

การศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา

นายธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของผลงานการค้นคว้าวิทยานิพนธ์  
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A GEOMETRIC STUDY OF PANORAMIC CAMERA SYSTEM

Mr. Tanarat Mityodwong

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

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา
โดย	นายธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรชูวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สวัสดิ์ชัย เกรียงไกรเพชร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์)

..... กรรมการ  
(พันเอก ดร.กนก วีรวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.คุณฐิติ ชาญลิขิต)

ธนรัตน์ มิตรยอคงศรี : การศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา.  
 (A GEOMETRIC STUDY OF PANORAMIC CAMERA SYSTEM) อ. ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์, 121 หน้า.

กล้องถ่ายภาพทั่วไปมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ มีมุมรับภาพแคบ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพพานอรามา ซึ่งเป็นกล้องที่สามารถถ่ายได้รอบทิศทางในการถ่ายภาพครั้งเดียว การเก็บข้อมูลจึงสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น ทำให้กล้องชนิดนี้นิยมนำมาใช้กับระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ แต่ก่อนที่จะนำข้อมูลภาพพานอรามาที่ได้จากระบบมาใช้งานนั้น ต้องมีการปรับแก้ ซึ่งวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสงเป็นวิธีที่ให้ความละเอียดถูกต้องและความเชื่อมั่นสูงที่สุด โดยการใช้ความสัมพันธ์ของสมการสภาวะร่วมเส้น ค่าพิกัดในสามมิติ การวัดจุดโยงยึด และการคำนวณปรับแก้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการรังวัดบนภาพพานอรามา และการประยุกต์ใช้ในการรังวัดจากภาพพานอรามาภาพเดียว สามารถหาพิกัด และวัดความสูงของวัตถุภายในภาพได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด รวมทั้งมีการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับการปรับแก้ของบล็อกลำแสง เพื่อการรังวัดบนภาพพานอรามา สำหรับข้อมูลที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ทำการคำนวณหาตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา และทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบที่ได้ระหว่างการทำการรังวัดภาคพื้นดินและการปรับแก้ของบล็อกลำแสง โดยกล้องถ่ายภาพพานอรามาที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ กล้อง Ladybug 3 ลักษณะเส้นทางที่ใช้ในการศึกษามีสองกรณีด้วยกันคือ กรณียานพาหนะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและกรณียานพาหนะเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง

กรณียานพาหนะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายจำนวน 15 จุด และจุดตรวจสอบอิสระ 20 จุด จากการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระจากการรังวัดภาคพื้นดินกับการคำนวณจากการปรับแก้ของบล็อกลำแสง ได้ว่า  $RMSE_x = 0.038$  เมตร  $RMSE_y = 0.029$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.219$  เมตร กรณียานพาหนะเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง มีจุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด จุดตรวจสอบอิสระทั้งหมด 10 จุด จากการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระ ได้ผลดังนี้  $RMSE_x = 0.024$  เมตร  $RMSE_y = 0.031$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.169$  เมตร

ภาควิชา.....วิศวกรรมสำรวจ.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสำรวจ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554.....

## 5170318621 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS : PANORAMIC IMAGE / SINGLE PANORAMA RESECTION /  
MOBILE MAPPING SYSTEM / BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

TANARAT MITYODWONG: A GEOMETRIC STUDY OF PANORAMIC  
CAMERA SYSTEM. ADVISOR: ASSOC. PROF. PHISAN SANTITAMNONT  
Ph.D., 121 pp.

The major problem of single-frame cameras is their limited field of view. A panoramic camera, which can acquire 360 degrees in field of view with a single panorama shot, is a remedy for such problem. This type of camera is relatively efficient in data collection, and thus commonly used in mobile mapping system. Panoramic images, the data from said system, require adjustment computation before use. Among the available methods, Bundle Block Adjustment is accepted as the most accurate. It was contributed by co-linearity equation, 3-D coordinate fixing, tie-point measurement and Least squares adjustment. This study eventually led to development of a mathematical model for measurement of panoramic images and of single panorama resection. The said model is capable of point positioning and height determining of the object in the image under a set of conditions. The study also covered development of a numerical solution of (1) computing Bundle Block Adjustment for measurement of panoramic images acquired from Mobile Mapping System, (2) finding series of the camera exposure stations, and (3) comparing between the coordinates of check point acquired from ground survey with those from Bundle Block Adjustment. This experiment studied the output from Ladybug 3 camera for two cases in which the vehicle travelled in straight and curved routes.

The resulted numerical solution can compute the optimal Bundle Block Adjustment, and compare coordinates of the check point. The case of a vehicle moving along straight route, with 15 control points and 20 independent check points, gave  $RMSE_x = 0.038$  meter,  $RMSE_y = 0.029$  meter, and  $RMSE_z = 0.219$  meter. While the case of curved route, with 5 control points and 10 independent check points, gave  $RMSE_x = 0.024$  meter,  $RMSE_y = 0.031$  meter, and  $RMSE_z = 0.169$  meter.

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

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

Academic Year :..... 2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งให้การสนับสนุนดูแล และเป็นกำลังใจต่อการศึกษาในครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ในการให้แนวความคิด คำแนะนำ คำปรึกษาในการวิจัย ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ข้อชี้แนะต่างๆ เพื่อแก้ไขปัญหา และให้แรงบันดาลใจ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ สวัสดิ์ชัย เกரியงไกรเพชร ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ พันเอก ดร.กนก วีรวงศ์ และ ดร.ศุภฤกษ์ ชาญลิขิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาใช้เวลาในการอ่าน ตรวจสอบข้อบกพร่อง และแนะนำสิ่งต่างๆ ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจทุกท่าน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำที่ดี ที่เป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ บริษัท โนวาเทล แคนาดา จำกัด, คุณนิกร สุทธิเสงี่ยม สำหรับความอนุเคราะห์เรื่องเครื่องมือในการวิจัย, อาจารย์ภานุ อุทัยศรี, คุณอรุณ บุรีรักรักษ์, คุณณกร วัฒนกิจ, คุณธิตินันท์ เชื้อสมบุญ, คุณสันต์ ไชยธีระพันธ์, คุณแหวววรรณ คำฟองเครือ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบไป

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย .....	4
1.7 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย.....	5
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ภาพพยานออรามา .....	6
2.1.1 Catadioptric system.....	6
2.1.2 Dioptric system .....	7
2.2 กล้องถ่ายภาพพยานออรามา .....	10
2.3 เรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพยานออรามา .....	15
2.3.1 Spherical coordinate system.....	17
2.3.2 Equirectangular coordinate system .....	18
2.4 การแปลงพิกัดในสามมิติแบบเฮลเมิร์ต .....	19
2.4.1 ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กลางกำเนิด .....	19
2.4.2 เมทริกซ์การหมุน .....	19
2.4.3 ความสัมพันธ์ในการมีมาตราส่วน .....	21
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพพยานออรามากับพิกัดวัตถุ ในกรณีที่กล้องถ่ายภาพพยานออรามาอยู่ในแนวตั้ง .....	22

2.6 การประยุกต์ใช้การรังวัดในภาพพานอรามาภาพเดียวในการหาตำแหน่งวัตถุ กรณีที่ต้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง.....	23
2.6.1 การรังวัดพิกัดทางรายของวัตถุ .....	24
2.6.2 การหาความสูงวัตถุ.....	24
2.6.3 การประมาณความคลาดเคลื่อนของระยะราบและระยะตั้ง .....	25
2.7 หลักการกำลังสองน้อยที่สุด .....	27
2.8 บทความที่เกี่ยวข้อง .....	28
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	33
3.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างระบบพิกัดแบบต่างๆ .....	33
3.1.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular กับระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลม .....	33
3.1.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับพิกัดวัตถุ ในกรณีทั่วไป .....	33
3.2 การหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 .....	34
3.3 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา .....	36
3.4 การเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ .....	37
3.4.1 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	38
3.4.2 การหาตำแหน่งของอุปกรณ์ .....	39
3.4.3 สถานที่เก็บข้อมูล.....	40
3.4.4 การจัดทำหมุดควบคุมภาพถ่าย .....	40
3.4.5 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย.....	41
3.4.5.1 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	41
3.4.5.2 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	43
3.4.6 การประเมินความถูกต้องของการปรับแก้ของบล็อกลำแสงโดย การใช้จุดตรวจสอบอิสระ .....	46
3.4.7 ขั้นตอนการคำนวณการหาค่าพิกัดด้วยวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสง.....	46
บทที่ 4 ผลการศึกษา .....	51
4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
4.1.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular กับระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลม .....	51



4.1.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับพิกัดวัตถุ ในกรณีทั่วไป .....	53
4.2 ผลการทำ Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 .....	54
4.2.1 การหาตำแหน่งของจุดควบคุมจากกล้อง Total Station .....	54
4.2.2 ผลการทำ Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 .....	55
4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา .....	58
4.3.1 กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	58
4.3.1.1 ข้อมูลทดสอบ ห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาเอก.....	58
4.3.1.2 ข้อมูลทดสอบ อาคารปฏิบัติการทดสอบ โครงสร้างขนาดจริง .....	61
4.3.2 กรณีกล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง.....	67
4.3.2.1 ข้อมูลทดสอบ ห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาเอก.....	67
4.3.2.2 ข้อมูลทดสอบ อาคารปฏิบัติการทดสอบ โครงสร้างขนาดจริง .....	69
4.3.3 สรุปผลการคำนวณการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา .....	72
4.4 ผลการเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	73
4.4.1 ผลการหาตำแหน่งของอุปกรณ์.....	73
4.4.2 ผลการทำวงรอบและจุดควบคุมภาพถ่าย .....	75
4.4.2.1 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	76
4.4.2.2 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	78
4.4.3 ผลการปรับแก้ของบล็อกลำแสงและการเปรียบเทียบค่าพิกัดของ จุดตรวจสอบอิสระ.....	80
4.4.3.1 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	80
4.4.3.2 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	89
4.4.4 สรุปผลการปรับแก้ของบล็อกลำแสงและการเปรียบเทียบค่าพิกัดของ จุดตรวจสอบอิสระ.....	94
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	96
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	97
รายการอ้างอิง .....	98

ภาคผนวก .....	100
ภาคผนวก ก โปรแกรม GNU GAMA 1.10 .....	101
ภาคผนวก ข โปรแกรม Ladybug SDK 1.6 .....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	121

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงาน .....	4
ตารางที่ 2-1 ผลการทดสอบในกรณีต่างๆ .....	29
ตารางที่ 2-2 ผลจากการปรับแก้ด้วยวิธีบล็อกลำแสง .....	30
ตารางที่ 2-3 ผลการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ .....	32
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของ SPAN-CPT .....	38
ตารางที่ 3- 2 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย .....	41
ตารางที่ 3-3 จุดทั้งหมดที่ปรากฏบนภาพพานอรามา .....	42
ตารางที่ 3-4 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย .....	43
ตารางที่ 3-5 จุดทั้งหมดที่ปรากฏบนภาพพานอรามา .....	44
ตารางที่ 3-6 ส่วนประกอบของข้อมูลที่สำคัญที่ได้จาก SPAN-CPT .....	45
ตารางที่ 3-7 รายละเอียดของค่า Q ที่ได้จากการประมวลผล .....	45
ตารางที่ 4-1 พิกัดของจุดควบคุมภายในห้องวิจัย .....	54
ตารางที่ 4-2 ผลการวัดพิกัดภาพของกล้อง Ladybug 3 ครั้งที่ 1 .....	56
ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณ $\Delta H$ ครั้งที่ 1 .....	56
ตารางที่ 4-4 ผลการวัดพิกัดภาพของกล้อง Ladybug ครั้งที่ 2 .....	57
ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณ $\Delta H$ ครั้งที่ 2 .....	57
ตารางที่ 4-6 พิกัดวัตถุของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	59
ตารางที่ 4-7 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	59
ตารางที่ 4-8 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	60
ตารางที่ 4-9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดภาพจากภาพถ่ายกับพิกัดภาพที่คำนวณได้ .....	60
ตารางที่ 4-10 พิกัดวัตถุของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	61
ตารางที่ 4-11 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	62
ตารางที่ 4-12 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	62
ตารางที่ 4-13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดภาพจากภาพถ่ายกับพิกัดภาพที่คำนวณได้ .....	63
ตารางที่ 4-14 พิกัดวัตถุของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	64
ตารางที่ 4-15 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	65
ตารางที่ 4-16 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง .....	65
ตารางที่ 4-17 ผลทางสถิติ สำหรับค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้ .....	66
ตารางที่ 4-18 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีทั่วไป .....	67

ตารางที่ 4-19 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีทั่วไป .....	68
ตารางที่ 4-20 ผลทางสถิติ สำหรับค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้.....	68
ตารางที่ 4-21 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีทั่วไป .....	69
ตารางที่ 4-22 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีทั่วไป .....	70
ตารางที่ 4-23 การเปรียบเทียบระหว่างพิกัดภาพจากภาพถ่ายกับพิกัดภาพที่คำนวณได้.....	70
ตารางที่ 4-24 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีทั่วไป .....	71
ตารางที่ 4-25 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีทั่วไป .....	71
ตารางที่ 4-26 ผลทางสถิติ สำหรับค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้.....	72
ตารางที่ 4-27 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา .....	73
ตารางที่ 4-28 ความสูงของอุปกรณ์เมื่อเทียบกับพื้น.....	74
ตารางที่ 4-29 ระยะห่างของกล้องถ่ายภาพพานอรามา กับ GPS/IMU.....	74
ตารางที่ 4-30 ค่าพิกัดหมุมดวงรอบ.....	75
ตารางที่ 4-31 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	76
ตารางที่ 4-32 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	77
ตารางที่ 4-33 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่าย กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	78
ตารางที่ 4-34 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง .....	79
ตารางที่ 4-35 ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	81
ตารางที่ 4-36 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณออกมาได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	82
ตารางที่ 4-37 ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่จะนำมาเปรียบเทียบ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	83
ตารางที่ 4-38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	84
ตารางที่ 4-39 ค่าต่างระหว่างค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้กับค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพ จาก SPAN-CPT กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	85
ตารางที่ 4-40 ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	87
ตารางที่ 4-41 ค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากกล้อง Total Station กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง.....	88

ตารางที่ 4-42 ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	90
ตารางที่ 4-43 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณออกมาได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	90
ตารางที่ 4-44 ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่จะนำมาเปรียบเทียบ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	91
ตารางที่ 4-45 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	91
ตารางที่ 4-46 ค่าต่างระหว่างค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้กับค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพ จาก SPAN-CPT กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	92
ตารางที่ 4-47 ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	93
ตารางที่ 4-48 ค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากกล้อง Total Station กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	94

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 แผนผังวิธีดำเนินงานวิจัย.....	5
ภาพที่ 2-1 ประเภทของภาพพานอรามา.....	6
ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบ Multi mirror .....	7
ภาพที่ 2-3 การประยุกต์ใช้ในการทำแบบจำลองสามมิติ.....	7
ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างกล้องประเภท Multi-head camera .....	8
ภาพที่ 2-5 ตัวอย่างกล้องประเภท Direct scanning .....	8
ภาพที่ 2-6 การหมุนของกล้องถ่ายภาพ .....	8
ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบ Stitching .....	9
ภาพที่ 2-8 กล้อง Ladybug 3 และ ภาพที่ออกมาจากแต่ละกล้อง .....	10
ภาพที่ 2-9 ข้อมูลจำเพาะของกล้อง Ladybug 3 .....	10
ภาพที่ 2-10 รายละเอียดของกล้อง Ladybug 3 ด้านบน.....	11
ภาพที่ 2-11 รายละเอียดของกล้อง Ladybug 3 ด้านข้าง .....	11
ภาพที่ 2-12 รายละเอียดของกล้อง Ladybug 3 ด้านล่าง .....	12
ภาพที่ 2-13 ก) ขั้นตอนการประมวลผลภาพของกล้อง Ladybug 3 ข) ลักษณะการถ่ายภาพของกล้อง Ladybug 3.....	13
ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างภาพที่ได้จากกล้อง Ladybug 3 ในระบบ Equirectangular .....	13
ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างการเพิ่มระยะผลานภาพ เพื่อให้ภาพกลมกลืนกันมากขึ้น .....	14
ภาพที่ 2-16 แกนอ้างอิงของกล้อง Ladybug 3.....	15
ภาพที่ 2-17 ระบบแกนอ้างอิงของกล้อง Ladybug 3 .....	15
ภาพที่ 2-18 พิกัดภาพพานอรามา ระบบ ก) Equirectangular ข) Spherical ค) Cylindrical .....	16
ภาพที่ 2-19 ภาพในรูปแบบ ก) Multiple Image ข) Panorama Image ค) Panorama Image .....	16
ภาพที่ 2-20 การอ้างอิงพิกัดภาพระบบพิกัดทรงกลม .....	17
ภาพที่ 2-21 ตัวอย่างภาพในระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลม.....	17
ภาพที่ 2-22 การอ้างอิงพิกัดภาพระบบ Equirectangular .....	18
ภาพที่ 2-23 ตัวอย่างภาพในระบบพิกัด Equirectangular .....	18
ภาพที่ 2-24 ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กำเนิด .....	19
ภาพที่ 2-25 เมทริกซ์การหมุนของมุม $K$ .....	20
ภาพที่ 2-26 เมทริกซ์การหมุนของมุม $\Phi$ .....	20
ภาพที่ 2-27 เมทริกซ์การหมุนของมุม $\Omega$ .....	20

ภาพที่ 2-28 ความสัมพันธ์ในการมีมาตราส่วน .....	21
ภาพที่ 2-29 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามากับพิกัดวัตถุ .....	22
ภาพที่ 2-30 การหาระยะห่างจากจุดเปิดถ่ายภาพไปยังระนาบวัตถุ .....	23
ภาพที่ 2-31 การรังวัดพิกัดทางราบของวัตถุ.....	24
ภาพที่ 2-32 การหาความสูงของวัตถุ.....	24
ภาพที่ 2-33 ความคลาดเคลื่อนของระยะราบ .....	25
ภาพที่ 2-34 ความคลาดเคลื่อนของระยะราบ .....	25
ภาพที่ 2-35 ความคลาดเคลื่อนของระยะตั้ง .....	26
ภาพที่ 2-36 ความคลาดเคลื่อนของระยะตั้ง .....	26
ภาพที่ 2-37 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบราบกับระนาบทรงกระบอก .....	28
ภาพที่ 3-1 การหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3.....	34
ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งการตั้งกล้อง Ladybug 3 และตำแหน่งจุดควบคุม .....	35
ภาพที่ 3-3 การตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาให้อยู่ในแนวตั้ง สำหรับการทดสอบ .....	36
ภาพที่ 3-4 ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	37
ภาพที่ 3-5 SPAN-CPT.....	38
ภาพที่ 3-6 แกนอ้างอิงของระบบ .....	39
ภาพที่ 3-7 การหาคำแหน่งของอุปกรณ์ .....	39
ภาพที่ 3-8 ตัวอย่างโปรแกรม GNU GAMA.....	39
ภาพที่ 3-9 ตำแหน่งของข้อมูลและตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่ใช้งาน.....	40
ภาพที่ 3-10 ตำแหน่งของข้อมูล กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	41
ภาพที่ 3-11 ตำแหน่งของข้อมูล กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	43
ภาพที่ 4-1 การเปรียบเทียบพิกัดภาพระบบ Equirectangular กับ ระบบ Spherical .....	52
ภาพที่ 4-2 จุดควบคุม .....	55
ภาพที่ 4-3 ตำแหน่งการตั้งกล้องสำหรับการหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 และตำแหน่งจุดควบคุม .....	55
ภาพที่ 4-4 ภาพจากการตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาครั้งที่ 1 .....	55
ภาพที่ 4-5 ภาพจากการตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาครั้งที่ 2 .....	57
ภาพที่ 4-6 การทดสอบแบบจำลองกรณีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง.....	58
ภาพที่ 4-7 การทดสอบแบบจำลองกรณีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง.....	61
ภาพที่ 4-8 การทดสอบแบบจำลองกรณีทั่วไป .....	67
ภาพที่ 4-9 การทดสอบแบบจำลองกรณีทั่วไป.....	69

ภาพที่ 4-10 ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ .....	73
ภาพที่ 4-11 ความสูงของอุปกรณ์บนยานพาหนะเทียบกับพื้น .....	74
ภาพที่ 4-12 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ .....	74
ภาพที่ 4-13 ตำแหน่งหมุดวงรอบ .....	75
ภาพที่ 4-14 จุดควบคุมกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง ก) ตัวอย่างจุดควบคุม ข) จุดควบคุมทั้งหมด.....	76
ภาพที่ 4-15 จุดตรวจสอบอิสระกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง ก) ตัวอย่างจุดตรวจสอบอิสระ ข) จุดตรวจสอบอิสระทั้งหมด .....	77
ภาพที่ 4-16 จุดควบคุมกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง ก) ตัวอย่างจุดควบคุม ข) จุดควบคุมทั้งหมด.....	78
ภาพที่ 4-17 จุดตรวจสอบอิสระกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง ก) ตัวอย่างจุดตรวจสอบอิสระ ข) จุดตรวจสอบอิสระทั้งหมด .....	79
ภาพที่ 4-18 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 8312) .....	80
ภาพที่ 4-19 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 8344) .....	80
ภาพที่ 4-20 ตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug 3 กรณียานพาหนะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง .....	86
ภาพที่ 4-21 เศษเหลือและค่าทางสถิติ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง .....	86
ภาพที่ 4-22 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 12241) .....	89
ภาพที่ 4-23 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 12253) .....	89
ภาพที่ 4-24 ตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug 3 กรณียานพาหนะเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง .....	92
ภาพที่ 4-25 เศษเหลือและค่าทางสถิติ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง.....	93
ภาพที่ ก-1 โปรแกรม GNU GAMA 1.10 .....	101
ภาพที่ ก-2 การเรียกใช้งานโปรแกรม GNU GAMA.....	103
ภาพที่ ก-3 การเรียกใช้งานโปรแกรม GNU GAMA.....	103
ภาพที่ ก-4 การเรียกใช้งานโปรแกรม GNU GAMA.....	104
ภาพที่ ข-1 การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCap.....	108
ภาพที่ ข-2 การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCap.....	109
ภาพที่ ข-3 การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCap.....	109
ภาพที่ ข-4 การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCap.....	110
ภาพที่ ข-5 ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCap .....	110



ภาพที่ ข-6 การแสดงข้อมูลจากภาพแต่ละกล้อง .....	112
ภาพที่ ข-7 การแสดงข้อมูลจากทุกกล้อง .....	112
ภาพที่ ข-8 การแสดงข้อมูลภาพแบบโดม .....	112
ภาพที่ ข-9 การแสดงข้อมูลภาพแบบ Equirectangular.....	113
ภาพที่ ข-10 การแสดงข้อมูลภาพแบบ Spherical .....	113
ภาพที่ ข-11 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCapPro .....	114
ภาพที่ ข-12 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCapPro .....	115
ภาพที่ ข-13 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCapPro .....	115
ภาพที่ ข-14 ส่วนประกอบของ โปรแกรม LadybugCapPro.....	116
ภาพที่ ข-15 การตั้งค่าการควบคุมกล้อง Ladybug 3.....	118
ภาพที่ ข-16 การตั้งค่าสมดุลแสงขาว .....	119
ภาพที่ ข-17 การตั้งค่าการควบคุมกล้อง โดยละเอียด.....	120

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในรอบ 20 ปีที่ผ่านมา ความต้องการก้าวสู่ยุคภูมิสารสนเทศในการใช้ข้อมูลปริภูมิ มีอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิมมาก โดยที่ผ่านมาข้อมูลเหล่านี้ จะเป็นการรวบรวมมาจากหลายแหล่งหลายรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตาม ความต้องการจริงๆของข้อมูลเหล่านี้ก็คือต้องการให้ข้อมูลมีความถูกต้องสูงขึ้น มีความหนาแน่นของข้อมูลมากขึ้น ผลิตข้อมูลได้รวดเร็วและทันสมัย รวมถึงค่าใช้จ่ายในการทำงานนั้นลดลง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้น การได้มาซึ่งข้อมูลจะเป็นการลงพื้นที่สำรวจ หรือเป็นการใช้ภาพถ่ายทางอากาศในการทำงาน แต่ในการลงพื้นที่สำรวจ ต้องใช้เวลานาน และในการบินถ่ายภาพถึงแม้จะได้แผนที่ ที่เป็นปัจจุบัน รวดเร็ว แต่ก็มีค่าใช้จ่ายที่สูง ด้วยเหตุนี้ การเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ หรือ Mobile Mapping System (MMS) โดยใช้พาหนะพื้นดินจึงมีความนิยมมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้ข้อมูลปริภูมิ ข้อเด่นของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่มีหลายประการ เช่น ได้ข้อมูลที่รวดเร็ว มีปริมาณมาก และค่าใช้จ่ายที่ลดลง เป็นต้น (El-Sheimy, 2008)

ในความเป็นจริงมีการใช้วิธีสำรวจเก็บข้อมูลแบบนี้มานานแล้ว แต่เนื่องด้วยเทคโนโลยีที่ยังไม่พัฒนาและราคาของอุปกรณ์ต่างๆยังมีราคาสูง ทำให้ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก แต่ในปัจจุบัน อุปกรณ์ต่างๆได้รับการพัฒนาไปมาก เครื่องมือประมวลผลต่างๆ มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ในปัจจุบัน มีผู้ใช้ระบบนี้มากขึ้น ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยเครื่องมือหลายส่วน เช่น ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (GPS) เครื่องมือวัดความเร็วและเครื่องวัดมุม (IMU) เครื่องวัดระยะทาง (Odometer) เลเซอร์สแกนเนอร์ รวมทั้งกล้องถ่ายภาพ สำหรับบันทึกภาพรอบตัวของยานพาหนะที่ขับเคลื่อนไป (El-Sheimy, 2008)

กล้องที่ใช้บนตัวยานพาหนะนั้น นิยมใช้กล้องถ่ายภาพพานอรามา ซึ่งเป็นกล้องที่สามารถบันทึกภาพได้รอบทิศทางในการถ่ายภาพครั้งเดียว เพื่อแก้ไขในเรื่องมุมรับภาพที่แคบ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของกล้องถ่ายภาพแบบทั่วไป ได้ผลลัพธ์เป็นภาพพานอรามาออกมาภาพพานอรามา (Panoramic image) คือ ภาพที่ถ่ายหรือบันทึกในมุมมองที่กว้างกว่าภาพปกติ จึงสามารถบรรจุข้อมูลของภูมิประเทศได้มาก และทำให้เข้าใจหรือจินตนาการถึงสภาพภูมิประเทศที่ภาพนั้นถูกบันทึกได้ง่าย (Huang, Klette, Scheibe, 2008) ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากสำหรับภาพภูมิประเทศ สิ่งปลูกสร้าง โบราณสถาน สถาปัตยกรรมต่างๆ เป็นต้น (Schneider and Maas, 2006)

ในปัจจุบันมีผู้ให้บริการแผนที่ภาพพานอรามา ที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ เป็นจำนวนมาก เช่น Google Street View โดย Google, Bing Maps โดย Microsoft, Tele Atlas, NAVTEQ เป็นต้น ซึ่งเป็นแผนที่ที่ให้บริการฟรีบนอินเทอร์เน็ต แต่ส่วนใหญ่เป็นเพียงการนำเสนอ ภาพพานอรามาที่สามารถมองเห็นได้ในมุมมองกว้างรอบตัวเท่านั้น ไม่ได้นำการประยุกต์ในด้านอื่น เช่น การวัดตำแหน่งหรือวัดมิติของวัตถุบนภาพมาใช้

ด้วยเหตุนี้เอง ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยเห็นว่า หากจะนำภาพพานอรามาที่ได้จากระบบ การทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ มาประยุกต์ใช้ในการทำการทำแผนที่ ก่อนอื่นต้องมีการทดสอบกล้องและ การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ภาพที่ได้ออกมาในรูปแบบการฉายภาพแบบต่างๆและ ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดของภาพพานอรามากับระบบพิกัดวัตถุ เพื่อให้ภาพที่ได้มีแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือสำหรับการนำไปใช้งานต่อ และก่อนการนำข้อมูล ภาพพานอรามาที่บันทึกได้มาใช้งานในการทำการทำแผนที่นั้น ต้องมีการปรับแก้ และการคำนวณ ปรับแก้ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ให้ความละเอียดถูกต้องและความเชื่อมั่นสูงที่สุดคือ วิธีการปรับแก้ของ บล็อกลำแสง (Bundle Block Adjustment) (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553) โดยใช้ความสัมพันธ์ ของ สมการสถานะร่วมเส้น (Co-linearity equation) ค่าพิกัดในสามมิติ (3-D coordinate) การวัดจุดโยงยึด (Tie-point measurement) และการคำนวณปรับแก้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares adjustment) นอกจากนี้ควรจะมีการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์สำหรับทำการรังวัด บนภาพพานอรามา รวมทั้งการหาตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา และเปรียบเทียบตำแหน่งที่ คำนวณออกมาได้กับตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาที่ได้มาจาก GPS/IMU เพราะจะทำให้ได้ ผลลัพธ์ที่ใหม่ ๆ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในอีกหลายๆส่วนต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา และระบบพิกัดภาพพานอรามาแบบ ต่างๆ
- 1.2.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการแปลงค่าพิกัดระหว่าง พิกัด ภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular กับ พิกัดภาพพานอรามา ระบบ Spherical และการแปลงค่าพิกัดระหว่างพิกัดภาพพานอรามา ระบบ Spherical กับพิกัดวัตถุ ในกรณีต่างๆ
- 1.2.3 พัฒนา โปรแกรม สำหรับ ช่วย ในการ ปรับ แก้ ของ บล็อก ลำ แสง สำหรับภาพพานอรามา
- 1.2.4 หาตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาจากการปรับแก้ของบล็อกลำแสง
- 1.2.5 เปรียบเทียบตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาที่คำนวณออกมาได้กับ จุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาที่ได้จากอุปกรณ์ GPS/IMU

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

#### 1.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

- กล้องถ่ายภาพพานอรามาที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือกล้อง Ladybug 3
- GPS/IMU ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ SPAN/CPT
- โปรแกรมที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย MATLAB, Ladybug SDK, GNU GAMA

#### 1.3.2 ภาพพานอรามาที่ใช้ในการวิจัยจะเป็นภาพพานอรามาในระบบ Equirectangular ที่ ผสานกันแล้วจากโปรแกรม Ladybug SDK

#### 1.3.3 โปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัย จะมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- สามารถหาตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาได้
- สามารถหาพิกัดของจุดที่เห็นในภาพตั้งแต่สองภาพขึ้นไปได้

#### 1.3.4 ขอบเขตพื้นที่ในการวิจัย

- พื้นที่ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1.4.2 ศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามาและระบบพิกัดภาพพานอรามาแบบต่างๆ

#### 1.4.3 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการแปลงค่าพิกัดระหว่าง พิกัดภาพพานอรามาในระบบ Equirectangular กับ พิกัดภาพพานอรามาในระบบ Spherical และการแปลงค่าพิกัดระหว่างพิกัดภาพพานอรามาในระบบ Spherical กับพิกัดวัตถุในกรณีต่างๆ

#### 1.4.4 จัดเตรียมข้อมูลที่ได้จากกล้องถ่ายภาพพานอรามา โดยการตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาสำหรับเก็บข้อมูล และเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

#### 1.4.5 พัฒนา โปรแกรม สำหรับ ช่วย ในการ ปรับ แก้ ของ บล๊อค ล้า แสง สำหรับภาพพานอรามา

#### 1.4.6 คำนวณหาตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาจากการปรับแก้ของบล๊อค ล้า แสง

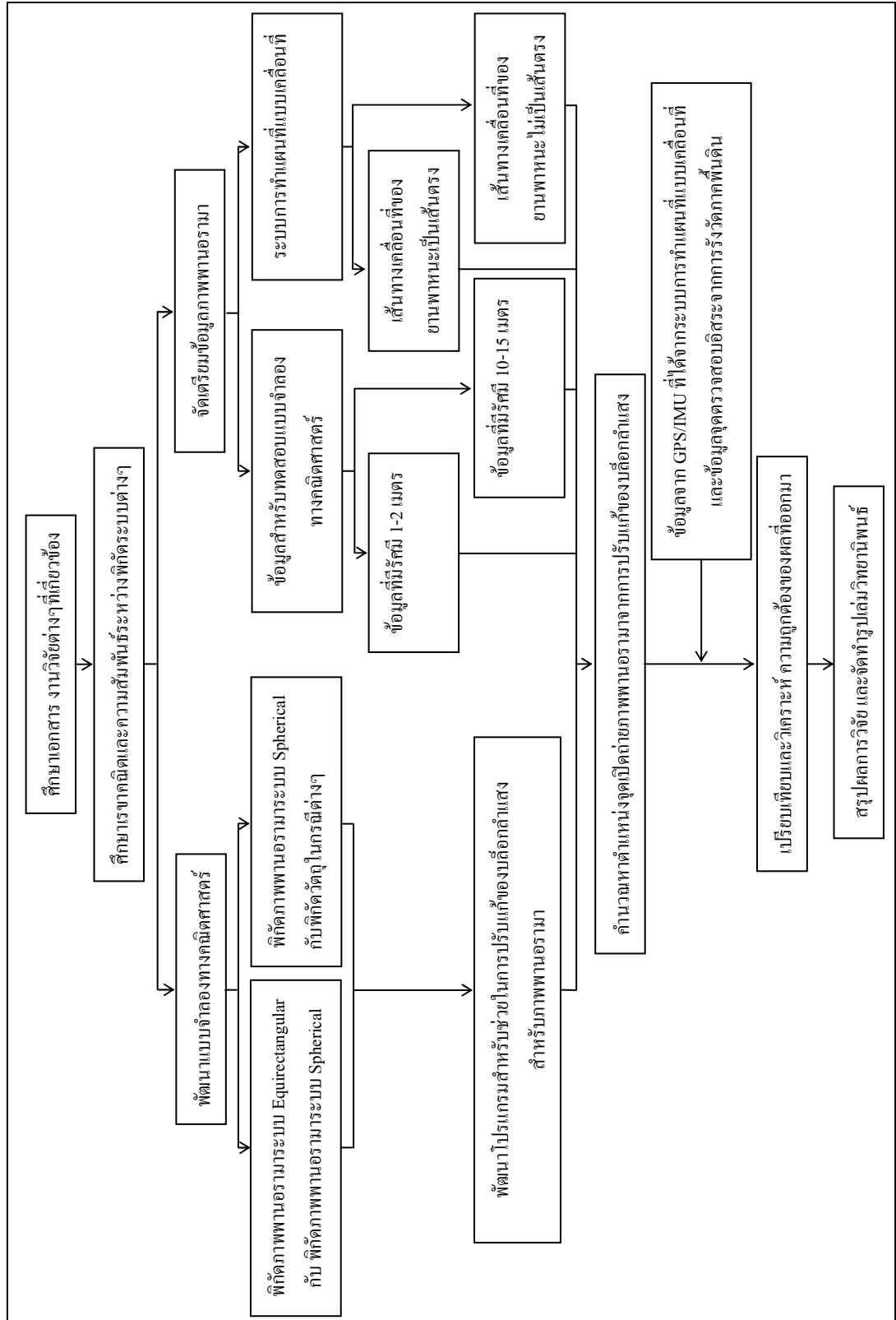
#### 1.4.7 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ ความถูกต้องของผลที่ออกมา

#### 1.4.8 สรุปผลการวิจัย และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



### 1.7 แผนผังวิธีดำเนินการวิจัย

แผนผังวิธีดำเนินการวิจัยได้แสดงในภาพที่ 1-1



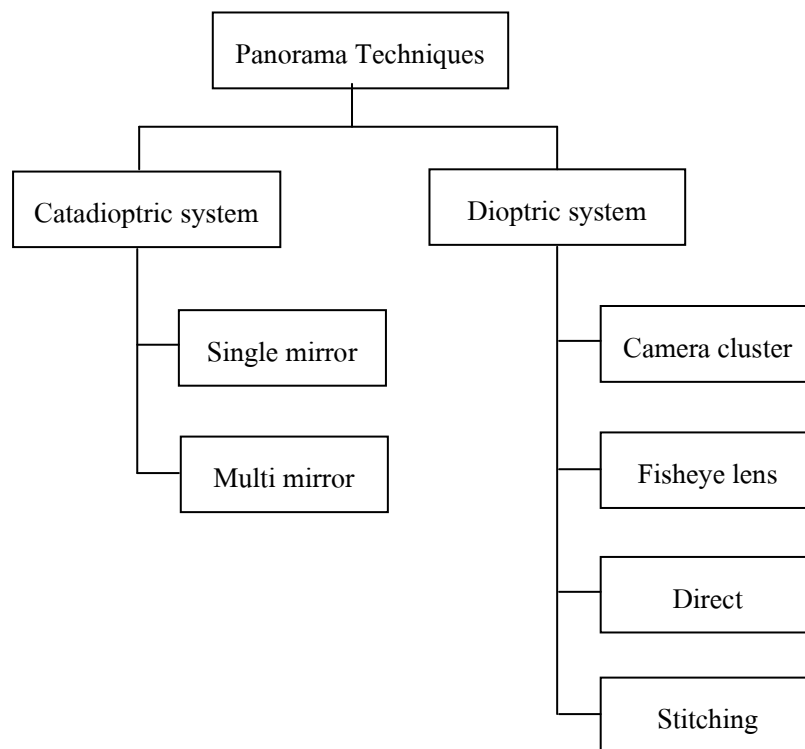
ภาพที่ 1-1 แผนผังวิธีดำเนินการงานวิจัย

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ภาพพานอรามา

ภาพพานอรามา (Panoramic image) คือ ภาพที่ถ่ายหรือบันทึกในมุมมองที่กว้างกว่าภาพปกติ จึงสามารถบรรจุข้อมูลของภูมิประเทศได้มาก และทำให้เข้าใจหรือจินตนาการถึงสภาพภูมิประเทศที่ภาพนั้นถูกบันทึกได้ง่าย (Huang, et al., 2008) ภาพพานอรามา สามารถแบ่งตามการผลิตภาพได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ (Parian, 2007) ดังแสดงในภาพที่ 2-1



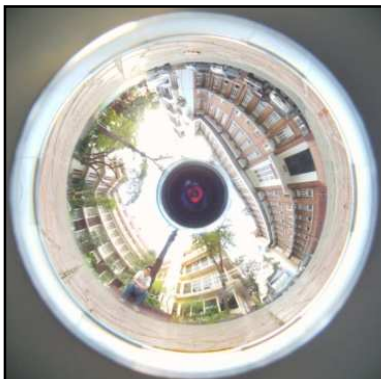
ภาพที่ 2-1 ประเภทของภาพพานอรามา (Parian, 2007)

##### 2.1.1 Catadioptric system

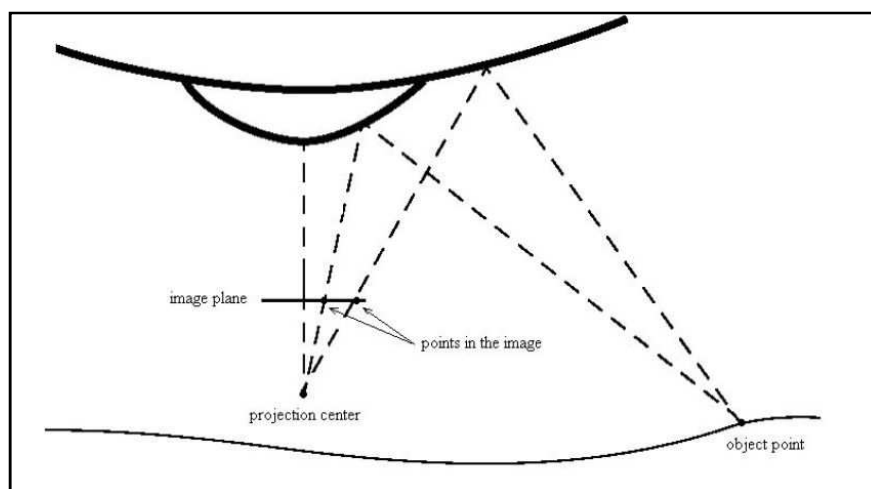
เป็นระบบที่ได้ภาพมาจากการสะท้อนแสงของแผ่นสะท้อนเข้าไปยังเซนเซอร์รับภาพ แบ่งได้เป็นสองประเภทคือ Single mirror และ Multi mirror

- Single mirror เป็นการสะท้อนของกระจกแผ่นเดียวไม่ว่าจะเป็นกระจกเรียบหรือกระจกโค้ง ข้อเสียของระบบนี้คือ ภาพที่ได้จะไม่คมชัดเพราะความโค้งของกระจก และในกรณีกระจกเรียบจะมีข้อจำกัดที่รับแสงของเลนส์ที่ใช้

- Multi mirror การสะท้อนของกระจกตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไป สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำแบบจำลองสามมิติได้โดยใช้กระจกที่มีรัศมีความโค้งไม่เท่ากัน ผลที่ได้ก็คือ จุดสองจุดบนเซนเซอร์รับภาพที่ได้จากกระจกทั้งสองดังตัวอย่างในภาพที่ 2-2 และภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบ Multi mirror



ภาพที่ 2-3 การประยุกต์ใช้ในการทำแบบจำลองสามมิติ (Parian, 2007)

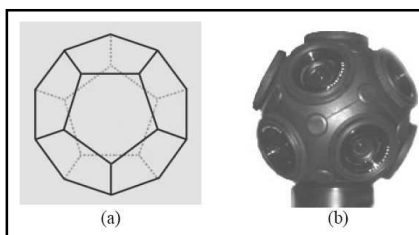
### 2.1.2 Dioptric system

เป็นระบบที่ได้ภาพมาจากการหักเหของแสงเข้าไปที่เซนเซอร์รับภาพโดยตรง แบ่งได้เป็นสี่ประเภทย่อยคือ Camera cluster, Fisheye lens, Direct scanning และ Stitching

- Camera cluster หรือ Multi-head camera จุดประสงค์ของวิธีการนี้คือ ต้องการภาพที่มีมุมมองกว้างโดยที่ไม่เสียรายละเอียดของภาพไปด้วยการใช้กล้องให้น้อยที่สุด ซึ่ง



เลนส์ที่มีมุมมองที่กว้างจะเป็นตัวแปรที่สำคัญของจำนวนกล้องที่จะใช้ในวิธีการนี้ (ภาพที่ 2-4)

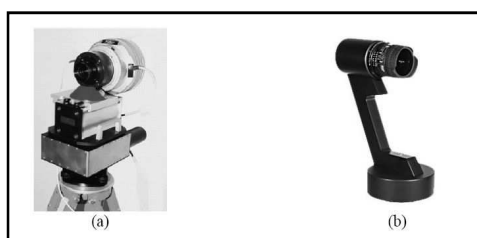


ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างกล้องประเภท Multi-head camera

a) Design axiom b) ตัวกล้องใช้ทั้งหมด 11 กล้อง (Parian, 2007)

- Fisheye lens เป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างภาพได้มุมกว้างที่สุดในการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียวด้วยกล้องตัวเดียว ในเลนส์บางตัวมีมุมรับภาพมากกว่า 180 องศาเลยทีเดียว ข้อจำกัดของภาพที่ได้จากเลนส์ชนิดนี้คือ มีความเพี้ยนของเลนส์สูงโดยเฉพาะในแนวรัศมี

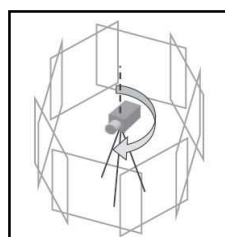
- Direct scanning เป็นการกวาดของเซนเซอร์รับภาพ โดยแบ่งได้เป็นสองประเภทย่อยคือ ภาพที่ได้จากการหมุนของเลนส์ และการหมุนของตัวกล้อง ภาพที่ได้จากกล้องประเภทนี้จะเป็นภาพที่ไม่มีรอยต่อของภาพ (ภาพที่ 2-5)



ภาพที่ 2-5 ตัวอย่างกล้องประเภท Direct scanning

a) EYESCAN M3 b) SpheroCam (Parian, 2007)

- Stitching เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการผลิตภาพพานอรามา โดยปกติแล้วภาพที่นำมาทำ Stitching หรือเชื่อมต่อกันนั้น จะเป็นภาพที่ได้มาจากกล้องตัวเดียวกัน แล้วถ่ายภาพหลายๆมุม โดยที่กล้องจะอยู่ที่เดิม แล้วหมุนไปรอบๆ (ภาพที่ 2-6 และ ภาพที่ 2-7)



ภาพที่ 2-6 การหมุนของกล้องถ่ายภาพ (Huang, et al., 2008)

ภาพที่ได้มาจะต้องมีส่วนทับซ้อนกันเพื่อที่จะนำมาเชื่อมต่อให้กลายเป็นภาพพานอรามา โดยขั้นตอนในการเชื่อมต่อนั้น มีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้ (Brown and Lowe, 2003)

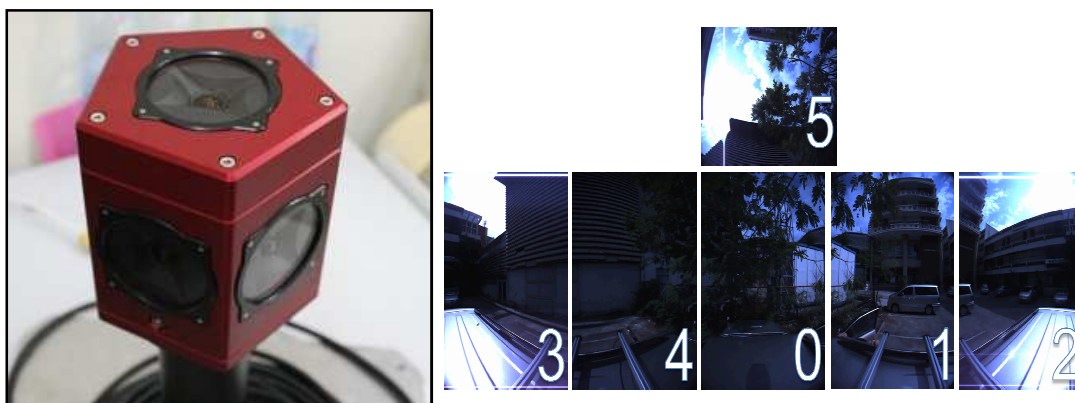
- Feature Matching เป็นการหาจุดหรือตำแหน่งที่เหมือนกันในสองภาพ อัลกอริทึมที่ใช้ในการทำงานมีหลายวิธี เช่น SIFT เป็นต้น
- Image Matching นำภาพสองภาพมาซ้อนกัน โดยใช้จุดที่สามารถตรวจเจอในขั้นตอนแรกมาซ้อนทับกัน
- Bundle Adjustment ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะจะเป็นการจัดการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนต่างๆที่เกิดจากการทำ Image Matching
- Multi-band Blending คือการผสม และ จัดการโทนสีของภาพให้เป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบ Stitching

## 2.2 กล้องถ่ายภาพพานอรามา

กล้องถ่ายภาพพานอรามาที่จะใช้ในการวิจัยนี้คือ กล้อง Ladybug 3 ผลิตโดย บริษัท Point Grey Research ประเทศแคนาดา เป็นกล้องถ่ายภาพพานอรามาแบบ Multi-head camera ประกอบด้วยกล้องทั้งหมด 6 กล้อง แยกเป็นกล้องแนวราบ 5 กล้อง (หมายเลข 0 - 4) และกล้องในแนวตั้ง 1 กล้อง(หมายเลข 5) โดยกล้องแต่ละตัวจะสามารถถ่ายภาพได้ที่ 1600x1200 จุดภาพ (pixel) หรือประมาณ 2 ล้านจุดภาพ ระบบสามารถนำภาพทั้ง 6 มาประกอบกัน เพื่อสร้างเป็นภาพพานอรามาที่มีขนาด 5400x2700 จุดภาพได้ สามารถถ่ายภาพต่อเนื่องได้ สูงสุด 15 ภาพต่อวินาที แบบบีบอัดภาพ และ 6.5 ภาพต่อวินาทีแบบไม่บีบอัดภาพ (ภาพที่ 2-8 และ ภาพที่ 2-9)

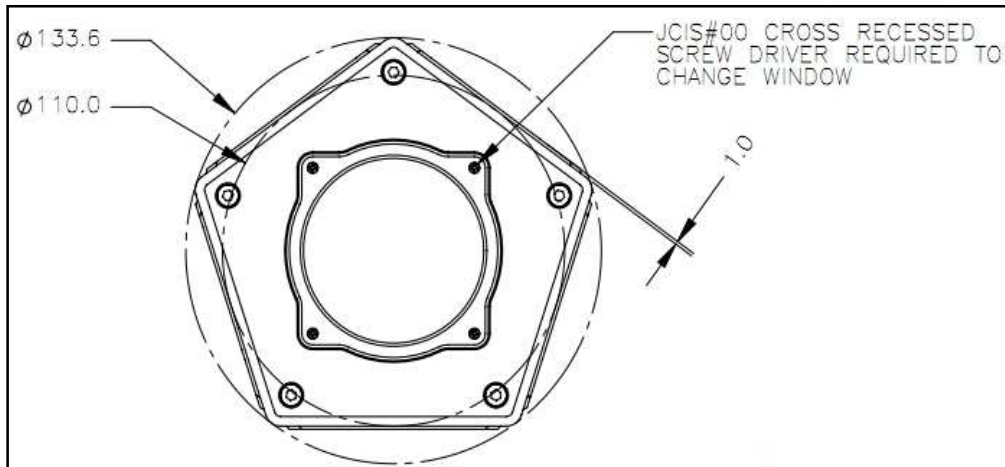


ภาพที่ 2-8 กล้อง Ladybug 3 และ ภาพที่ออกมาจากแต่ละกล้อง

LADYBUG®3 SPECIFICATIONS	
SPECIFICATION	DESCRIPTION
Image Sensor Model	Six (6) Sony <a href="#">LCX274</a> 1/1.8" progressive scan color CCDs (five in horizontal ring, one on top)
Maximum Resolution	1600(H) x 1200(V) (each sensor)
Shutter Type	Global Shutter
A/D Converter	Analog Devices 12-bit ADC
Video Data Output	8-bit raw Bayer (color) digital data
Digital Interface	9-pin 1394b (FireWire) 800Mb/s interface for camera control, power and video data, locking screws guarantee secure connection
Max Frame Rates	15 FPS JPEG compressed, 6.5 FPS uncompressed
Partial Image Modes	region of interest modes via Format_7, programmable via software
Optics	six (6) high quality 3.3 mm focal length microlenses
GPIO Port	8-pin GPIO connector for external trigger, strobe, serial port or external power
Camera Settings Control	shutter, gain, white balance, gamma and JPEG compression, are programmable via software
Voltage Requirements	8-30V via the IEEE-1394b interface
Power consumption	7.2 W at 12V
Case Material	Machined aluminum housing, anodized red
Case Type	Single unit, water resistant
Dimensions	122 mm x 141 mm
Mass	2416 grams (head unit)
Camera Specification	IICD 1394-based Digital Camera Specification v1.31
Emissions Compliance	complies with CE rules and Part 15 Class A of FCC rules
Operating Temperature	0° to 45°C (-30° - 60°C storage)

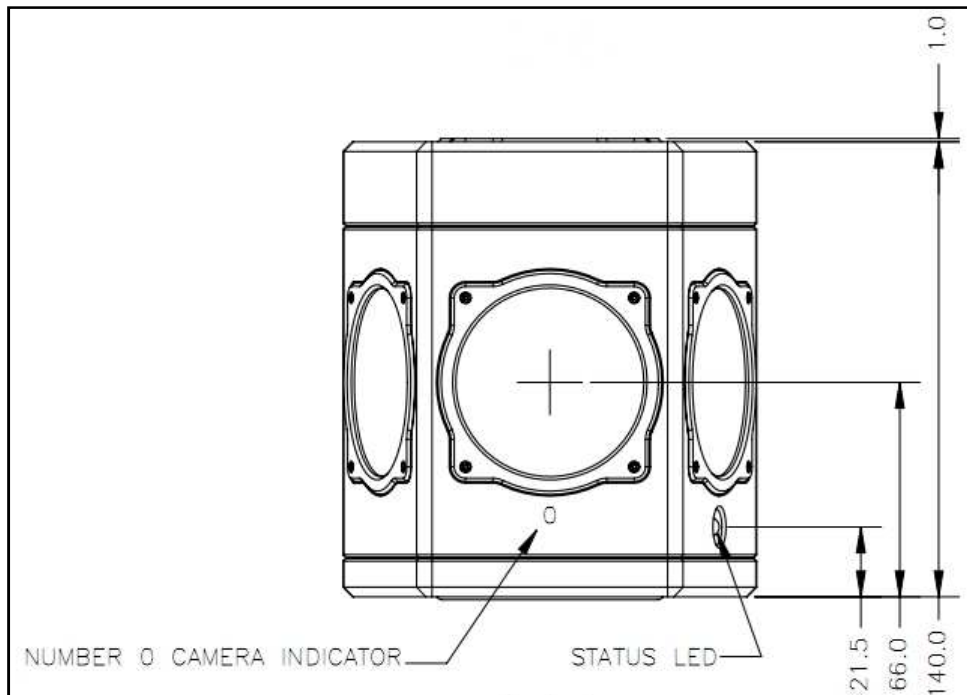
ภาพที่ 2-9 ข้อมูลจำเพาะของกล้อง Ladybug 3 (Point Grey Research, 2008a)

โดยขนาดของด้านต่างๆ ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา Ladybug 3 จะมีขนาดดังนี้  
 ด้านบน จะประกอบด้วย กล้องหมายเลข 5 ที่จะทำหน้าที่บันทึกภาพด้านบน (ภาพที่ 2-10)



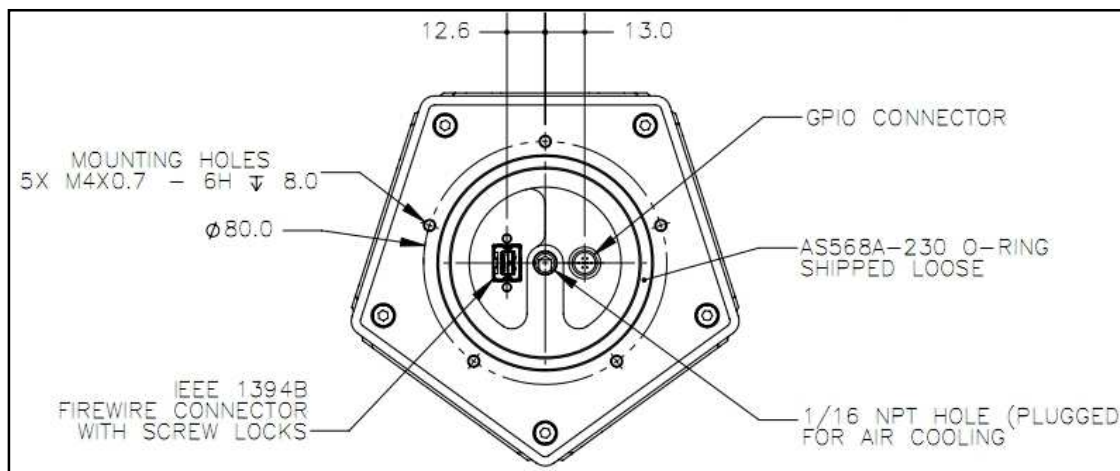
ภาพที่ 2-10 รายละเอียดของกล้อง Ladybug 3 ด้านบน (Point Grey Research, 2008a)

ด้านข้าง จะประกอบด้วย กล้องหมายเลข 0 - 4 ที่เก็บภาพด้านข้างโดยกล้อง 0 จะมีหมายเลข 0 กำกับไว้ ส่วนกล้องหมายเลขอื่นๆ จะวนไปทางขวามือ และมีไฟแสดงสถานะของกล้องว่าพร้อมใช้งานหรือไม่ อยู่ใต้กล้องหมายเลข 4 (ภาพที่ 2-11)



ภาพที่ 2-11 รายละเอียดของกล้อง Ladybug 3 ด้านข้าง (Point Grey Research, 2008a)

ด้านล่างจะมีขั้วสำหรับต่อสายข้อมูลในรูปแบบต่างๆสำหรับส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ (ภาพที่ 2-12)



ภาพที่ 2-12 รายละเอียดของกล้อง Ladybug 3 ด้านล่าง (Point Grey Research, 2008a)

ภายในของกล้อง Ladybug 3 จะประกอบด้วย กล้อง 5 กล้องสำหรับถ่ายภาพรอบตัวในแนวนอน และอีก 1 กล้อง สำหรับถ่ายภาพแนวตั้งบน โดยในแต่ละกล้องจะมีเซนเซอร์รับภาพแบบ CCD Sony รุ่น ICX274AQ ซึ่งมีขนาด  $1/1.8$  นิ้ว สามารถถ่ายภาพได้ที่  $1600 \times 1200$  จุดภาพ ขนาดจุดภาพ 4.4 ไมโครเมตร และเลนส์ทางยาวโฟกัส 3.3 มิลลิเมตร ทำให้สามารถคำนวณขอบเขตภาพ (Field of view,  $\Omega$ ) ของแต่ละกล้องได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \Omega = 2 \cdot \arctan\left(\frac{S}{2 \cdot f}\right) \quad \dots\dots\dots(\text{สมการ 2-1})$$

โดยที่ S = ขนาดเซนเซอร์, f = ระยะโฟกัส

$$\text{จะได้ว่า} \quad \text{ขอบเขตภาพทางราบ} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{1200 \times (4.4 \times 10^{-3})}{2 \times 3.3}\right) \\ = 77.32^\circ$$

เพราะฉะนั้น ในส่วนของภาพในแต่ละกล้องจะมีส่วนซ้อนกันประมาณ

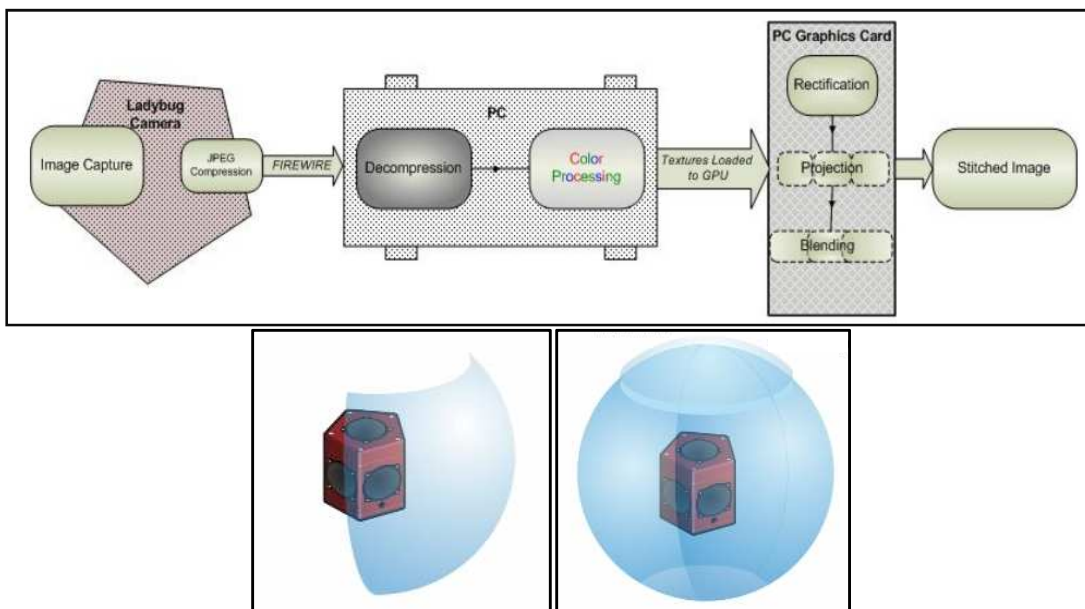
$$= 77.32^\circ - \left(\frac{360^\circ}{5}\right) \\ = 5.32^\circ$$

ภาพหนึ่งภาพ มีขนาด  $5400 \times 2700$  จุดภาพ และมีมุมรับภาพ  $360 \times 180$  องศา เพราะฉะนั้นหนึ่งจุดภาพ จะมีมุมรับภาพ  $= \frac{360 \times 60}{5400} = 4$  ลิปดา หรือหนึ่งองศา จะมีขนาด  $= \frac{5400}{360} = 15$  จุดภาพ

การทำงานของกล้อง Ladybug 3 จะถูกควบคุมและสั่งการผ่านโปรแกรม Ladybug SDK (ภาคผนวก ข) และข้อมูลภาพพานอรามาที่ได้ออกมา จะมีอยู่หลายลักษณะ เช่น ภาพถ่ายจากกล้องแต่ละกล้อง ภาพพานอรามาในระบบ Equirectangular ภาพพานอรามาในระบบ Spherical เป็นต้น

ลำดับการประมวลผลภาพ สำหรับกล้อง Ladybug 3 จะเริ่มจากการถ่ายภาพหนึ่ง จากนั้นจะมีการบีบอัดภาพให้อยู่ในรูปแบบของ JPEG (Joint Photographic Experts Group) สองขั้นตอนนี้จะมีการประมวลผลภายในตัวกล้อง Ladybug 3 ก่อนที่จะส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อที่จะทำ

การคลายข้อมูล และทำการประมวลผลทางด้านสี การ์ดประมวลผลด้านกราฟิกของเครื่องคอมพิวเตอร์ จะทำการแก้ความเพี้ยนของเลนส์ของภาพ ที่ได้จากกล้องต่างๆ นำภาพมาจัดวางเพื่อความเหมาะสมกับการฉายในรูปแบบต่างๆ และผสานภาพให้เสมือนเป็นภาพเดียวกัน (Point Grey Research, 2008b) สุดท้าย ผลลัพธ์ที่ได้ออกมา คือภาพที่ผสานกันและเป็นภาพในมุม 360 องศาในแนวราบและ 180 องศาในแนวตั้ง ดังภาพที่ 2-13 และภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-13 ก) ขั้นตอนการประมวลผลภาพของกล้อง Ladybug 3  
 ข) ลักษณะการถ่ายภาพของกล้อง Ladybug 3 (Point Grey Research, 2008b)



ภาพที่ 2-14 ตัวอย่างภาพที่ได้จากกล้อง Ladybug 3 ในระบบ Equirectangular

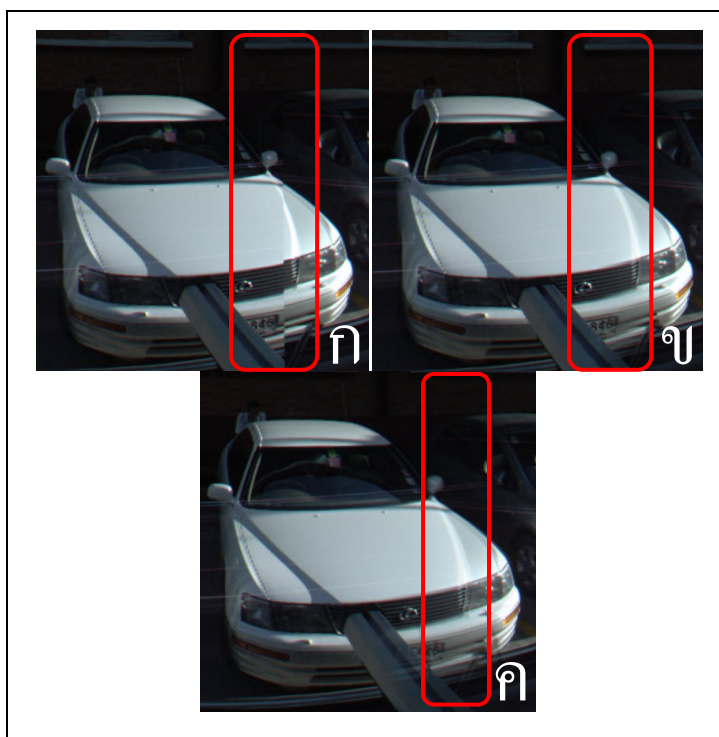
ในการเชื่อมต่อภาพจากแต่ละกล้อง จะมีข้อจำกัดอยู่บ้าง คือการเกิดส่วนซ้อนของภาพ ซึ่งเกิดจากการที่ภาพนอกรามาที่ได้ ไม่ได้เป็นการถ่ายภาพจากจุดเปิดถ่ายเดียวกัน แต่จะถ่ายจากจุดเปิดถ่ายที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ในบางครั้งจะเกิดการซ้อนทับที่ไม่สนิทของภาพที่ได้จากกล้องสอง

กล้อง เรียกว่า แพรริลแลกซ์ (Parallax) และข้อจำกัดอีกประการหนึ่งก็คือ ระยะห่างจากกล้องไปยังวัตถุใกล้หรือไกลเกินไป จะทำให้เกิดการซ้อนกันของภาพในขั้นตอนการนำภาพมาจัดวางเพื่อผสานภาพ ซึ่งในปัจจุบันระยะวัดสอบของกล้อง Ladybug 3 ที่ทางผู้ผลิตได้มีการวัดสอบไว้คือ ระยะ 20 เมตร ซึ่งถ้าระยะทางไม่ใช่ 20 เมตร จะเกิดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนการเชื่อมต่อภาพตามความสัมพันธ์ (Point Grey Research, 2008b)

$$stitching\_error = \left| \frac{1}{Z} - \frac{1}{Z_c} \right| \cdot K \quad \dots\dots\dots(สมการ 2-2)$$

โดยที่ stitching\_error = ความคลาดเคลื่อน หน่วยเป็นจุดภาพ  
 Z = ระยะทางจากกล้องถึงวัตถุ  
 Z<sub>c</sub> = ระยะทางที่มีการวัดสอบ  
 K = ค่าคงที่ที่กำหนดจากระยะระหว่างเลนส์ ระยะโฟกัส และ จำนวนจุดภาพของเซนเซอร์ ซึ่งกล้อง Ladybug 3 มีค่า K ประมาณ 45

การแก้ไขปัญหาการซ้อนทับของภาพ จะทำได้โดยการเพิ่มระยะที่ใช้ผสานภาพ ซึ่งจะทำให้ส่วนซ้อนของภาพนั้น กลมกลืนกันมากขึ้นดังตัวอย่างภาพที่ 2-15



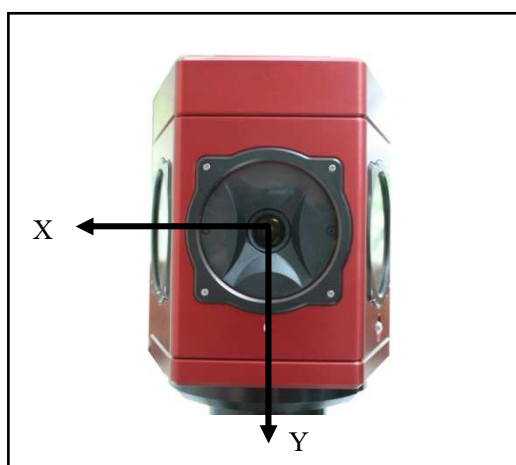
ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างการเพิ่มระยะผสานภาพ เพื่อให้ภาพกลมกลืนกันมากขึ้น  
 ก) ระยะผสาน 1 จุดภาพ ข) ระยะผสาน 40 จุดภาพ ค) ระยะผสาน 100 จุดภาพ

### 2.3 เรขาคณิตของกล้องพานอรามา

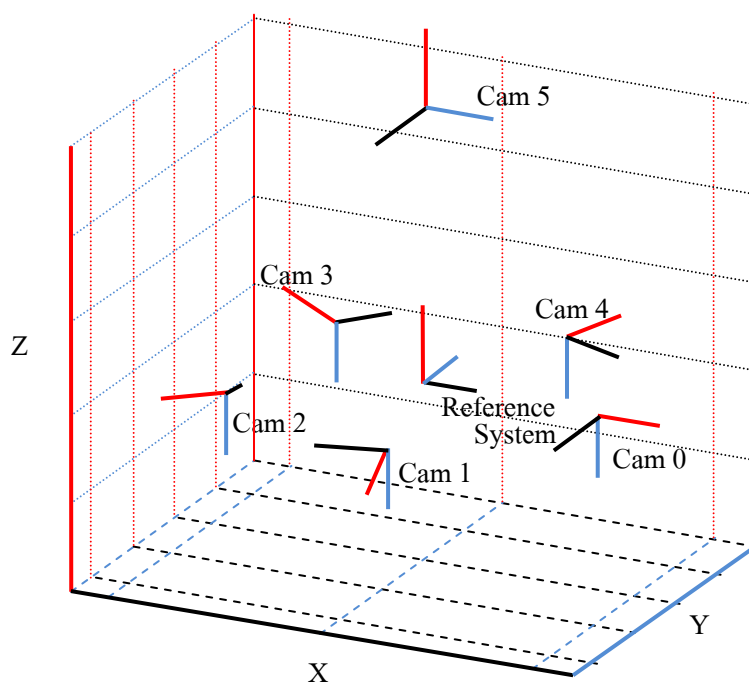
กล้องถ่ายภาพโดยทั่วไปนั้น จะมีเรขาคณิตตามลักษณะของกล้องรูเข็มกล่าวคือ เมื่อแสงฉายตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าฉากรับภาพ เช่น เซอร์รับภาพของกล้อง ก็จะบันทึกภาพไว้

สำหรับกล้อง Ladybug 3 จะมีกล้องถ่ายภาพทั้งหมด 6 กล้อง คิดตั้งให้กลายเป็นระบบเดียวกัน ทำให้ภาพที่ได้ก่อนที่จะนำมาผสานกันจากกล้องแต่ละตัว จะมีแกนอ้างอิงพิกัดภาพแยกจากกัน ดังนี้ (ภาพที่ 2-16 และภาพที่ 2-17)

- แกน X หันไปทางขวาของเซนเซอร์
- แกน Y มีทิศชี้ลงด้านล่างของเซนเซอร์
- แกน Z ชี้ออกจากเซนเซอร์ของกล้อง



ภาพที่ 2-16 แกนอ้างอิงของกล้อง Ladybug 3

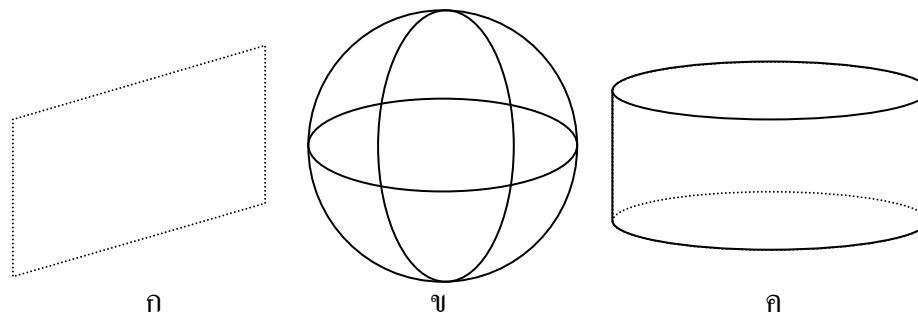


ภาพที่ 2-17 ระบบแกนอ้างอิงของกล้อง Ladybug 3



ชุดภาพที่บันทึกหรือประมวลผล ที่ได้จากระบบกล้องถ่ายภาพพานอรามา มีด้วยกันสามระบบคือ (ภาพที่ 2-18)

- พิกัดภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular
- พิกัดภาพพานอรามา ระบบ Spherical
- พิกัดภาพพานอรามา ระบบ Cylindrical

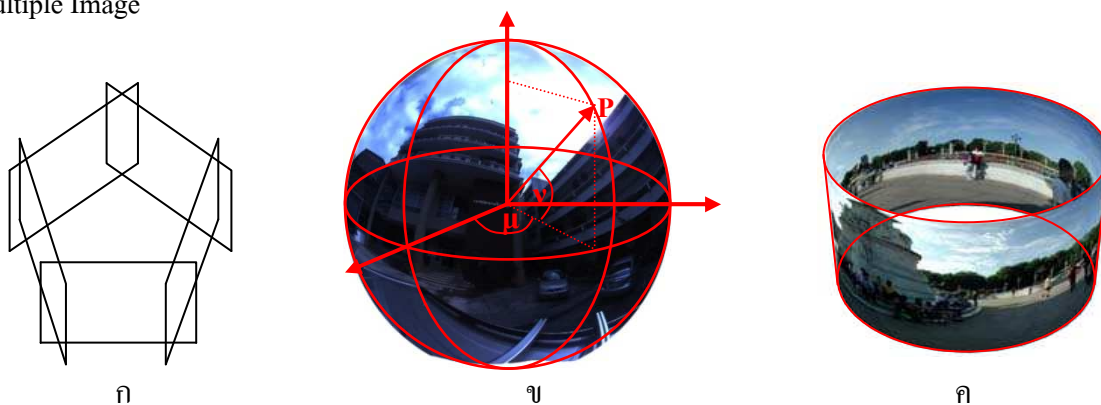


ภาพที่ 2-18 พิกัดภาพพานอรามา ระบบ ก) Equirectangular ข) Spherical ค) Cylindrical

(Huang, et al., 2008)

Multiple Image เป็นภาพในระนาบราบ หลากๆภาพประกอบกัน (ภาพที่ 2-19 ก) โดยแต่ละระนาบ จะทำมุมเท่ากัน จนครบ 360 องศา ซึ่งในแต่ละภาพจะต้องมีส่วนซ้อนทับกัน เพื่อที่จะสามารถต่อกันเป็นภาพพานอรามาได้ การอ้างอิงจุดต่างๆในระนาบภาพ ก็จะอ้างอิงตาม  $(x_p, y_p)$  ของแต่ละภาพ

Panorama Image เป็นภาพพานอรามาในรูปแบบของทรงกลม (ภาพที่ 2-19 ข) ทรงกระบอก (ภาพที่ 2-19 ค) หรือระนาบราบในส่วนของทรงกลม การอ้างอิงจุดต่างๆก็จะอยู่ในรูปของมุมราบที่หมุนไปจากจุดเริ่มต้น มุมตั้งที่หมุนออกจากแนวราบ และระยะจากจุดศูนย์กลาง หรือ  $(\mu, \nu, r)$  และทรงกระบอกการอ้างอิงจะอยู่ในลักษณะ มุมราบที่หมุนไปจากจุดเริ่มต้น กับความสูงของทรงกระบอก หรือ  $(\mu, h)$  ในส่วนระนาบราบ การอ้างอิงจะอยู่ในรูป  $(x_p, y_p)$  เช่นเดียวกับแบบ Multiple Image

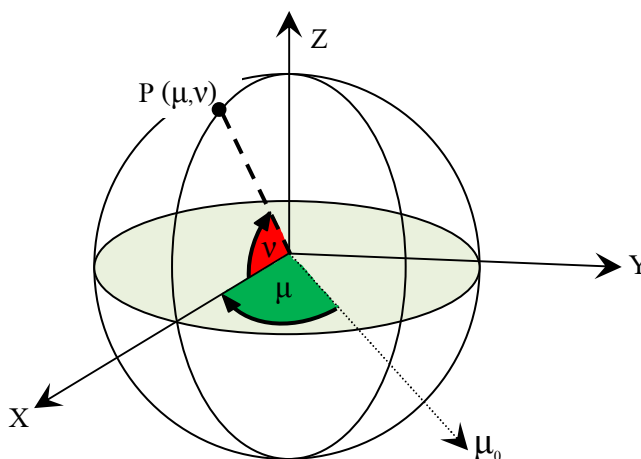


ภาพที่ 2-19 ภาพในรูปแบบ ก) Multiple Image ข) Panorama Image ค) Panorama Image

สำหรับภาพของกล้องทั้ง 6 กล้องในกล้อง Ladybug 3 ที่ได้จากโปรแกรม Ladybug SDK จะมีด้วยกัน 2 รูปแบบคือ

### 2.3.1 Spherical coordinate system

เรียกว่า ระบบพิกัดทรงกลม ในการกำหนดตำแหน่งด้วยระบบพิกัดทรงกลม จะแสดงพิกัดโดยใช้ระบบพิกัดเชิงขั้ว คือใช้ปริมาณ 3 ปริมาณ ประกอบด้วย มุมสองมุม ได้แก่  $\mu$  (MU) และ  $\nu$  (NU) โดย  $\mu$  จะเป็นมุมราบ ที่ทำกับเส้นอ้างอิง ( $\mu_0$ ) โดยหากกวาดตามเข็มนาฬิกาจะมีขนาดเป็น 0 ถึง 180 องศา และถ้ากวาดทวนเข็มนาฬิกาจะมีขนาดเป็น 0 ถึง -180 องศา และ  $\nu$  จะเป็นมุมในแนวตั้ง มีขนาด -90 ถึง 90 องศา หากมุมมีทิศขึ้นจากแนวราบจะมีค่าเป็นบวก และในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นมุมที่มีทิศทางลง จะมีค่าเป็นลบ และระยะทางหนึ่งระยะ ได้แก่  $r$  แต่ทุกจุดบนผิวทรงกลมเมื่อระบุตำแหน่งด้วยพิกัดเชิงขั้ว จะมี  $r$  คงที่เสมอ โดยจะเท่ากับรัศมีทรงกลมที่ใช้ ดังนั้น อาจละค่า  $r$  ไว้ในฐานะที่เข้าใจกัน การบอกตำแหน่งบนทรงกลมในระบบพิกัดเชิงขั้ว จึงลดลงเหลือเพียงปริมาณทางมุมสองปริมาณ คือ  $\mu$  และ  $\nu$  (ภาพที่ 2-20 และภาพที่ 2-21) โปรแกรมที่สามารถวัดพิกัดภาพพานอรามาในระบบนี้ได้ เช่น krpano เป็นต้น



ภาพที่ 2-20 การอ้างอิงพิกัดภาพระบบพิกัดทรงกลม



ภาพที่ 2-21 ตัวอย่างภาพในระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลม

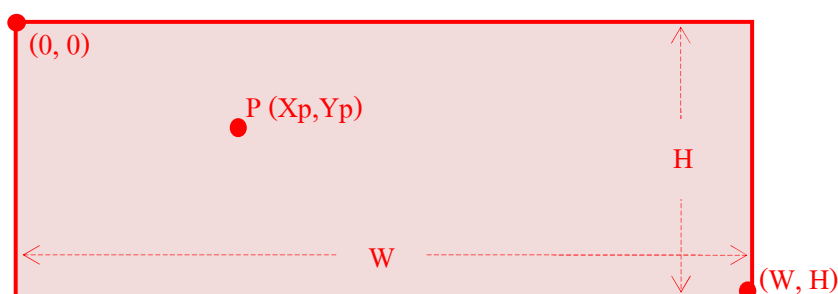
### 2.3.2 Equirectangular coordinate system

เป็นระบบพิกัดที่มีลักษณะเป็นระนาบราบ ได้จากการฉายด้วยแผนที่ (Map projection) แบบ Equirectangular projection หรือ Equidistant Cylindrical projection เป็นการฉายแผนที่ที่มีคุณลักษณะแบบระยะทาง หมายความว่า การฉายแผนที่ชนิดนี้ไม่ก่อให้เกิดการยืดหดตัวของระยะทาง สมการของการฉายแผนที่ในลักษณะนี้จะเป็น

$$x = \mu - \mu_0 \quad \text{.....(สมการที่ 2-3)}$$

$$y = v \quad \text{.....(สมการที่ 2-4)}$$

การแสดงพิกัดในระบบพิกัดภาพพานอรามาจะแสดงเป็นจุดภาพที่ตำแหน่งต่างๆ โดยเริ่มจากมุมซ้ายบน จะเป็นคู่ลำดับ (0, 0) และสำหรับกล้อง Ladybug 3 ที่มีขนาดภาพ 5400 x 2700 จุดภาพ เพราะฉะนั้นมุมขวาล่างจะเป็นคู่ลำดับ (5400, 2700) (ภาพที่ 2-22 และ ภาพที่ 2-23) สิ่งที่สำคัญของระบบพิกัดภาพพานอรามา ลักษณะนี้คือ อัตราส่วนระหว่าง ความกว้าง: ความยาวของภาพ จะเป็น 1:2 เสมอ โปรแกรมที่สามารถวัด พิกัดภาพพานอรามาในระบบนี้ได้ เช่น OpenEV เป็นต้น



ภาพที่ 2-22 การอ้างอิงพิกัดภาพระบบ Equirectangular



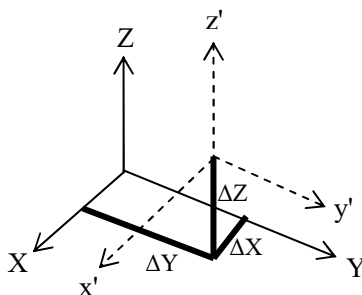
ภาพที่ 2-23 ตัวอย่างภาพในระบบพิกัด Equirectangular

## 2.4 การแปลงค่าพิกัดในสามมิติแบบเฮลเมิร์ต

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดฉากสองระบบ ซึ่งมีพื้นฐานเริ่มจากระบบพิกัดฉากในสามมิติ ซึ่งประกอบด้วยแกน X แกน Y และ แกน Z การแปลงค่าพิกัดในสามมิติแบบเฮลเมิร์ต (Helmert Transformation) เป็นการแปลงค่าพิกัดที่มีพารามิเตอร์ทั้งหมดเจ็ดพารามิเตอร์ ประกอบด้วย  $X_0$   $Y_0$   $Z_0$  เป็นพารามิเตอร์ของการย้ายศูนย์กลางกำเนิด  $\omega$   $\phi$   $\kappa$  เป็นพารามิเตอร์การหมุนของแกนต่างๆ และ  $m$  เป็นพารามิเตอร์ของการมีมาตราส่วนที่ต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้

### 2.4.1 ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กลางกำเนิด

ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กลางกำเนิด ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดในสามมิติ คือการที่แกนทั้งสามของระบบพิกัดขนานกัน แต่มีศูนย์กลางกำเนิดต่างกันเป็นระยะชัดทางแกน X Y และ Z เป็น  $\Delta X$   $\Delta Y$  และ  $\Delta Z$  ตามลำดับ ดังภาพที่ 2-24



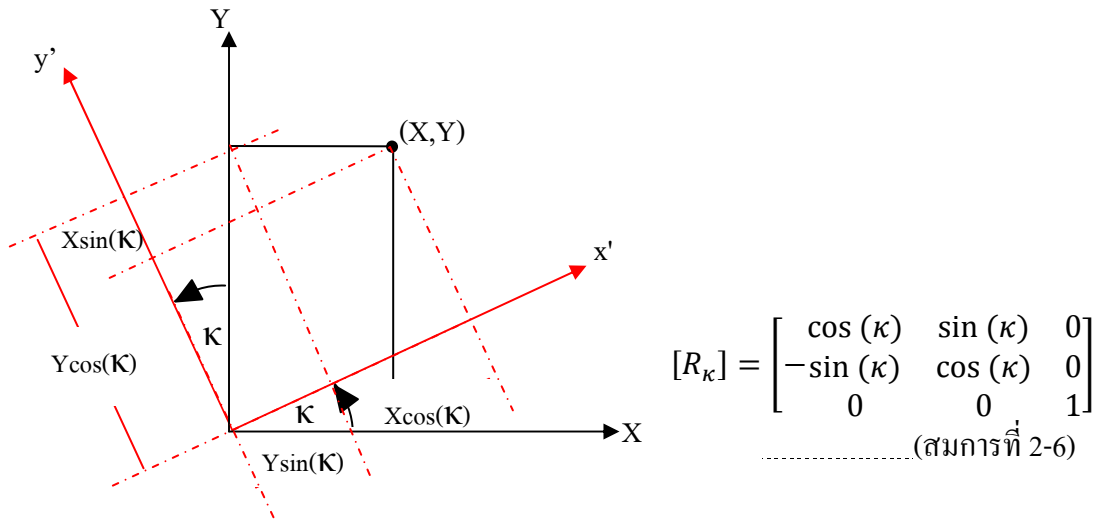
ภาพที่ 2-24 ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กลางกำเนิด (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553)

เมื่อเขียนเป็นสมการ จะได้

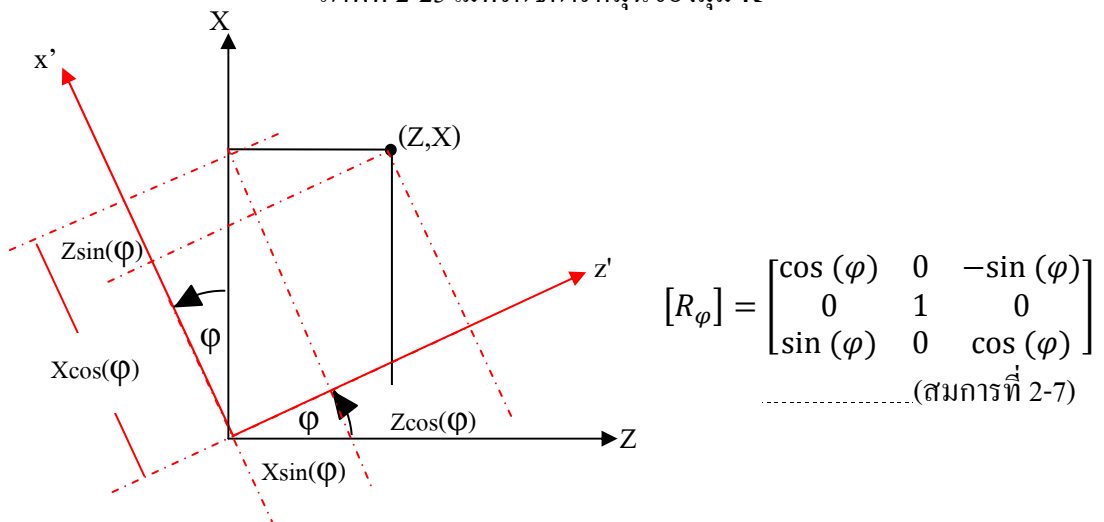
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-5})$$

### 2.4.2 เมทริกซ์การหมุน

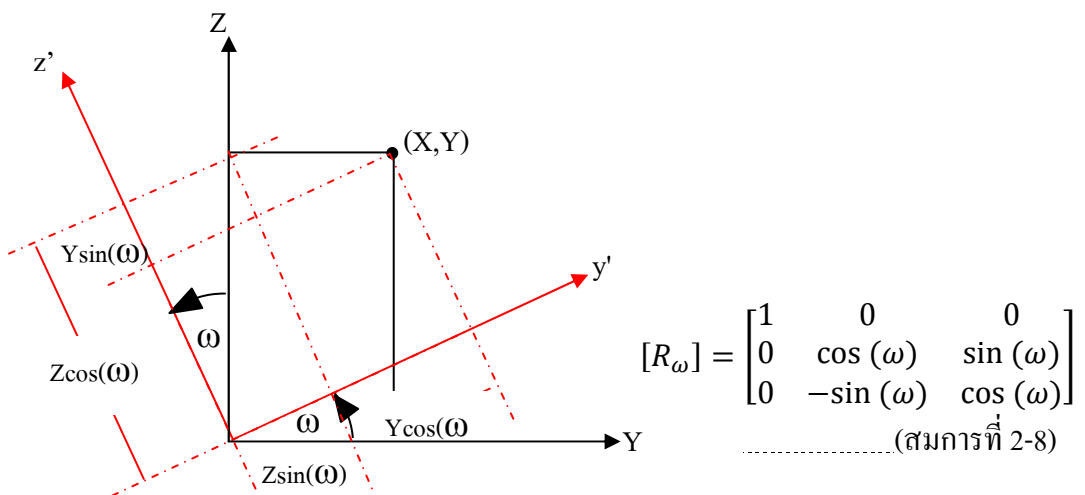
เมทริกซ์การหมุน จะมีด้วยกันทั้งหมด 3 แกน ประกอบด้วย การหมุนในแกน X เรียกว่า  $\omega$  (โอเมกา) การหมุนในแกน Y เรียกว่า  $\phi$  (ฟี) การหมุนในแกน Z เรียกว่า  $\kappa$  (แคปป์) ซึ่งเมทริกซ์การหมุนในแกนต่างๆจะมีขนาดดังนี้ (ภาพที่ 2-25, ภาพที่ 2-26 และ ภาพที่ 2-27)



ภาพที่ 2-25 เมทริกซ์การหมุนของมุม  $\kappa$



ภาพที่ 2-26 เมทริกซ์การหมุนของมุม  $\varphi$



ภาพที่ 2-27 เมทริกซ์การหมุนของมุม  $\omega$

ตามปกติแล้ว ลำดับการหมุนจะเรียงไปตามแกน X Y Z ซึ่งก็คือ  $\omega$   $\varphi$  และ  $\kappa$  แต่ถ้าในกรณีที่ลำดับการหมุนลำดับที่สองมีค่าใกล้เคียง 90 องศา จะสามารถเปลี่ยนลำดับการหมุนระหว่างการหมุนลำดับที่หนึ่งกับที่สองได้ ซึ่งจะกลายเป็น  $\varphi$   $\omega$   $\kappa$  สาเหตุเพราะแกน  $x'$  ของภาพ จะขนานกับแกน X ของวัตถุ ส่วนแกน  $y'$  กับ  $z'$  ของภาพ จะขนานกับแกน Z และแกน Y ของวัตถุตามลำดับ ซึ่งจะต่างจากภาพถ่ายทางอากาศที่ระบบแกนทั้งสามจะตรงกัน (วิชา จีวาลัย และ ปรีชา ถิระวัฒนาสวัสดิ์, 2523) กรรมวิธีนี้ นิยมใช้ในการสำรวจระยะใกล้ หรือ Close Range Photogrammetry หรือเมื่อแนวเล็งของกล้องมีค่าเกือบจะเป็นแนวราบ (Luhmann, et al., 2006) ซึ่งจะได้เมทริกซ์การหมุนดังนี้

$$[R_{\varphi\omega\kappa}] = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\varphi) \sin(\omega) \sin(\kappa) & \cos(\omega) \sin(\kappa) & \cos(\varphi) \sin(\omega) \sin(\kappa) - \sin(\varphi) \cos(\kappa) \\ \sin(\varphi) \sin(\omega) \cos(\kappa) - \cos(\varphi) \sin(\kappa) & \cos(\omega) \cos(\kappa) & \sin(\varphi) \sin(\kappa) + \cos(\varphi) \sin(\omega) \cos(\kappa) \\ \sin(\varphi) \cos(\omega) & -\sin(\omega) & \cos(\varphi) \cos(\omega) \end{bmatrix}$$

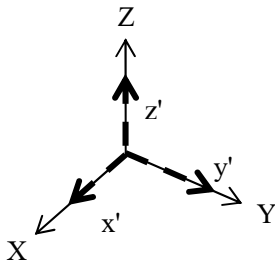
$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{สมการที่ 2-9})$$

โดยที่

$$\begin{aligned} R_{11} &= \cos(\varphi) \cos(\kappa) + \sin(\varphi) \sin(\omega) \sin(\kappa) \\ R_{12} &= \cos(\omega) \sin(\kappa) \\ R_{13} &= \cos(\varphi) \sin(\omega) \sin(\kappa) - \sin(\varphi) \cos(\kappa) \\ R_{21} &= \sin(\varphi) \sin(\omega) \cos(\kappa) - \cos(\varphi) \sin(\kappa) \\ R_{22} &= \cos(\omega) \cos(\kappa) \\ R_{23} &= \sin(\varphi) \sin(\kappa) + \cos(\varphi) \sin(\omega) \cos(\kappa) \\ R_{31} &= \sin(\varphi) \cos(\omega) \\ R_{32} &= -\sin(\omega) \\ R_{33} &= \cos(\varphi) \cos(\omega) \end{aligned}$$

**2.4.3 ความสัมพันธ์ในการมีมาตราส่วน**

เมื่อมาตราส่วนระหว่างแกนต่างๆไม่เท่ากัน แต่มีศูนย์กำเนิดเดียวกัน ทำให้ค่าพิกัดของจุดใดๆที่กำลังพิจารณามีค่าพิกัดไม่เท่ากัน ความสัมพันธ์ในการมีมาตราส่วนโดยทั่วไป จะให้เป็นมาตราส่วนเดียวกันทั้งระบบ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-28 ความสัมพันธ์ในการมีมาตราส่วน (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553)

เพื่อเสถียรภาพในแง่ของการคำนวณ นิยมให้มาตราส่วนอยู่ในรูปของ Scale Factor  $m$  โดยที่  $m \rightarrow 0$  เมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (1 + m) \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-10})$$

เมื่อรวมความสัมพันธ์ในการแปลงระบบพิกัดในสามมิติที่ประกอบด้วยความอิสระในการเคลื่อนย้ายศูนย์กลางกำเนิดในทั้งสามแกน การทำมุมกันรอบแกนทั้งสามมุมรอบแกนหมุน การมีมาตราส่วน นั่นคือ จะมีพารามิเตอร์ 7 พารามิเตอร์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$X = X_0 + mRx$$

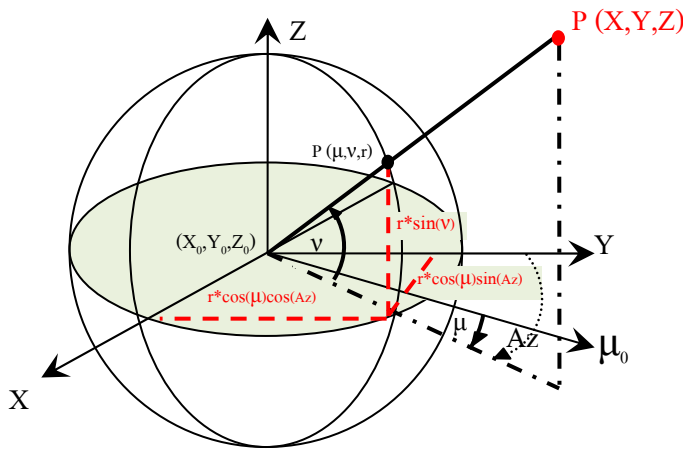
หรือ \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-11})

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1 + m) \cdot [R_{\phi\omega\kappa}] \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

การแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ดพารามิเตอร์นี้เรียกว่า การแปลงค่าพิกัดในสามมิติแบบเฮลเมิร์ต (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2553)

### 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับพิกัดวัตถุ ในกรณีที่กำลังถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง

พิกัดในสามมิติของวัตถุ P (X,Y,Z) ใดๆ ที่ปรากฏบนภาพพานอรามา สามารถหาความสัมพันธ์ไปปรากฏเป็นพิกัดภาพ P (μ,ν) บนภาพพานอรามาได้โดยง่าย หากว่าภาพพานอรามาเป็นภาพที่อยู่ในแนวตั้ง ทิศทางการวางตัวของกล้องหันไปทางทิศเหนือ หากทราบระยะทางจากศูนย์กลางการฉายไปยังวัตถุ (r) แล้ว จะสามารถคำนวณค่าพิกัดและระดับของวัตถุได้ ทั้งนี้ทำให้ผู้รังวัดมีความสะดวกที่สามารถรังวัดได้บนภาพถ่ายเดี่ยว (Single Panorama Resection) (ภาพที่ 2-29)



ภาพที่ 2-29 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับพิกัดวัตถุ ในกรณีที่กำลังถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง

จากภาพที่ 2-29 กำหนดให้  $(x_0, y_0, z_0)$  เป็นพิกัดวัตถุของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา และ  $Az = \mu_0 + \mu$  จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง พิกัดภาพพานอรามา กับพิกัดวัตถุในกรณีทีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้งดังนี้

พิกัดภาพพานอรามาสู่พิกัดวัตถุในกรณีทีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง

$$X = r \cdot \cos(v) \cdot \sin(Az) + X_0 \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-12})$$

$$Y = r \cdot \cos(v) \cdot \cos(Az) + Y_0 \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-13})$$

$$Z = r \cdot \sin(v) + Z_0 \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-14})$$

พิกัดวัตถุสู่พิกัดภาพพานอรามาในกรณีทีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง

$$r = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-15})$$

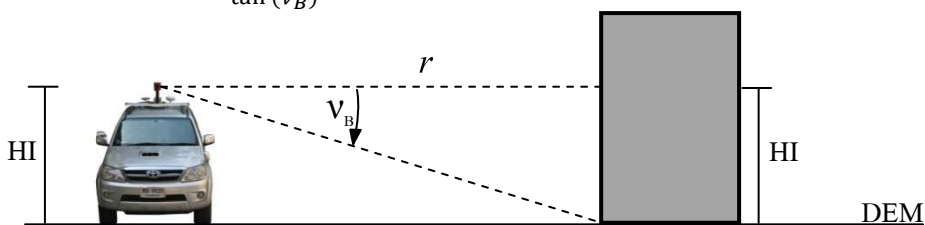
$$Az = \tan^{-1} \left[ \frac{(X - X_0)}{(Y - Y_0)} \right] \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-16})$$

$$v = \sin^{-1} \left[ \frac{(Z - Z_0)}{r} \right] \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-17})$$

## 2.6 การประยุกต์ใช้การรังวัดในภาพพานอรามาภาพเดียวในการหาตำแหน่งวัตถุ กรณีทีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง

ภาพพานอรามา สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งของวัตถุใดๆ จากการวัดพิกัดภาพ P ( $\mu, v$ ) ในระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลมได้ หากกำหนดให้ระบบอยู่บนพื้นราบ ทราบความสูงของกล้อง (HI) ทำการวัดพิกัดภาพพานอรามาไปยังฐานของอาคาร โดยหากวัดจากภาพพานอรามาในระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลมจะได้มุมกด ( $v_B$ ) แต่ถ้าวัดจากพิกัดภาพพานอรามาในระบบพิกัด Equirectangular จะต้องทำการแปลงพิกัดให้อยู่ในระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลมก่อน แล้วเมื่อได้มุมกด จะทำให้สามารถคำนวณหาระยะห่างจากจุดเปิดถ่ายภาพไปยังระนาบวัตถุ (r) ได้ ดังนี้ (ภาพที่ 2-30)

$$r = \frac{HI}{\tan(v_B)} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-17})$$



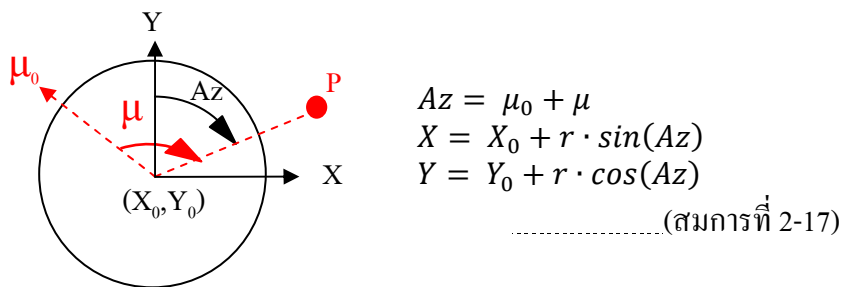
ภาพที่ 2-30 การหาระยะห่างจากจุดเปิดถ่ายภาพไปยังระนาบวัตถุ



เมื่อทราบระยะห่างจากจุดเปิดถ่ายภาพไปยังระนาบวัตถุ จะสามารถหาค่าพิกัดทางราบ หรือ วัตถุขนาดวัตถุได้ ดังนี้

**2.6.1 การรังวัดพิกัดทางราบของวัตถุ**

จะได้จากการรังวัดมุมราบอ้างอิงจากมุม  $\mu_0$  ของกล้องพานอรามา ทำให้ได้ค่าแอสิมัทของจุด P (X,Y) ที่ต้องการดังนี้ (ภาพที่ 2-31)



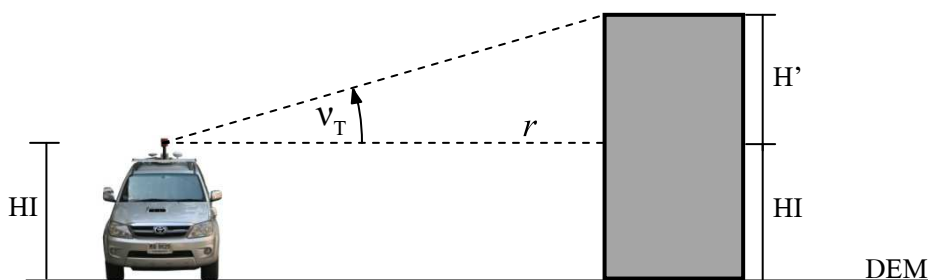
ภาพที่ 2-31 การรังวัดพิกัดทางราบของวัตถุ

**2.6.2 การหาความสูงวัตถุ**

ทำการรังวัดพิกัดภาพพานอรามาไปยังยอดอาคารหรือจุดใดๆในแนวตั้ง จะได้มุมเปิด ( $V_T$ ) และจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (ภาพที่ 2-32)

$H' = r \cdot \tan(V_T)$  .....(สมการที่ 2-18)

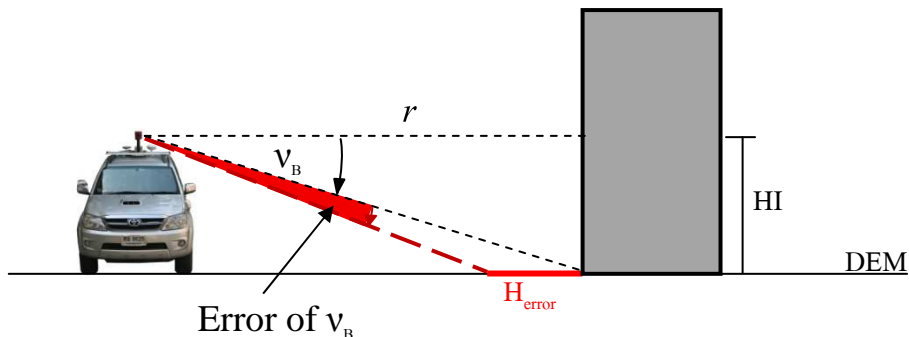
$H = HI + H'$  .....(สมการที่ 2-19)



ภาพที่ 2-32 การหาความสูงของวัตถุ

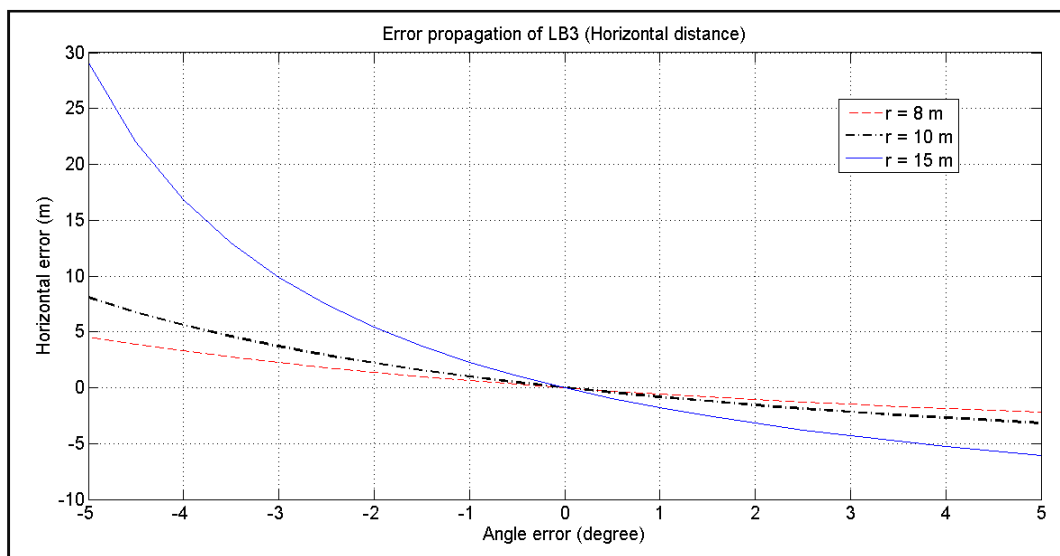
2.6.3 การประมาณความคลาดเคลื่อนของระยะราบและระยะตั้ง

การเกิดความคลาดเคลื่อนทั้งทางราบ และทางตั้ง ถ้ามีการวัดมุมกดที่คลาดเคลื่อน หรือเกิดการเอียงของกล้องในขณะที่เก็บข้อมูลดังภาพที่ 2-33



ภาพที่ 2-33 ความคลาดเคลื่อนของระยะราบ

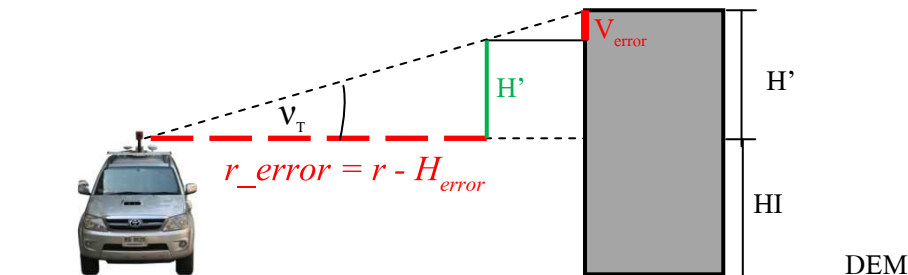
ความคลาดเคลื่อนทางราบ จะมีผลกระทบกับระยะทางราบที่วัดได้ ถ้า  $v_B$  มากกว่าค่าจริง จะทำให้ระยะทางที่วัดได้ น้อยกว่าที่ควรจะเป็น ในทางกลับกัน หาก  $v_B$  น้อยกว่าค่าจริง ระยะทางจะมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งจะเป็นไปตามภาพที่ 2-34



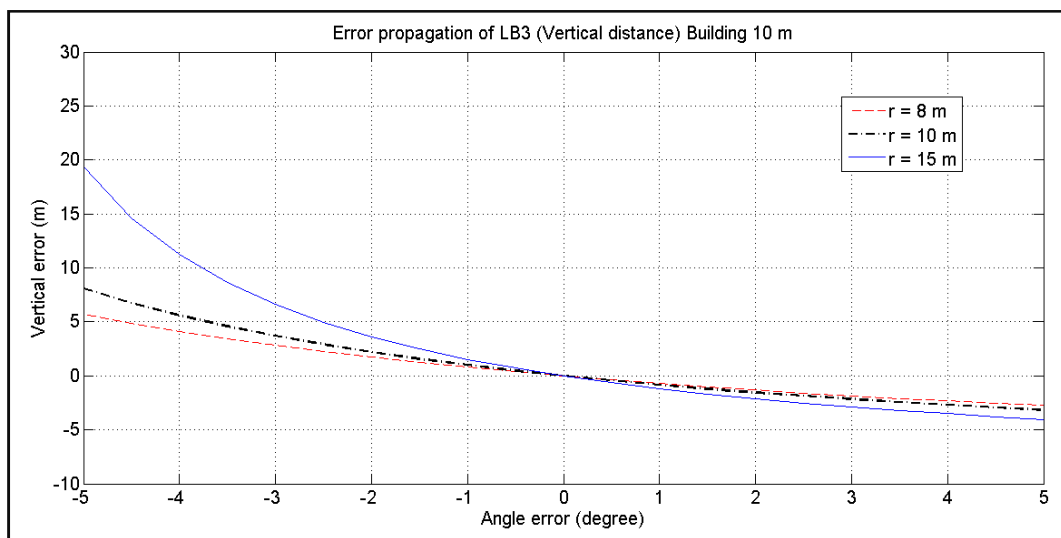
ภาพที่ 2-34 ความคลาดเคลื่อนของระยะราบ

จากภาพที่ 2-34 สีแดงแสดงถึงระยะจากกล้องถึงวัตถุมีค่าเท่ากับ 8 เมตร สีดำมีค่า 10 เมตร และสีน้ำเงินมีค่า 15 เมตร ถ้ามีการวัดมุมที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อน ระยะราบก็จะมี ความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ แต่หากมีการวัดมุมเกินไป 2 องศา ในกรณีระยะห่างจากกล้อง ถึงวัตถุมีค่าเป็น 8 เมตร ระยะราบจะสั้นไปประมาณ ครึ่งเมตร เป็นต้น

ในส่วนระยะดิ่งที่คลาดเคลื่อน จะเป็นผลมาจากการวัดมุมกดที่ผิดพลาด ทำให้คำนวณระยะห่างจากจุดเปิดถ่ายภาพไปยังระนาบวัตถุได้ไม่ถูกต้อง เมื่อนำมาคำนวณหาความสูงของวัตถุ ตามสมการที่ 2-18 จะได้ความสูงที่ไม่ตรงกับความเป็นจริง (ภาพที่ 2-35) โดยหากวัดมุมกด ได้มากกว่าค่าจริง จะทำให้ความสูงของวัตถุที่คำนวณได้น้อยลง และถ้าวัดมุมกดได้น้อยกว่าค่าจริง ความสูงของวัตถุจะเพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2-36



ภาพที่ 2-35 ความคลาดเคลื่อนของระยะดิ่ง



ภาพที่ 2-36 ความคลาดเคลื่อนของระยะดิ่ง

จากภาพที่ 2-36 สีแดงแสดงถึงระยะจากกล้องถึงวัตถุมีค่าเท่ากับ 8 เมตร สีดำมีค่า 10 เมตร และสีน้ำเงินมีค่า 15 เมตร ถ้ามีการวัดมุมที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อน ระยะดิ่ง ก็จะมี ความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ แต่หากมีการวัดมุมเกินไป 2 องศา ในกรณีระยะห่างจากกล้อง ถึงวัตถุมีค่าเป็น 8 เมตร ระยะดิ่งจะลดลงไปประมาณ 0.25 เมตร เป็นต้น

## 2.7 หลักการกำลังสองน้อยที่สุด

เมื่อมีการเก็บข้อมูลที่เกินความต้องการของระบบสมการ ( $n > 0$ ) เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่เป็นตัวแทนหรือเป็นเอกภาพสำหรับข้อมูลชุดนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้

การปรับแก้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด เป็นวิธีการสำหรับปรับแก้ค่ารังวัดที่มีความคลาดเคลื่อนลุ่มอยู่ มีเงื่อนไขที่สำคัญว่า เมื่อนำเศษเหลือของข้อมูลแต่ละตัวมายกกำลังสอง แล้วนำผลยกกำลังสองที่ได้มารวมกัน จะต้องเป็นค่าที่น้อยที่สุด ดังสมการ

$$\phi = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \text{minimum} \quad \text{.....(สมการที่ 2-20)}$$

ในการปรับแก้ด้วยหลักการกำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้ สมการค่ารังวัด (Observation Equation) สมการค่ารังวัดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้กับความคลาดเคลื่อนคงเหลือ และตัวแปรที่ยังไม่รู้ค่า ค่ารังวัดค่าหนึ่งๆ เขียนเป็นสมการค่ารังวัดได้หนึ่งสมการ เพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นเอกภาพ จำนวนสมการจึงจำเป็นต้องเท่ากับจำนวนตัวไม่รู้ค่า ถ้าได้ทำการวัดไว้มากเกินก็หมายความว่าสามารถจะสร้างสมการค่ารังวัดได้มากกว่า ที่ต้องใช้หาคำตอบที่เป็นเอกภาพ ในกรณีเช่นนี้ ค่าควรจะเป็นที่สุดของตัวไม่รู้ค่า สามารถหาได้โดยวิธีการหลักการกำลังสองน้อยที่สุด สำหรับกลุ่มค่ารังวัดที่มีน้ำหนักเท่ากัน สมการสำหรับหาค่าคงเหลือค่าหนึ่งๆ หาได้จากสมการค่ารังวัดแต่ละสมการแล้วยกกำลังสองของค่าคงเหลือและบวกเข้าด้วยกัน เพื่อหาฟังก์ชัน  $\sum_{i=1}^n v_i^2$  ฟังก์ชันนี้ค่าน้อยที่สุดก็ต่อเมื่อผลต่างเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential) เทียบกับตัวไม่รู้ค่าแต่ละตัว จะมีค่าเท่ากับศูนย์ การทำเช่นนี้ทำให้ได้ชุดของสมการชุดหนึ่งเรียกว่า สมการปกติ (Normal Equations) ซึ่งมีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวไม่รู้ค่า เมื่อแก้สมการปกติจะได้ค่าที่ควรจะเป็นที่สุดของตัวไม่รู้ค่า (วิชา จีวาลัย และ ปรีชา ธีระวัฒนาสวัสดิ์, 2523)

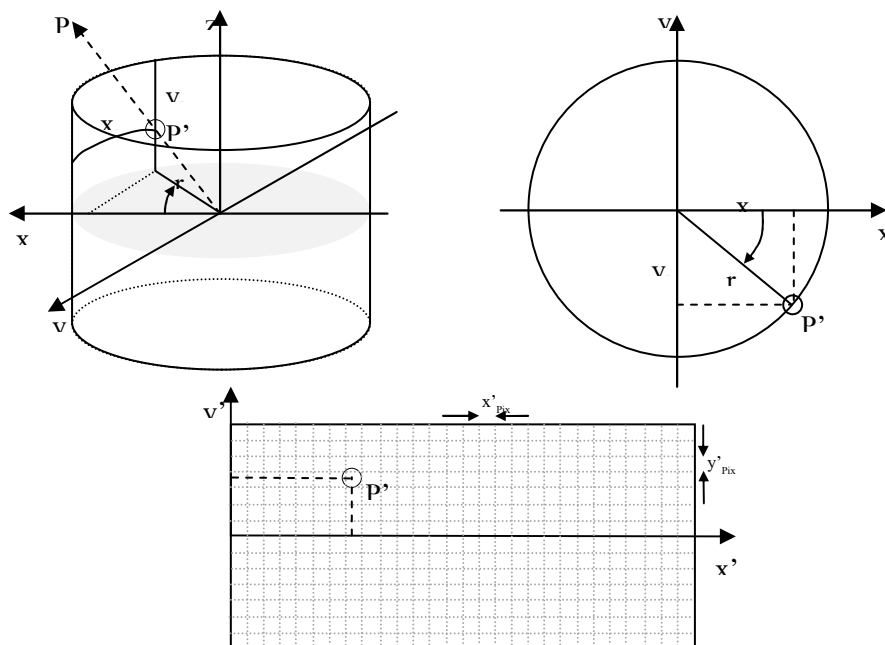
## 2.8 บทความที่เกี่ยวข้อง

T. Luhmann และ W. Tecklenburg (2004) ได้ศึกษาในเรื่องเรขาคณิตของภาพพานอรามาสำหรับพิกัดภาพพานอรามาในรูปแบบทรงกระบอก หรือ Cylindrical coordinates system ซึ่งสามารถคลี่ออกมาเป็นระนาบราบได้ดังภาพที่ 2-37 โดยความสัมพันธ์ของทั้งสองระนาบคือ

$$x'_{pix} = r \cdot \arctan\left(\frac{X_{Cyl}}{Y_{Cyl}}\right) + \Delta x'_{pix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-21})$$

$$y'_{pix} = y_h - Z_{Cyl} \cdot \lambda + \Delta y'_{pix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-22})$$

- โดยที่  $x'_{pix}, y'_{pix}$  = พิกัดภาพบนระนาบราบ
- $y_h$  = ความเคลื่อนในแกนตั้งที่มาจากความเอียงของแกนราบ
- $r$  = รัศมีของทรงกระบอก
- $\Delta x'_{pix}, \Delta y'_{pix}$  = ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนของขนาดจุดภาพที่ได้มาจากการวัดสอบกล้อง
- $X_{Cyl}, Y_{Cyl}, Z_{Cyl}$  = ค่าพิกัดทรงกระบอกที่ได้จากสมการสถานะร่วมเส้น
- $\lambda = \frac{r}{\sqrt{X_{Cyl}^2 + Y_{Cyl}^2}} = \text{Scale Factor}$



ภาพที่ 2-37 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบราบกับระนาบทรงกระบอก

(Luhmann and Tecklenburg 2004)

Danilo Schneider และ Hans-Gerd Maas (2006) ได้ศึกษา และพัฒนาแบบจำลองสำหรับ กล้องพานอราามาชนิด Linear Array Based โดยใช้กล้อง EYESCAN ในการศึกษา ภาพที่ได้จะมี ระบบพิกัดภาพแบบทรงกระบอก ซึ่งผลการศึกษาแบบจำลอง ออกมาดังนี้

$$x'_{pano} = x'_0 - c \cdot \arctan\left(\frac{-y}{x}\right) + \Delta x'_{pano} \quad \dots\dots(\text{สมการที่ 2-23})$$

$$y'_{pano} = y'_0 - \frac{c \cdot z}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \Delta y'_{pano} \quad \dots\dots(\text{สมการที่ 2-24})$$

- โดยที่  $x'_{pano}, y'_{pano}$  = พิกัด x y บนภาพพานอราามา  
 $\Delta x'_{pano}, \Delta y'_{pano}$  = พารามิเตอร์เพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองต่างๆ  
 $x'_0, y'_0$  = Principle point  
 $x, y, z$  = พิกัดวัตถุในระบบพิกัดกล้อง  
 $c$  = รัศมีทรงกระบอก

ซึ่ง  $\Delta x'_{pano}, \Delta y'_{pano}$  ค่าที่ได้จะเปลี่ยนไปตามกรณีต่างๆ เช่น

กรณีเกิดความเอียงจากจุดศูนย์กลางของกล้อง

$$\Delta x'_e = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-25})$$

$$\Delta y'_e = e \frac{z+y'}{\sqrt{x^2+y^2}} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-26})$$

กรณีแกนหมุนไม่ขนานกับแกนกล้อง

$$\Delta x'_{\gamma_1} = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-27})$$

$$\Delta y'_{\gamma_1} = \frac{y' \cos(\arctan\frac{y'}{c})}{\cos(\arctan\frac{y'}{c} + \gamma_1)} - y' \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-28})$$

กรณีมีความโค้งของเลนส์

$$\Delta x'_{distortion} = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-29})$$

$$\Delta y'_{distortion} = A_1 y' (y'^2 - r_0^2) + A_2 y' (y'^4 - r_0^4) \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 2-30})$$

และได้ทดสอบโดยการปรับแก้ของบล็อกลำแสงในกรณีต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ผลการทดสอบในกรณีต่างๆ(Schneider and Maas, 2006)

Case	$\hat{\sigma}_0$ (pixel)	RMSx (mm)	RMSy (mm)	RMSz (mm)
Calibration room/Minimum datum	0.22	0.97	0.85	2.28
Calibration room/Free network adjustment	0.22	0.39	0.28	0.16
Dresden University Campus courtyard	0.24	2.9	2.4	3.1
4 Panoramic image	0.28	3.4	2.9	3.7
4 Panoramic image + Central perspective snapshot	0.27	3.3	2.9	2.7

Gabriele Fangi (2007) ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคสำหรับการใช้ภาพหลายภาพมาผสมผสานรวมกันให้เป็นภาพพานอรามาทรงกลมและทำการจัดองค์ประกอบภาพให้เสมือนรังวัดด้วยกล้องวัดมุม ภาพพานอรามาทรงกลมที่ได้นั้นจะใช้วิธีการปรับแก้แบบบล็อกค่าแสง เพื่อหาพารามิเตอร์การจัดวางภายนอก และใช้สมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับภาพพานอรามาทรงกลมในการหาค่าพิกัดจุดต่างๆ โดยในการคำนวณยังไม่ได้นำพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายในมาเกี่ยวข้อง ซึ่งแบบจำลองกับผลที่ได้ มีรายละเอียดดังนี้

$$\theta = atg \left( \frac{x' - d\alpha_z z'}{d\alpha_z x' + y' + d\alpha_x z'} \right) \dots\dots\dots (\text{สมการที่ 2-31})$$

$$\varphi = acos \left( \frac{-d\alpha_y x' + d\alpha_x y' + z'}{\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}} \right) \dots\dots\dots (\text{สมการที่ 2-32})$$

โดยที่  $atg, acos$  = arctangent, arccos

$d\alpha_x, d\alpha_y, d\alpha_z$  = พารามิเตอร์การหมุนสำหรับแกนต่างๆ

ในการรังวัดสำหรับการทดสอบ มีค่าสังเกตทั้งหมด 4640 ตัว และมีตัวไม่ทราบค่า 1764 ตัว มีเศษเหลือ 2876 ตัว จุดที่ไม่ทราบค่าพิกัดทั้งหมด 583 จุด ผลที่ได้ เป็นไปดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ผลจากการปรับแก้ด้วยวิธีบล็อกค่าแสง (Fangi ,2007)

Case	RMSx(m)	RMSy(m)	RMSz(m)
3 Spherical Panorama (64 check point)	0.0234	-0.0333	0.004
3 Spherical Panorama +3 Control point (58 check point)	0.0190	-0.0197	0.0081
3 Spherical Panorama + 10 Control point (51 check point)	0.0203	-0.0246	0.0065

T.Oh, K.Choi และ I.Lee (2010) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกล้องถ่ายภาพหลายทิศทาง ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ พัฒนาสมการค่าสังเกตจากสมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับกล้องถ่ายภาพหลายทิศทาง และกำหนดข้อมูลที่ได้จาก GPS/INS และจุดควบคุมภาคพื้นดิน สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การพัฒนาสมการค่าสังเกตจากสมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับกล้องถ่ายภาพหลายทิศทาง เริ่มจากกำหนดให้  ${}^G P$  เป็นพิกัดภาคพื้นดิน  ${}^C P$  เป็นพิกัดภาพถ่าย  ${}^G O_C$  เป็นจุดเปิดถ่ายภาพ และ  ${}^G R_C$  เป็นเมทริกซ์การหมุนจากพิกัดภาคพื้นดินไปสู่พิกัดภาพถ่าย จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$${}^C P = {}^G R_C ({}^G P - {}^G O_C) \dots\dots\dots (\text{สมการที่ 2-33})$$

โดยพิกัดของจุดต่างๆ จะถูกฉายลงบนทรงกลมของระบบพิกัดกล้องถ่ายภาพ จึงสามารถสร้างสมการค่าสังเกตได้ดังนี้

$$\rho = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{c_{P_y}}{c_{P_x}} \right) \\ \arcsin \left( \frac{c_{P_z}}{\|c_P\|} \right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{สมการที่ 2-34})$$

โดยที่  $\rho$  = ตำแหน่งจุดบนทรงกลม  
 $\alpha$  = มุมราบ  
 $\beta$  = มุมตั้ง  
 $c_{P_x} c_{P_y} c_{P_z}$  = พิกัดจุดบนทรงกลมทางแกน x y z ตามลำดับ  
 $\|c_P\|$  = ระยะจากจุดเปิดถ่ายภาพถึงจุดบนทรงกลม

เมื่อทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ Tylor series สุดท้าย จะได้สมการว่า

$$\rho \cong f(E_0) + \partial f / \partial E|_{E=E_0} (E - E_0) + e \dots\dots\dots (\text{สมการที่ 2-35})$$

$$\text{โดยที่ } f(E_0) = \begin{bmatrix} \arctan \left( \frac{c_{P_y}}{c_{P_x}} \right) \\ \arcsin \left( \frac{c_{P_z}}{\|c_P\|} \right) \end{bmatrix}$$

$E$  = ตัวไม่ทราบค่า ประกอบด้วย ค่าการจัดวางภาพภายนอก  
 $(X_c, Y_c, Z_c, \omega, \phi, K)$  และพิกัดจุดภาคพื้นดิน  $(^G P_x, ^G P_y, ^G P_z)$

$E_0$  = ค่าประมาณของตัวไม่ทราบค่า

$e \sim (0, \sigma_0^2 I_2)$

$\partial f / \partial E|_{E=E_0}$  = จาคอเบียนเมทริกซ์ของสมการเทียบกับตัวไม่ทราบค่า

สำหรับข้อมูลที่จะนำมาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบ่งได้เป็น 4 แบบ คือ

- 1) กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆเป็นตัวไม่ทราบค่าและให้ค่าการจัดวางภาพภายนอกเป็นค่าคงที่โดยใช้ข้อมูลจาก GPS/INS
- 2) กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆและค่าการจัดวางภาพภายนอกเป็นตัวไม่ทราบค่าและใช้ข้อมูลจาก GPS/INS ช่วยในการคำนวณ
- 3) กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆและค่าการจัดวางภาพภายนอกเป็นตัวไม่ทราบค่าและใช้ข้อมูลจากจุดควบคุมภาพถ่ายช่วยในการคำนวณ
- 4) กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆและค่าการจัดวางภาพภายนอกเป็นตัวไม่ทราบค่าและใช้ข้อมูลจาก GPS/INS และจุดควบคุมภาพถ่ายช่วยในการคำนวณ

และในการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น มาใช้ทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ โดยเลือกพื้นที่ที่เป็นที่อยู่อาศัยเป็นสถานที่ทดสอบ ใช้ภาพทั้งหมด 24 ภาพ ระยะห่างระหว่างภาพประมาณ 4 เมตร จุดควบคุมภาคพื้นดินทั้งหมด 4 จุด และผลที่ได้ปรากฏ



ว่าแบบจำลองที่ใช้เฉพาะข้อมูลที่ได้จากจุดควบคุมภาคพื้นดิน มีความถูกต้องสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ผลการทดสอบกับข้อมูลที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (Oh, Choi, Lee, 2010)

กรณี	RMSx(m)	RMSy(m)	RMSz(m)
1	0.360	0.390	0.816
2	0.360	0.392	0.827
3	0.027	0.024	0.045
4	0.268	0.316	0.648

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยเรื่อง การศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา นี้ จะแบ่งการวิจัยเป็นหัวข้อย่อยๆ ประกอบด้วย

- การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างระบบพิกัดแบบต่างๆ
- การหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3
- การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา
- การเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

#### 3.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างระบบพิกัดแบบต่างๆ

##### 3.1.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular กับระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลม

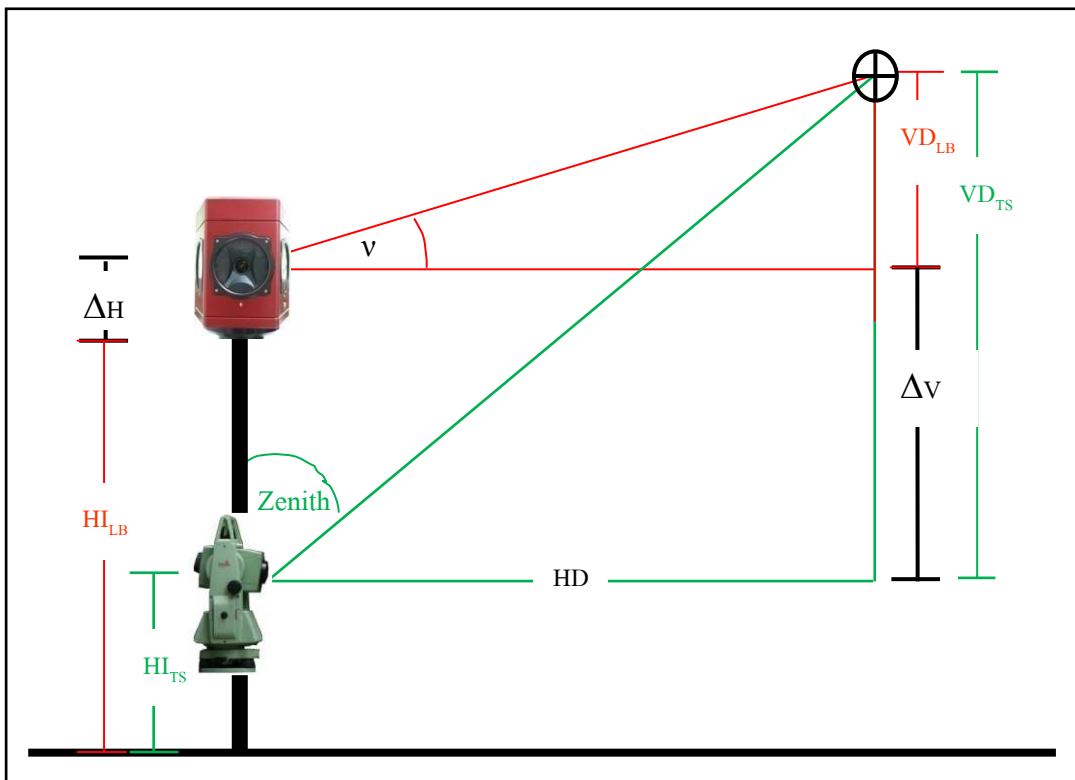
จากการศึกษาระบบพิกัดภาพพานอรามาที่ได้จากโปรแกรม Ladybug SDK ทั้งสองรูปแบบนั้น ในการแปลงพิกัดระหว่างพิกัดภาพระบบ Equirectangular กับระบบพิกัดภาพทรงกลมของภาพพานอรามา นั้น จำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยจะทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา จากสมการการฉายแผนที่ของพิกัดระบบ Equirectangular ดังที่แสดงในสมการที่ 2-3 และ สมการที่ 2-4

##### 3.1.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับพิกัดวัตถุในกรณีทั่วไป

ในกรณีทั่วไป ความสัมพันธ์ของการแปลงพิกัดในสามมิติ หรือการหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดจากสองระบบ จะใช้การแปลงค่าพิกัดในสามมิติแบบเฮลเมิร์ต ดังที่แสดงในสมการที่ 2-11 ซึ่งจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมด 7 ตัว คือ  $X_0$   $Y_0$   $Z_0$  เป็นพารามิเตอร์ของการย้ายศูนย์กลางกำเนิด  $\omega$   $\phi$   $K$  เป็นพารามิเตอร์การหมุนของแกนต่างๆ และ  $m$  เป็นพารามิเตอร์ของการใช้มาตราส่วนที่ต่างกัน สำหรับพารามิเตอร์หกตัวแรก ( $X_0$   $Y_0$   $Z_0$   $\omega$   $\phi$   $K$ ) สามารถเรียกรวมกันได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ของการจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation Parameter)

### 3.2 การหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3

Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 หรือตำแหน่งจุดเปิดถ่ายของภาพพานอรามาที่ได้ ไม่มีเอกสารอ้างอิงแน่ชัด จึงทำการวัดสอบแล้วทำการคำนวณเพื่อหาความสูงของจุดเปิดถ่ายภาพ เทียบกับฐานกล้อง ( $\Delta H$ ) ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 การหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3

จากภาพที่ 3-1 ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\Delta H = HI_{TS} + VD_{TS} - HI_{LB} - VD_{LB} \quad \text{.....(สมการที่ 3-1)}$$

$$VD_{LB} = HD \times \tan(v) \quad \text{.....(สมการที่ 3-2)}$$

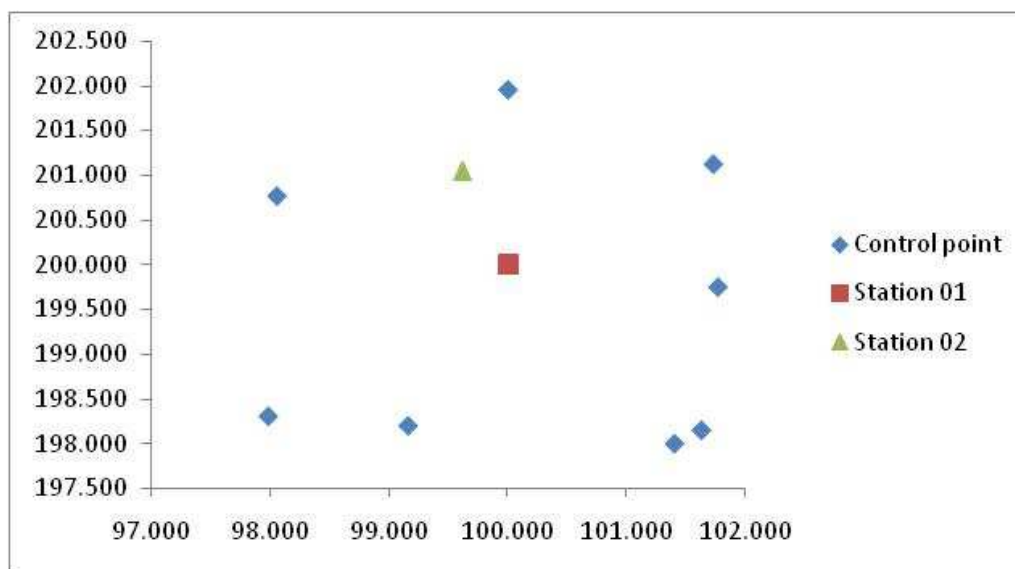
$$VD_{TS} = HD \times \cot(\text{Zenith}) \quad \text{.....(สมการที่ 3-3)}$$

ขั้นตอนการทดสอบคือ

- 1) ตั้งกล้อง Total Station Leica TC405 ที่ Station01 ดังภาพที่ 3-2
- 2) หาดำแหน่งเป้าที่อยู่ในแนวระดับ รอบตัวกล้อง ซึ่งมีทั้งหมด 8 เป้า ระยะห่างจากกล้องถึงเป้าประมาณ 2-2.5 เมตร
- 3) ตั้งกล้อง Ladybug 3 ตรงตำแหน่งเดียวกับกล้อง Total Station แล้วบันทึกภาพ

- 4) ขยับกล้อง Ladybug 3 ให้เยื้องออกไปเล็กน้อยที่ Station02 แล้วทำการบันทึกภาพ
- 5) นำข้อมูลที่ได้ มาหาพิกัดภาพ โดยในการวัดพิกัดภาพจะวัดในระบบ Equirectangular แล้วนำมาแปลงเป็นระบบ Spherical
- 6) นำมาคำนวณหา  $\Delta H$  ตามสมการที่ 3-1 คือ

$$\Delta H = HI_{TS} + VD_{TS} - HI_{LB} - VD_{LB}$$



ภาพที่ 3-2 ตำแหน่งการตั้งกล้อง Ladybug 3 และตำแหน่งจุดควบคุม

วิธีการตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาให้อยู่ในแนวตั้งสำหรับการทดสอบ (ภาพที่ 3-3)

- 1) สร้างจุดควบคุมให้อยู่ในแนวระดับเดียวกันรอบจุดที่ต้องการตั้งกล้องโดยใช้กล้องระดับวัดให้อยู่ในแนวเดียวกัน
- 2) นำกล้องถ่ายภาพพานอรามาติดกับฐานตั้งกล้อง (Tribatch) แล้วนำไปติดตั้งบนขาตั้งกล้อง
- 3) ปรับระดับลูกน้ำฟองกลมที่ฐานตั้งกล้องให้อยู่ในวงกลม
- 4) ถ่ายภาพ แล้วนำภาพพานอรามาที่ได้มาวัดพิกัดภาพ โดยจะต้องให้ระดับของจุดควบคุมอยู่ในแนวเดียวกันหากไม่ทราบระยะระหว่างกล้องกับเป้า สามารถทำได้โดยการปรับระดับจุดควบคุมให้อยู่ที่จุดกึ่งกลางภาพ หรือที่  $y_p = 1350$  จุดภาพ
- 5) หากยังไม่ได้ระดับ ให้ปรับความสูงของขาตั้งโดยการเพิ่มหรือลดขาตั้งกล้อง จนกระทั่งภาพพานอรามาที่ได้ออกมามีจุดควบคุมทั้งหมด อยู่ในแนวเดียวกัน



ภาพที่ 3-3 การตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาให้อยู่ในแนวตั้ง สำหรับการทดสอบ

### 3.3 การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะทำโดยการนำข้อมูลภาพพานอรามาที่ได้บันทึกไว้ มาหาค่าพิกัดของจุดที่กำหนดบนภาพ และทำการหาค่าพิกัดวัตถุด้วยกล้อง Total Station Leica TC 405 จากนั้นนำมาคำนวณหาจุดเปิดถ่ายภาพ และใช้ค่าพิกัดวัตถุกับจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้ คำนวณกลับหาพิกัดภาพ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน มีรายละเอียดในการทำงาน ดังนี้

- 1) แบ่งการทดสอบออกเป็นสองประเภทคือ กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง และกรณีทั่วไปหรือกล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง
- 2) เลือกสถานที่ทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย
  - ห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ซึ่งมีขนาดประมาณ 4x4 เมตร เป็นตัวแทนของข้อมูลที่มีรัศมีประมาณ 1-2 เมตร
  - อาคารปฏิบัติการทดสอบ โครงสร้างขนาดจริง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มีลักษณะเป็นอาคารเปิดโล่งขนาดประมาณ 20x30 เมตร เป็นตัวแทนของข้อมูลที่มีรัศมีประมาณ 10-15 เมตร
- 3) กำหนดจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ
- 4) ตั้งกล้องทั้งกล้อง Ladybug 3 และกล้อง Total Station ที่จุดเดียวกันแล้วเก็บข้อมูล
- 5) คำนวณค่าพิกัดของจุดต่างๆเพื่อใช้ในการอ้างอิง โดยจะใช้พิกัดสมมุติทั้งหมด

- $X=100$   $Y= 200$   $Z= 1$  สำหรับห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก
  - $X=1000$   $Y= 500$   $Z= 100$  สำหรับอาคารปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างขนาดจริง
- 6) คำนวณจุดเปิดถ่ายภาพ โดยใส่ค่าพิกัดภาพและพิกัดวัตถุ เพื่อคำนวณหาตัวไม่ทราบค่า ก็คือ  $X_0$   $Y_0$   $Z_0$   $\omega$   $\phi$   $K$  และใช้การปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุดในการคำนวณ
  - 7) เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ของจุดเปิดถ่ายภาพทั้งหมดตัว ก็นำมาคำนวณหาพิกัดภาพ พานอรามาเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง
  - 8) เปรียบเทียบค่าพิกัดที่คำนวณได้กับพิกัดที่วัดจากภาพ แล้วทำการเปลี่ยนเป็นระยะทาง ตามสมการ  $a = r*\theta$  เมื่อ  $a$  คือความยาวส่วนโค้ง  $r$  คือ รัศมี และ  $\theta$  คือมุมของส่วนโค้ง เพื่อหาระยะทางที่คลาดเคลื่อนจากการวัดและการคำนวณ

### 3.4 การเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ หรือ Mobile Mapping System (MMS) เป็นระบบที่ประกอบไปด้วยเครื่องมือหลายส่วน (ภาพที่ 3-4) เช่น ระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก เครื่องมือวัดความเร็วและเครื่องวัดมุม เครื่องวัดระยะทาง เลเซอร์สแกนเนอร์ รวมทั้งกล้องถ่ายภาพ ที่สำหรับบันทึกภาพรอบตัวของยานพาหนะที่ขับเคลื่อนไปจริงๆ แล้วมีการใช้วิธีสำรวจเก็บข้อมูลแบบนี้มานานแล้ว แต่เนื่องด้วยเทคโนโลยีที่ยังไม่พัฒนาและราคาของอุปกรณ์ต่างๆ ยังมีราคาสูง ทำให้ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก แต่ในปัจจุบัน อุปกรณ์ต่างๆ ได้รับการพัฒนาไปมาก เครื่องมือประมวลผลต่างๆ มีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ในปัจจุบัน มีผู้ใช้ระบบนี้มากขึ้น และเมื่อนำข้อมูลทุกอย่างมาผนวกรวมกัน จะทำให้สามารถหาค่าพิกัดภาคพื้นดินได้ (El-Sheimy, 2008)



ภาพที่ 3-4 ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

### 3.4.1 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ประกอบด้วย

- Ladybug 3 เป็นกล้องถ่ายภาพพานอรามาแบบ Multi-head camera รายละเอียดในหัวข้อ 2.2
- SPAN-CPT เป็น GPS/IMU หรืออุปกรณ์สำหรับหาตำแหน่งของยานพาหนะขณะที่ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ (ภาพที่ 3-5) โดย IMU จะวัดความเร่งและการหมุนของแกนต่างๆที่เปลี่ยนไป สามารถทดแทนการขาดหายไปของสัญญาณ GPS ในที่อับสัญญาณได้ โดยคุณสมบัติต่างๆของ SPAN-CPT จะเป็นไปตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของ SPAN-CPT (NovAtel, 2011a)

Parameter	NovAtel SPAN-CPT
IMU Grade	Tactical
Embedded GNSS	OEMV-3 receiver
Acceleration Type	MEMS
Accelerometer Range	$\pm 10$ mg
Accelerometer Bias	$\pm 50$ mg
Gyros Type	FOG
Gyro Output Range	$\pm 375^{\circ}$ /s
Gyro Bias	$\pm 20^{\circ}$ /hr
Data Rate (IMU)	100 Hz
Data Rate (GPS)	5 Hz
Dimensions	152 x 168 x 89 mm
Weight	2.36 kg

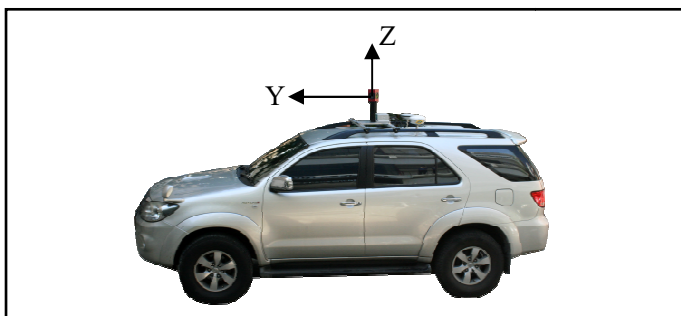


ภาพที่ 3-5 SPAN-CPT

### 3.4.2 การหาตำแหน่งของอุปกรณ์

การหาตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆบนยานพาหนะ เพื่อการประมาณตำแหน่งที่ถูกต้อง มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์บนเพลาแล้วจัดวางตำแหน่งให้เหมาะสมบนยานพาหนะ โดยให้แกน Y ของ SPAN-CPT หันไปทางด้านหน้าของยานพาหนะขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ (ภาพที่ 3-6)



ภาพที่ 3-6 แกนอ้างอิงของระบบ

- 2) กำหนดจุดอ้างอิงสองจุด (A,B) ห่างกันประมาณ 20 เมตร
- 3) ทำการรังวัดด้วยกล้อง Total Station Leica TC405 ตามตำแหน่งวัตถุต่างๆที่ต้องการ (ภาพที่ 3-7)



ภาพที่ 3-7 การหาตำแหน่งของอุปกรณ์

- 4) คำนวณข้อมูลโดยใช้วิธีโปรแกรม GNU GAMA (ภาคผนวก ก) เพื่อหาค่าพิกัดของตำแหน่งวัตถุต่างๆที่ต้องการบนยานพาหนะ (ภาพที่ 3-8)

```

C:\GAMA\Offset01.xml - Notepad...
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run TextFX Plugins Window ?
Offset01.xml
1 <?xml version="1.0" ?>
2 <!DOCTYPE gamma-local
3 SYSTEM "http://www.gnu.org/software/gama/gama-local.dtd">
4 <gamma-local>
5 <network axes="xy"="en" angles="left-handed">
6
7 <description>
8 GNU GAMA 1.10
9 Determination of lever-arm offset, Equipment SPAN-CPT, B8, Novatel 703666
10 Geodetic Computation and Least Square Adjustment Session
11 Workshop on Python and FOSS4G For Geomatic Researchers
12 Survey Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
13 7-8 Oct. 2010
14 </description>
15
16 <!-- parameters are expressed with empty-element tag -->
17 <parameters sigma-act = "aposteriori" />
18
19
20 <points=observations
21 direction-stdev="5.0"
  
```

ภาพที่ 3- 8 ตัวอย่างโปรแกรม GNU GAMA



### 3.4.3 สถานที่เก็บข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยภาพพานอรามา บริเวณถนนระหว่างอาคาร 1 อาคาร 2 และอาคาร 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บันทึกเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2553 เวลาประมาณ 16:00-18:00 น

### 3.4.4 การจัดทำหมุดควบคุมภาพถ่าย

จุดควบคุมภาพถ่าย (Photo control point) และจุดตรวจสอบอิสระ (Independent check point) มีทั้งหมด 50 จุด โดยแบ่งเป็น จุดควบคุม 20 จุด และจุดตรวจสอบอิสระ 30 จุด อยู่บริเวณอาคาร 1 อาคาร 2 และอาคาร 3 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ (ภาพที่ 3-9)

- 1) ทำการถ่ายค่าพิกัดจากหมุด CU09 และ CU01 มายังหมุดอ้างอิงบริเวณหน้าทางเข้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ (COR1) และระหว่างอาคาร 2 กับอาคาร 3 (COR2) โดยใช้กล้อง Total Station Leica TC405
- 2) เก็บข้อมูลของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบอิสระทั้งหมด
- 3) คำนวณวงรอบโดยใช้โปรแกรม GNU GAMA เพื่อหาค่าพิกัดของจุดต่างๆ



ภาพที่ 3-9 ตำแหน่งของข้อมูลและตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายที่ใช้งาน

### 3.4.5 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

รายละเอียดของข้อมูลภาพพานอรามาที่ใช้ในการวิจัยจะแบ่งเป็นสองกรณี มีดังนี้

#### 3.4.5.1 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

ใช้ข้อมูลบริเวณถนนระหว่างอาคาร 1 อาคาร 2 และอาคาร 3 (ภาพที่ 3-10) จำนวนภาพทั้งหมด 32 ภาพ จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 15 จุด จุดตรวจสอบอิสระ 20 จุด ระยะทางเฉลี่ยระหว่างภาพประมาณ 3.31 เมตร และรายละเอียดอื่นๆดังตารางที่ 3-2 และ ตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3- 2 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

Parameter	Value
ระยะทางเฉลี่ยระหว่างภาพ	3.31 เมตร
จำนวนภาพ	32 ภาพ
จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย	15 จุด
จำนวนจุดตรวจสอบอิสระ	20 จุด
จำนวนจุดผ่าน	76 จุด
จำนวน Image point	519 จุด
จำนวนภาพเฉลี่ยต่อ 1 จุดผ่าน	6.83 ภาพ/จุด
จำนวนจุดผ่านเฉลี่ย ต่อ 1 ภาพ	16.22 จุด/ภาพ



ภาพที่ 3-10 ตำแหน่งของข้อมูล กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง



### 3.4.5.2 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

ใช้ข้อมูลบริเวณทางโค้งระหว่างอาคาร 1 และอาคาร 3 (ภาพที่ 3-11) จำนวนภาพทั้งหมด 10 ภาพ จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด จุดตรวจสอบอิสระ 10 จุด ระยะทางเฉลี่ยระหว่างภาพประมาณ 3.03 เมตร และรายละเอียดอื่นๆ ดังตารางที่ 3-4 และ ตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-4 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

Parameter	Value
ระยะทางเฉลี่ยระหว่างภาพ	3.03 เมตร
จำนวนภาพ	10 ภาพ
จำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย	5 จุด
จำนวนจุดตรวจสอบอิสระ	10 จุด
จำนวนจุดผ่าน	37 จุด
จำนวน Image point	145 จุด
จำนวนภาพเฉลี่ยต่อ 1 จุดผ่าน	3.92 ภาพ/จุด
จำนวนจุดผ่านเฉลี่ย ต่อ 1 ภาพ	14.50 จุด/ภาพ



ภาพที่ 3-11 ตำแหน่งของข้อมูล กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง



ในส่วนข้อมูลที่ได้จาก SPAN-CPT จะมีส่วนประกอบของข้อมูลที่สำคัญ คือ ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพและมุมเอียงของตัวกล้อง ดังนี้ (ตารางที่ 3-6)

ตารางที่ 3-6 ส่วนประกอบของข้อมูลที่สำคัญที่ได้จาก SPAN-CPT

Date	(YMD)	20/7/2010	H-Ell	(m)	-28.174
GPSTime	(HMS)	10:26:56	Omega	(Deg)	0.35917
Latitude	(+/-D)	13	Phi	(Deg)	1.12624
Latitude	(M)	44	Heading	(Deg)	98.80202
Latitude	(S)	12.2293	SDHoriz	(m)	0.501
Longitude	(+/-D)	100	SDHeight	(m)	0.314
Longitude	(M)	31	OmPhSD	(Deg)	0.00666
Longitude	(S)	57.22226	HdngSD	(Deg)	0.03611
Easting	(m)	665706.858	Q		5
Northing	(m)	1519136.654			

โดยคุณภาพของค่าพิกัดที่คำนวณได้ สามารถดูได้จากค่า Q (Quality) ที่ได้จากการประมวลผลค่าพิกัด ซึ่งค่า Q แต่ละตัวมีรายละเอียดดังนี้ (ตารางที่ 3-7)

ตารางที่ 3-7 รายละเอียดของค่า Q ที่ได้จากการประมวลผล (NovAtel, 2011b)

Quality	Color	Description	3D Accuracy (m)
1	Green	Fixed integer	0.00-0.15
2	Cyan	Converged float or noisy fixed integer	0.05-0.40
3	Blue	Converging float	0.20-1.00
4	Purple	Converging float	0.50-2.00
5	Magenta	DGPS	1.00-5.00
6	Red	DGPS	2.00-10.00
Unprocessed	Grey	Has not been processed	N/A

ตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพของกล้อง Ladybug 3 ที่คำนวณได้จากการปรับแก้ของบล็อกค่าแสงและตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT นั้น จะไม่ซ้อนทับกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลทั้งสอง จะใช้ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพของกล้อง Ladybug 3 ที่คำนวณได้จากการปรับแก้ของบล็อกค่าแสงและตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่อยู่ใกล้กันที่สุด ในการเปรียบเทียบ

### 3.4.6 การประเมินความถูกต้องของการปรับแก้ของบล็อกลำแสงโดยการใช้จุดตรวจสอบอิสระ

หลังจากที่คำนวณการปรับแก้ของบล็อกลำแสงเพื่อหาจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา และการวางตัวของกล้องถ่ายภาพแล้วนั้น ต้องมีการประเมินความถูกต้องของการปรับแก้ของบล็อกลำแสงที่คำนวณได้ ทั้งในกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรงและเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง โดยจะใช้ประเมินโดยการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระ ที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินและการปรับแก้ของบล็อกลำแสง ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

- 1) วัดพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระบนภาพพานอรามาที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่
- 2) ทำการคำนวณหาพิกัดวัตถุของจุดตรวจสอบอิสระที่ละจุด โดยการปรับแก้ของบล็อกลำแสง ซึ่งตัวไม่ทราบค่าในกรณีนี้จะมีสามตัวคือ พิกัด X Y Z ของจุดตรวจสอบอิสระ
- 3) นำค่าพิกัดที่คำนวณได้จากการปรับแก้ของบล็อกลำแสง มาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดิน
- 4) หา Root Mean Square Error จากค่าพิกัดที่ได้ทั้งหมด

### 3.4.7 ขั้นตอนการคำนวณการหาค่าพิกัดด้วยวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสง

ตัวอย่างขั้นตอนการหาค่าพิกัดด้วยวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสง โดยกำหนดให้มีภาพพานอรามาจำนวน 3 ภาพซึ่งทราบค่าการจัดวางภาพภายนอกแล้ว และต้องการหาค่าพิกัดจุดหนึ่งจุด ที่ปรากฏบนภาพพานอรามาทั้งสาม

ค่าการจัดวางภาพภายนอก กำหนดให้เป็นค่าคงที่ (Constant Parameter)

$$(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, K) = (665706.856, 1519136.877, -27.629, 2.94671, -0.04948, 104.16527)$$

$$(X_0', Y_0', Z_0', \omega', \phi', K') = (665708.303, 1519136.670, -27.641, 0.95399, -0.24155, 104.32880)$$

$$(X_0'', Y_0'', Z_0'', \omega'', \phi'', K'') = (665709.652, 1519136.504, -27.655, -0.75405, -0.21646, 104.57504)$$

พิกัดภาพพานอรามาระบบ Equirectangular กำหนดให้เป็นค่าสังเกต (Observation Parameter)

$$(x_p, y_p) = (4103.28, 1219.93)$$

$$(x_p', y_p') = (4234.75, 1221.06)$$

$$(x_p'', y_p'') = (4344.36, 1220.78)$$

พิกัดวัตถุ กำหนดให้เป็นตัวไม่ทราบค่า (Unknown Parameter)

(X,Y,Z)

กำหนดให้ค่าประมาณของ ตัวไม่รู้ค่าเป็น (665700.000, 1519130.000, -27.000)

จากข้อมูลข้างต้น จะมีจำนวนสมการ (n) = 6 สมการ และ จำนวนตัวไม่ทราบค่า (u) = 3 ตัวทำให้มีค่ารังวัดส่วนเกิน (Redundant) = 6-3 = 3 ค่า และให้ค่าสังเกตทุกตัวมีน้ำหนักเท่ากัน

สามารถสร้างเมทริกซ์ต่างๆได้ดังนี้

เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่า และเมทริกซ์ค่าประมาณของตัวไม่ทราบค่า

$$Xa = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 3-4})$$

$$Xo = \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ \tilde{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 665700.000 \\ 1519130.000 \\ -27.000 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 3-5})$$

เมทริกซ์ค่าสังเกต ในหน่วยจุดภาพ

$$L_b = \begin{bmatrix} xp \\ xp' \\ xp'' \\ yp \\ yp' \\ yp'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4103.28 \\ 4234.75 \\ 4344.36 \\ 1219.93 \\ 1221.06 \\ 1220.78 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 3-6})$$

แปลงค่าพิกัดภาพพานอรามาจากระบบ Equirectangular เป็นระบบ Spherical ตามความสัมพันธ์ (แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.1)

$$\mu = \frac{180 \cdot (2Xp - W)}{W}$$

$$v = \frac{90 \cdot (H - 2Yp)}{H}$$

จะสามารถสร้างเมทริกซ์ค่าสังเกตใหม่ ในหน่วยองศา ดังนี้

$$L_b = \begin{bmatrix} \mu \\ \mu' \\ \mu'' \\ v \\ v' \\ v'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 93.55200 \\ 102.31667 \\ 109.62400 \\ 8.67133 \\ 8.59600 \\ 8.61467 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 3-7})$$



แปลงเป็นหน่วย เรเดียนเพื่อใช้สำหรับการคำนวณ จะได้เป็น

$$L_b = \begin{bmatrix} 1.63279 \\ 1.78576 \\ 1.91330 \\ 0.15134 \\ 0.15003 \\ 0.15035 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์น้ำหนัก(กำหนดให้ค่าสังเกตทุกตัวมีน้ำหนักเท่ากัน)

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(\text{สมการที่ 3-8})$$

สมการค่าสังเกต สามารถสร้างได้ดังนี้ (แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 4.1.2)

$$L_a = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \left( \frac{R_{11}(\bar{X}-X_0)+R_{21}(\bar{Y}-Y_0)+R_{31}(\bar{Z}-Z_0)}{R_{12}(\bar{X}-X_0)+R_{22}(\bar{Y}-Y_0)+R_{32}(\bar{Z}-Z_0)} \right) \\ \tan^{-1} \left( \frac{R'_{11}(\bar{X}-X_0')+R'_{21}(\bar{Y}-Y_0')+R'_{31}(\bar{Z}-Z_0')}{R'_{12}(\bar{X}-X_0')+R'_{22}(\bar{Y}-Y_0')+R'_{32}(\bar{Z}-Z_0')} \right) \\ \tan^{-1} \left( \frac{R''_{11}(\bar{X}-X_0'')+R''_{21}(\bar{Y}-Y_0'')+R''_{31}(\bar{Z}-Z_0'')}{R''_{12}(\bar{X}-X_0'')+R''_{22}(\bar{Y}-Y_0'')+R''_{32}(\bar{Z}-Z_0'')} \right) \\ \sin^{-1} \left( \frac{R_{13}(\bar{X}-X_0)+R_{23}(\bar{Y}-Y_0)+R_{33}(\bar{Z}-Z_0)}{\sqrt{(\bar{X}-X_0)^2+(\bar{Y}-Y_0)^2+(\bar{Z}-Z_0)^2}} \right) \\ \sin^{-1} \left( \frac{R'_{13}(\bar{X}-X_0')+R'_{23}(\bar{Y}-Y_0')+R'_{33}(\bar{Z}-Z_0')}{\sqrt{(\bar{X}-X_0')^2+(\bar{Y}-Y_0')^2+(\bar{Z}-Z_0')^2}} \right) \\ \sin^{-1} \left( \frac{R''_{13}(\bar{X}-X_0'')+R''_{23}(\bar{Y}-Y_0'')+R''_{33}(\bar{Z}-Z_0'')}{\sqrt{(\bar{X}-X_0'')^2+(\bar{Y}-Y_0'')^2+(\bar{Z}-Z_0'')^2}} \right) \end{bmatrix} \quad \dots\dots(\text{สมการที่ 3-9})$$

เมื่อแทนค่าประมาณจากสมการที่ 3-5 ลงในสมการที่ 3-9 จะได้เป็น

$$L_o = \begin{bmatrix} 2.10973 \\ 2.21561 \\ 2.29382 \\ 0.03908 \\ 0.05348 \\ 0.06776 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์แบบจำลอง

$$A = \frac{\partial La}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mu}{\partial X} & \frac{\partial \mu}{\partial Y} & \frac{\partial \mu}{\partial Z} \\ \frac{\partial \mu'}{\partial X} & \frac{\partial \mu'}{\partial Y} & \frac{\partial \mu'}{\partial Z} \\ \frac{\partial \mu''}{\partial X} & \frac{\partial \mu''}{\partial Y} & \frac{\partial \mu''}{\partial Z} \\ \frac{\partial v}{\partial X} & \frac{\partial v}{\partial Y} & \frac{\partial v}{\partial Z} \\ \frac{\partial v'}{\partial X} & \frac{\partial v'}{\partial Y} & \frac{\partial v'}{\partial Z} \\ \frac{\partial v''}{\partial X} & \frac{\partial v''}{\partial Y} & \frac{\partial v''}{\partial Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.07255 & 0.07275 & 0.00458 \\ -0.05870 & 0.07322 & 0.00147 \\ -0.04808 & 0.07128 & -0.00063 \\ 0.00793 & 0.00146 & 0.10245 \\ 0.00532 & 0.00237 & 0.09354 \\ 0.00364 & 0.00322 & 0.08565 \end{bmatrix}$$

.....(สมการที่ 3-10)

เมื่อได้เมทริกซ์ทั้งหมด สามารถหาค่าพิกัดด้วยการปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุด  
ดังนี้

$$L = L_0 - L_b = \begin{bmatrix} 0.47694 \\ 0.42985 \\ 0.38052 \\ -0.11227 \\ -0.09655 \\ -0.08259 \end{bmatrix} \quad \text{.....(สมการที่ 3-11)}$$

$$N = A^t P A = \begin{bmatrix} 0.01113 & -0.01297 & 0.00123 \\ -0.01297 & 0.01575 & 0.00104 \\ 0.00123 & 0.00104 & 0.002660 \end{bmatrix} \quad \text{.....(สมการที่ 3-12)}$$

$$u = A^t P L = \begin{bmatrix} -0.07983 \\ 0.09263 \\ -0.02502 \end{bmatrix} \quad \text{.....(สมการที่ 3-13)}$$

$$x = -N^{-1}u = \begin{bmatrix} 3.921 \\ -2.710 \\ 0.865 \end{bmatrix} \quad \text{.....(สมการที่ 3-14)}$$

$$Xa = X_0 + x = \begin{bmatrix} 665703.921 \\ 1519127.290 \\ -26.135 \end{bmatrix} \quad \text{.....(สมการที่ 3-15)}$$

$$V = Ax + L = \begin{bmatrix} -0.00073 \\ 0.00251 \\ -0.00173 \\ 0.00351 \\ -0.00117 \\ -0.00294 \end{bmatrix} \quad \text{.....(สมการที่ 3-16)}$$

เมื่อได้ค่าต่างๆออกมา หากค่าของผลต่างของเมทริกซ์  $Xa$  ยังไม่น้อยกว่าค่าที่  
ต้องการ ก็ทำการวนซ้ำจนกระทั่ง

$$|Xa^{t+1} - Xa^t| \leq \varepsilon \quad \text{.....(สมการที่ 3-17)}$$

ในการวนซ้ำ จะนำค่า  $Xa$  ที่คำนวณได้ในรอบก่อนหน้า มาแทนเป็นค่าประมาณของตัวไม่ทราบค่าในรอบถัดไป และทำการคำนวณเมทริกซ์ต่างๆ อีกหนึ่งรอบ หากกำหนดให้หยุดการวนซ้ำเมื่อผลต่างของเมทริกซ์  $Xa$  มีค่าน้อยกว่า 0.0001 จะได้ผลการคำนวณรอบสุดท้ายว่า

$$x = \begin{bmatrix} 1.164 \times 10^{-7} \\ -4.163 \times 10^{-7} \\ 2.903 \times 10^{-8} \end{bmatrix}$$

$$Xa = \begin{bmatrix} 665704.301 \\ 1519128.653 \\ -26.294 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} -0.00018 \\ 0.00045 \\ -0.00028 \\ 0.00033 \\ -0.00025 \\ -0.00010 \end{bmatrix}$$

ค่าพิกัดที่ได้ ก็คือ เมทริกซ์  $Xa$  รอบสุดท้ายของการคำนวณ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ จะมีดังนี้

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักหนึ่งหน่วย คือ

$$S_0 = \sqrt{\frac{VTPV}{r}} = 4.054 \times 10^{-4} \quad \text{.....(สมการที่ 3-18)}$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ปรับแก้ คือ

$$S_{X_i} = S_0 \sqrt{Q_{X_i}} = \begin{bmatrix} 0.008 & 0.011 & 0.000 \\ 0.011 & 0.015 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.003 \end{bmatrix}$$

.....(สมการที่ 3-19)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 4.1.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular กับระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลม

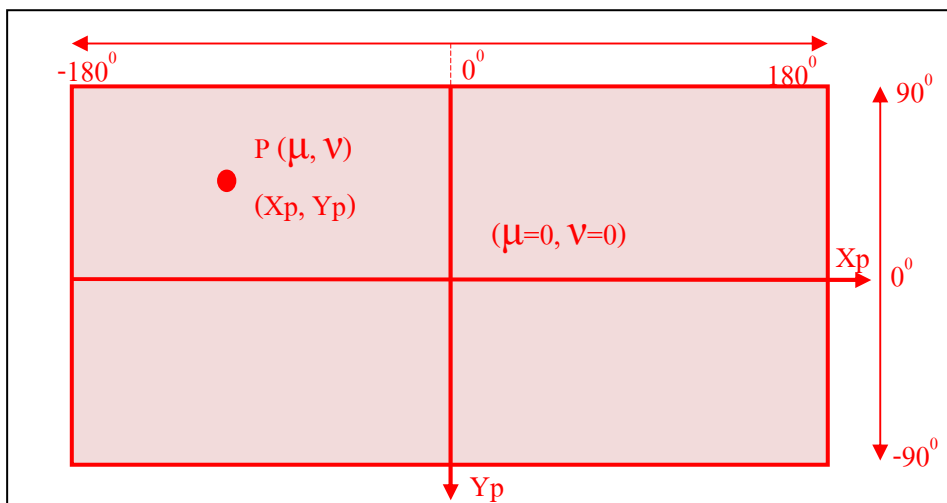
ระบบพิกัดภาพพานอรามาทรงกลมมีการอ้างอิงโดย  $\mu$  เป็นมุมราบ ที่ทำกับเส้นอ้างอิง ( $\mu_0$ ) โดยหากกวาดตามเข็มนาฬิกาจะมีขนาดเป็น 0 ถึง 180 องศา และถ้ากวาดทวนเข็มนาฬิกาจะมีขนาดเป็น 0 ถึง -180 องศา และ  $\nu$  เป็นมุมในแนวตั้ง มีขนาด -90 ถึง 90 องศา หากมุมมีทิศขึ้นจากแนวราบจะมีค่าเป็นบวก และในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นมุมที่มีทิศทางลง จะมีค่าเป็นลบ

ส่วนพิกัดภาพพานอรามา ระบบ Equirectangular มีการอ้างอิงตำแหน่งโดยจุดภาพที่ตำแหน่งต่างๆ โดยเริ่มจากมุมซ้ายบน จะเป็นคู่ลำดับ (0, 0) และสำหรับกล้อง Ladybug 3 ที่มีขนาดภาพ 5400 x 2700 จุดภาพ เพราะฉะนั้นมุมขวาล่างจะเป็นคู่ลำดับ (5400, 2700)

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสองแบบจะเป็นดังนี้

กำหนดให้	$X_p, Y_p$	เป็น พิกัด ของ จุด ใด ๆ ใน ระบบ พิกัด แบบ Equirectangular มีหน่วยเป็นจุดภาพ
	$\mu, \nu$	เป็น พิกัด ของ จุด ใด ๆ เดียวกัน ใน ระบบ พิกัด ภาพพานอรามา ทรงกลม มีหน่วยเป็นองศา
	$W, H$	เป็นขนาดความกว้างและความสูงของภาพพานอรามาตามลำดับ มีหน่วยเป็นจุดภาพ

ภาพพานอรามา 1 ภาพ มีความกว้าง  $W$  และมีความสูง  $H$  โดยจะมีขนาด 360 องศา ในแนวราบ และ 180 องศา ในแนวตั้ง และจากสมการที่ 2-3 และ สมการที่ 2-4 หากแกนอ้างอิง  $\mu_0$  มีค่าเท่ากับ 0 จะได้ว่าตำแหน่ง  $\mu = 0$  องศา กับ  $\nu = 0$  องศา จะอยู่ที่กึ่งกลางภาพ หรือพิกัดที่ ( $W/2, H/2$ ) ดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 การเปรียบเทียบพิกัดภาพระบบ Equirectangular กับ ระบบ Spherical

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$X_p = \left[ \frac{W}{2} \right] + \left[ \frac{\mu}{\frac{360}{W}} \right] = \frac{W}{2} + \frac{\mu \cdot W}{360} = \frac{(180 + \mu) \cdot W}{360} \quad \text{.....(สมการที่ 4-1)}$$

$$Y_p = \left[ \frac{H}{2} \right] - \left[ \frac{\nu}{\frac{180}{H}} \right] = \frac{H}{2} - \frac{\nu \cdot H}{180} = \frac{(90 - \nu) \cdot H}{180} \quad \text{.....(สมการที่ 4-2)}$$

สุดท้ายจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดแบบ Spherical กับระบบพิกัดแบบ Equirectangular ดังนี้

ระบบพิกัดแบบ Spherical สู่ระบบพิกัดแบบ Equirectangular

$$X_p = \frac{(180 + \mu) \cdot W}{360} \quad \text{.....(สมการที่ 4-3)}$$

$$Y_p = \frac{(90 - \nu) \cdot H}{180} \quad \text{.....(สมการที่ 4-4)}$$

ระบบพิกัดแบบ Equirectangular สู่ระบบพิกัดแบบ Spherical

$$\mu = \frac{180 \cdot (2X_p - W)}{W} \quad \text{.....(สมการที่ 4-5)}$$

$$\nu = \frac{90 \cdot (H - 2Y_p)}{H} \quad \text{.....(สมการที่ 4-6)}$$

#### 4.1.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับ พิกัดวัตถุ ในกรณีทั่วไป

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามา กับ พิกัดวัตถุ ในกรณีทั่วไป จะใช้การแปลงค่าพิกัดสามมิติแบบเฮลเมิร์ต ดังที่แสดงในสมการที่ 2-11 ซึ่งจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมด 7 ตัว ประกอบด้วย  $X_0$   $Y_0$   $Z_0$   $\omega$   $\phi$   $K$  และ  $m$

แบบจำลองของการแปลงค่าพิกัดสามมิติแบบเฮลเมิร์ตตามสมการที่ 2-11 คือ

$$X = X_0 + mRx$$

หรือ .....(สมการที่ 2-11)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

ซึ่งเมื่อแปลงพิกัดภาพพานอรามา กับ พิกัดวัตถุ ตามสมการที่ 2-12 สมการที่ 2-13 และ สมการที่ 2-14

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\mu) \\ r \cdot \cos(v) \cdot \cos(\mu) \\ r \cdot \sin(v) \end{bmatrix}$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m[R] \begin{bmatrix} r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\mu) \\ r \cdot \cos(v) \cdot \cos(\mu) \\ r \cdot \sin(v) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-7})$$

ย้ายข้างเมทริกซ์ของพารามิเตอร์ของการย้ายจุดกำเนิด

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = m[R] \begin{bmatrix} r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\mu) \\ r \cdot \cos(v) \cdot \cos(\mu) \\ r \cdot \sin(v) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-8})$$

ย้ายข้างเมทริกซ์การหมุน กับ พารามิเตอร์ของมาตราส่วน ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\mu) \\ r \cdot \cos(v) \cdot \cos(\mu) \\ r \cdot \sin(v) \end{bmatrix} = \frac{1}{m} [R'] \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-9})$$

สามารถกระจายได้สามสมการ ดังนี้

$$r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\mu) = \frac{1}{m} (R_{11}(X - X_0) + R_{21}(Y - Y_0) + R_{31}(Z - Z_0)) \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-10})$$

$$r \cdot \cos(v) \cdot \cos(\mu) = \frac{1}{m} (R_{12}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{32}(Z - Z_0)) \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-11})$$

$$r \cdot \sin(v) = \frac{1}{m} (R_{13}(X - X_0) + R_{23}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)) \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-12})$$

สามารถปรับรูปสมการได้โดยการนำสมการที่ 4-10 หาด้วยสมการที่ 4-11 และนำ r หรือ ระยะทางระหว่างจุดกำเนิดถึงวัตถุ หาสมาการที่ 4-12 ได้ว่า

$$\frac{r \cdot \cos(v) \cdot \sin(\mu)}{r \cdot \cos(v) \cdot \cos(\mu)} = \frac{(R_{11}(X-X_0)+R_{21}(Y-Y_0)+R_{31}(Z-Z_0))}{(R_{12}(X-X_0)+R_{22}(Y-Y_0)+R_{32}(Z-Z_0))} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-14})$$

$$\frac{r \cdot \sin(v)}{r} = \frac{(R_{13}(X-X_0)+R_{23}(Y-Y_0)+R_{33}(Z-Z_0))}{\sqrt{(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2+(Z-Z_0)^2}} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-15})$$

สุดท้าย จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพพานอรามากับพิกัดวัตถุเป็น

พิกัดวัตถุสู่พิกัดภาพพานอรามา

$$\begin{bmatrix} \mu \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \left( \frac{R_{11}(X-X_0)+R_{21}(Y-Y_0)+R_{31}(Z-Z_0)}{R_{12}(X-X_0)+R_{22}(Y-Y_0)+R_{32}(Z-Z_0)} \right) \\ \sin^{-1} \left( \frac{R_{13}(X-X_0)+R_{23}(Y-Y_0)+R_{33}(Z-Z_0)}{\sqrt{(X-X_0)^2+(Y-Y_0)^2+(Z-Z_0)^2}} \right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-16})$$

และพิกัดภาพพานอรามาทรงกลมสู่พิกัดวัตถุ

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 + (Z - Z_0) \frac{R_{11}(\cos(v) \cdot \sin(\mu))+R_{12}(\cos(v) \cdot \cos(\mu))+R_{13}(\sin(v))}{R_{31}(\cos(v) \cdot \sin(\mu))+R_{32}(\cos(v) \cdot \cos(\mu))+R_{33}(\sin(v))} \\ Y_0 + (Z - Z_0) \frac{R_{21}(\cos(v) \cdot \sin(\mu))+R_{22}(\cos(v) \cdot \cos(\mu))+R_{23}(\sin(v))}{R_{31}(\cos(v) \cdot \sin(\mu))+R_{32}(\cos(v) \cdot \cos(\mu))+R_{33}(\sin(v))} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{สมการที่ 4-17})$$

## 4.2 ผลการหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3

จากการศึกษาในเรื่องการหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 ได้ผลการคำนวณต่างๆดังนี้

### 4.2.1 ผลการหาตำแหน่งของ จุดควบคุมจากกล้อง Total Station

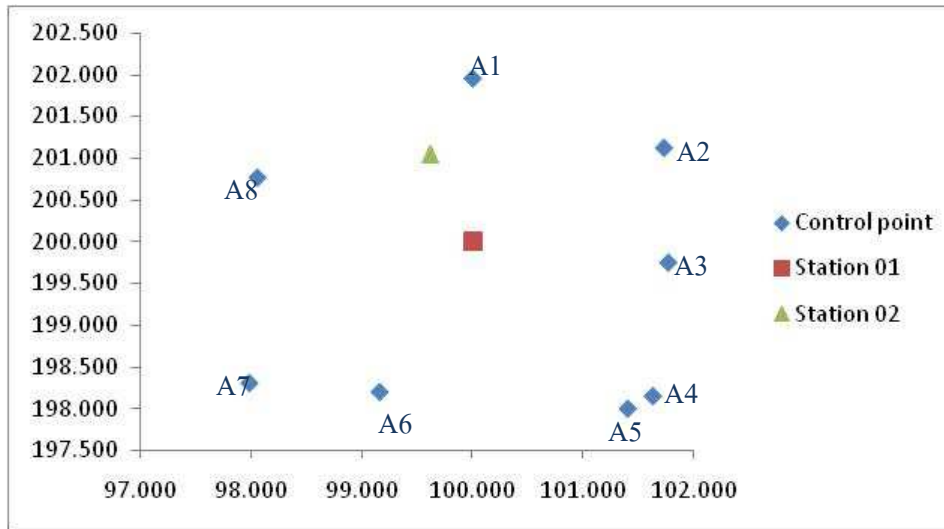
ผลที่ได้จากการหาตำแหน่งของจุดควบคุมทั้ง 8 จุด (ภาพที่ 4-2 และ ภาพที่ 4-3) จะเป็นไปตามตารางที่ 4-1 ซึ่งจะอ้างอิงกับพิกัดสมมุติ โดยให้จุดตั้งกล้องที่ Station01 มีค่าพิกัดเป็น X=100 Y= 200 Z= 1

ตารางที่ 4-1 พิกัดของจุดควบคุมภายในห้องวิจัย

Target	X	Y	Z
A1	100.000	201.960	1.380
A2	101.727	201.128	1.380
A3	101.766	199.752	1.380
A4	101.627	198.152	1.380
A5	101.400	198.001	1.380
A6	99.160	198.201	1.380
A7	97.986	198.308	1.380
A8	98.058	200.771	1.380



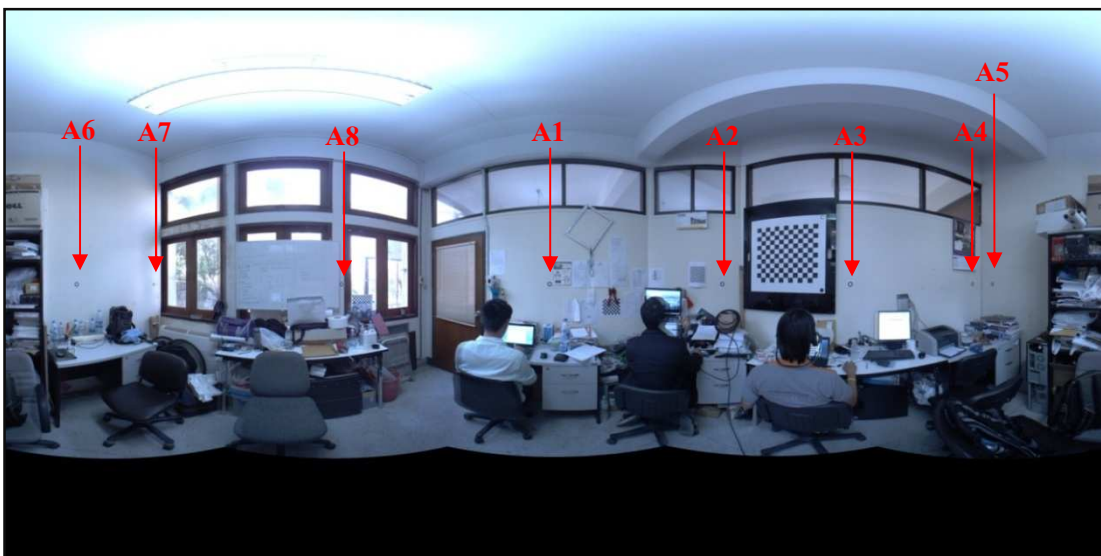
ภาพที่ 4-2 จุดควบคุม



ภาพที่ 4-3 ตำแหน่งการตั้งกล้องสำหรับการหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 และตำแหน่งจุดควบคุม

#### 4.1.2 ผลการหา Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3

ทำการตั้งกล้อง Ladybug จะทำการตั้งทั้งหมดสองที่ โดยให้เอียงออกจากกัน ประมาณหนึ่งเมตร โดยในการตั้งครั้งแรกที่ Station01 (ภาพที่ 4-4)



ภาพที่ 4-4 ภาพจากการตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาครั้งที่ 1



ครั้งที่ 1 ทำการวัดมุมของกล้อง Ladybug 3 ในระบบพิกัด Equirectangular แล้วแปลงเป็นระบบ Spherical ได้ผลดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการวัดพิกัดภาพของกล้อง Ladybug 3 ครั้งที่ 1

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$V$ (Degree)
A1	2678.36	1349.74	-1.44267	0.01733
A2	3527.64	1349.74	55.17600	0.01733
A3	4157.01	1350.26	97.13400	-0.01733
A4	4759.37	1349.23	137.29133	0.05133
A5	4856.24	1350.26	143.74933	-0.01733
A6	352.52	1350.77	-156.49867	-0.05133
A7	732.33	1350.77	-131.17800	-0.05133
A8	1656.11	1350.26	-69.59267	-0.01733

นำมาคำนวณ  $\Delta H$  ตามสมการที่ 3-1

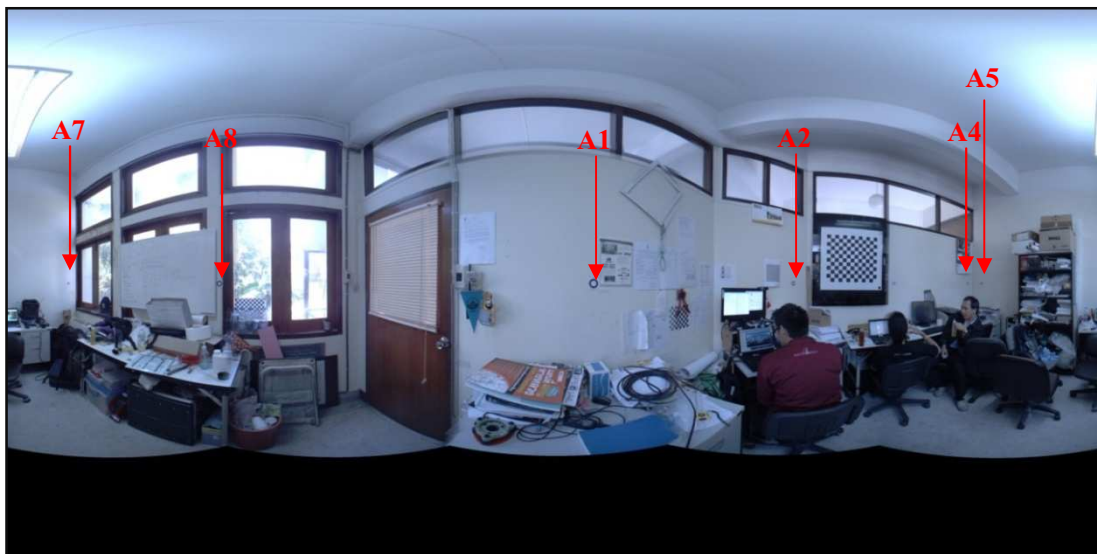
$$\Delta H = HI_{TS} + VD_{TS} - HI_{LB} - VD_{LB}$$

ได้ผลการคำนวณ  $\Delta H$  จากการตั้งกล้องที่ Station01 ดังนี้ (ตารางที่ 4-3)

ตารางที่ 4-3 ผลการคำนวณ  $\Delta H$  ครั้งที่ 1

Target	$VD_{LB}$ (m)	$VD_{TS}$ (m)	$HI_{TS}$ (m)	$HI_{LB}$ (m)	$\Delta H$ (m)
A1	0.001	-0.043	1.423	1.318	0.061
A2	0.001	-0.043	1.423	1.318	0.061
A3	-0.001	-0.043	1.423	1.318	0.063
A4	0.002	-0.043	1.423	1.318	0.060
A5	-0.001	-0.043	1.423	1.318	0.063
A6	-0.002	-0.043	1.423	1.318	0.064
A7	-0.002	-0.043	1.423	1.318	0.064
A8	-0.001	-0.043	1.423	1.318	0.063
Mean					0.062

การตั้งกล้องครั้งที่ 2 ที่ Station02 ทำโดยการตั้งให้เอียงไปจากจุดแรกประมาณ 1 เมตร ได้ภาพ ดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 ภาพจากการตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาครั้งที่ 2

ครั้งที่ 2 ทำการวัดมุมของกล้อง Ladybug 3 แล้วนำมาคำนวณ  $\Delta H$  ตามสมการ ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4-4 และตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-4 ผลการวัดพิกัดภาพของกล้อง Ladybug ครั้งที่ 2

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$V$ (Degree)
A1	2885.64	1352.03	12.37600	-0.13533
A2	3866.99	1351.61	77.79933	-0.10733
A4	4725.27	1351.40	135.01800	-0.09333
A5	4791.86	1351.40	139.45733	-0.09333
A7	302.78	1351.99	-159.81467	-0.13267
A8	1044.30	1351.96	-110.38000	-0.13067

ตารางที่ 4-5 ผลการคำนวณ  $\Delta H$  ครั้งที่ 2

Target	$VD_{LB}$ (m)	$VD_{TS}$ (m)	$HI_{TS}$ (m)	$HI_{LB}$ (m)	$\Delta H$ (m)
A1	-0.002	-0.043	1.423	1.322	0.060
A2	-0.004	-0.043	1.423	1.322	0.062
A4	-0.006	-0.043	1.423	1.322	0.064
A5	-0.006	-0.043	1.423	1.322	0.064
A7	-0.007	-0.043	1.423	1.322	0.065
A8	-0.004	-0.043	1.423	1.322	0.062
Mean					0.063

เฉลี่ย 2 ครั้ง ได้ =  $(0.062+0.063)/2 = 0.063$  เมตร หรือ 6.3 เซนติเมตร ซึ่งค่าที่ได้มีค่าประมาณระยะจากฐานกล้องถึงจุดศูนย์กลางเลนส์ซึ่งมีระยะห่างอยู่ 6.6 เซนติเมตรดังที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 2.2 ภาพที่ 2-11

จากผลการคำนวณที่ได้ แสดงว่าในการวัดค่าความสูงของอุปกรณ์สำหรับเตรียมงาน เพื่อความสะดวกรวดเร็วสามารถวัดความสูงจากพื้นเทียบกับฐานล่างของกล้อง Ladybug 3 แล้วนำค่าที่ได้ มาบวก 0.066 เมตร หรือ 6.6 เซนติเมตร ก็จะได้ความสูงโดยประมาณของจุดเปิดถ่ายภาพของกล้อง Ladybug 3

### 4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะแบ่งเป็นสองกรณีด้วยกันคือ กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง และกรณีทั่วไป โดยจะนำข้อมูลภาพพานอรามาที่ได้บันทึกไว้ มาหาค่าพิกัดของจุดที่กำหนดบนภาพ และทำการหาค่าพิกัดวัตถุด้วยกล้อง Total Station จากนั้นนำมาคำนวณหาจุดเปิดถ่ายภาพ และใช้ค่าพิกัดวัตถุกับจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้ คำนวณกลับหาพิกัดภาพ แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณและจากการรังวัดบนภาพมาเปรียบเทียบกัน

#### 4.3.1 กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง

##### 4.3.1.1 ข้อมูลทดสอบห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก

ห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอกเป็นตัวแทนของข้อมูลที่มีรัศมีประมาณ 1-2 เมตร จุดควบคุมภาพถ่ายที่ทำการหาค่าพิกัดไว้ มีทั้งหมด 8 จุด (ภาพที่ 4-6) ซึ่งพิกัดวัตถุ มีค่าดังตารางที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 การทดสอบแบบจำลองกรณีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้ง

ตารางที่ 4-6 พิกัดวัตถุของจุดความคม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Target	X	Y	Z
A1	100.000	201.960	1.380
A2	101.727	201.128	1.380
A3	101.766	199.752	1.380
A4	101.627	198.152	1.380
A5	101.400	198.001	1.380
A6	99.160	198.201	1.380
A7	97.986	198.308	1.380
A8	98.058	200.771	1.380

ทำการวัดพิกัดภาพในระบบ Equirectangular แล้วแปลงเป็นระบบ Spherical ได้ดังนี้ (ตารางที่ 4-7)

ตารางที่ 4-7 พิกัดภาพของจุดความคม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$\nu$ (Degree)
A1	2678.36	1349.74	-1.44267	0.01733
A2	3527.64	1349.74	55.17600	0.01733
A3	4157.01	1350.26	97.13400	-0.01733
A4	4759.37	1349.23	137.29133	0.05133
A5	4856.24	1350.26	143.74933	-0.01733
A6	352.52	1350.77	-156.49867	-0.05133
A7	732.33	1350.77	-131.17800	-0.05133
A8	1656.11	1350.26	-69.59267	-0.01733

เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 4-16

$$\begin{bmatrix} \mu_0 + \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \left( \frac{R_{11}(X - X_0) + R_{21}(Y - Y_0) + R_{31}(Z - Z_0)}{R_{12}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{32}(Z - Z_0)} \right) \\ \sin^{-1} \left( \frac{R_{13}(X - X_0) + R_{23}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)}{\sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2}} \right) \end{bmatrix}$$

แล้วทำการปรับแก้ค่าของตัวไม่ทราบค่าซึ่งก็คือ  $X_0$   $Y_0$   $Z_0$   $\omega$   $\phi$   $K$  จะได้ผลลัพธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้ (ตารางที่ 4-8)

ตารางที่ 4-8 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Parameter	Value	$\sigma$
$X_0$	100.003 ม.	4.0 มิลลิเมตร
$Y_0$	200.002 ม.	3.8 มิลลิเมตร
$Z_0$	1.380 ม.	2.8 มิลลิเมตร
$\omega$	0.01867 องศา	6.6ฟิลิปดา
$\phi$	-0.02689 องศา	6.5ฟิลิปดา
$K$	1.32236 องศา	4.7ฟิลิปดา

เมื่อทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้พิกัดภาพพานอรามา แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่ทำการวัดจากภาพ ได้ผลลัพธ์ดังนี้(ตารางที่ 4-9)

ตารางที่ 4-9 ผลการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดภาพจากภาพถ่ายกับพิกัดภาพที่คำนวณได้

Target	$x_p'$ (Pixel)	$y_p'$ (Pixel)	$x_p'-x_p$ (Pixel)	$y_p'-y_p$ (Pixel)
A1	2678.73	1349.89	0.37	0.15
A2	3532.91	1349.67	5.27	-0.07
A3	4150.95	1349.81	-6.06	-0.45
A4	4760.98	1350.06	1.61	0.83
A5	4856.33	1350.12	0.09	-0.14
A6	356.45	1350.58	3.93	-0.19
A7	729.93	1350.61	-2.40	-0.16
A8	1653.96	1350.44	-2.15	0.18
Mean			0.08	0.02
RMSE			3.41	0.36
ระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัด			0.008 ม.	0.001 ม.

จากผลการคำนวณ ได้ว่า จุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้คือ  $X_0 = 100.003$  เมตร  $Y_0 = 200.002$  เมตร  $Z_0 = 1.380$  เมตร  $\omega = 0.01867$  องศา  $\phi = -0.02689$  องศา และ  $K = 1.32236$  องศา โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X_0$ ,  $Y_0$  และ  $Z_0$  เท่ากับ 4.0, 3.8 และ 2.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม  $\omega$ ,  $\phi$  และ  $K$  เท่ากับ 6.6, 6.5 และ 4.7 ฟิลิปดา ตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบพิกัดภาพที่คำนวณออกมาได้ กับพิกัดภาพที่ทำการวัดบนภาพจะมี Root Mean Square Error (RMSE) ทางแกน X มีค่า 3.41 จุดภาพ และ

ทางแกน Y มีค่า 0.36 จุดภาพ แล้วเมื่อนำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระยะทางเทียบกับรัศมีเฉลี่ยประมาณ 2 เมตร จะได้ว่า ในทางแกน X มีระยะทางที่คลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.008 เมตร และในทางแกน Y เท่ากับ 0.001 เมตร

#### 4.3.1.2 ข้อมูลทดสอบ อาคารปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างขนาดจริง

อาคารปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างขนาดจริง (ภาพที่ 4-7) จะเป็นตัวแทนของข้อมูลที่มีรัศมีประมาณ 10-15 เมตร จุดควบคุมภาพถ่ายที่ทำการหาค่าพิกัดไว้มีทั้งหมด 18 จุด โดยจะแบ่งการคำนวณเป็นสองรอบ รอบแรก ทำการคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายเพียง 5 จุด และคำนวณรอบที่สอง ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายทั้งหมด



ภาพที่ 4-7 การทดสอบแบบจำลองกรณีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวโค้ง

- การคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด ใช้พิกัดของจุดควบคุม ดังนี้ (ตารางที่ 4-10)

ตารางที่ 4-10 พิกัดวัตถุของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวโค้ง

Target	X	Y	Z
13	1001.183	501.638	100.007
17	1011.541	499.740	102.262
29	1007.487	491.676	102.259
33	1001.969	486.828	102.248
35	998.576	488.531	102.250

ทำการวัดพิกัดภาพในระบบ Equirectangular แล้วแปลงเป็นระบบ Spherical ได้ดังนี้ (ตารางที่ 4-11)

ตารางที่ 4-11 พิกัดภาพของจุดควบคุม ภูมิกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$V$ (Degree)
13	1757.55	1747.21	-62.83000	-26.48067
17	2588.14	1254.82	-7.45733	6.34533
29	3287.25	1251.45	39.15000	6.57000
33	3788.31	1270.29	72.55400	5.31400
35	4022.11	1255.43	88.14067	6.30467

เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 4-16 แล้วทำการปรับแก้ค่าของตัวไม่ทราบค่าซึ่งก็คือ  $X_0 Y_0 Z_0 \omega \varphi K$  จะได้ผลลัพธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้ (ตารางที่ 4-12)

ตารางที่ 4-12 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ ภูมิกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Parameter	Value	$\sigma$
$X_0$	1000.018 ม.	14.3 มิลลิเมตร
$Y_0$	500.044 ม.	26.3 มิลลิเมตร
$Z_0$	100.990 ม.	15.0 มิลลิเมตร
$\omega$	0.04378 องศา	6.6 ฟลิปดา
$\varphi$	-0.02857 องศา	4.1 ฟลิปดา
$K$	99.02652 องศา	6.6 ฟลิปดา

เมื่อทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้พิกัดภาพพานอรามา แล้วเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่ทำการวัดจากภาพ ได้ผลลัพธ์ดังนี้ (ตารางที่ 4-13)

ตารางที่ 4-13 ผลการเปรียบเทียบระหว่างพิกัดภาพจากภาพถ่ายกับพิกัดภาพ  
ที่คำนวณได้

Target	$x_p'$ (Pixel)	$y_p'$ (Pixel)	$x_p'-x_p$ (Pixel)	$y_p'-y_p$ (Pixel)
13	1757.64	1747.11	0.09	-0.10
17	2587.23	1254.90	-0.91	0.08
29	3288.30	1252.35	1.05	0.90
33	3788.65	1268.66	0.34	-1.63
35	4021.73	1256.56	-0.38	1.13
Mean			0.04	0.08
RMSE			0.66	0.97
ระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัด			0.010 ม.	0.014 ม.

จากผลการคำนวณ ได้ว่า จุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้คือ  $X_0 = 1000.018$  เมตร  $Y_0 = 500.044$  เมตร  $Z_0 = 100.990$  เมตร  $\omega = 0.04378$  องศา  $\phi = -0.02857$  องศา และ  $K = 99.02652$  องศา โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X_0$ ,  $Y_0$  และ  $Z_0$  เท่ากับ 14.3, 26.3 และ 15.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม  $\omega$ ,  $\phi$  และ  $K$  เท่ากับ 6.6, 4.1 และ 6.6 ฟลิปดา ตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบพิกัดภาพที่คำนวณออกมาได้ กับพิกัดภาพที่ทำการวัดบนภาพจะมี RMSE ทางแกน X มีค่า 0.66 จุดภาพ และทางแกน Y มีค่า 0.97 จุดภาพ แล้วเมื่อนำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระยะทางเทียบกับรัศมีเฉลี่ยประมาณ 12.5 เมตร จะได้ว่า ในทางแกน X มีระยะทางที่คลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.010 เมตร และในทางแกน Y เท่ากับ 0.014 เมตร



- การคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย 18 จุด ใช้พิกัดของจุดควบคุม ดังนี้  
(ตารางที่ 4-14)

ตารางที่ 4-14 พิกัดวัตถุของจุดควบคุม กรณีกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Target	X	Y	Z
13	1001.183	501.638	100.007
15	1010.312	502.650	100.333
16	1011.534	499.741	105.552
17	1011.541	499.740	102.262
18	1011.374	499.419	105.546
19	1011.378	499.418	102.262
24	1008.755	494.189	102.965
25	1008.755	494.186	102.303
26	1008.350	493.394	102.967
27	1008.358	493.388	102.306
28	1007.468	491.687	105.544
29	1007.487	491.676	102.259
30	1007.309	491.368	105.538
31	1007.333	491.365	102.255
32	1001.969	486.827	105.547
33	1001.969	486.828	102.248
34	998.573	488.524	105.544
35	998.576	488.531	102.250

ทำการวัดพิกัดภาพในระบบ Equirectangular แล้วแปลงเป็น Spherical ได้  
ดังนี้ (ตารางที่ 4-15)

ตารางที่ 4-15 พิกัดภาพของจุดควบคุม ภูมิกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$V$ (Degree)
13	1757.55	1747.21	-62.83000	-26.48067
15	2348.75	1402.33	-23.41667	-3.48867
16	2585.90	1023.84	-7.60667	21.74400
17	2588.14	1254.82	-7.45733	6.34533
18	2609.83	1020.18	-6.01133	21.98800
19	2609.83	1252.85	-6.01133	6.47667
24	3071.07	1188.79	24.73800	10.74733
25	3071.91	1240.93	24.79400	7.27133
26	3140.02	1190.62	29.33467	10.62533
27	3140.59	1241.63	29.37267	7.22467
28	3286.96	1014.58	39.13067	22.36133
29	3287.25	1251.45	39.15000	6.57000
30	3313.04	1018.78	40.86933	22.08133
31	3312.19	1253.13	40.81267	6.45800
32	3786.63	1064.96	72.44200	19.00267
33	3788.31	1270.29	72.55400	5.31400
34	4022.68	1026.13	88.17867	21.59133
35	4022.11	1255.43	88.14067	6.30467

เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 4-16 แล้วทำการปรับแก้ค่าของตัวไม่ทราบค่าซึ่งก็คือ  
 $X_0 Y_0 Z_0 \omega \varphi K$  จะได้ผลลัพธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้ (ตารางที่ 4-16)

ตารางที่ 4-16 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ ภูมิกล้องอยู่ในแนวตั้ง

Parameter	Value	$\sigma$
$X_0$	1000.009 ม.	6.0 มิลลิเมตร
$Y_0$	500.026 ม.	10.5 มิลลิเมตร
$Z_0$	100.999 ม.	6.7 มิลลิเมตร
$\omega$	0.15517 องศา	2.7 พิลิปดา
$\varphi$	-0.09640 องศา	1.8 พิลิปดา
$K$	99.02418 องศา	3.2 พิลิปดา

เมื่อทำการคำนวณย้อนกลับ ก็จะได้ค่าทางสถิติดังนี้ (ตารางที่ 4-17)

ตารางที่ 4-17 ผลทางสถิติ สำหรับค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้

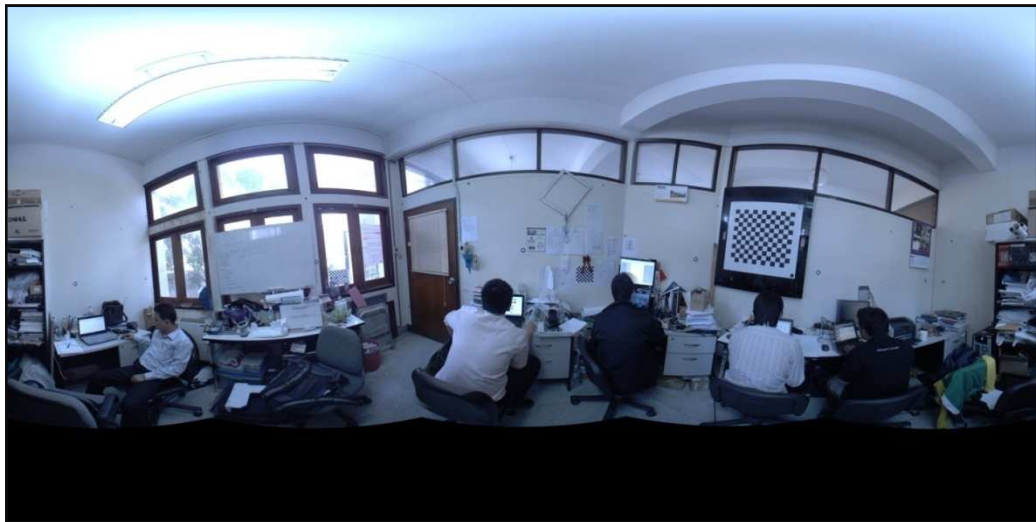
	x (Pixel)	y (Pixel)
RMSE	1.11	0.90
ระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัด	0.016 ม.	0.013 ม.

จากผลการคำนวณ ได้ว่า จุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้คือ  $X_0 = 1000.009$  เมตร  $Y_0 = 500.026$  เมตร  $Z_0 = 100.999$  เมตร  $\omega = 0.15517$  องศา  $\phi = -0.09640$  องศา และ  $K = 99.02418$  องศา โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X_0$ ,  $Y_0$  และ  $Z_0$  เท่ากับ 6.0, 10.5 และ 6.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม  $\omega$ ,  $\phi$  และ  $K$  เท่ากับ 2.7, 1.8 และ 3.2 พิลิปดา ตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบพิกัดภาพที่คำนวณออกมาได้ กับพิกัดภาพที่ทำการวัดบนภาพจะมี RMSE ทางแกน X มีค่า 1.11 จุดภาพ และทางแกน Y มีค่า 0.90 จุดภาพ แล้วเมื่อนำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระยะทางเทียบกับรัศมีเฉลี่ยประมาณ 12.5 เมตร จะได้ว่า ในทางแกน X มีระยะทางที่คลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.016 เมตร และในทางแกน Y เท่ากับ 0.013 เมตร

### 4.3.2 กรณีกล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง

ในกรณีนี้จะเสