทางตำแหน่งของแต่ละจุดที่ได้จากการปรับแก้ มาแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบขนาดทั้ง 6 กรณีสึกษาตามแกน X, แกน Y, แกน Z และ ขนาดของค่าความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) ดังแสดงในรูปที่ 4.6ก-ง ตามลำดับ

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนXของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่1 ถ่ายภาพ 8 สถานี

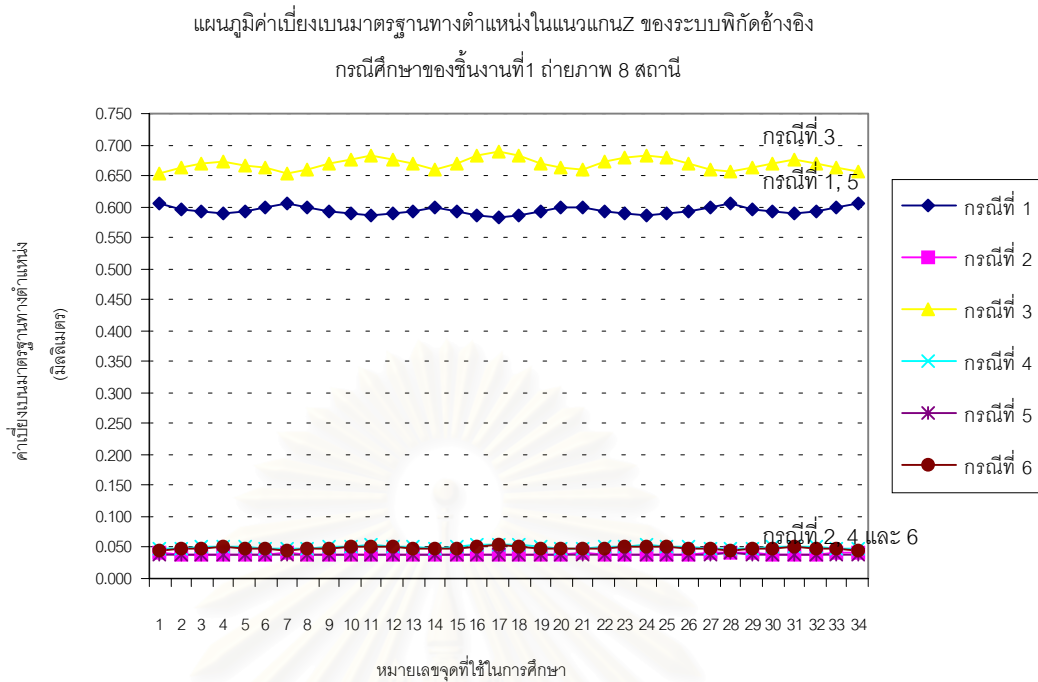


รูปที่ 4.7ก กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกนX

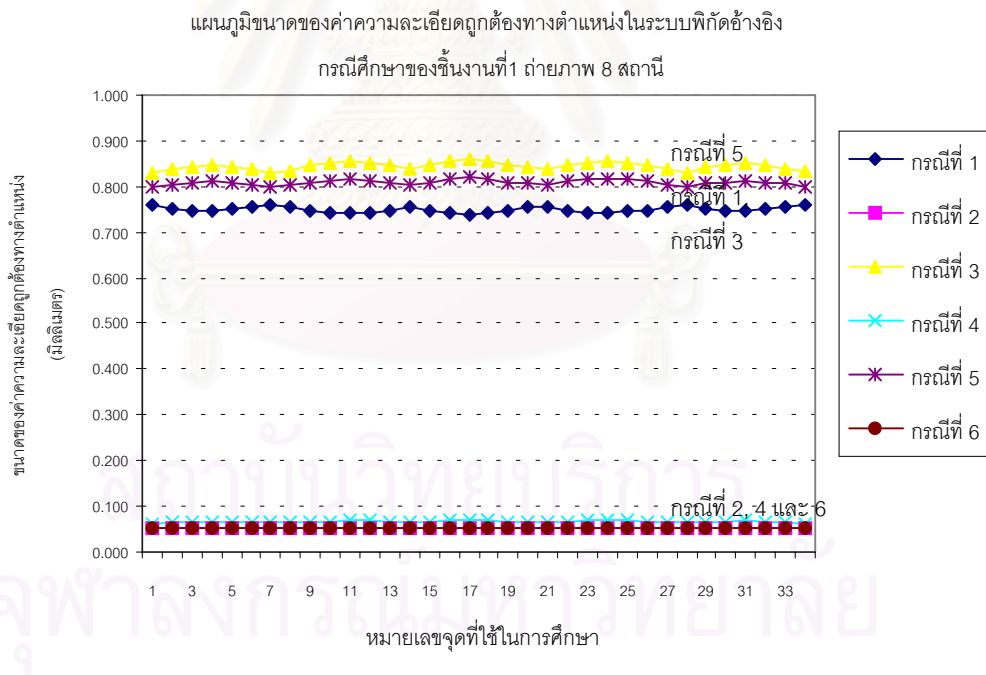
แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนYของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่1 ถ่ายภาพ 8 สถานี



รูปที่ 4.7ข กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกนY



รูปที่ 4.7ค กราฟเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งทางแกน Z



รูปที่ 4.7ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถสรุปส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่ง ต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าขนาดความละเอียดถูกต้อง(Root-Sum-Square) ในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 4.5

| | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 1 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.320 | 0.327 | 0.323 |
| Y Precision | 0.319 | 0.327 | 0.323 |
| Z Precision | 0.583 | 0.604 | 0.594 |
| Root – Sum - Square | 0.738 | 0.761 | 0.749 |
| กรณีที่ 2 | | | |
| X Precision | 0.024 | 0.025 | 0.025 |
| Y Precision | 0.024 | 0.026 | 0.024 |
| Z Precision | 0.039 | 0.041 | 0.040 |
| Root – Sum - Square | 0.052 | 0.054 | 0.053 |
| กรณีที่ 3 | | | |
| X Precision | 0.360 | 0.371 | 0.365 |
| Y Precision | 0.359 | 0.371 | 0.364 |
| Z Precision | 0.654 | 0.690 | 0.669 |
| Root – Sum - Square | 0.830 | 0.860 | 0.845 |
| กรณีที่ 4 | | | |
| X Precision | 0.029 | 0.033 | 0.031 |
| Y Precision | 0.028 | 0.032 | 0.030 |
| Z Precision | 0.047 | 0.056 | 0.051 |
| Root – Sum - Square | 0.062 | 0.070 | 0.066 |
| กรณีที่ 5 | | | |
| X Precision | 0.357 | 0.362 | 0.359 |
| Y Precision | 0.356 | 0.362 | 0.359 |
| Z Precision | 0.619 | 0.644 | 0.630 |
| Root – Sum - Square | 0.798 | 0.821 | 0.809 |
| กรณีที่ 6 | | | |
| X Precision | 0.024 | 0.025 | 0.025 |
| Y Precision | 0.024 | 0.025 | 0.024 |
| Z Precision | 0.038 | 0.040 | 0.039 |
| Root – Sum - Square | 0.051 | 0.053 | 0.052 |

ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์

ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จะเห็นว่าค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการคำนวณทางแกน X และ Y มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ความถูกต้องทางแกน Z ประมาณ 2 เท่า ทั้ง 34 จุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) กรณีที่ 2, 4 และ 6 มีค่าต่ำกว่า 0.1 มม. ในขณะที่กรณีที่ 1, 3, 5 มีค่าประมาณ 1 มม.

2) กรณีที่ 1, 3 และ 5 ให้ค่าความละเอียดถูกต้อง (Precision) ทางตำแหน่งเฉลี่ย 0.749, 0.845 และ 0.809 มม.

จากผลข้างต้น จะเห็นว่า

1) กรณีที่ 2, 4 และ 6 เป็นการวัดพิศภาพหมุดบังคับแบบศูนย์ถ่วงและวัดหมุดโยงยึดแบบอัตโนมัติ จึงทำค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องดีกว่า กรณีที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นวัดพิศภาพด้วยมือ

2) สำหรับการวัดพิศภาพแบบอัตโนมัติกรณีที่ 2 และ 6 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

3) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 2, 4 และ 6 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มพอๆกัน

4) สำหรับการวัดพิศภาพด้วยมือ กรณีที่ 1 และ 5 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

5) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 1 และ 5 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกล่องในตัว

เมื่อนำค่าที่ได้จากการวัดและการคำนวณจะพบว่าได้ความแตกต่างดังตารางที่ 4.6 และคำนวณค่าความถูกต้อง ดังตารางที่ 4.7

| ชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง | ค่าต่างระยะตรวจสอบกับระยะคำนวณ (มิลลิเมตร) | | | | | |
|-----------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 |
| ระยะที่ 1 | 0.472 | 0.504 | 0.172 | 0.081 | -0.514 | -0.018 |
| ระยะที่ 2 | 0.401 | 0.532 | 0.125 | 0.068 | -0.423 | 0.012 |
| ระยะที่ 3 | 0.565 | 0.644 | 0.215 | 0.060 | -0.464 | 0.003 |
| ระยะที่ 4 | 0.476 | 0.592 | 0.137 | 0.064 | -0.574 | 0.011 |
| ระยะที่ 5 | 0.206 | 0.331 | -0.009 | 0.003 | -0.338 | -0.020 |
| ระยะที่ 6 | 0.210 | 0.247 | 0.064 | 0.015 | -0.212 | -0.022 |

ตารางที่ 4.6 ค่าต่างระหว่างระยะตรวจสอบกับระยะที่ ได้จากการคำนวณในแต่ละกรณี
จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า

กรณีที่ 1 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.565 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.206 มม.

กรณีที่ 2 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.644 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.247 มม.

กรณีที่ 3 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.215 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.009 มม.

กรณีที่ 4 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.081 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.003 มม.
 กรณีที่ 5 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.574 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.212 มม.
 กรณีที่ 6 มีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.022 มม. ค่าความแตกต่างต่ำสุด 0.003 มม.

| ชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง | ค่าความถูกต้อง (1:X) | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 3 | กรณีที่ 4 | กรณีที่ 5 | กรณีที่ 6 |
| ระยะที่ 1 | 494 | 462 | 1354 | 2864 | 453 | 13211 |
| ระยะที่ 2 | 578 | 436 | 1851 | 3416 | 549 | 18841 |
| ระยะที่ 3 | 423 | 371 | 1109 | 3975 | 515 | 75079 |
| ระยะที่ 4 | 501 | 403 | 1739 | 3752 | 416 | 21026 |
| ระยะที่ 5 | 700 | 434 | 15395 | 43851 | 426 | 7164 |
| ระยะที่ 6 | 518 | 439 | 1694 | 7098 | 513 | 4882 |

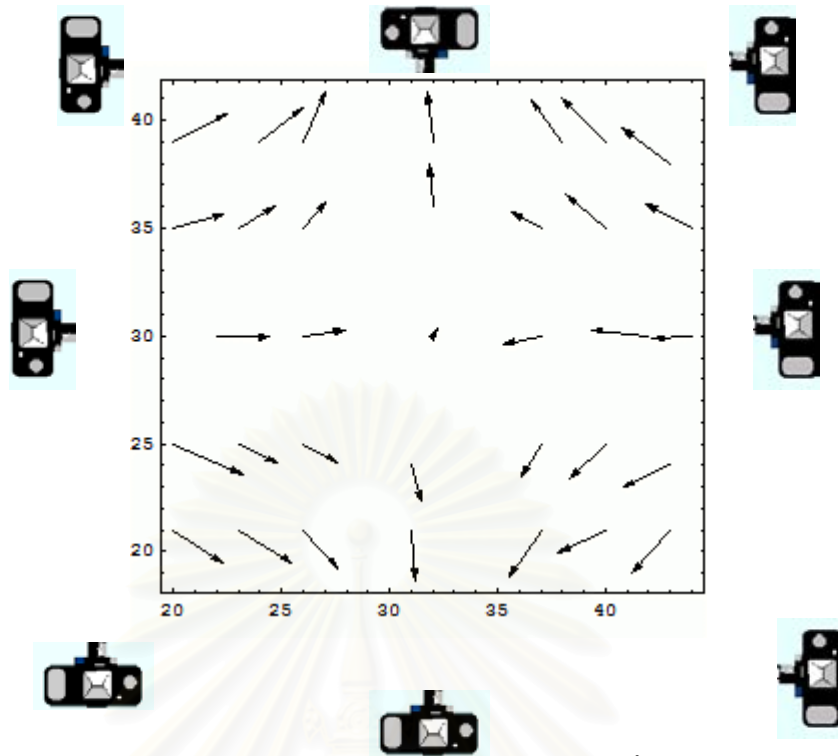
ตารางที่ 4.7 ค่าความถูกต้อง

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า

กรณีที่ 1 มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 1:700 และต่ำสุดเท่ากับ 1:423
 กรณีที่ 2 มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 1:462 และต่ำสุดเท่ากับ 1:371
 กรณีที่ 3 มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 1:15395 และต่ำสุดเท่ากับ 1:1109
 กรณีที่ 4 มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 1:43851 และต่ำสุดเท่ากับ 1:2864
 กรณีที่ 5 มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 1:549 และต่ำสุดเท่ากับ 1:416
 กรณีที่ 6 มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 1:13211 และต่ำสุดเท่ากับ 1:4882

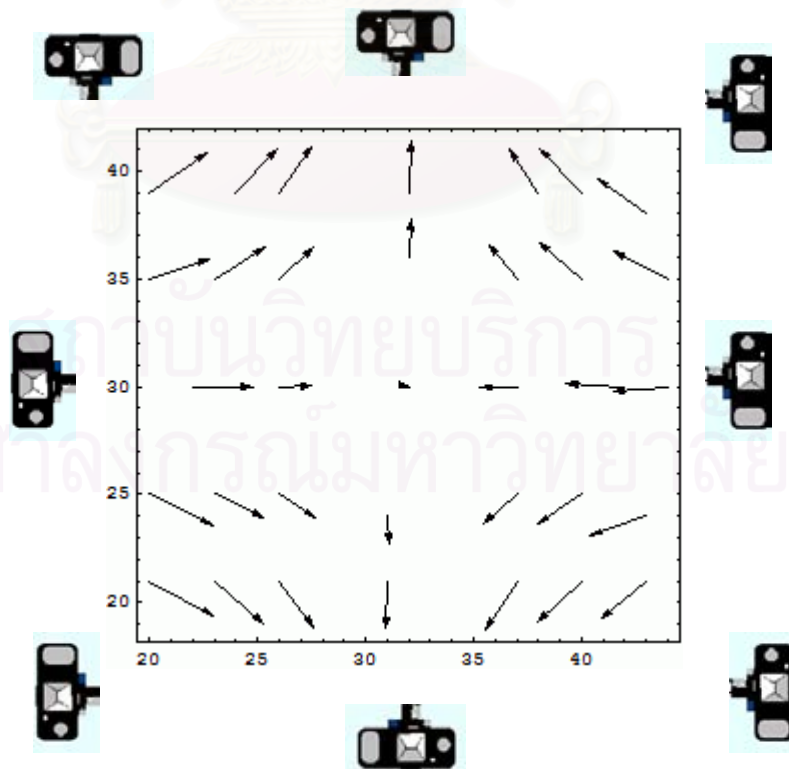
4.3.2.2 พิจารณาค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบของชั้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง

นำค่าพิกัดฉากในระบบพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยโฟโตโมเดลเลอร์มาแปลงเป็นค่าพิกัดในระบบพิกัดเดียวกับระบบพิกัดที่วัดตรงชั้นงานตรวจสอบมาตรฐานเพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่คำนวณได้จากโฟโตโมเดลเลอร์เมื่อเทียบกับค่าพิกัดที่วัดได้โดยตรง (ภาคผนวก ค) ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนวิเคราะห์เป็นสนามเวกเตอร์ (Vector Field) ของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทิศทางราบ ดังรูปที่ 4.7ก-จ



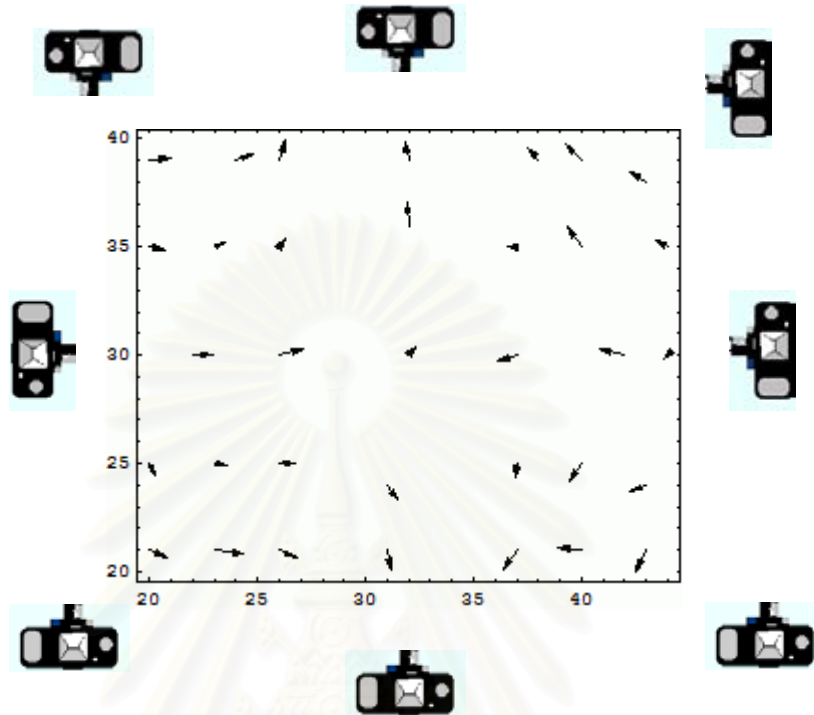
รูปที่ 4.8ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 1 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.8ก เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 1 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะทั่วไปด้วยกรรมวิธีการวัดสอบก่อนออกงาน) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชั้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชั้นงานมีขนาดใหญ่



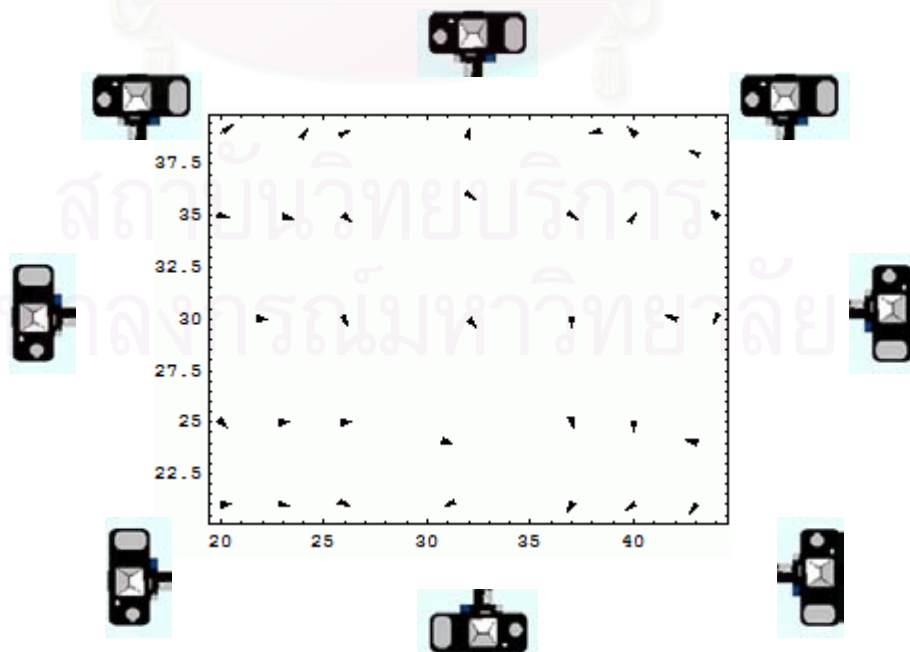
รูปที่ 4.8ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีที่ 2 ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.8ข เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 2 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะจำเพาะด้วยกรรมวิธีการวัดสอบปล้องก่อนออกงาน) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่



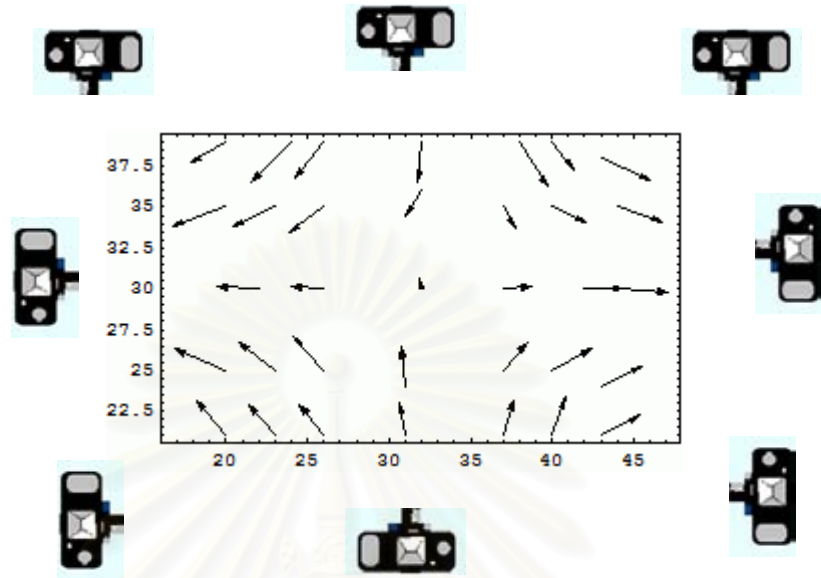
รูปที่ 4.8ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 3 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.8ค เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 3 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะทั่วไปด้วยกรรมวิธีการวัดสอบปล้องตัวแบบทั่วไป) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่



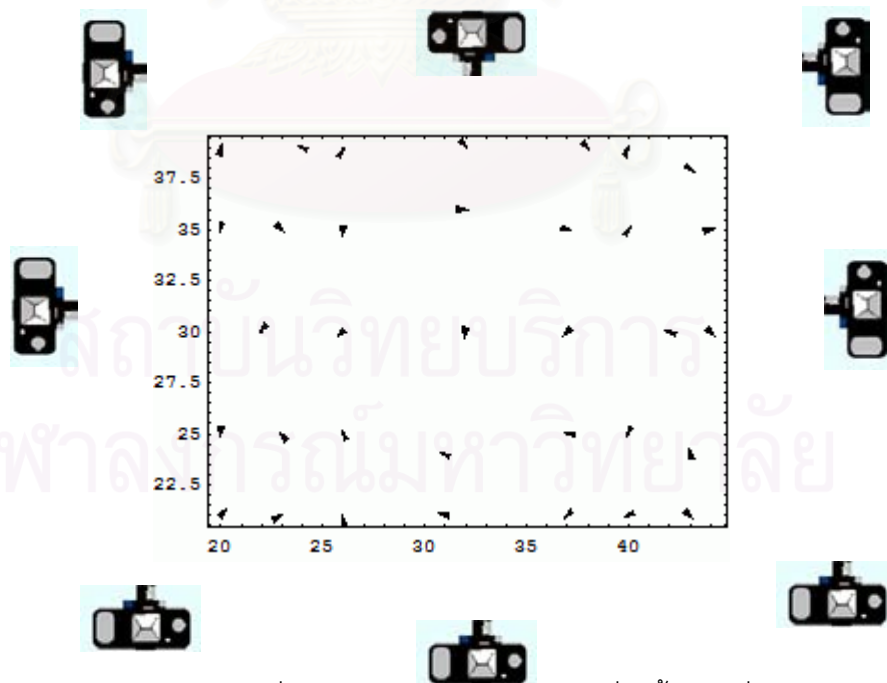
รูปที่ 4.8ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 4 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.8g เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 4 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะจำเพาะด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกล่องตัวแบบทั่วไป) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.8g แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 5 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.8g เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 5 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะทั่วไปด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกล่องตัวแบบอินเวอร์ส) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่



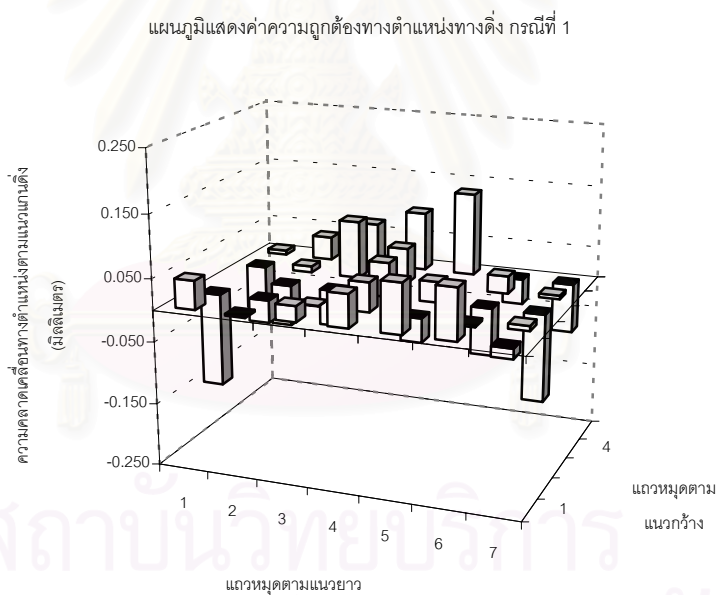
รูปที่ 4.8h แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 6 ชิ้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.8h เวกเตอร์แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางราบกรณีศึกษาที่ 6 (การประมวลผลข้อมูลในสถานะจำเพาะด้วยกรรมวิธีการวัดสอบกล่องตัวแบบอินเวอร์ส) จะเห็นว่าขนาดความคลาดเคลื่อนบริเวณตรงกลางชิ้นงานมีขนาดเล็ก และบริเวณกลางชิ้นงานมีขนาดใหญ่

ลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางแกนราบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8ก – 4.8 ข ค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งจุดของกระบวนการวัดสอบกลิ้งในตัวภายใต้สภาวะจำเพาะ จะมีขนาดเล็กกว่าการวัดแบบสภาวะทั่วไปและมีขนาดเฉลี่ยใกล้เคียงกันทุกจุด กรณีอื่น ๆ มีขนาดความคลาดเคลื่อนของจุดบริเวณตรงกลางน้อยและบริเวณขอบๆ มาก

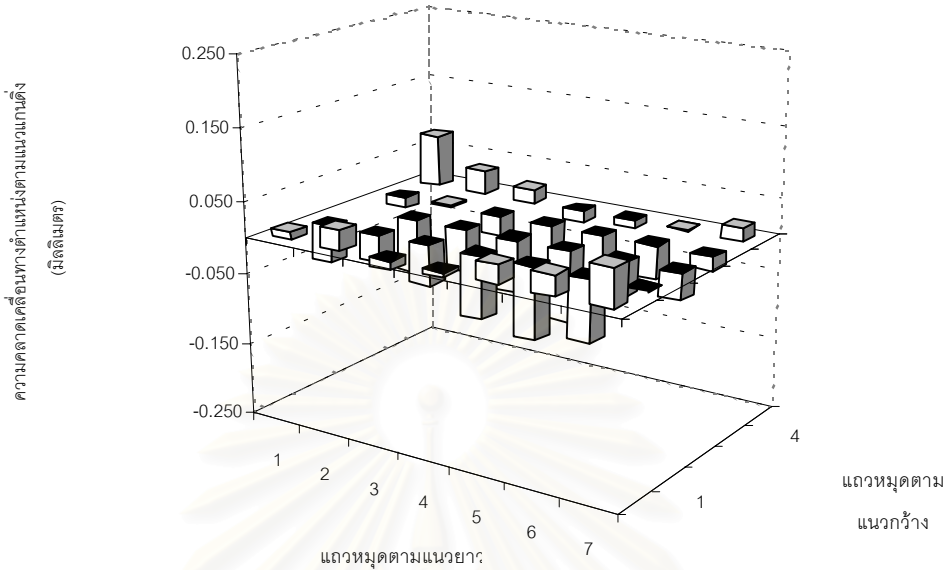
4.3.2.3 ค่าคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้งของชิ้นงานที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง

ลักษณะของค่าความคลาดเคลื่อนค่าพิกัดทางแกนตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ก - 4.9ข ค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการวัดแบบสภาวะไม่จำเพาะ มีขนาดใหญ่กว่าการวัดแบบสภาวะจำเพาะ และมีเฉลี่ยใกล้เคียงกันทุกจุด



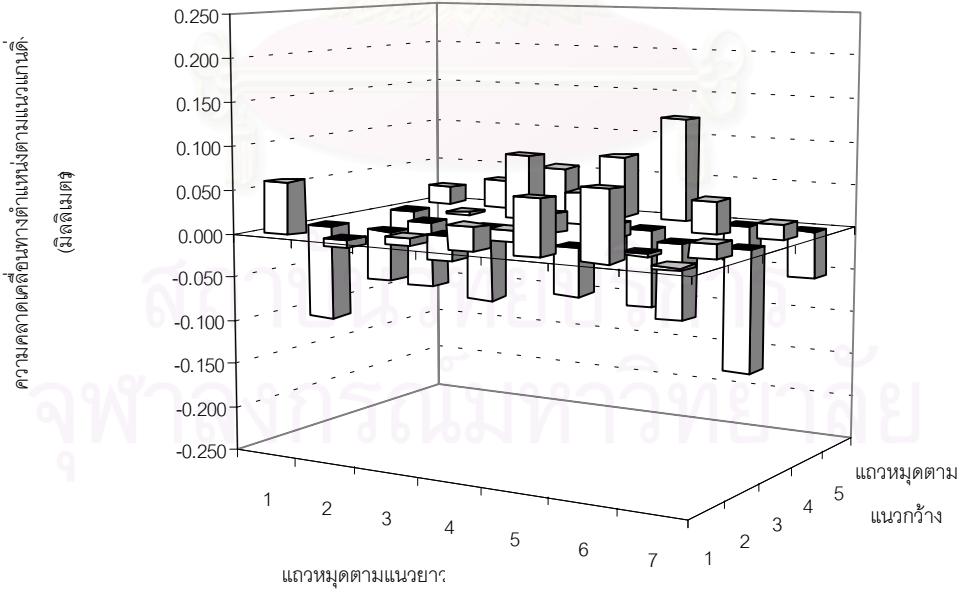
รูปที่ 4.9ก แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางตั้งกรณีที่ 1

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 2



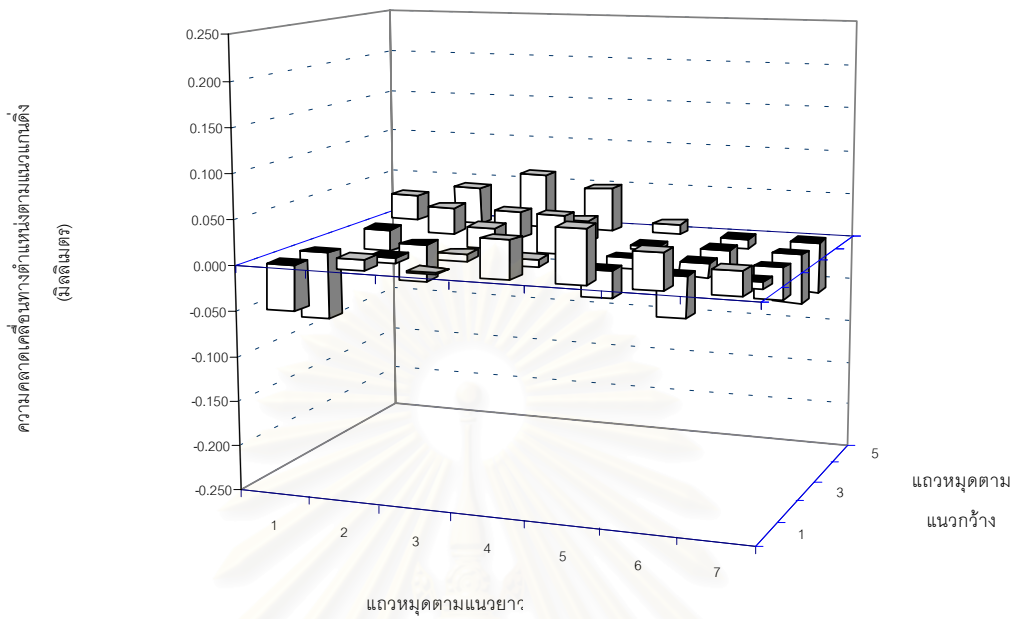
รูปที่ 4.9ข แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีนี้ที่ 2

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 3



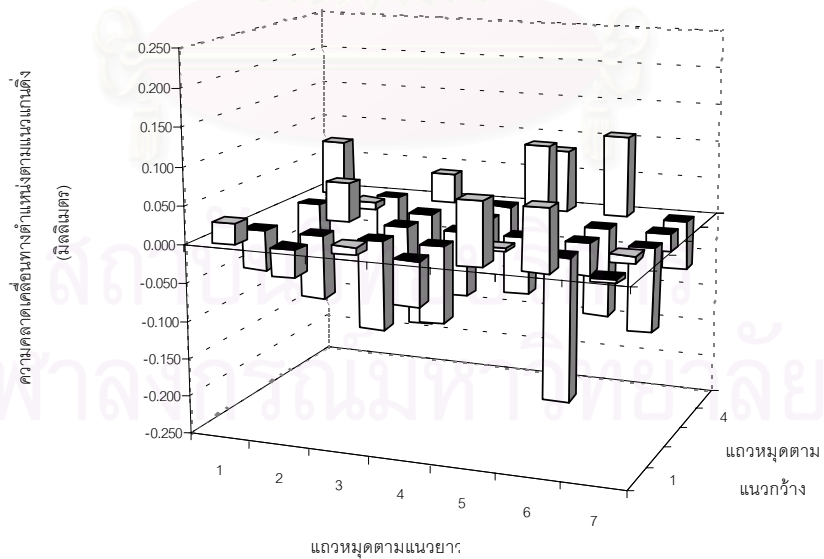
รูปที่ 4.9ค แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีนี้ที่ 3

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 4



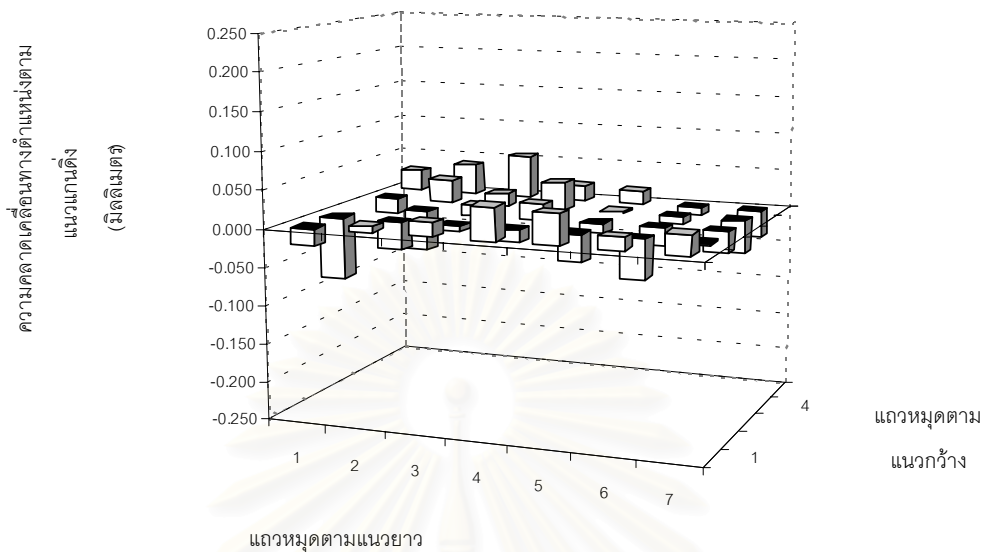
รูปที่ 4.9ง แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 4

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 5



รูปที่ 4.9จ แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 5

แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่ง กรณีที่ 6



รูปที่ 4.9 แสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดทางดิ่งกรณีที่ 6

4.3.2.4 สรุปผลการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไป (กรณีศึกษาที่ 1, 3 และ 5)

4.3.2.4.1 ผลสรุปทางด้านความละเอียดถูกต้อง(Precision)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.5 จะได้ว่าดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 กรณีศึกษาที่ 5 และกรณีศึกษาที่ 3 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกน X และแกน Y เท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.323 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางดิ่ง 0.594 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกน X และแกน Y เท่ากันโดยมีค่า 0.365 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางดิ่ง 0.669 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องก่อนออกงานให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดในขณะที่การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.3.2.4.2 ผลสรุปทางด้านความถูกต้องในการวัดขนาด

เมื่อเรียงลำดับของความถูกต้องในการวัดขนาดจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 3 กรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 5 โดยค่าต่างของระหว่างระยะตรวจสอบเทียบกับระยะที่คำนวณ ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ค่าต่างของกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความต่างทางการวัดขนาดใกล้เคียงระยะตรวจสอบที่สุด ให้ค่าต่างที่มากที่สุดจากการเปรียบเทียบระยะ 0.215 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลิ้งในตัวแบบทั่วไปให้ความถูกต้องสูงที่สุดในขณะที่การวัดสอบกลิ้งในตัวแบบอินเวอร์สทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.3.2.5 สรุปผลการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ (กรณีศึกษาที่ 2, 4 และ 6)

4.3.2.5.1 ผลสรุปทางด้านความละเอียดถูกต้อง(Precision)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.5 จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 2 เท่ากับกรณีศึกษาที่ 6 และมากกว่ากรณีศึกษาที่ 4 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 2 และ 6 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกน X และแกน Y เท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.025 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.040 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกน X และแกน Y เท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.030 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.051 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลิ้งก่อนออกงานให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดเทียบกับการวัดสอบกลิ้งในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุดแต่ต่างกันโดยเฉลี่ย 0.005 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนราบ และ 0.011 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนตั้ง

4.3.2.5.2 ผลสรุปทางด้านความถูกต้องในการวัดขนาด

เมื่อเรียงลำดับของความถูกต้องในการวัดขนาดจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 จะได้ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 6 กรณีศึกษาที่ 4 และกรณีศึกษาที่ 2 โดยค่าต่างของระหว่างระยะตรวจสอบเทียบกับระยะที่คำนวณ ตามตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ค่าต่างของกรณีศึกษาที่ 6 ซึ่ง

เป็นกรณีศึกษาที่ให้ความต่างทางการวัดขนาดใกล้เคียงระยะตรวจสอบที่สุด ให้ค่าต่างที่มากที่สุดจากการเปรียบเทียบระยะที่คำนวณจากค่าพิคกัระหว่างพิคกัที่ได้จากการวัดตรงและพิคกัที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่าย 0.022 มิลลิเมตร และค่าต่างของกรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความต่างทางการวัดขนาดใกล้เคียงระยะตรวจในลำดับรองลงมาไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร ให้ค่าต่างที่มากที่สุดจากการเปรียบเทียบระยะที่คำนวณจากค่าพิคกัระหว่างพิคกัที่ได้จากการวัดตรงและพิคกัที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่าย 0.081 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไปให้ความถูกต้องในการวัดระยะสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระยะที่คำนวณได้จากพิคกัที่ทราบค่า ในขณะที่การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์สทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.3.2.6 สรุปผลการประมวลผลจากการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 1 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไปเปรียบเทียบกับถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ จากข้อที่ 4.3.1.5.1 และจากข้อที่ 4.3.1.6.1 ความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะจำเพาะให้ความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะทั่วไป 10 เท่า และค่าต่างระยะระหว่างระยะตรวจสอบที่คำนวณได้จากพิคกัที่ได้จากการวัดโดยตรงเปรียบเทียบกับระยะที่คำนวณได้จากพิคกัที่ได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายแต่ละกรรมวิธีในการถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง

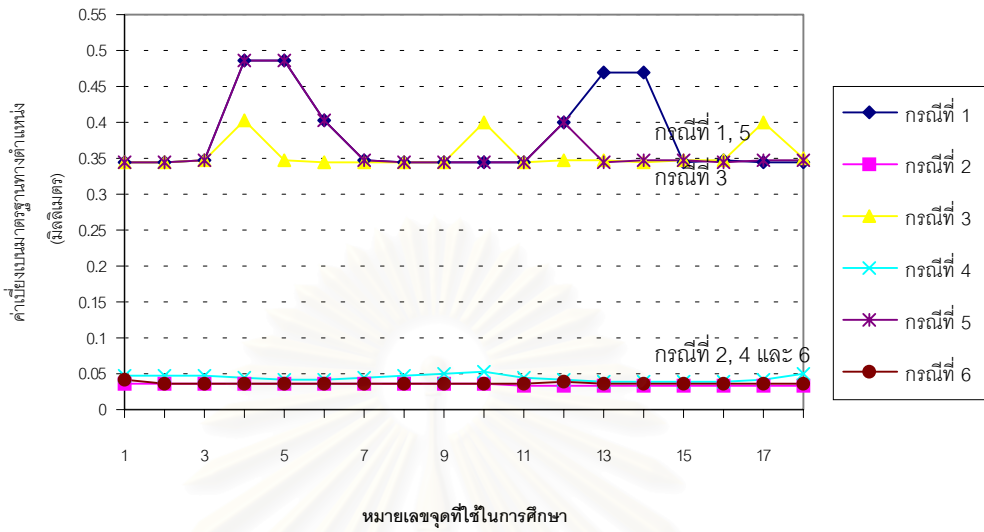
จะเห็นว่า วิธีการประมวลผลในกรณีที่ 4 หรือการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในการวัดขนาดสูงที่สุดเท่ากับ 0.114 มิลลิเมตรและมีการความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.44 มิลลิเมตร ความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.69 มิลลิเมตร แต่สำหรับความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลการวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์สให้ความละเอียดถูกต้องสูงสุด

4.4 ผลการวิจัยชิ้นงานที่ 2

4.4.1 ภาพถ่ายชุด 4 ตำแหน่ง

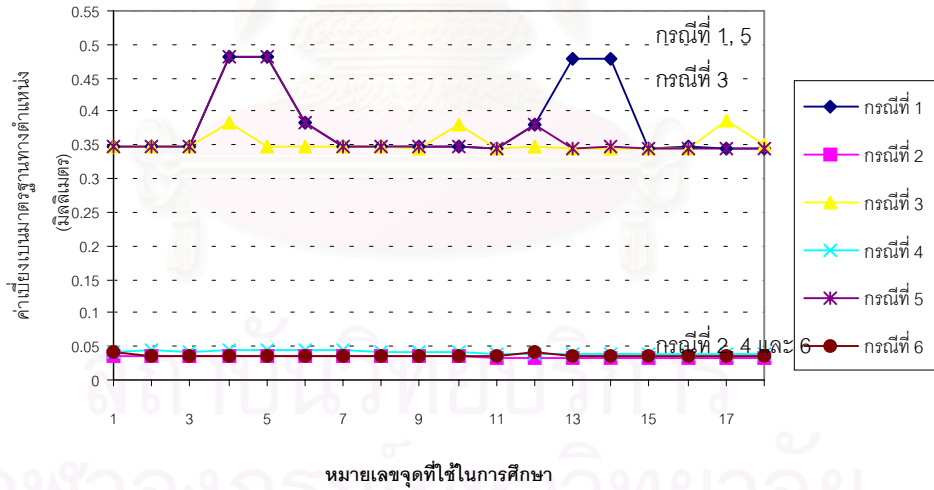
เป็นการถ่ายภาพทั้งหมด 4 สถานีที่หมายเลข 1, 3, 5, 7 (ดังแสดงในบทที่ 3) มีจุดควบคุมจำนวน 8 จุด เมื่อนำค่าความละเอียดถูกต้องของจุดที่ได้จากการปรับแก้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.4ก-ง

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนXของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่2 ถ่ายภาพ 4 สถานี



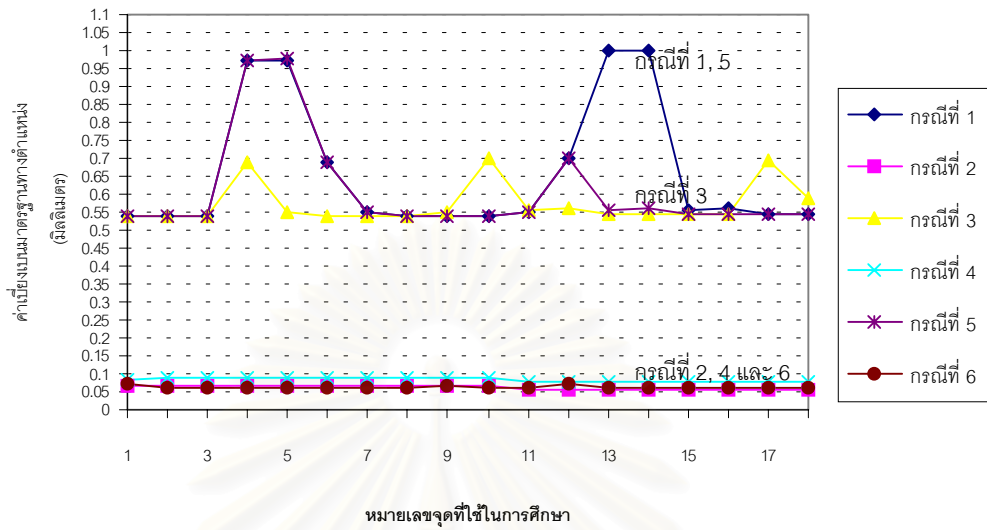
รูปที่ 4.10ก กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนX

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนYของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่2 ถ่ายภาพ 4 สถานี



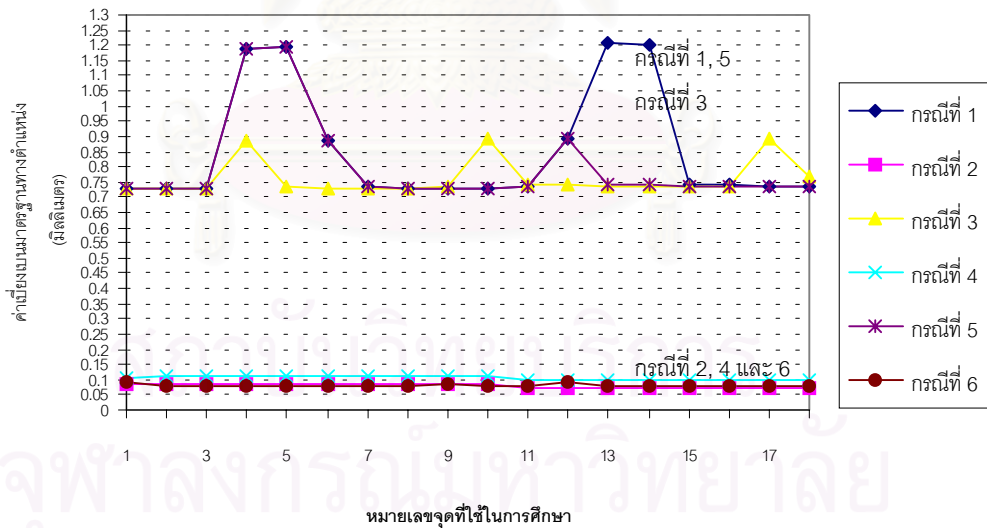
รูปที่ 4.10ข กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนY

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกน Z ของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ 4 สถานที่



รูปที่ 4.10ค กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกน Z

แผนภูมิขนาดของค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งในระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ 4 สถานที่



รูปที่ 4.10ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถสรุปค่าความละเอียดถูกต้องต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคำนวณค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Square) ในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 4.8

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 1 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.487 | 0.345 | 0.377 |
| Y Precision | 0.483 | 0.345 | 0.376 |
| Z Precision | 1.002 | 0.537 | 0.648 |
| Root-Sum-Square | 1.206 | 0.727 | 0.840 |
| กรณีที่ 2 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.047 | 0.033 | 0.035 |
| Y Precision | 0.046 | 0.033 | 0.035 |
| Z Precision | 0.096 | 0.069 | 0.067 |
| Root-Sum-Square | 0.085 | 0.089 | 0.087 |
| กรณีที่ 3 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.402 | 0.345 | 0.355 |
| Y Precision | 0.387 | 0.345 | 0.353 |
| Z Precision | 0.698 | 0.537 | 0.572 |
| Root-Sum-Square | 0.892 | 0.727 | 0.761 |
| กรณีที่ 4 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.056 | 0.038 | 0.045 |
| Y Precision | 0.059 | 0.038 | 0.044 |
| Z Precision | 0.115 | 0.072 | 0.084 |
| Root-Sum-Square | 0.139 | 0.095 | 0.105 |
| กรณีที่ 5 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.487 | 0.345 | 0.368 |
| Y Precision | 0.483 | 0.345 | 0.366 |
| Z Precision | 0.975 | 0.537 | 0.613 |
| Root-Sum-Square | 1.192 | 0.727 | 0.804 |
| กรณีที่ 6 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.063 | 0.035 | 0.038 |
| Y Precision | 0.060 | 0.037 | 0.040 |
| Z Precision | 0.146 | 0.061 | 0.070 |
| Root-Sum-Square | 0.170 | 0.080 | 0.089 |

ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์

ชิ้นงานที่ 2 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

จะเห็นว่าค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการคำนวณทางแกน X และ Y มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ความถูกต้องทางแกน Z ประมาณ 2 เท่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) กรณีที่ 2, 4 และ 6 มีค่า 0.035, 0.105 และ 0.089 มิลลิเมตรตามลำดับ ในขณะที่กรณีที่ 1, 3, 5 มีค่า 0.840, 0.761 และ 0.804 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากผลข้างต้น จะเห็นว่า

1) กรณีที่ 2, 4 และ 6 เป็นการวัดพิกัดภาพหมุดบังคับแบบศูนย์ถ่วงและวัดมุมโดยยึดแบบอัตโนมัติ จึงทำค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องดีกว่า กรณีที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นวัดพิกัดภาพด้วยมือ

2) กรณีที่ 2 และ 6 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

3) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 2 และ 4 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่า กรณีที่ 6 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกลับในตัวแบบอินเวอร์ส

4) สำหรับการวัดพิกัดภาพด้วยมือ กรณีที่ 1 และ 5 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

5) กรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไปมีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 1 และ 5

4.4.1.1 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง (Precision) ของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไป (กรณีศึกษาที่ 1, 3 และ 5)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.8 จะได้ว่า กรณีศึกษาที่ 5 กรณีศึกษาที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 1 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกน X และแกน Y เท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.355 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.572 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกน X และแกน Y เท่ากันโดยมีค่า 0.377 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.648 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 2 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไป ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดในขณะที่การวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

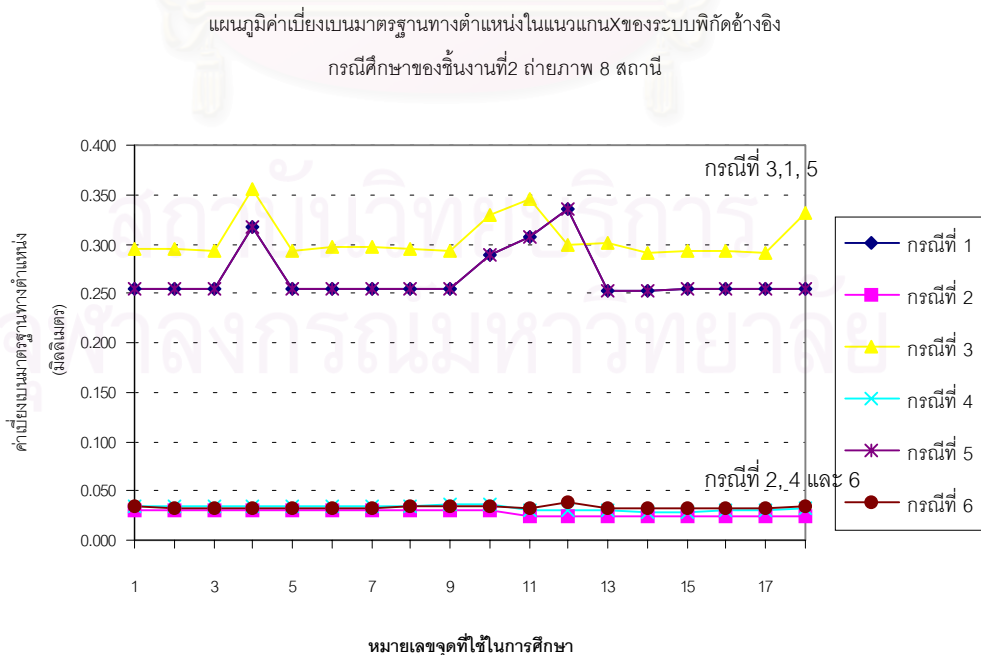
4.4.1.2 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ(กรณีศึกษาที่ 2, 4 และ 6)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.8 จะได้ว่า กรณีศึกษาที่ 2 เท่ากับกรณีศึกษาที่ 6 และมากกว่ากรณีศึกษาที่ 4 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 2 และ 6 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.035 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.067 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.045 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.084 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 2 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลิ้งก่อนออกงานและการวัดสอบกลิ้งในตัวแบบอินเวอร์สให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด

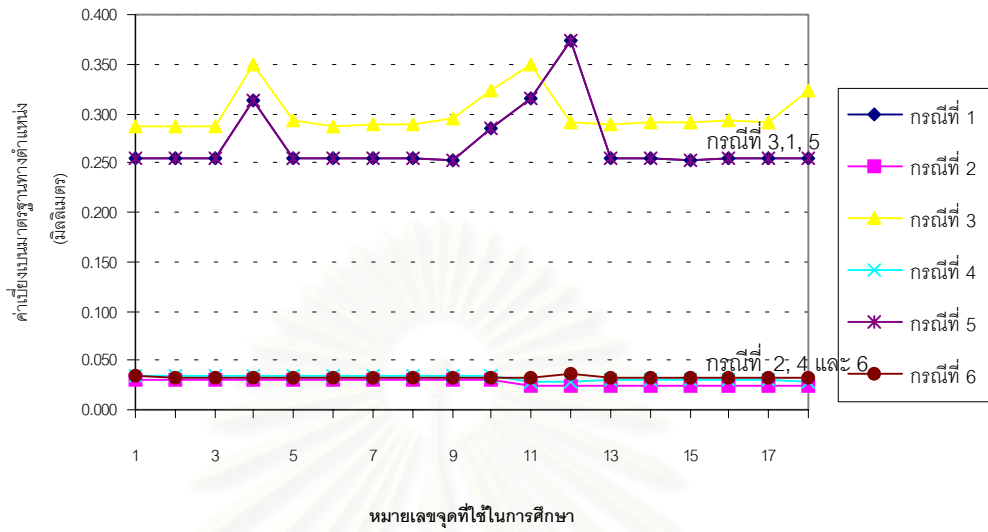
4.4.2 ภาพถ่ายชุด8ตำแหน่ง

เป็นการถ่ายภาพทั้งหมด8 สถานีที่หมายเลข 1- 8 (ดังแสดงในบทที่3) มีจุดควบคุมจำนวน 8จุด จุดโยงยึดสำหรับการวัดมือในกรณีที่ 1, 3 และ 5 จำนวน 30 จุด และจุดโยงยึดสำหรับการวัดมือในกรณีที่ 2, 4 และ 6 จำนวน 99 จุด เมื่อนำค่าความละเอียดถูกต้องของแต่ละจุดที่ได้จากการปรับแก้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ก-ง



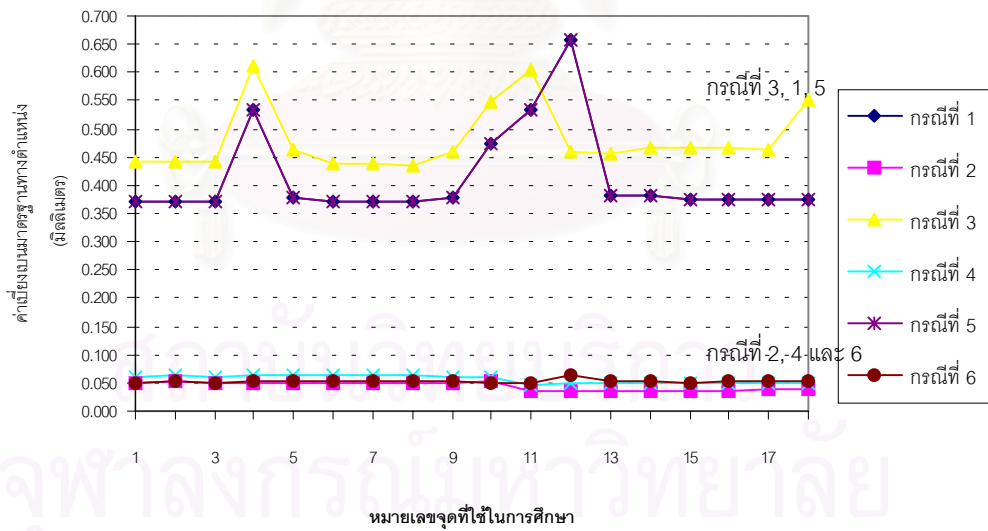
รูปที่ 4.11ก กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนX

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนYของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่2 ถ่ายภาพ 8 สถานี



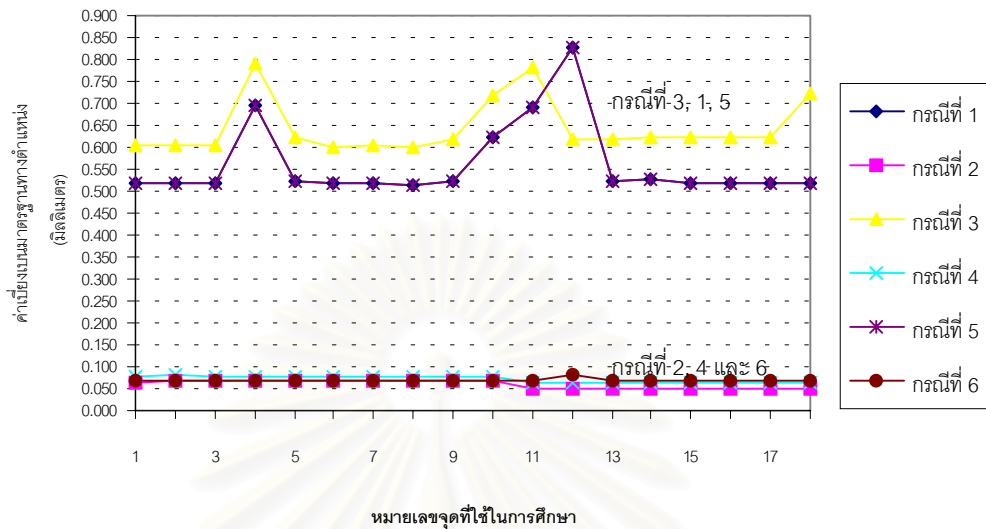
รูปที่ 4.11x กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนY

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนZของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่2 ถ่ายภาพ 8 สถานี



รูปที่ 4.11ค กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนZ

แผนภูมิขนาดของค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งในระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ 8 สถานี



รูปที่ 4.11ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถสรุปค่าความละเอียดถูกต้องต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคำนวณค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Square) ในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 4.9

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 1 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.252 | 0.335 | 0.268 |
| Y Precision | 0.253 | 0.374 | 0.270 |
| Z Precision | 0.370 | 0.656 | 0.417 |
| Root-Sum-Square | 0.516 | 0.826 | 0.565 |
| กรณีที่ 2 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.025 | 0.035 | 0.028 |
| Y Precision | 0.025 | 0.036 | 0.028 |
| Z Precision | 0.036 | 0.062 | 0.044 |
| Root-Sum-Square | 0.066 | 0.079 | 0.069 |
| กรณีที่ 3 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.291 | 0.356 | 0.306 |
| Y Precision | 0.287 | 0.350 | 0.301 |
| Z Precision | 0.435 | 0.611 | 0.482 |
| Root-Sum-Square | 0.600 | 0.790 | 0.645 |

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 4 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.029 | 0.040 | 0.032 |
| Y Precision | 0.028 | 0.041 | 0.032 |
| Z Precision | 0.045 | 0.073 | 0.055 |
| Root-Sum-Square | 0.061 | 0.092 | 0.072 |
| กรณีที่ 5 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.252 | 0.335 | 0.268 |
| Y Precision | 0.253 | 0.374 | 0.270 |
| Z Precision | 0.370 | 0.656 | 0.417 |
| Root-Sum-Square | 0.516 | 0.826 | 0.568 |
| กรณีที่ 6 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.031 | 0.058 | 0.031 |
| Y Precision | 0.032 | 0.067 | 0.031 |
| Z Precision | 0.046 | 0.075 | 0.047 |
| Root-Sum-Square | 0.065 | 0.116 | 0.064 |

ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์

ชิ้นงานที่ 2 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จะเห็นว่าค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการคำนวณทางแกน X และ Y มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ความถูกต้องทางแกน Z ประมาณ 0.6 เท่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) กรณีที่ 2, 4 และ 6 มีค่าประมาณ 0.07-0.08 มิลลิเมตร ในขณะที่กรณีที่ 1, 3, 5 มีค่าประมาณ 0.55 – 0.65 มิลลิเมตร

2) กรณีที่ 2, 4 และ 6 ให้มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square of Precision) ทางตำแหน่งเฉลี่ย 0.069, 0.072 และ 0.064

3) กรณีที่ 1 และ 5 ให้มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square of Precision) ทางตำแหน่งเฉลี่ย 0.565 และ 0.568 มิลลิเมตร ตามลำดับและมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งมีค่าเป็น 0.645 มิลลิเมตร

จากผลข้างต้น จะเห็นว่า

1) กรณีที่ 2, 4 และ 6 เป็นการวัดพิิกัดภาพหมุดบังคับแบบศูนย์ถ่วงและวัดหมุดโยงยึดแบบอัตโนมัติ จึงทำค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องดีกว่า กรณีที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นวัดพิิกัดภาพด้วยมือ

2) กรณีที่ 2 และ 6 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

3) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 2 และ 4 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากรณีที่ 6 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกลับในตัวแบบอินเวอร์ส

4) สำหรับการวัดพิภพภาพด้วยมือ กรณีที่ 1 และ 5 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวเองทั่วไป

5) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 1 และ 5 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไป

4.4.2.1 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไป(กรณีศึกษาที่ 1,3 และ 5)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.9 จะได้ว่า กรณีศึกษาที่ 1 เท่ากับกรณีศึกษาที่ 5 และมากกว่ากรณีศึกษาที่ 3 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องถูกต้องสูงสุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.268 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.417 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.305 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.482 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 2 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลับก่อนออกงานให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดในขณะที่การวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด

4.4.2.2 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 2 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ(กรณีศึกษาที่ 2, 4 และ 6)

จากข้อมูลในตารางที่ 4.9 จะเห็นว่า ความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 2และ6 เป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.028 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.044 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 4 เป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.032 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.055 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 2 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลับก่อนออกงานและการวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไปให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดเทียบกับการวัดสอบกลับในตัวแบบทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุดแต่ต่างกันโดยเฉลี่ย 0.004 มิลลิเมตรสำหรับ

ทางแกนราบ และ 0.011 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนนตั้ง

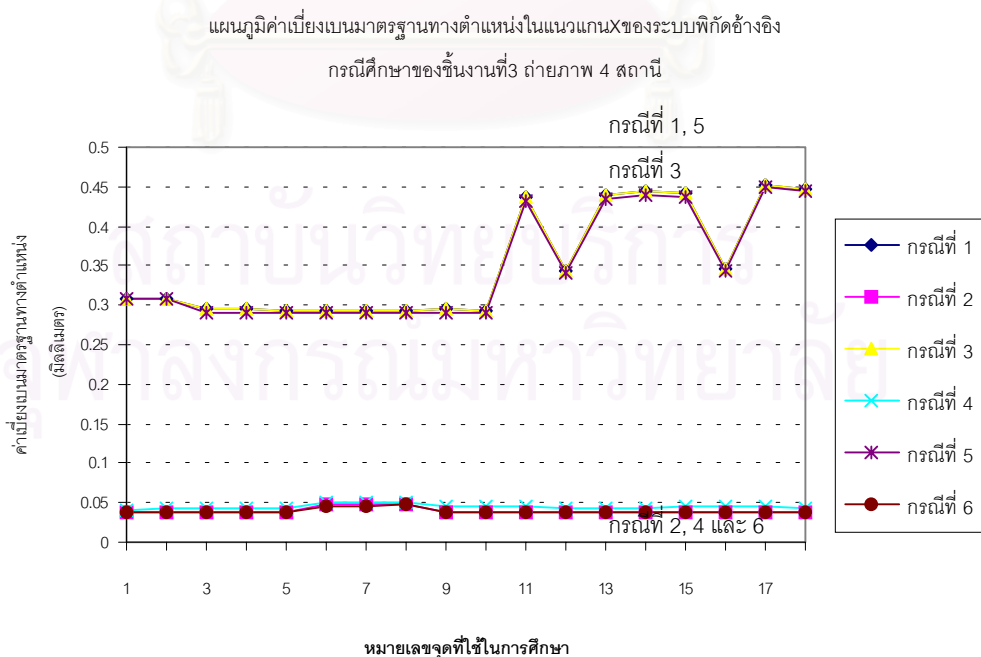
4.4.2.3 สรุปผลการการประมวลผลจากการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 2 ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง ภายใต้สภาวะทั่วไปเปรียบเทียบกับถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ จากข้อที่ 4.4.2.1 และจากข้อที่ 4.4.2.2 ความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะจำเพาะให้ความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะทั่วไป 10 เท่า

จะเห็นว่า วิธีการประมวลผลในกรณีที่ 2 และ 6 หรือการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล้อง ก่อนออกงานและการวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส มีการความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.028 มิลลิเมตร ความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.69 มิลลิเมตร

4.5 ผลการวิจัยชิ้นงานที่ 3

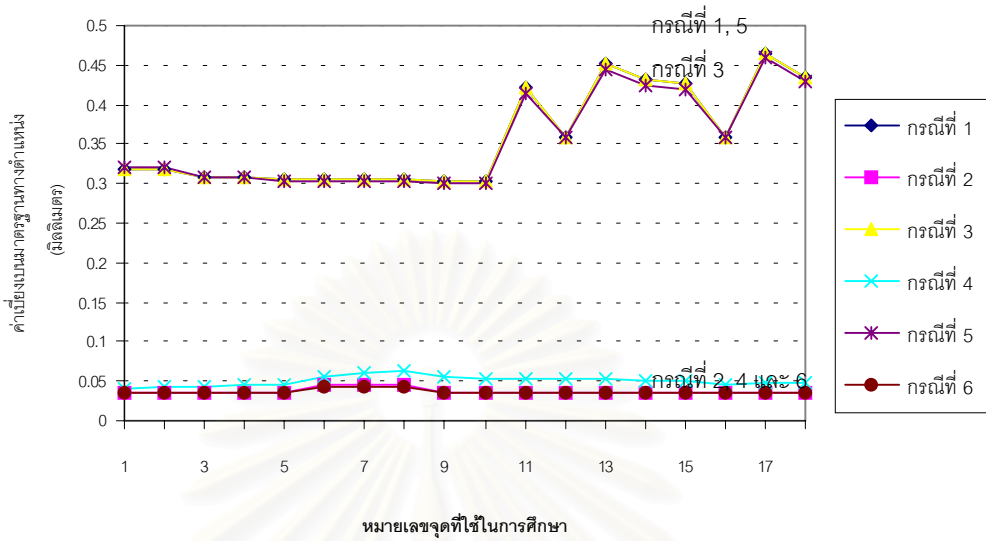
4.5.1 ภาพถ่ายชุด 4 ตำแหน่ง

เป็นการถ่ายภาพทั้งหมด 4 สถานีที่หมายเลข 1, 3, 5, 7 (ดังแสดงในบทที่ 3) มีจุดควบคุมจำนวน 8 จุด จุดโยงยึดสำหรับการวัดมือในกรณีที่ 1, 3 และ 5 จำนวน 30 จุด และจุดโยงยึดสำหรับการวัดมือในกรณีที่ 2, 4 และ 6 จำนวน 34 จุด ในจำนวนนี้มีจุดโยงยึดที่ดี (Good Point) 26 จุด และจุดโยงยึดที่อ่อนแอ (Weak Point) จำนวน 7 จุด เมื่อนำค่าความละเอียดถูกต้องของจุดที่ได้จากการปรับแก้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ก-



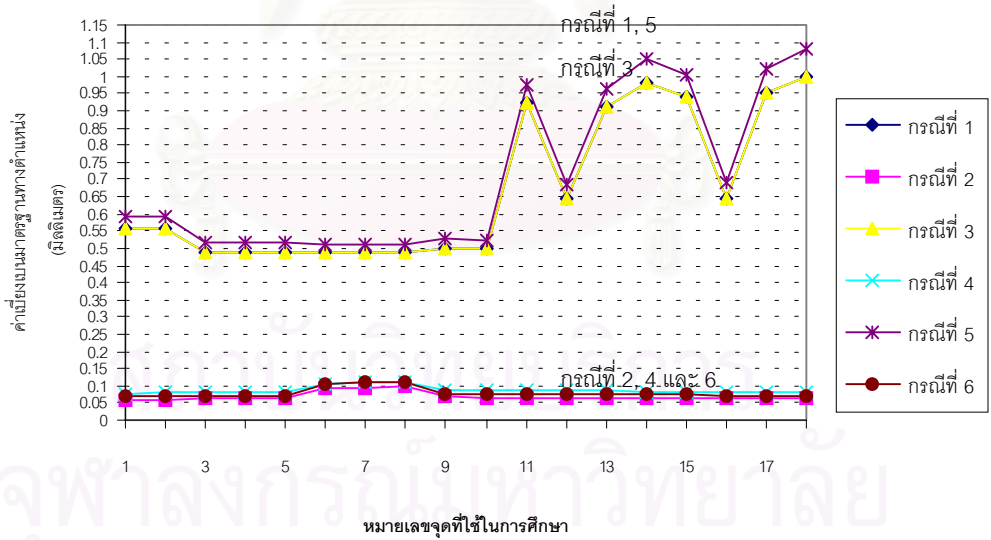
รูปที่ 4.12ก กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกน X

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนYของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่3 ถ่ายภาพ 4 สถานี



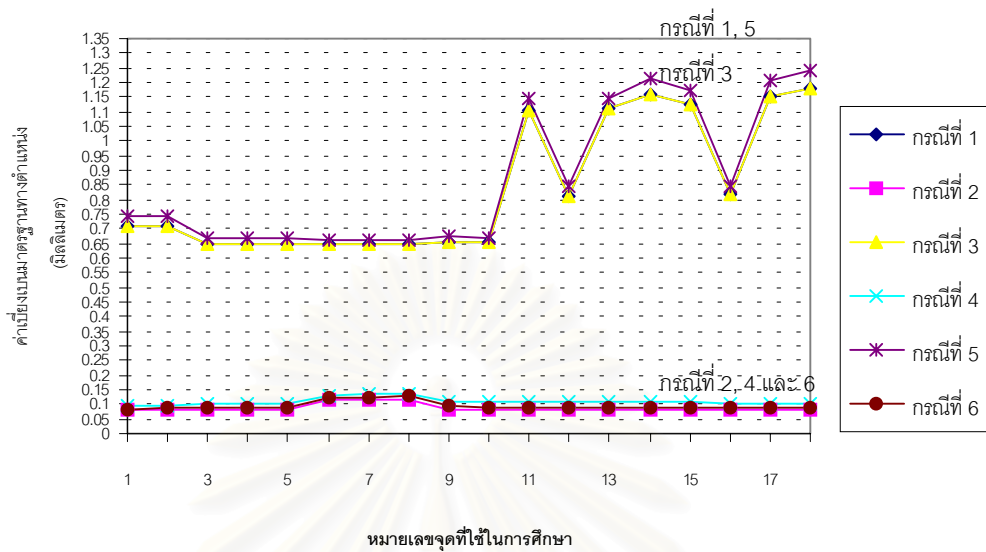
รูปที่ 4.12ข กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนY

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกนZของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่3 ถ่ายภาพ 4 สถานี



รูปที่ 4.12ค กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกนZ

แผนภูมิขนาดของค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งในระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่3 ถ่ายภาพ 4 สถานี



รูปที่ 4.12ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถสรุปค่าความละเอียดถูกต้องต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคำนวณค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Square) ในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 4.10

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 1 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.566 | 0.293 | 0.346 |
| Y Precision | 0.488 | 0.302 | 0.350 |
| Z Precision | 0.999 | 0.487 | 0.632 |
| Root-Sum-Square | 1.178 | 0.645 | 0.803 |
| กรณีที่ 2 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.047 | 0.032 | 0.038 |
| Y Precision | 0.048 | 0.033 | 0.037 |
| Z Precision | 0.096 | 0.051 | 0.065 |
| Root-Sum-Square | 0.117 | 0.069 | 0.084 |
| กรณีที่ 3 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.566 | 0.293 | 0.346 |
| Y Precision | 0.488 | 0.302 | 0.350 |
| Z Precision | 0.999 | 0.487 | 0.632 |
| Root-Sum-Square | 1.178 | 0.645 | 0.803 |

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 4 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.055 | 0.037 | 0.044 |
| Y Precision | 0.062 | 0.037 | 0.047 |
| Z Precision | 0.112 | 0.068 | 0.082 |
| Root-Sum-Square | 0.138 | 0.088 | 0.104 |
| กรณีที่ 5 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.604 | 0.290 | 0.344 |
| Y Precision | 0.491 | 0.300 | 0.348 |
| Z Precision | 1.079 | 0.512 | 0.671 |
| Root-Sum-Square | 1.243 | 0.662 | 0.833 |
| กรณีที่ 6 | Max | Min | Mean |
| X Precision | 0.047 | 0.032 | 0.038 |
| Y Precision | 0.048 | 0.033 | 0.037 |
| Z Precision | 0.111 | 0.057 | 0.073 |
| Root-Sum-Square | 0.128 | 0.074 | 0.091 |

ตารางที่ 4.10 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมไฟโต้โมเดลเลอร์

ชิ้นงานที่ 3 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

จะเห็นว่าค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการคำนวณทางแกน X, Y, Z มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ความถูกต้องทางแกน Z ประมาณ 1.6 เท่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) กรณีที่ 2, 4 และ 6 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.084, 0.104 และ 0.091 มิลลิเมตรตามลำดับ ในขณะที่กรณีที่ 1, 3, 5 มีค่า 0.803, 0.803 และ 0.833 มิลลิเมตร

2) กรณีที่ 1 และ 3 ให้ค่าขนาดความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) ทางตำแหน่งเฉลี่ย 0.803 มิลลิเมตร น้อยกว่ากรณีที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.833

จากผลข้างต้น จะเห็นว่า

1) กรณีที่ 2, 4 และ 6 เป็นการวัดพิกัดภาพมุมบังคับแบบศูนย์ถ่วงและวัดมุมโดยยึดแบบอัตโนมัติ จึงทำค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งดีกว่า กรณีที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นวัดพิกัดภาพด้วยมือ ประมาณ 2 เท่า

2) สำหรับการวัดพิกัดภาพแบบอัตโนมัติกรณีที่ 2 และ 6 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 4 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

3) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 2, 4 และ 6 มีความค่าความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มเท่าๆกัน

- 4) สำหรับการวัดพิภักภาพด้วยมือ กรณีที่ 1 และ 3 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 5 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวเองทั่วไป
- 5) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 1, 3 และ 5 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มเท่าๆกัน

4.5.1.1 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไป(กรณีศึกษาที่ 1,3 และ 5)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.10 จะได้ว่า กรณีศึกษาที่ 1, 3 และ 5 มีความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.348 มิลลิเมตร กรณีที่ 1 และ 3 มีความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.632 มิลลิเมตร ให้ความละเอียดถูกต้องทางตั้ง สูงกว่ากรณีที่5ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.833 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์สมีให้ความละเอียดถูกต้องทางตั้งต่ำที่สุด

4.5.1.2 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ(กรณีศึกษาที่ 2, 4 และ 6)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.10 จะได้ว่า กรณีศึกษาที่ 2 เท่ากับกรณีศึกษาที่ 6 และมากกว่ากรณีศึกษาที่ 4 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 2และ6 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.038 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.065 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYโดยเฉลี่ยมีค่า 0.046 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.082 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องก่อนออกงานให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุดเทียบกับการวัดสอบกล้องในตัวเองทั่วไปให้ละเอียดถูกต้องต่ำที่สุดแต่ต่างกันโดยเฉลี่ย 0.008 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนราบ และ 0.017 มิลลิเมตรสำหรับทางแกนตั้ง

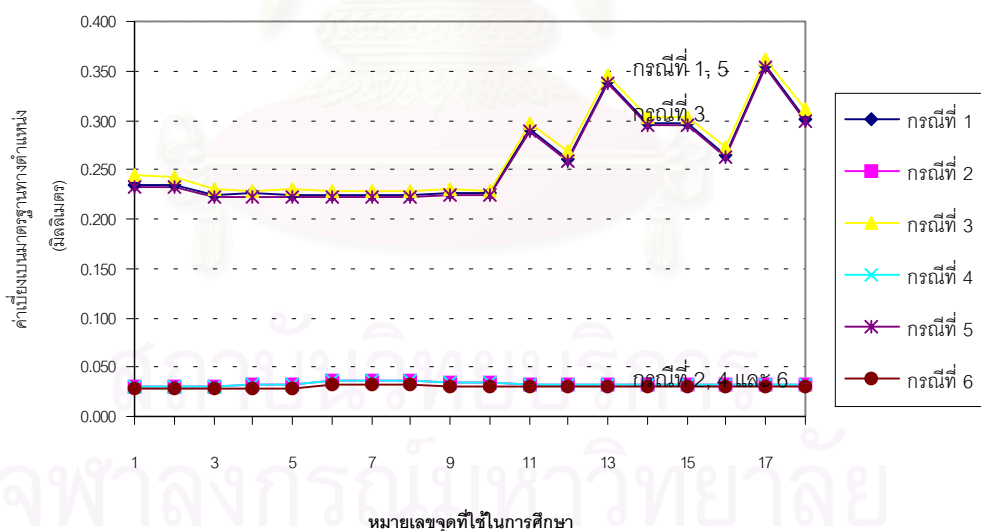
4.5.1.3 สรุปผลการการประมวลผลจากการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง ภายใต้สภาวะทั่วไปเปรียบเทียบกับถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ จากข้อที่ 4.5.1.2 และจากข้อที่ 4.5.1.1 ความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะจำเพาะให้ความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะ 10 เท่า

จะเห็นว่า วิธีการประมวลผลในกรณีที่ 2 และ 6 หรือการประมวลผลด้วยการวัดสอบล้องก่อนออกงานและการวัดสอบล้องในตัวแบบทั่วไป สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่าย 4 ตำแหน่ง

4.5.2 ภาพถ่ายชุด 8 ตำแหน่ง

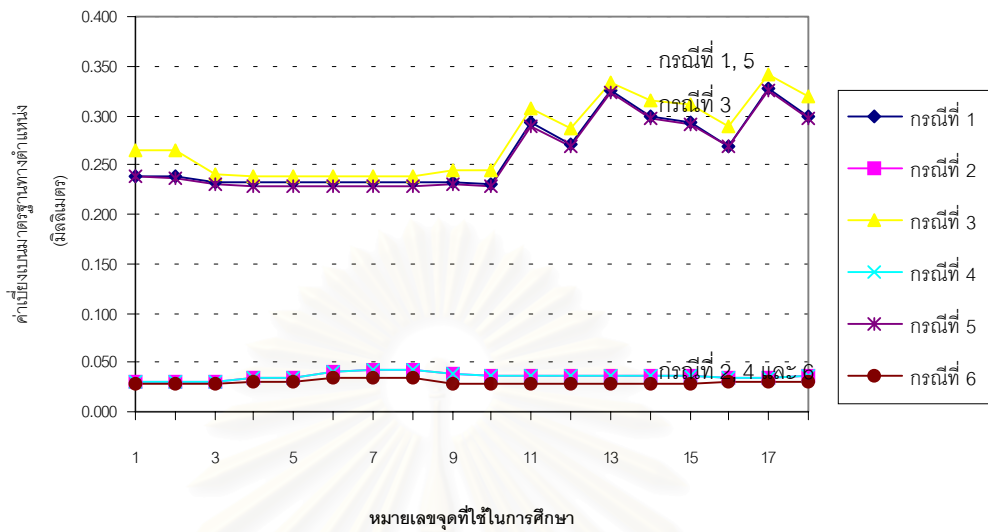
เป็นการถ่ายภาพทั้งหมด 8 สถานีที่หมายเลข 1- 8 (ดังแสดงในบทที่ 3) มีจุดควบคุมจำนวน 8 จุด จุดโยงยึดสำหรับการวัดมือในกรณีที่ 1, 3 และ 5 จำนวน 30 จุด และจุดโยงยึดสำหรับการวัดมือในกรณีที่ 2, 4 และ 6 จำนวน 146 จุด ในจำนวนนี้มีจุดโยงยึดที่ดี (Good Point) 134 จุด และจุดโยงยึดที่อ่อนแอ(Weak Point)จำนวน 11จุด เมื่อนำค่าความละเอียดถูกต้องของแต่ละจุดที่ได้จากการปรับแก้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.11ก-ง

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกน X ของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ 8 สถานี



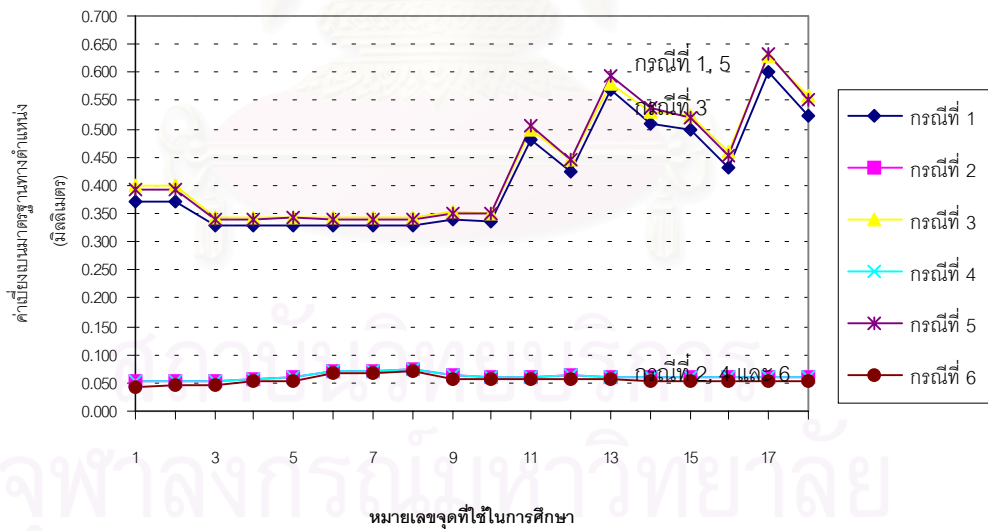
รูปที่ 4.13ก กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกน X

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกน Y ของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ 8 สถานี



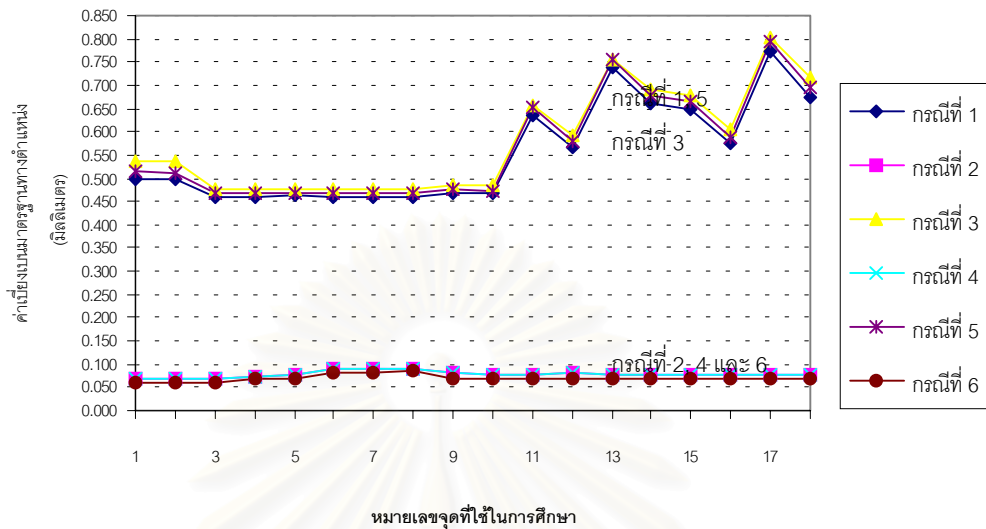
รูปที่ 4.13ข กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกน Y

แผนภูมิค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางตำแหน่งในแนวแกน Z ของระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ 8 สถานี



รูปที่ 4.13ค กราฟเปรียบเทียบค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทางแกน Z

แผนภูมิขนาดของค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งในระบบพิกัดอ้างอิง
กรณีศึกษาของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ 8 สถานี



รูปที่ 4.13ง กราฟเปรียบเทียบค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณปรับแก้สามารถสรุปค่าความละเอียดถูกต้องต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคำนวณค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root-Sum-Square) ในแต่ละกรณีศึกษาได้ดังตารางที่ 4.11

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีศึกษาที่ 1 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.225 | 0.336 | 0.254 |
| Y Precision | 0.231 | 0.363 | 0.259 |
| Z Precision | 0.328 | 0.522 | 0.394 |
| Root-Sum-Square | 0.460 | 0.713 | 0.536 |
| กรณีศึกษาที่ 2 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.027 | 0.102 | 0.037 |
| Y Precision | 0.028 | 0.095 | 0.039 |
| Z Precision | 0.044 | 0.167 | 0.067 |
| Root-Sum-Square | 0.059 | 0.208 | 0.086 |
| กรณีศึกษาที่ 3 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.227 | 0.388 | 0.254 |
| Y Precision | 0.238 | 0.328 | 0.263 |
| Z Precision | 0.343 | 0.559 | 0.398 |
| Root-Sum-Square | 0.476 | 0.716 | 0.540 |

| | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|
| กรณีที่ 4 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.027 | 0.102 | 0.037 |
| Y Precision | 0.028 | 0.095 | 0.039 |
| Z Precision | 0.044 | 0.167 | 0.067 |
| Root-Sum-Square | 0.059 | 0.208 | 0.086 |
| กรณีที่ 5 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.222 | 0.344 | 0.247 |
| Y Precision | 0.229 | 0.362 | 0.252 |
| Z Precision | 0.339 | 0.551 | 0.400 |
| Root-Sum-Square | 0.465 | 0.734 | 0.534 |
| กรณีที่ 6 | Min | Max | Mean |
| X Precision | 0.024 | 0.097 | 0.034 |
| Y Precision | 0.025 | 0.091 | 0.034 |
| Z Precision | 0.038 | 0.174 | 0.063 |
| Root-Sum-Square | 0.051 | 0.209 | 0.079 |

ตารางที่ 4.11 ตารางสรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณปรับแก้จากโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์

ชิ้นงานที่ 3 ถ่าย 8 ตำแหน่ง

จะเห็นว่าค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการคำนวณทางแกน X, Y, Z มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ความถูกต้องทางแกน Z ประมาณ 1.6 เท่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าขนาดของความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square) กรณีที่ 2, 4 และ 6 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.07-0.08 มิลลิเมตร ในขณะที่กรณีที่ 1, 3, 5 มีค่าประมาณ 0.53 มิลลิเมตร

2) กรณีที่ 1, 3 และ 5 ให้ค่าขนาดความละเอียดถูกต้อง (Root Sum Square of Precision) ทางตำแหน่งเฉลี่ย 0.536, 0.540 และ 0.534 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3) กรณีที่ 1 และ 5 ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง (Standard Deviation of Precision) 0.09 มิลลิเมตร มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.093 มิลลิเมตร

จากผลข้างต้น จะเห็นว่า

1) กรณีที่ 2, 4 และ 6 เป็นการวัดพิศภาพหมุดบังคับแบบศูนย์ถ่วงและวัดหมุดโยงยึดแบบอัตโนมัติ จึงทำค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งดีกว่า กรณีที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นวัดพิศภาพด้วยมือ ประมาณ 7 เท่า

2) สำหรับการวัดพิศภาพแบบอัตโนมัติกรณีที่ 2 และ 4 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 6 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบอินเวอร์ส

3) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 2, 4 และ 6 มีความค่าความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มเท่าๆกัน

4) สำหรับการวัดพิภักภาพด้วยมือ กรณีที่ 1 และ 5 ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องที่ดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบในตัวแบบทั่วไป

5) กระบวนการปรับแก้ในกรณีที่ 1 และ 5 มีความละเอียดถูกต้องที่เกาะกลุ่มกันดีกว่ากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับแก้ด้วยกระบวนการวัดสอบกลับในตัว

4.5.2.1 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ8ตำแหน่งภายใต้สภาวะทั่วไป(กรณีศึกษาที่ 1,3 และ 5)

จากข้อมูลในตารางที่ 4.11 จะได้ว่าขณะนี้ ความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 5 สูงกว่ากรณีศึกษาที่ 5 และกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งเท่ากัน โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องถูกต้องสูงสุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXโดยเฉลี่ยมีค่า 0.247 มิลลิเมตร และแกนYโดยเฉลี่ยมีค่า 0.252 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้งของกรณีที่1สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.394 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 5 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องทางตั้งต่ำที่สุดเท่ากับ0.400 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่าย 4 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลับในตัวแบบอินเวอร์สให้ละเอียดถูกต้องสูงที่สุด

4.5.2.2 สรุปผลความละเอียดถูกต้อง(Precision)ของชิ้นงานที่ 3 ถ่ายภาพ8ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ(กรณีศึกษาที่ 2, 4 และ 6)

เมื่อเรียงลำดับของความละเอียดถูกต้องจากมากไปหาน้อยจากข้อมูลในตารางที่ 4.11 จะได้ว่าขณะนี้ กรณีศึกษาที่ 6, กรณีศึกษาที่ 2 เท่ากับกรณีศึกษาที่ 4 โดยความละเอียดถูกต้องทางราบของกรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยเฉลี่ยมีค่า 0.034 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.063 มิลลิเมตร กรณีศึกษาที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ความละเอียดถูกต้องต่ำที่สุด ให้ความละเอียดถูกต้องทางแกนXและแกนYเท่ากันโดยมีค่า 0.038 มิลลิเมตร และความละเอียดถูกต้องทางตั้ง 0.067 มิลลิเมตร

จึงสรุปว่า สำหรับชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่าย 8 ตำแหน่งประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกลับในตัวแบบอินเวอร์สให้ละเอียดถูกต้องสูงที่สุด

4.5.2.3 สรุปผลการการประมวลผลจากการศึกษาวิจัยชิ้นงานศึกษาที่ 3 ถ่ายภาพ8ตำแหน่ง ภายใต้สภาวะทั่วไปเปรียบเทียบกับถ่ายภาพ4ตำแหน่งภายใต้สภาวะจำเพาะ จากข้อที่4.5.2.1 และจากข้อที่ 4.5.2.2 ความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะจำเพาะให้ความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการประมวลผลข้อมูลที่เก็บภายใต้สภาวะทั่วไป 10 เท่า

จะเห็นว่า วิธีการประมวลผลในกรณีที่ 6 หรือประมวลผลด้วยวิธีการวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส มีการความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.034 มิลลิเมตร ความละเอียดถูกต้องทางราบโดยเฉลี่ย 0.063 มิลลิเมตร

4.6 สรุปเปรียบเทียบผลการวิจัยทั้ง 3 ชิ้นงาน

จากการศึกษาวิจัยชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นงาน เมื่อพิจารณาค่าขนาดความละเอียดถูกต้องในกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณีสามารถแสดงเป็นตารางแสดงสรุปดังตารางที่ 4.12

| ขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง (มิลลิเมตร) | ชิ้นงานที่ 1 | | ชิ้นงานที่ 2 | | ชิ้นงานที่ 3 | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | ถ่าย4ตำแหน่ง | ถ่าย8ตำแหน่ง | ถ่าย4ตำแหน่ง | ถ่าย8ตำแหน่ง | ถ่าย4ตำแหน่ง | ถ่าย8ตำแหน่ง |
| การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน ภายใต้สภาวะทั่วไป | 1.050 | 0.749 | 0.840 | 0.565 | 0.803 | 0.536 |
| การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน ภายใต้สภาวะจำเพาะ | 0.075 | 0.053 | 0.089 | 0.069 | 0.084 | 0.086 |
| การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป ภายใต้สภาวะทั่วไป | 1.004 | 0.845 | 0.761 | 0.645 | 0.803 | 0.540 |
| การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป ภายใต้สภาวะจำเพาะ | 0.092 | 0.066 | 0.105 | 0.072 | 0.104 | 0.086 |
| การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส ภายใต้สภาวะทั่วไป | 1.021 | 0.809 | 0.804 | 0.568 | 0.833 | 0.534 |
| การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส ภายใต้สภาวะจำเพาะ | 0.080 | 0.052 | 0.089 | 0.064 | 0.091 | 0.079 |

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง (Root Sum Square) ของค่าพิกัดซึ่งเป็นผลลัพธ์ในโฟโต้โมเดลเลอร์

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่า

ชิ้นงานที่ 1 ข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปและจำเพาะที่ทำการถ่ายภาพ4และ8ตำแหน่งมีลักษณะเป็นแผ่นผิวราบเรียบให้ค่าความละเอียดถูกต้องไปในทำนองเดียวกับชิ้นงานที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงความลาดชันเล็กน้อยกล่าวคือ ค่าขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่ประมวลผลได้จากกรรมวิธีการวัดสอบกล้องก่อนออกงานมีขนาดของความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดที่ประมวลผลได้จากกรรมวิธีการวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส และค่าขนาดความละเอียดถูกต้องดังกล่าวมีค่าดีกว่าค่าขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งของค่า

พิกัดที่ประมวลผลได้จากกรรมวิธีการวัดสอบกล่องแบบทั่วไป

ส่วนชิ้นงานที่ 3 เป็นข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปและจำเพาะของการถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งและ 8 ตำแหน่งของชิ้นงานที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงความลาดชันมาก โดยผลขนาดความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดไม่เป็นไปในทำนองเดียวกับตำแหน่งอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีบางบริเวณเกิดจุดที่การตัดกันของรังสีมีเรขาคณิตในการถ่ายภาพไม่ดี โดยเกิดในบริเวณที่ความชันสูงจนเกือบเป็นแนวตั้ง โดยมีตำแหน่งของจุดที่ไม่เหมาะสมกับตำแหน่งถ่ายภาพที่ออกแบบโดยกำหนดจำนวนและตำแหน่งโดยประมาณที่ตายตัว (Fix Station) อย่างเช่นในงานวิจัย ทำให้การโยงยึดของโครงข่ายการถ่ายภาพออกมาไม่ดีตรงบริเวณที่ต้องการจุดที่ต้องการหาค่าพิกัดในระบบอ้างอิงเดียวกับหมุดบังคับภาพ

จึงสรุปได้ว่า การถ่ายภาพให้ครอบคลุมการตำแหน่งจุดที่ต้องการทราบค่าต้องมีการออกแบบโครงข่ายโยงยึด (Network Design) ภาพที่ให้เรขาคณิตของการตัดกันของรังสีแสงมีการโยงยึดภาพที่แข็งแรง

เมื่อเปรียบเทียบตารางที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่า ตารางที่ 4.12 ซึ่งเป็นผลสรุปที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปมีค่าขนาดของความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งที่น้อยกว่าตารางที่ 4.13 ซึ่งเป็นผลสรุปข้อมูลภายใต้สภาวะจำเพาะถึง 10 เท่า

จึงสรุปได้ว่า การวัดชิ้นงานที่หมุดโยงยึดเป็นชนิดเป้าสร้างขึ้น (Signalize Point) มีการวัดพิกัดภาพของจุดโยงยึดภาพด้วยวิธีอัตโนมัติและวัดพิกัดภาพของจุดบังคับภาพด้วยวิธีศูนย์ถ่วงให้ความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงกว่าการวัดมือถึง 10 เท่า ดังนั้น หากสมมติฐานในการวัดพิกัดภาพด้วยมือด้วยสำหรับผู้มีทักษะในการทำงานถือว่าการวัดพิกัดภาพมีการผิดพลาดไปถึง 1/3 จุดภาพ การวัดพิกัดภาพด้วยศูนย์ถ่วงจะมีการผิดพลาดในการหมายตำแหน่งจุด 1/30 จุดภาพ ซึ่งผลการศึกษานับสนับสนุนแนวคิดที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ข้อ 2.2.3

บทที่ 5

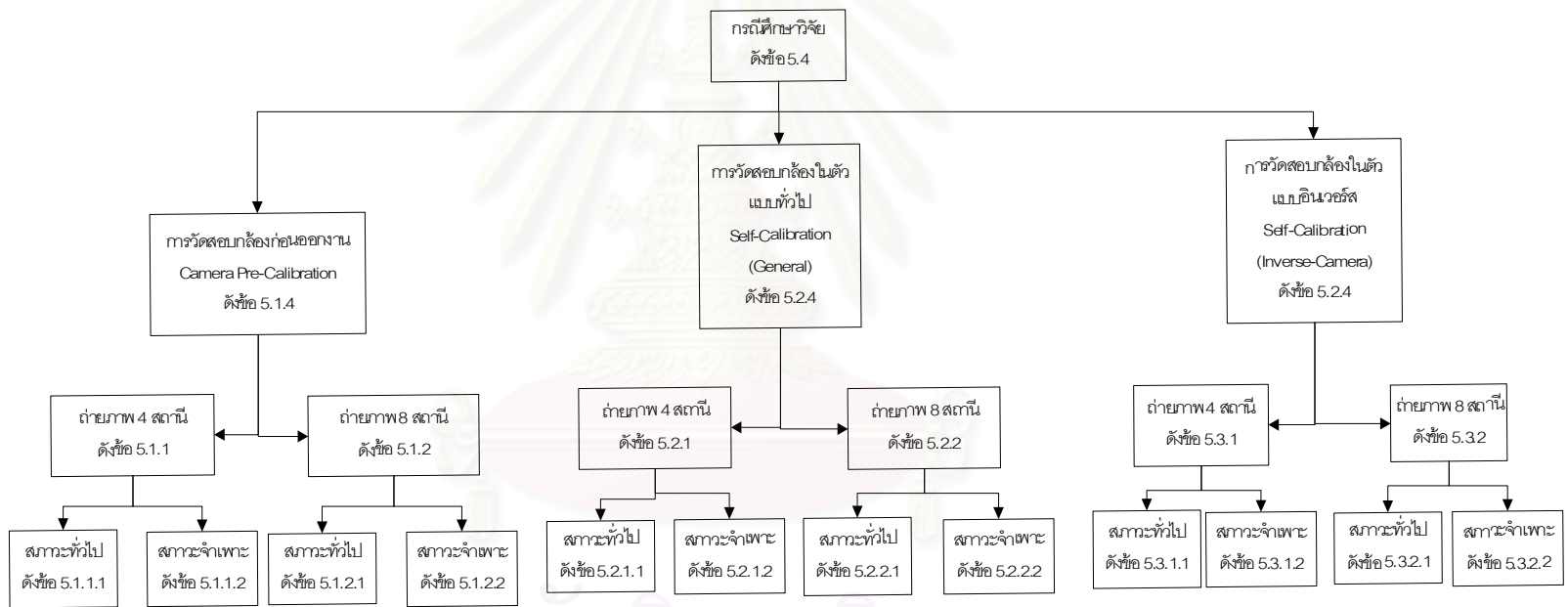
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปขั้นตอนของการวิจัย

ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยศึกษาโดยแบ่งกรรมวิธีการวัดสอบกลับ 3 วิธี ในแต่ละกรรมวิธี มีการถ่ายภาพชิ้นงาน 3 ชั้น จำนวน 2 ชุด คือ มีตำแหน่งถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งและ 8 ตำแหน่ง ในลักษณะสมมาตร และในการถ่ายภาพแต่ละชุดทำการถ่ายภาพ 2 ครั้ง ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน 2 สภาวะ คือ ไม่ควบคุมแสง(สภาวะทั่วไป) และควบคุมแสง (สภาวะจำเพาะ) ดังสรุปผังงานตามรูปที่ 5.1 รวม 12 กรณีศึกษาในแต่ละชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นงาน รวมทั้งสิ้น 36 กรณีศึกษา

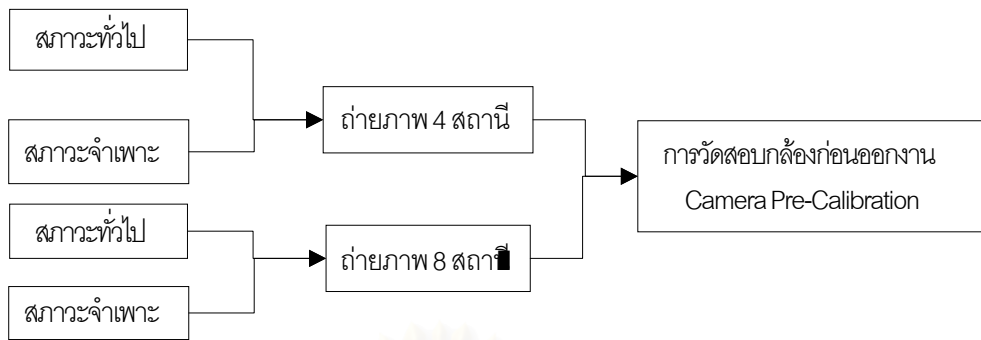


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 5.1 ผังกรณีศึกษาวิจัย

5.2 สรุปผลการคำนวณสำหรับการวัดสอบกล้องก่อนออกงาน



รูปที่ 5.2 ผังโครงสร้างการวิเคราะห์การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน

5.2.1 สรุปกรณีถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งโดยเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปกับภายใต้สภาวะจำเพาะ

5.2.1.1 การถ่ายภาพ 4 สถานีที่สภาวะทั่วไป ผลการคำนวณค่าพิกัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบ (ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y) ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย 0.35 – 0.57 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง (แกน Z) ซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย 0.7-0.8 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิกัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิกัดจากโฟโตโมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.074-0.355 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้น กรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.2.1.2 การถ่ายภาพ 4 สถานีที่สภาวะจำเพาะ ผลการคำนวณค่าพิกัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบ (ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y) ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกัน มีค่าโดยเฉลี่ย 0.03 – 0.04 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง (แกน Z) มีค่าโดยเฉลี่ย 0.05-0.07 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิกัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิกัดจากโฟโตโมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.183-0.470 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้น กรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.2.2 กรณีถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งโดยเปรียบเทียบข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะ

5.2.2.1 การถ่ายภาพ 8 สถานีที่สภาวะทั่วไป ผลการคำนวณค่าพิคัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มี ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันที่ 0.25 – 0.33 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิคัดทางตั้ง (แกน Z) ซึ่งมีค่าอยู่ 0.40-0.6 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิคัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิคัดจากโฟโตโมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.210-0.565 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้นกรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.2.2.2 การถ่ายภาพ 8 สถานีที่สภาวะจำเพาะ ผลการคำนวณค่าพิคัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มี ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันที่ 0.025 – 0.039 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าความละเอียดถูกต้องของค่าพิคัดทาง แกน Z ซึ่งมีค่าอยู่ 0.040-0.07 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิคัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิคัดจากโฟโตโมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.247-0.644 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้น กรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

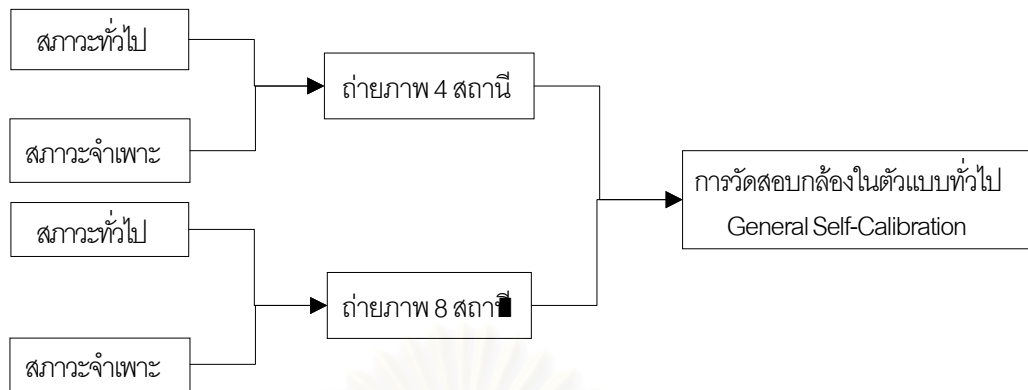
5.2.3 สรุปผลการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล้องก่อนออกงานโดยเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง กับ การถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง

5.2.3.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะแล้วพบว่า ผลการคำนวณปรับแก้แบบวัดสอบกล้องก่อนออกงานที่สภาวะจำเพาะมีความละเอียดถูกต้อง (Precision) ดีกว่าที่สภาวะทั่วไปประมาณ 10 เท่า ทั้งในกรณีถ่ายภาพ 4 และ 8 สถานีโดยค่าได้ประมาณ 0.037 มิลลิเมตร

5.2.3.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณในการประมวลผลด้วยถ่ายรูป 4 สถานีและ 8 สถานีแล้วพบว่า ผลการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีรูป 8 สถานี ให้ผลการคำนวณที่มีความละเอียดถูกต้อง (Precision) ใกล้เคียงกันกับการคำนวณปรับแก้ด้วยรูป 4 สถานี

5.2.4 สรุปกรรมวิธีการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล้องก่อนออกงาน ให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดที่เกินกว่า 0.080 มิลลิเมตร

5.3 สรุปผลการคำนวณสำหรับการวัดสอบกลิ้งในตัวแบบทั่วไป



รูปที่ 5.3 ผังโครงสร้างการวิเคราะห์การวัดสอบกลิ้งในตัวแบบทั่วไป

5.3.1 กรณีถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งโดยเปรียบเทียบข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะ

5.3.1.1 การถ่ายภาพ 4 สถานีที่สภาวะทั่วไป ผลการคำนวณค่าพิคตจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มี ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย 0.35 – 0.56 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าค่าความละเอียดถูกต้องแกน Z ซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย 0.5-0.87 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิคตหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิคตจากโฟโต้โมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.027-0.142 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้นกรณีศึกษาไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.3.1.2 การถ่ายภาพ 4 สถานีที่สภาวะจำเพาะ ผลการคำนวณค่าพิคตจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มี ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกัน มีค่าโดยเฉลี่ย 0.04-0.05 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าค่าความละเอียดถูกต้องแกน Z มีค่าโดยเฉลี่ย 0.06-0.08 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิคตหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิคตจากโฟโต้โมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.045-0.119 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้นกรณีศึกษาไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.3.2 กรณีถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งโดยเปรียบเทียบข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะ

5.3.2.1 การถ่ายภาพ 8 สถานีที่สภาวะทั่วไป ผลการคำนวณค่าพิคตจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิคตทางราบ (ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y)

ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันที่ 0.25 – 0.36 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง (แกนZ) ซึ่งมีค่าอยู่ 0.4-0.6 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิกัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิกัดจากโฟโตโมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.009-0.215 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้น กรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.3.2.2 การถ่ายภาพ8สถานีที่สภาวะจำเพาะ ผลการคำนวณค่าพิกัดจากชิ้นงานที่1, 2 และ 3 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบ (ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกนX และแกนY) ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันที่ 0.031 – 0.039 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง (แกนZ) ซึ่งมีค่าอยู่ 0.055-0.67 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิกัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิกัดจากโฟโตโมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.003-0.081 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งไม่เกินกว่า 0.08 มิลลิเมตร ดังนั้น กรณีศึกษานี้ให้ระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

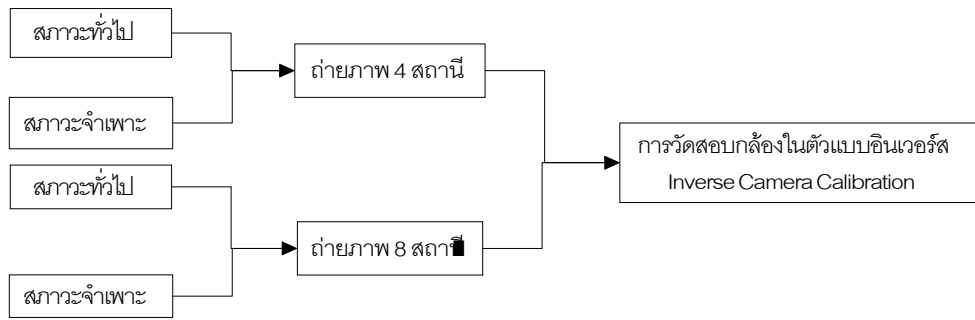
5.3.3 สรุปผลการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล่องก่อนออกงานโดยเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง กับ การถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง

5.3.3.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะแล้วพบว่า ผลการคำนวณปรับแก้แบบวัดสอบกล่องในตัวแบบทั่วไปที่สภาวะจำเพาะมีความละเอียดถูกต้อง (Precision) ดีกว่าที่สภาวะทั่วไปประมาณ 10 เท่า ทั้งในกรณีถ่ายภาพ4และ8 สถานีโดยค่าได้ประมาณ 0.040 มิลลิเมตร

5.3.3.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณในการประมวลผลด้วยถ่ายรูป4สถานีและ8สถานีแล้วพบว่า ผลการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีรูป 8สถานี ให้ผลการคำนวณที่มีความละเอียดถูกต้อง (Precision) ดีกว่ากับการคำนวณปรับแก้ด้วยรูป 4 สถานี

5.3.4 สรุปกรรมวิธีการประมวลผลด้วยการวัดสอบกล่องในตัวแบบทั่วไป มีเพียงกรณีเดียวคือ ข้อมูลที่สภาวะจำเพาะที่ถ่ายภาพ 8 ตำแหน่ง ที่ให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดไม่เกิน 0.08 มิลลิเมตร

5.4 สรุปผลการคำนวณสำหรับการวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส



รูปที่ 5.5ผังโครงสร้างการวิเคราะห์การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส

5.4.1 กรณีถ่ายภาพ 4 ตำแหน่งโดยเปรียบเทียบข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะ

5.4.1.1 การถ่ายภาพ 4 สถานีที่สภาวะทั่วไป ผลการคำนวณค่าพิกัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบ (ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y) ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย 0.3 – 0.5 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง (แกน Z) ซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย 0.7-0.8 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิกัดมุมดูบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิกัดจากโฟโต้โมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.170 - 0.489 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้น กรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.4.1.2 การถ่ายภาพ 4 สถานีที่สภาวะจำเพาะ ผลการคำนวณค่าพิกัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มีค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกัน มีค่าโดยเฉลี่ย 0.03 – 0.04 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าพิกัดทางตั้ง (แกน Z) มีค่าโดยเฉลี่ย 0.05-0.07 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิกัดมุมดูบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิกัดจากโฟโต้โมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่ 1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.687- 1.543 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้น กรณีศึกษานี้ไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.4.2 กรณีถ่ายภาพ 8 ตำแหน่งโดยเปรียบเทียบข้อมูลภายใต้สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะ

5.4.2.1 การถ่ายภาพ 8 สถานีที่สภาวะทั่วไป ผลการคำนวณค่าพิกัดจากชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 มีค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน X และแกน Y ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันที่ 0.25 – 0.33 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกน Z ซึ่งมีค่าอยู่

0.40-0.6 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิคัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิคัดจากโฟโต้โมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.212 ถึง 0.574 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งเกินกว่า 80 ไมครอน ดังนั้นกรณีศึกษาไม่ผ่านระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

5.4.2.2 การถ่ายภาพ8สถานีที่สภาวะจำเพาะ ผลการคำนวณค่าพิคัดจากชิ้นงานที่1, 2 และ 3 มี ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกนX และแกนYที่ได้จากการคำนวณปรับแก้ใกล้เคียงกันที่ 0.025 – 0.039 มิลลิเมตร และมีค่าน้อยกว่าค่าความละเอียดถูกต้องทางราบแกนZ ซึ่งมีค่าอยู่ 0.040-0.07 มิลลิเมตร ผลการวัดค่าแตกต่างทางระยะระหว่างระยะที่คำนวณจากการวัดตรงด้วยวิธีการวัดเดียวกับการวัดพิคัดหมุดบังคับภาพเทียบกับระยะที่คำนวณจากผลลัพธ์ที่เป็นค่าพิคัดจากโฟโต้โมเดลเลอร์ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (ชิ้นงานที่1) มีค่าความแตกต่างทางระยะอยู่ระหว่าง 0.003-0.022 มิลลิเมตร ที่ระยะไม่เกิน 240 มิลลิเมตร ซึ่งไม่เกินกว่า 0.08 มิลลิเมตร ดังนั้น กรณีศึกษาให้ระดับความถูกต้องในการวัดขนาดที่ต้องการ

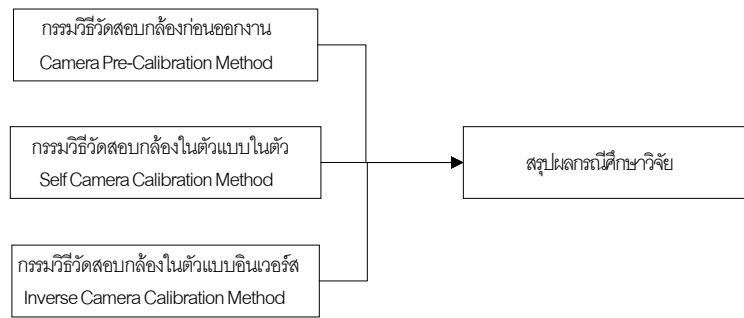
5.4.3 สรุปผลการประมวลผลด้วยการวัดสอบกลิ้งในตัวแบบอินเวอร์สโดยเปรียบเทียบการถ่ายภาพ 4 ตำแหน่ง กับ 8 ตำแหน่ง

5.4.3.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณที่สภาวะทั่วไปกับสภาวะจำเพาะแล้วพบว่า ผลการปรับแก้แบบวัดสอบกลิ้งในตัวแบบอินเวอร์สที่สภาวะจำเพาะมีความละเอียดถูกต้อง(Precision) ดีกว่าสภาวะทั่วไปประมาณ 10 เท่า ทั้งในกรณีถ่ายภาพ4และ8 สถานีโดยค่าได้ 0.04 มิลลิเมตร

5.4.3.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณในการประมวลผลด้วยถ่ายรูป4สถานีและ8สถานีแล้วพบว่า ผลการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีรูป 8สถานี ให้ผลการคำนวณที่มีความละเอียดถูกต้อง (Precision) ใกล้เคียงกันกับการคำนวณปรับแก้ด้วยรูป 4 สถานี

5.4.4 สรุปกรรมวิธีการประมวลผลด้วยการวัดสอบกลิ้งในตัวแบบอินเวอร์ส มีเพียงกรณีเดียวคือ ข้อมูลที่สภาวะจำเพาะที่ถ่ายภาพ 8ตำแหน่ง ที่ความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดไม่เกิน 0.08 มิลลิเมตร

5.5 สรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณจากกรรมวิธีการวัดสอบกล้องของกรณีศึกษาวิจัย



รูปที่ 5.6 ผังการสรุปผลการกรณีศึกษาวิจัย

กรณีศึกษาวิจัยการวัดขนาดด้วยวิธีการทางด้านการสำรวจด้วยภาพถ่าย ที่ต้องการความคลาดเคลื่อนในการวัดวัดขนาดไม่เกิน 0.08 มิลลิเมตร ที่ระยะสำหรับเปรียบเทียบขนาดที่ได้จากการคำนวณได้จากพิกัดที่ได้จากการวัดตรงต้องมีขนาดไม่เกิน 240 มิลลิเมตร มีกรณีการประมวลผลด้วยการวัดสอบการวัดสอบกล้องในตัวแบบในตัวและแบบอินเวอร์สกับข้อมูลที่มีภาวะจำเพาะ กรณีถ่าย 8 ตำแหน่ง โดยความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดดังกล่าวเป็นความคลาดเคลื่อนของระยะที่คำนวณขึ้นจากค่าพิกัดที่ได้จากโฟโต้โมเดลเลอร์ เทียบกับ ระยะที่คำนวณขึ้นจากค่าพิกัดที่ได้จากการวัดพิกัดทางราบด้วยโคออดิเนตกราฟ และการวัดพิกัดทางตั้งด้วยกล้องระดับวิลด์ เอ็น 3 (Wild N3)

ดังนั้น การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายในงานวัดความละเอียดสูงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องคือ จำนวนตำแหน่งถ่ายภาพ กรรมวิธีในการวัดสอบกล้อง วิธีการวัดพิกัดภาพ ความถูกต้องของพิกัดหมุดบังคับภาพ ชนิดของเป้า การควบคุมแสงในการถ่ายภาพ กล่าวคือ

- ควรใช้กรรมวิธีการวัดสอบกล้องในตัว
- วิธีการวัดพิกัดหมุดบังคับภาพใช้วิธีการวัดแบบศูนย์ถ่วง
- วิธีการวัดพิกัดภาพใช้แบบอัตโนมัติ
- ความถูกต้องของพิกัดหมุดบังคับภาพต้องสูงโดยความถูกต้องทางตำแหน่งของพิกัดทางราบอยู่ระดับ 0.010 มิลลิเมตร และทางตั้งอยู่ในระดับ 0.020 มิลลิเมตร
- ต้องมีการควบคุมแสงในการถ่ายภาพ
- ใช้เป้าแบบสร้างขึ้น
- จำนวนตำแหน่งถ่ายภาพ

ในกรณีนี้คือกรณีการประมวลผลด้วยการวัดสอบการวัดสอบกล้องในตัวแบบในตัวและแบบอินเวอร์สกับข้อมูลที่มีภาวะจำเพาะ กรณีถ่าย 8 ตำแหน่ง (กรณีศึกษาที่ 4 และ 6) จะให้ค่าที่ดีที่สุดโดยอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน 80 ไมครอน ภาพได้สภาวะเงื่อนไขของอุปกรณ์ที่ใช้งานวิจัย

5.6 ปัญหาและอุปสรรคของงานวิจัย

5.6.1 การวัดค่าพิกัดหมุดบังคับมีความละเอียดของพิกัด Z ต่ำกว่า ทาง X และ Y เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ

5.6.2 ห้องวิจัยไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อาจมีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องมือและชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย

5.6.3 ไม่สามารถมีการวัดความหนาของชิ้นงานที่มีความหนาเกินกว่า 150 มิลลิเมตรได้

5.7 ข้อเสนอแนะ

5.7.1 ควรมีการทดสอบกับชิ้นงานจริงที่มีการวัดสอปจากเครื่องมือวัดความละเอียดสูงที่ได้มีการวัดสอปอย่างสม่ำเสมอ

5.7.2 ควรมีการศึกษาวิจัยต่อเนื่องในประเด็นของการวัดสอปกล่องแบบอินเวอร์ส ถึงความถูกต้องที่ของหมุดบังคับภาพและความถูกต้องการวัดขนาดของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล

5.7.3 การวัดพิกัดภาพสามารถทำให้ได้ความถูกต้องที่ดีกว่านี้โดยการถ่ายภาพที่มาตราส่วนใหญ่กว่านี้ ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องที่ได้จากการวัดด้วยภาพถ่ายมีความถูกต้องที่ดีกว่านี้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

วิชัย เยี่ยงวีรชน. คู่มือปฏิบัติการสำรวจด้วยภาพถ่าย2. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.

วิชา จิวาลัย และ ปรีชา วงศ์วิทวัส. หลักการเบื้องต้นของการสำรวจด้วยภาพถ่าย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

ภาษาอังกฤษ

Atkinson, K.B. Developments in close range photogrammetry -1. London: Applied Science Publisher, 1980

Clarke, T.A. An Analysis of the prospects for digital close range photogrammetry, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 50(March 1995): 4-7

Deng, F. and Faig, W. An Evaluation of an Off-the-shelf digital close-range photogrammetric software package, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 67(February 2001): 227-233

Fedak, M. 3D Measurement accuracy of a consumer-grade digital camera and retro-reflective survey targets, Available form : www.photomodeler.com/pdf/fedak1.pdf

Forlani, G. Guissani, A. and Scaioni, M. Target detection and Epipolar geometry for image orientation in close-range photogrammetry, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31(1996): 518-523

Fraser, C.S. Network design considerations for non-topographic photogrammetry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 53(August 1984): 1115-1126

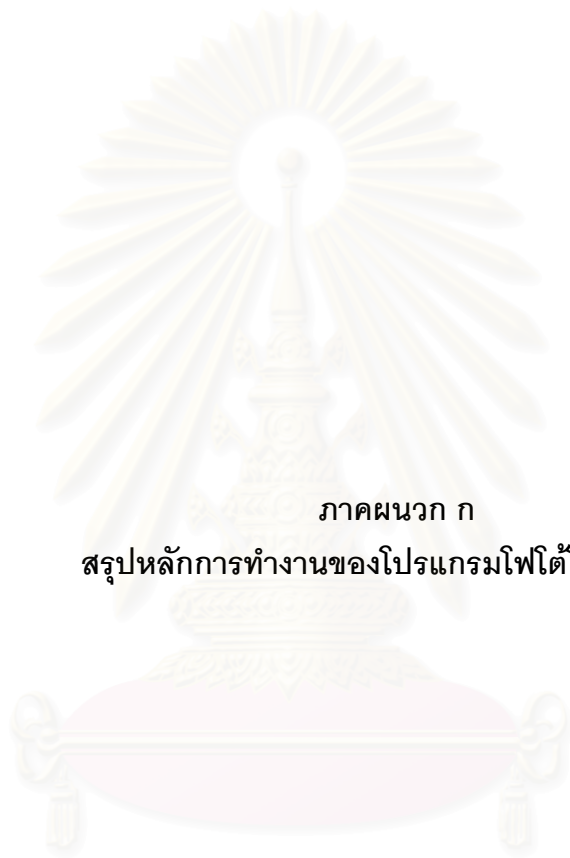
Fraser, C.S. and Brown, D.C., Industrial photogrammetry: new development and recent applications. Photogrammetric Record 12(October 1986) : 197-127

Fraser, C.S. Photogrammetric measurement to one part in a million, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 58(March 1992): 305-310

Fraser, C.S. Digital camera self calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52(1997): 149-159

Fraser, C.S. Automated vision metrology: a mature technology for industrial inspection and engineering surveys. 6th South East Asian Surveyors Congress Fremantle, Western Australia 1-6 November 1999

- Karara, H.M. and Abdel-Aziz ,Y.I. Accuracy aspect of non-metric imageries, Photogrammetric Engineering (1974) : 1017-1117
- Katri Oksanen. The design and simulation of video digitizing by using three – dimensions CAD-models, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing31(5): 518-523
- Luhmann, T. Nahbereichs-Photogrammetrie. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag , 2000.
- Mason, S. Expert system based of close-range photogrammetric networks, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing50(May 1995): 13-34
- Mikail, E.M. Introduction to Modern Photogrammetry .USA: John Wiley& Son, 2000.
- Pappa, R.S., Giersh, L.R. and Quagliaroli, M.J. Photogrammetry of a 5m Inflatable space antenna with consumer digital cameras. Available form : <http://www.photomodeler.com/pdf/NASA.pdf>
- Wang, X. and Clarke, T.A. Separate in close-range photogrammetry, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing55(2001): 289-298
- Wolf, P.R. Element of Photogrammetry .USA: McGraw-Hill , 2000.



ภาคผนวก ก

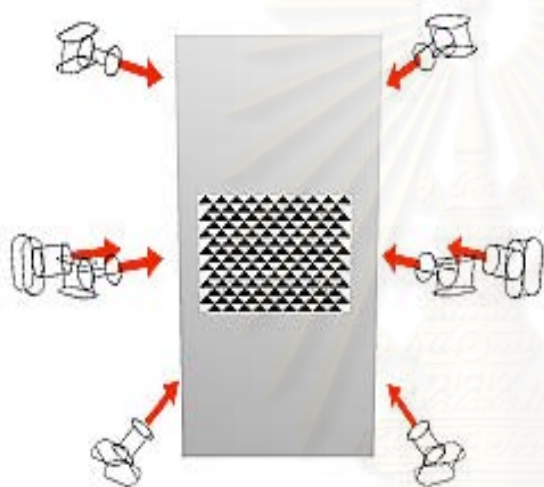
สรุปหลักการทำงานของโปรแกรมโฟโต้โมเดลเลอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 หลักการทั่วไป

โฟโต้โมเดลเลอร์โปร (Photomodeler Pro) เป็นโปรแกรมประยุกต์สำหรับวัดขนาดวัตถุและสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Model Reconstruction) ขึ้นจากภาพถ่ายดิจิทัล โดยอาศัยหลักการทางด้านการศึกษาด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ (Close Range Photogrammetry) ในการประมวลผล

1 โฟโต้โมเดลเลอร์โปร (Photomodeler) ประกอบด้วยโมดูลที่สำคัญ 2 โมดูล คือ โมดูลวัดสอบกล้องถ่ายภาพ (Camera Calibrator) เป็นโมดูลที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพ โดยทำการถ่ายภาพแผ่นวัดสอบ (Calibrate Plate) ที่มีมากับโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 สถานที่ถ่ายภาพสำหรับการวัดสอบกล้อง

2 โมดูลโฟโต้โมเดลเลอร์ใช้ในการวัดพิกัดภาพ ใช้ในการประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งการวางตัวของกล้องขณะถ่ายภาพ (และ/หรือจัดองค์ประกอบภาพภายในเพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ในการวัดสอบกล้อง) และคำนวณค่าพิกัดของวัตถุในตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าในระบบพิกัดเดียวกับหมุดบังคับภาพ (Ground Control Point) ตลอดจนการสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D Modeling) ของวัตถุนั้น

ข้อมูลภาพถ่ายที่สามารถนำมาใช้งานในโฟโต้โมเดลเลอร์ต้องจัดเก็บในรูปแบบ JPEG, TIFF, TGA, PNG, PCX, PPM, BMP, MAC, CAL, PICT, IFF, PSD และ PhotoCD

แบบจำลองคอมพิวเตอร์กราฟิก 3มิติ ที่โฟโต้โมเดลเลอร์สร้างขึ้นมีรูปแบบผลลัพธ์ ได้แก่ DXF3D, 3DS, Wavefront OBJ, VRML และ Direct X

ก2. หลักการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ

โฟโต้โมเดลเลอร์ แบ่งกรรมวิธีการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ ไว้ 3 ลักษณะ ดังนี้

1. การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน(Camera Pre-Calibration)
2. การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป(General Self Camera Calibration)
3. การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส(Inverse Camera Calibration)

โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

1 การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน (Camera Pre-Calibration)

เป็นกรรมวิธีการใช้โมดูลวัดสอบกล้อง (Camera Calibrator) ในการหา“ค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้อง” ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกคุณลักษณะกล้อง (Characteristic of Camera) ได้แก่ ค่าการจัดองค์ประกอบภาพภายในอัน (ตำแหน่งจุดมูขยสำคัญของซีซีดี (x_p, y_p) ความยาวโฟกัสของกล้อง (f)) ตลอดจนค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับแก้ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี (k_1, k_2) และแนวสัมผัส (P1, P2) ซึ่งจะบันทึกเป็นไฟล์นามสกุล Cam สำหรับใช้งานในการประมวลผลหาค่าพิกัด ด้วยโมดูลโฟโต้โมเดลเลอร์ ในขั้นตอนต่อไป

โดยค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้องที่กล่าวมา มีแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังนี้ (ก.1-ก.2)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าองค์ประกอบจัดภาพภายใน (x_p, y_p, f) ด้วยวิธีการคำนวณปรับแก้ค่าเศษเหลือกำลังสองน้อยที่สุด(Least Squares Adjustment) โดยพิกัดภาพของหมุดบังคับ (x_{ij}, y_{ij})เป็นค่าสังเกต(Observation) (Atkinson,1976)

$$x_i - j \mp_p = \frac{A_i \left(\frac{X_j - X_i + B_i}{f} \left(\frac{-Y_j - Y_i}{f} \right) \right) C_i - Z}{D_i \left(\frac{X_j - X_i + E_i}{f} \left(\frac{-Y_j - Y_i}{f} \right) \right) F_i - Z} \quad (ก.1)$$

$$y_i - j \mp_p = \frac{A'_i \left(\frac{X_j - X_i + B'_i}{f} \left(\frac{-Y_j - Y_i}{f} \right) \right) C'_i - Z}{D'_i \left(\frac{X_j - X_i + E'_i}{f} \left(\frac{-Y_j - Y_i}{f} \right) \right) F'_i - Z} \quad (ก.2)$$

กำหนดให้

$A_i, B_i, C_i, A'_i, B'_i, C'_i, D_i, E_i, F_i$ แทน เมตริกซ์หมุนระหว่างระบบพิกัด

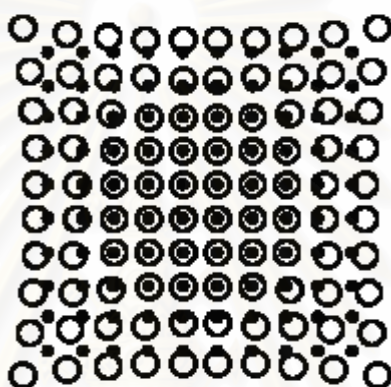
X_j, Y_j แทน ค่าพิกัดของหมุดบังคับและหมุดโยงยึดภาพ

X_i^o, Y_i^o แทน ตำแหน่งกล้องถ่ายภาพ

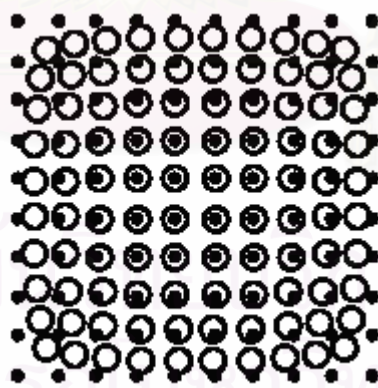
แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี ใช้คำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์ที่ค่าความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี (k_1, k_2) ในโฟโต้โมเดลเลอร์ เป็นดังนี้

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 \quad (\text{ก.3})$$

Δr เป็นค่าความคลาดเคลื่อนตามแนวรัศมีของจุดภาพ เป็นดังรูปที่ ก.1 และ ก.2 สมการที่ ก.3 ค่า k_1 และ k_2 ในสมการที่ ก.3 จะมีลักษณะเช่นเดียวกับ k_1 ซึ่งโดยทั่วไป k_2 มีค่าน้อยมาก ตัวอย่างแสดงความเพี้ยนของจุดภาพ เมื่อ k_1 มีค่าเป็นบวกดังแสดงรูป ก.1 บางที่เรียกว่า ฟินคูชัน (Pincushion) และ k_1 มีค่าเป็นลบดังแสดงรูป ก.2 บางที่เรียกว่า แบร์เรล (Barrel) (Giersh,2001)



รูปที่ ก.2 แสดงลักษณะของความคลาดเคลื่อนตามแนวรัศมี เมื่อค่า $k_1=0.004$



รูปที่ ก.3 แสดงลักษณะของความคลาดเคลื่อนตามแนวรัศมี เมื่อค่า $k_1 = -0.004$

กำหนดให้ ○ แทนจุดภาพที่มีการเพี้ยนไปตามแนวรัศมี

● แทนจุดภาพที่ถูกตัดอง

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับจำลองความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส ใช้คำนวณหาค่าค่าสัมประสิทธิ์ค่าความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส(P_1, P_2) ในโฟโต้ไมโครเดลเลอร์ เป็นดังนี้

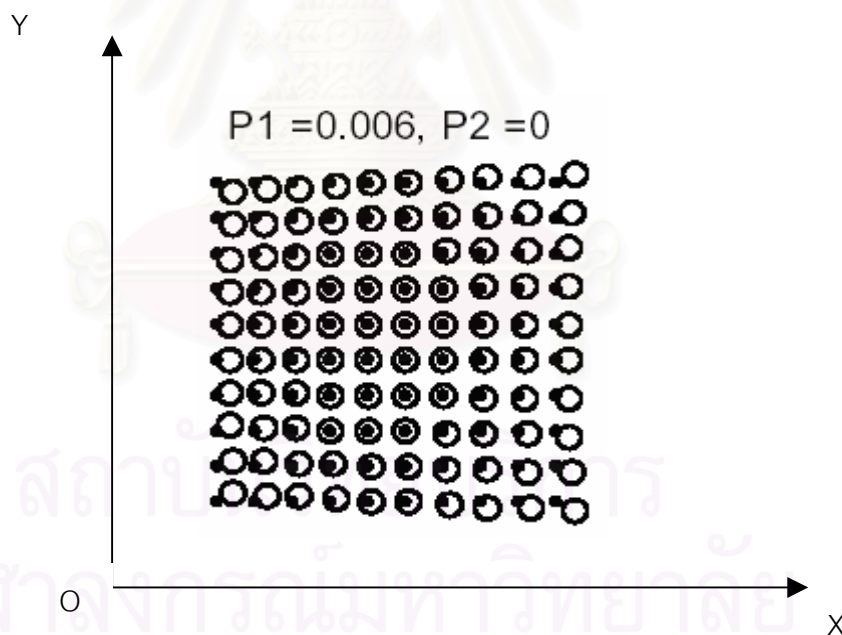
$$\Delta x = P_1(r^2 + 2\overline{x^2}) + 2P_2\overline{xy} \quad (ก.4)$$

$$\Delta y = P_2(r^2 + 2\overline{y^2}) + 2P_1\overline{xy}$$

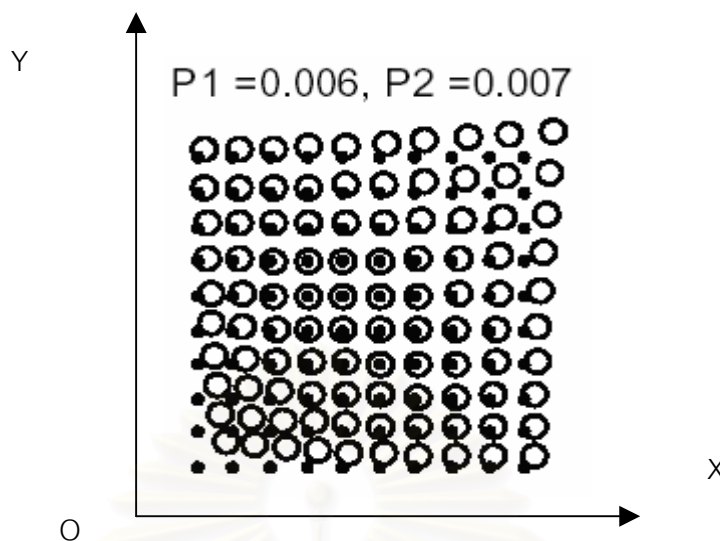
กำหนด P_1, P_2 แทน ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส

$\Delta x, \Delta y$ แทน ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจุดภาพจากความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส

ตัวอย่างแสดงการความคลาดทางตำแหน่งของจุดภาพอันเนื่องมาจากเลนส์ตามแนวสัมผัส เมื่อ $P_2=0$ รูป ก.3 จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะเกิดในแนวแกน X แสดงว่าเลนส์ประกอบที่ใช้ในกล้องถ่ายภาพประกอบเลนส์ไม่ได้แนว (Misalignment) ตามแกน X และ $P_2 \neq 0$ รูป ก.4 จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนเกิดในแนวแกน X และ แกน Y แสดงว่า เลนส์ประกอบที่ใช้ในกล้องถ่ายภาพประกอบเลนส์ไม่ได้แนว (Misalignment) ทั้งในแกน X และแกน Y



รูปที่ ก.4 ลักษณะของความคลาดเคลื่อนตามแนวเนื่องจากความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส เมื่อค่า $P_2 = 0$ (Giersh, 2001)



รูปที่ ก.5 ลักษณะของความคลาดเคลื่อนตามแนวเนื่องจากความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส
เมื่อค่า $P2 \neq 0$ (Giersh, 2001)

จากที่กล่าวมาเมื่อรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เข้าด้วยกัน จะได้แบบจำลอง
คณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณปรับแก้หาค่าค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้อง เป็นดังสมการที่ ก.5
และ ก.6 (Atkinson, 1976)

$$\bar{x}_{ij} - x_p + \frac{\bar{x}_{ij}}{r} \Delta r + \Delta x_{ij} = f \frac{A_i(X_j - X_i^o) + B_i(Y_j - Y_i^o) + C_i(Z_j - Z_i^o)}{D_i(X_j - X_i^o) + E_i(Y_j - Y_i^o) + F_i(Z_j - Z_i^o)} \quad (\text{ก.5})$$

$$\bar{y}_{ij} - y_p + \frac{\bar{y}_{ij}}{r} \Delta r + \Delta y_{ij} = f \frac{A'_i(X_j - X_i^o) + B'_i(Y_j - Y_i^o) + C'_i(Z_j - Z_i^o)}{D_i(X_j - X_i^o) + E_i(Y_j - Y_i^o) + F_i(Z_j - Z_i^o)} \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ $\bar{x}_{ij} = x_{ij} - x_p$ และ $\bar{y}_{ij} = y_{ij} - y_p$

2 การวัดสอบกล้องในตัวแบบทั่วไป (Self-Camera Calibration)

เป็นกรรมวิธีการใช้โมเดลโฟโตโตรีโมเดลเลอร์ในการหาค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้องไปพร้อม
กับการหาค่าองค์ประกอบภาพภายนอก หรือ ตำแหน่งการวางตัวของกล้องขณะถ่ายภาพของกล้อง
แต่ละสถานี โดยใช้ค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้องที่ได้จากการวัดสอบกล้องก่อนออกงานเป็นค่า
เริ่มต้น (Initial Value) ในการประมวลผล

แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหา ตำแหน่งและการวางตัวของกล้อง ขณะถ่ายภาพ
 ชีงงานที่ต้องการวัด ใช้แบบจำลองตามสมการที่ ก.1 และ ก.2

เมื่อรวมแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากความเพี้ยน
 ของเลนส์จากสมการที่ ก.3และ ก.4 ได้เป็นสมการที่ ก.6 และ ก.7

$$\Delta x_i = \bar{x}_i \left(\bar{k}_i^2 + \bar{r}_j^2 \right) \bar{k}_i \left(\bar{r}_j^2 - \bar{P}_i^2 \right) \bar{r}_j^2 \bar{P}_i^2 \bar{x}_i \quad (ก.6)$$

$$\Delta y_i = \bar{y}_i \left(\bar{k}_i^2 + \bar{r}_j^2 \right) \bar{k}_i \left(\bar{r}_j^2 - \bar{P}_i^2 \right) \bar{r}_j^2 \bar{P}_i^2 \bar{y}_i \quad (ก.7)$$

กำหนดให้

$\Delta x_i, \Delta y_i$ แทน ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนจุดภาพเนื่องจากความเพี้ยนของเลนส์

เมื่อแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความเพี้ยนของเลนส์จากสมการสภาวะร่วมเส้น จะได้
 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการปรับแก้ (Atkinson, 1976) เป็นดังนี้

$$x_i - \bar{x}_i + \Delta x_i = \frac{A_i \left(\bar{x}_j - \bar{x}_i + B_i \left(\bar{y}_j - \bar{y}_i \right) \right) C_i - Z_i}{D_i \left(\bar{x}_j - \bar{x}_i + E_i \left(\bar{y}_j - \bar{y}_i \right) \right) F_i - Z_i} \quad (ก.8)$$

$$y_i - \bar{y}_i + \Delta y_i = \frac{A_i' \left(\bar{x}_j - \bar{x}_i + B_i' \left(\bar{y}_j - \bar{y}_i \right) \right) C_i' - Z_i'}{D_i' \left(\bar{x}_j - \bar{x}_i + E_i' \left(\bar{y}_j - \bar{y}_i \right) \right) F_i' - Z_i'} \quad (ก.9)$$

สมการที่ ก.12และ ก.13 ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้อง ไปพร้อมกับ
 ตำแหน่งและการวางตัวของกล้องขณะถ่ายภาพขึ้น โดยใช้ค่าเริ่มต้นในการประมวลผลจากการ
 ทำงานในข้อ ก.1.1 (การวัดสอบกล้องก่อนออกงาน)

3 การวัดสอบกล้องในตัวแบบอินเวอร์ส (Inverse Camera Calibration)

เป็นกรรมวิธีการใช้โมดูลโฟโต้โมเดลเลอร์ในส่วนการทำงานแบบอินเวอร์สแคมเรา (Inverse
 Camera) ในการหาค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้องพร้อมกับการจัดองค์ประกอบภายนอกของ
 กล้องดิจิทัลจากหมุดบังคับภาพโดยกำหนดค่าเริ่มต้นในการประมวลผลเฉพาะค่าความยาว
 โฟกัสโดยประมาณขณะถ่ายภาพให้กับโปรแกรม

การประมวลผลด้วยกรรมวิธีนี้ จะได้คุณสมบัติทางด้านเรขาคณิตของภาพของกล้องถ่าย
 ภาพ (Geometrical Properties) อันได้แก่ ค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้อง ตำแหน่งและการวาง
 ตัวของกล้อง โดยค่าที่ได้นี้จะไม่ใช่ค่าที่เป็นคุณสมบัติตามจริงของกล้องที่ใช้ถ่ายภาพขึ้นงาน แต่
 สามารถให้ผลคำนวณของค่าพิกัดจากสามมิติของจุดที่ต้องการทราบค่าด้วยความถูกต้องที่ใกล้เคียง
 เคียงกับกรรมวิธีอื่นๆที่กล่าวไว้ในข้างต้น

นักสำรวจด้วยภาพถ่ายบางท่านได้ถือว่า คุณสมบัติของกล้องที่คำนวณหรือประมวลผลออกมาได้จากกรรมวิธีนี้ เป็นคุณสมบัติเทียมของกล้อง หรือ ซูโดคาเมรา (Pseudo Camera) (Faig, 2001) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของกล้องไม่มีอยู่จริงในโลก โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ ก.10

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้มีหลักการดังนี้

แปลงระบบพิกัดจากระบบพิกัดของภาพ(Image Coordinate) ไปยังระบบพิกัดภาพถ่าย(Photo Coordinate) ด้วยการแปลงค่าพิกัดฉากในระบบพิกัดฉากสองมิติหนึ่งไปยังระบบพิกัดฉากสองมิติอีกระบบหนึ่ง (2D to 2D Transformation) และแปลงพิกัดของหมุดบังคับและหมุดโยงยึดภาพในระบบอ้างอิงที่ใช้ทำงานไปยังระบบพิกัดภาพ (Image Coordinate) ด้วยหลักการแปลงค่าพิกัดฉากในระบบพิกัดฉากสามมิติไปยังระบบพิกัดฉากสองมิติ (3D to 2D Transformation)

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \underset{j}{=} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 & c \\ a_3 & & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1^i & b_2^i & b_3^i \\ b_1^i & b_2^i & b_3^i \\ b_1^i & b_2^i & b_3^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.10})$$

กำหนดให้

$b_1^i, b_2^i, b_3^i, b_4^i, b_1^i, b_2^i, b_3^i, b_4^i, b_3^i, b_3^i$ แทน ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงสามมิติ

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4$ แทน ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงสองมิติ

x_i, y_j แทน พิกัดภาพหมุดบังคับในระบบข้อมูลภาพ

x_i', y_i' แทน พิกัดหมุดโยงยึดในระบบพิกัดภาพ

X_j, Y_j แทน พิกัดหมุดบังคับและหมุดโยงยึดในระบบอ้างอิง

การประมวลผลจะใช้แบบจำลองตามสมการที่ ก.10 ใช้ร่วมกันกับแบบจำลองตามสมการที่ ก.3 และ ก.4 เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การวัดสอบกล้อง ($x_p, y_p, f, k_1, k_2, P1, P2$) ตำแหน่งและการจัดวางตัวของกล้องขณะถ่ายภาพ และขนาดของภาพ(Format Size)ทางด้านกว้างและด้านยาว(S_x, S_y) ไปพร้อมกับการประมวลผลปรับแก้เพื่อหาค่าพิกัดฉากสามมิติของจุดบนชิ้นงาน

ก.3 หลักการหาค่าพิกัดจากสามมิติ

1 การวัดพิกัดภาพของหมุดบังคับและหมุดโยงยึด

ใช้วิธีวัดบนภาพถ่ายเดี่ยว (Monoscopic Photo-Coordinate Marking) วิธีการวัดพิกัดภาพกระทำได้ 3 กรรมวิธี

1.1 การวัดพิกัดภาพด้วยมือ

1.2 การวัดพิกัดภาพด้วยวิธีศูนย์ถ่วงความเข้มแสง

1.3 วิธีวัดพิกัดภาพแบบอัตโนมัติ (Automatic Target Marking) โดยใช้หลักการจับคู่กำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Matching)

2 การอ้างอิงพิกัดภาพของหมุดโยงยึดเข้าด้วยกัน

สามารถที่จะอ้างอิงได้ 2 กรรมวิธี คือ

2.1 การอ้างอิงด้วยมือ (Manual Reference Tie Point)

2.2 การอ้างอิงอัตโนมัติ (Automatic Reference Tie Point) ใช้หลักการจับคู่จุดภาพที่อยู่ในระบบพิกัดอ้างอิงเดียวกันเข้าด้วยกันโดยอาศัยเส้นแนวเดียวกัน (Epipolar Line) อย่างอัตโนมัติ (วิธีการนี้สามารถกระทำได้หลังจากการจัดองค์ประกอบภาพภายนอกของแต่ละภาพแล้ว)

3 การประมวลผลภาพถ่ายของโฟโต้โมเดลเลอร์

แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนการทำงาน

3.1 ส่วนการจัดองค์ประกอบภาพภายนอก อาศัยลำแสงตัดกันแบบย้อนกลับ (Ray Resection) โดยลำแสงจากพิกัดหมุดบังคับภาพที่ทราบค่าอย่างน้อย 4-8 จุดในระบบพิกัดอ้างอิงผ่านพิกัดภาพสอดคล้องกันไปตัดกันที่ตำแหน่งถ่ายภาพและอาศัยการโยงยึดกันระหว่างหมุดบังคับภาพกับตำแหน่งถ่ายภาพทำให้ทราบทิศทางกรวางตัวของกล้อง

3.2 ส่วนการหาค่าพิกัดของจุดที่ต้องการทราบค่า (พิกัดในระบบอ้างอิง) ด้วยวิธีลำแสงตัดกัน (Ray Intersection) โดยอาศัยแนวลำแสงจากตำแหน่งถ่ายภาพผ่านพิกัดภาพของจุดที่ต้องการทราบตำแหน่งของภาพอย่างน้อย 2 สถานี ตัดกันที่จุดบนชิ้นงาน จะได้ค่าพิกัดในระบบอ้างอิงเดียวกันกับระบบพิกัดของหมุดบังคับภาพ

3.3 การทดสอบทางสถิติของผลลัพธ์ ใช้การทดสอบด้วยวิธีไควสแควร์ (Chi-square Hypothesis Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



ภาคผนวก ข

ข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของกล้อง SONY S-75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข1 รายละเอียดทางเทคนิคของกล้องดิจิทัลรุ่น SONY-S75

| | |
|-------------------------------|---|
| ความละเอียดจุดภาพที่มากที่สุด | 2048 x 1536 จุดภาพ |
| อัตราส่วนภาพ (กว้าง:ยาว) | 3:2 ที่ความละเอียด 2048 x 1360 จุดภาพ |
| ขนาดของตัวรับแสง(CCD) | 1/1.8" (0.556") หรือ 8.93 มม. |
| ตัวแปลงจากอนาลอกไปยังดิจิทัล | 14 บิต |
| รูรับแสง | F2.0 - F2.5 |
| ซูมกว้าง (Zoom Wide) | 34 มิลลิเมตร |
| ซูมไกล(Zoom tele) | 102 มิลลิเมตร (3 x) |
| การปรับโฟกัส | 0.1 m - Infinity in 14 ชั้น |
| ระยะโฟกัสปกติ | 50 ซม. (19.7") - ระยะอนันต์ |
| ระยะโฟกัสแบบแมคโคร | 4 ซม. (1.5") - 50 ซม. (19.7") |
| ความยาวโฟกัส | 7- 21 มม. |
| การรับจรับแสง | -2EV ถึง +2EV ใน 1/3EV ชั้น |
| ชนิดตัวเก็บข้อมูลภาพ | เมมโมรี่ สติก(Memory Stick) |
| ขนาดการเก็บข้อมูล | 64 เมกกะไบต์ |
| นามสกุลที่ใช้เก็บภาพ | ทีฟ(TIFF) |
| ขนาดจอภาพของกล้อง | 1.8 นิ้ว 123,000 จุดภาพ |
| แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทำงาน | Sony Info Lithium NP-FM50 (1200 mAh) |
| เครื่องชาร์ตแบตเตอรี่ | AC-L10 AC adapter |
| น้ำหนัก (รวมแบตเตอรี่) | 430 กรัม (15.1 ออนซ์) |
| ขนาดของกล้องถ่ายภาพ | 120 x 74 x 63 มม.(4.7 x 2.9 x 2.5 นิ้ว) |

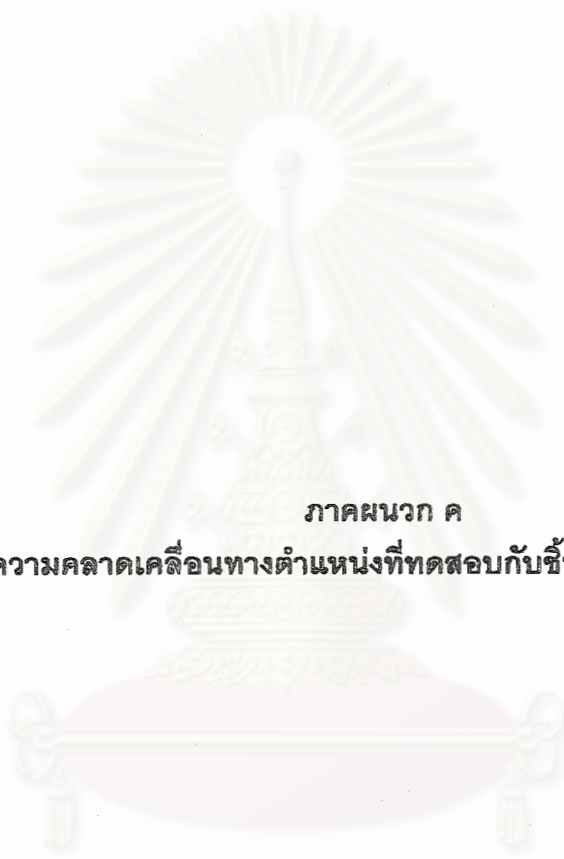
ตารางที่ ข1 ตารางข้อมูลทางเทคนิคของกล้องถ่ายภาพรุ่น โซนี่ เอส 75(Sony S75)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 ขนาดของกล้องถ่ายภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค
ตารางความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่ทดสอบกับชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง | ค่าความแตกต่างของพิกัดทางแกน X (มิลลิเมตร) | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Point ID | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
| 1 | 0.112 | 0.217 | 0.376 | 0.057 | -0.199 | 0.268 |
| 2 | 0.127 | 0.143 | 0.272 | 0.017 | -0.209 | 0.193 |
| 3 | 0.130 | 0.127 | 0.106 | 0.039 | -0.159 | 0.148 |
| 4 | -0.028 | -0.003 | -0.017 | -0.007 | -0.013 | 0.012 |
| 5 | -0.087 | -0.098 | -0.191 | -0.019 | 0.141 | -0.147 |
| 6 | -0.091 | -0.147 | -0.289 | -0.040 | 0.135 | -0.208 |
| 7 | -0.122 | -0.174 | -0.315 | -0.042 | 0.226 | -0.236 |
| 8 | 0.146 | 0.224 | 0.325 | 0.041 | -0.283 | 0.288 |
| 9 | 0.140 | 0.200 | 0.235 | 0.056 | -0.256 | 0.241 |
| 10 | 0.157 | 0.135 | 0.094 | 0.034 | -0.135 | 0.162 |
| 11 | 0.004 | 0.005 | -0.028 | 0.003 | -0.030 | 0.018 |
| 12 | -0.106 | -0.098 | -0.179 | -0.004 | 0.073 | -0.144 |
| 13 | -0.097 | -0.159 | -0.339 | -0.032 | 0.214 | -0.215 |
| 14 | -0.115 | -0.198 | -0.297 | -0.041 | 0.301 | -0.260 |
| 15 | 0.136 | 0.229 | 0.339 | 0.046 | -0.214 | 0.284 |
| 16 | 0.212 | 0.131 | 0.198 | 0.021 | -0.143 | 0.149 |
| 17 | 0.014 | 0.006 | 0.020 | 0.008 | 0.038 | 0.007 |
| 18 | -0.181 | -0.140 | -0.207 | -0.034 | 0.199 | -0.179 |
| 19 | -0.251 | -0.222 | -0.302 | -0.060 | 0.190 | -0.279 |
| 20 | -0.073 | -0.200 | -0.278 | -0.021 | 0.267 | -0.265 |
| 21 | 0.072 | 0.234 | 0.513 | 0.042 | -0.265 | 0.309 |
| 22 | 0.103 | 0.188 | 0.239 | 0.038 | -0.239 | 0.243 |
| 23 | 0.094 | 0.140 | 0.200 | 0.033 | -0.135 | 0.176 |
| 24 | 0.046 | 0.008 | 0.038 | 0.002 | -0.047 | 0.009 |
| 25 | -0.074 | -0.120 | -0.146 | -0.019 | 0.177 | -0.164 |
| 26 | -0.129 | -0.165 | -0.240 | -0.026 | 0.222 | -0.219 |
| 27 | -0.165 | -0.222 | -0.269 | -0.051 | 0.187 | -0.268 |
| 28 | 0.192 | 0.244 | 0.277 | 0.070 | -0.216 | 0.314 |
| 29 | 0.207 | 0.179 | 0.274 | 0.042 | -0.170 | 0.246 |
| 30 | 0.178 | 0.131 | 0.156 | 0.033 | -0.109 | 0.180 |
| 31 | 0.020 | 0.002 | 0.009 | -0.005 | -0.042 | -0.005 |
| 32 | -0.105 | -0.119 | -0.192 | -0.030 | 0.113 | -0.147 |
| 33 | -0.130 | -0.168 | -0.281 | -0.044 | 0.082 | -0.206 |
| 34 | -0.151 | -0.179 | -0.217 | -0.027 | 0.235 | -0.219 |

ตารางที่ ค.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน X ของชั้นงานทดสอบมาตรฐานถ่าย 4 ตำแหน่ง

| ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง | ค่าความแตกต่างของพิกัดทางแกน Y (มิลลิเมตร) | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Point ID | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
| 1 | 0.053 | 0.150 | 0.210 | 0.044 | -0.135 | 0.196 |
| 2 | 0.087 | 0.165 | 0.237 | 0.033 | -0.217 | 0.224 |
| 3 | 0.192 | 0.178 | 0.290 | 0.034 | -0.210 | 0.238 |
| 4 | 0.165 | 0.205 | 0.311 | 0.052 | -0.242 | 0.266 |
| 5 | 0.117 | 0.162 | 0.233 | 0.025 | -0.201 | 0.220 |
| 6 | 0.144 | 0.169 | 0.270 | 0.048 | -0.139 | 0.231 |
| 7 | 0.103 | 0.131 | 0.191 | 0.038 | -0.112 | 0.184 |
| 8 | 0.039 | 0.081 | 0.098 | 0.002 | -0.148 | 0.104 |
| 9 | 0.027 | 0.110 | 0.172 | 0.015 | -0.162 | 0.135 |
| 10 | 0.062 | 0.106 | 0.188 | 0.002 | -0.118 | 0.135 |
| 11 | 0.203 | 0.140 | 0.234 | 0.025 | -0.145 | 0.169 |
| 12 | 0.016 | 0.112 | 0.169 | 0.014 | -0.099 | 0.166 |
| 13 | 0.161 | 0.131 | 0.180 | 0.043 | -0.148 | 0.173 |
| 14 | 0.017 | 0.107 | 0.205 | 0.041 | -0.094 | 0.144 |
| 15 | -0.057 | -0.003 | 0.035 | -0.009 | 0.004 | -0.005 |
| 16 | 0.051 | -0.005 | 0.012 | -0.018 | -0.020 | -0.019 |
| 17 | -0.004 | 0.003 | 0.071 | -0.009 | 0.069 | -0.030 |
| 18 | -0.046 | -0.019 | -0.004 | -0.028 | 0.047 | -0.016 |
| 19 | 0.053 | 0.020 | 0.031 | 0.014 | -0.039 | 0.021 |
| 20 | 0.020 | -0.021 | -0.021 | -0.024 | -0.002 | -0.009 |
| 21 | -0.073 | -0.110 | -0.201 | -0.039 | 0.044 | -0.159 |
| 22 | -0.013 | -0.089 | -0.221 | -0.004 | 0.208 | -0.144 |
| 23 | -0.037 | -0.096 | -0.206 | -0.006 | 0.209 | -0.141 |
| 24 | -0.070 | -0.120 | -0.247 | -0.019 | 0.237 | -0.156 |
| 25 | -0.080 | -0.117 | -0.208 | -0.029 | 0.202 | -0.156 |
| 26 | -0.131 | -0.127 | -0.179 | -0.047 | 0.135 | -0.158 |
| 27 | -0.058 | -0.076 | -0.165 | -0.004 | 0.075 | -0.103 |
| 28 | -0.097 | -0.121 | -0.217 | -0.011 | 0.253 | -0.181 |
| 29 | -0.061 | -0.170 | -0.269 | -0.039 | 0.246 | -0.227 |
| 30 | -0.082 | -0.167 | -0.253 | -0.024 | 0.183 | -0.232 |
| 31 | -0.157 | -0.184 | -0.294 | -0.034 | 0.220 | -0.241 |
| 32 | -0.159 | -0.189 | -0.261 | -0.051 | 0.217 | -0.250 |
| 33 | -0.104 | -0.167 | -0.193 | -0.042 | 0.169 | -0.215 |
| 34 | -0.139 | -0.158 | -0.239 | -0.052 | 0.126 | -0.204 |

ตารางที่ ค.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Y ของชั้นงานทดสอบมาตรฐานถ่าย 4 ตำแหน่ง

| ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 4 ตำแหน่ง | ค่าความแตกต่างของพิกัดทางแกน Z (มิลลิเมตร) | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Point ID | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
| 1 | 0.065 | 0.092 | -0.079 | 0.032 | 0.011 | 0.059 |
| 2 | 0.033 | 0.038 | 0.030 | 0.039 | -0.012 | 0.033 |
| 3 | 0.063 | 0.014 | 0.048 | 0.054 | 0.020 | 0.032 |
| 4 | 0.070 | -0.021 | 0.111 | 0.049 | -0.094 | -0.005 |
| 5 | 0.125 | -0.026 | 0.166 | 0.006 | 0.101 | -0.004 |
| 6 | -0.042 | -0.008 | -0.027 | -0.012 | 0.100 | 0.001 |
| 7 | -0.026 | 0.039 | -0.118 | -0.030 | -0.005 | 0.012 |
| 8 | -0.095 | -0.006 | -0.052 | -0.028 | -0.001 | -0.010 |
| 9 | -0.055 | -0.012 | 0.096 | 0.027 | 0.011 | -0.011 |
| 10 | 0.100 | -0.062 | 0.080 | 0.014 | -0.135 | -0.028 |
| 11 | 0.042 | -0.093 | 0.091 | 0.012 | -0.020 | -0.050 |
| 12 | -0.073 | -0.080 | -0.069 | -0.005 | -0.024 | -0.047 |
| 13 | 0.133 | -0.058 | 0.056 | -0.021 | -0.101 | -0.024 |
| 14 | -0.030 | -0.021 | 0.059 | -0.049 | -0.023 | -0.033 |
| 15 | -0.047 | -0.092 | -0.090 | -0.057 | 0.031 | -0.079 |
| 16 | -0.116 | -0.100 | 0.025 | 0.000 | 0.011 | -0.065 |
| 17 | -0.039 | -0.137 | 0.208 | -0.004 | -0.093 | -0.047 |
| 18 | -0.033 | -0.134 | 0.158 | -0.033 | 0.027 | -0.082 |
| 19 | -0.129 | -0.075 | -0.008 | -0.036 | -0.066 | -0.046 |
| 20 | -0.135 | -0.030 | -0.142 | -0.028 | -0.148 | -0.038 |
| 21 | -0.161 | -0.048 | -0.094 | -0.072 | -0.056 | -0.056 |
| 22 | -0.072 | -0.062 | 0.024 | -0.027 | 0.005 | -0.050 |
| 23 | -0.080 | -0.099 | 0.139 | -0.026 | -0.014 | -0.052 |
| 24 | -0.009 | -0.121 | 0.141 | -0.019 | 0.027 | -0.087 |
| 25 | -0.147 | -0.126 | 0.153 | -0.051 | 0.060 | -0.085 |
| 26 | -0.002 | -0.098 | 0.032 | -0.060 | -0.207 | -0.071 |
| 27 | -0.002 | 0.007 | 0.005 | -0.013 | 0.011 | -0.006 |
| 28 | -0.032 | 0.034 | 0.155 | -0.033 | 0.038 | 0.014 |
| 29 | 0.072 | 0.007 | -0.092 | 0.003 | -0.029 | 0.005 |
| 30 | 0.025 | -0.008 | 0.028 | 0.024 | 0.001 | 0.005 |
| 31 | 0.025 | -0.027 | 0.100 | 0.039 | -0.047 | 0.001 |
| 32 | 0.121 | 0.013 | 0.023 | 0.048 | 0.094 | 0.032 |
| 33 | 0.115 | 0.035 | -0.008 | 0.034 | 0.068 | 0.035 |
| 34 | -0.016 | 0.084 | -0.015 | 0.028 | 0.005 | 0.048 |

ตารางที่ ค.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Z ของชั้นงานทดสอบมาตรฐานถ่าย 4 ตำแหน่ง

| ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง | ค่าความแตกต่างของพิกัดทางแกน X(มิลลิเมตร) | | | | | |
|--------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Point ID | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
| 1 | 0.252 | 0.261 | 0.094 | 0.055 | -0.216 | 0.006 |
| 2 | 0.198 | 0.187 | 0.079 | 0.013 | -0.246 | -0.020 |
| 3 | 0.105 | 0.149 | 0.025 | 0.023 | -0.178 | 0.001 |
| 4 | -0.027 | 0.011 | -0.019 | 0.005 | -0.021 | 0.001 |
| 5 | -0.141 | -0.135 | -0.047 | -0.011 | 0.174 | 0.008 |
| 6 | -0.199 | -0.193 | -0.077 | -0.027 | 0.134 | 0.003 |
| 7 | -0.221 | -0.225 | -0.078 | -0.026 | 0.298 | 0.024 |
| 8 | 0.233 | 0.277 | 0.067 | 0.035 | -0.326 | -0.004 |
| 9 | 0.169 | 0.232 | 0.051 | 0.052 | -0.262 | 0.009 |
| 10 | 0.105 | 0.157 | 0.024 | 0.033 | -0.208 | 0.000 |
| 11 | -0.016 | 0.013 | -0.009 | 0.032 | -0.095 | 0.010 |
| 12 | -0.134 | -0.129 | -0.046 | 0.028 | 0.077 | 0.018 |
| 13 | -0.181 | -0.197 | -0.066 | 0.005 | 0.211 | 0.010 |
| 14 | -0.210 | -0.252 | -0.055 | -0.025 | 0.280 | 0.020 |
| 15 | 0.244 | 0.278 | 0.092 | 0.026 | -0.256 | -0.004 |
| 16 | 0.193 | 0.149 | 0.108 | 0.011 | -0.200 | -0.028 |
| 17 | 0.023 | 0.007 | 0.029 | 0.030 | -0.012 | -0.004 |
| 18 | -0.175 | -0.167 | -0.086 | 0.004 | 0.180 | -0.022 |
| 19 | -0.268 | -0.269 | -0.119 | -0.042 | 0.238 | -0.020 |
| 20 | -0.181 | -0.252 | -0.021 | -0.009 | 0.313 | 0.024 |
| 21 | 0.318 | 0.291 | 0.027 | 0.026 | -0.315 | -0.002 |
| 22 | 0.177 | 0.229 | 0.057 | 0.033 | -0.220 | -0.007 |
| 23 | 0.159 | 0.168 | 0.073 | 0.031 | -0.187 | -0.007 |
| 24 | 0.051 | 0.010 | 0.048 | 0.018 | -0.028 | -0.020 |
| 25 | -0.089 | -0.152 | -0.009 | 0.009 | 0.144 | -0.018 |
| 26 | -0.164 | -0.205 | -0.058 | 0.005 | 0.241 | -0.006 |
| 27 | -0.217 | -0.258 | -0.071 | -0.044 | 0.250 | -0.009 |
| 28 | 0.227 | 0.294 | 0.080 | 0.050 | -0.179 | 0.026 |
| 29 | 0.249 | 0.228 | 0.136 | 0.030 | -0.159 | 0.004 |
| 30 | 0.162 | 0.161 | 0.083 | 0.018 | -0.146 | 0.000 |
| 31 | 0.017 | -0.004 | 0.019 | -0.013 | -0.031 | -0.034 |
| 32 | -0.148 | -0.143 | -0.064 | -0.019 | 0.060 | -0.018 |
| 33 | -0.217 | -0.198 | -0.106 | -0.036 | 0.081 | -0.020 |
| 34 | -0.174 | -0.209 | -0.045 | -0.028 | 0.244 | 0.013 |

ตารางที่ ค.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน X ของชั้นงานทดสอบมาตรฐานถ่าย 8 ตำแหน่ง

| ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง | ค่าความแตกต่างของพิกัดทางแกน Y (มิลลิเมตร) | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Point ID | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
| 1 | 0.131 | 0.181 | 0.014 | 0.041 | -0.129 | 0.017 |
| 2 | 0.156 | 0.199 | 0.027 | 0.020 | -0.246 | 0.008 |
| 3 | 0.230 | 0.215 | 0.095 | 0.014 | -0.219 | 0.002 |
| 4 | 0.228 | 0.241 | 0.088 | 0.023 | -0.243 | -0.002 |
| 5 | 0.191 | 0.197 | 0.057 | -0.004 | -0.275 | -0.010 |
| 6 | 0.199 | 0.205 | 0.073 | 0.025 | -0.169 | 0.006 |
| 7 | 0.161 | 0.161 | 0.049 | 0.015 | -0.138 | -0.015 |
| 8 | 0.062 | 0.093 | -0.014 | -0.011 | -0.115 | -0.017 |
| 9 | 0.099 | 0.146 | 0.019 | -0.013 | -0.118 | -0.009 |
| 10 | 0.119 | 0.144 | 0.037 | -0.030 | -0.153 | -0.033 |
| 11 | 0.194 | 0.176 | 0.109 | -0.017 | -0.155 | 0.000 |
| 12 | 0.074 | 0.157 | 0.003 | -0.014 | -0.126 | -0.004 |
| 13 | 0.157 | 0.167 | 0.092 | 0.009 | -0.096 | 0.012 |
| 14 | 0.109 | 0.125 | 0.033 | 0.024 | -0.089 | 0.004 |
| 15 | -0.005 | -0.001 | 0.004 | 0.001 | 0.011 | -0.005 |
| 16 | 0.025 | 0.006 | 0.028 | -0.035 | 0.010 | -0.026 |
| 17 | 0.032 | -0.001 | 0.040 | -0.041 | 0.062 | -0.031 |
| 18 | -0.037 | -0.006 | -0.026 | -0.044 | 0.014 | -0.024 |
| 19 | 0.030 | 0.012 | 0.028 | 0.012 | 0.005 | 0.009 |
| 20 | -0.015 | -0.023 | -0.018 | -0.021 | -0.021 | -0.022 |
| 21 | -0.142 | -0.140 | -0.056 | -0.027 | 0.128 | -0.015 |
| 22 | -0.090 | -0.104 | -0.008 | 0.000 | 0.176 | 0.009 |
| 23 | -0.082 | -0.107 | 0.004 | 0.003 | 0.213 | 0.016 |
| 24 | -0.167 | -0.129 | -0.069 | -0.005 | 0.242 | 0.012 |
| 25 | -0.153 | -0.131 | -0.063 | -0.027 | 0.167 | 0.002 |
| 26 | -0.164 | -0.137 | -0.079 | -0.044 | 0.133 | -0.017 |
| 27 | -0.101 | -0.089 | -0.031 | 0.011 | 0.122 | 0.026 |
| 28 | -0.154 | -0.159 | -0.033 | 0.003 | 0.215 | 0.033 |
| 29 | -0.153 | -0.197 | -0.021 | -0.007 | 0.193 | 0.002 |
| 30 | -0.175 | -0.214 | -0.035 | -0.010 | 0.188 | 0.004 |
| 31 | -0.231 | -0.218 | -0.088 | -0.006 | 0.204 | 0.009 |
| 32 | -0.217 | -0.222 | -0.087 | -0.034 | 0.220 | -0.015 |
| 33 | -0.106 | -0.191 | 0.013 | -0.025 | 0.235 | -0.008 |
| 34 | -0.197 | -0.175 | -0.097 | -0.043 | 0.122 | -0.013 |

ตารางที่ ค.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Y ของชั้นงานทดสอบมาตรฐานถ่าย 8 ตำแหน่ง

| ชั้นงานที่ 1 ถ่าย 8 ตำแหน่ง | ค่าความแตกต่างของพิกัดทางแกน Z (มิลลิเมตร) | | | | | |
|--------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Point ID | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
| 1 | 0.007 | 0.073 | 0.021 | 0.029 | 0.073 | 0.028 |
| 2 | 0.038 | 0.033 | 0.034 | 0.043 | -0.054 | 0.041 |
| 3 | 0.068 | 0.019 | 0.054 | 0.062 | 0.040 | 0.057 |
| 4 | 0.094 | -0.016 | 0.072 | 0.050 | -0.053 | 0.021 |
| 5 | 0.133 | -0.011 | 0.122 | 0.012 | 0.083 | 0.018 |
| 6 | -0.041 | 0.001 | -0.041 | -0.011 | 0.108 | -0.011 |
| 7 | -0.079 | 0.017 | -0.055 | -0.057 | -0.066 | -0.035 |
| 8 | -0.072 | -0.015 | -0.066 | -0.026 | -0.065 | -0.020 |
| 9 | 0.010 | 0.004 | 0.003 | 0.031 | 0.010 | 0.031 |
| 10 | 0.092 | -0.029 | 0.077 | 0.030 | -0.153 | 0.017 |
| 11 | 0.056 | -0.058 | 0.037 | 0.025 | -0.044 | 0.036 |
| 12 | -0.087 | -0.060 | -0.091 | -0.005 | 0.104 | 0.002 |
| 13 | 0.028 | -0.046 | 0.039 | -0.024 | -0.117 | -0.009 |
| 14 | 0.006 | -0.019 | 0.018 | -0.054 | -0.022 | -0.043 |
| 15 | -0.065 | -0.075 | -0.076 | -0.042 | 0.052 | -0.052 |
| 16 | -0.057 | -0.060 | -0.085 | 0.025 | -0.082 | 0.013 |
| 17 | 0.055 | -0.073 | 0.022 | 0.043 | -0.085 | 0.021 |
| 18 | 0.033 | -0.098 | 0.016 | -0.012 | -0.074 | -0.013 |
| 19 | -0.075 | -0.049 | -0.086 | -0.016 | -0.042 | -0.022 |
| 20 | -0.139 | -0.036 | -0.136 | -0.036 | -0.110 | -0.028 |
| 21 | -0.148 | -0.052 | -0.108 | -0.075 | -0.053 | -0.081 |
| 22 | -0.036 | -0.038 | -0.056 | -0.007 | -0.084 | -0.036 |
| 23 | 0.001 | -0.056 | -0.028 | 0.008 | -0.118 | -0.007 |
| 24 | 0.047 | -0.086 | 0.014 | 0.008 | -0.101 | -0.016 |
| 25 | -0.038 | -0.099 | -0.054 | -0.028 | 0.005 | -0.036 |
| 26 | -0.004 | -0.084 | -0.003 | -0.046 | -0.186 | -0.053 |
| 27 | 0.008 | -0.002 | 0.017 | -0.008 | 0.009 | -0.002 |
| 28 | 0.046 | 0.011 | 0.060 | -0.050 | 0.027 | -0.023 |
| 29 | -0.003 | 0.027 | -0.009 | 0.011 | -0.036 | 0.008 |
| 30 | 0.025 | -0.011 | 0.009 | 0.002 | 0.010 | 0.018 |
| 31 | 0.053 | -0.006 | 0.027 | 0.042 | -0.058 | 0.043 |
| 32 | 0.079 | 0.026 | 0.063 | 0.060 | 0.083 | 0.041 |
| 33 | 0.081 | 0.029 | 0.079 | 0.039 | 0.080 | 0.017 |
| 34 | -0.016 | 0.053 | 0.003 | 0.025 | -0.004 | 0.026 |

ตารางที่ ค.6 ค่าความคลาดเคลื่อนของทางแกน Z ของชิ้นงานทดสอบมาตรฐานถ่าย 8 ตำแหน่ง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชชาติชาย ไวยสระสิงห์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ.2522 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ2) สาขาวิศวกรรมสำรวจและการแผนที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542.

ในปี พ.ศ.2543 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์สำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย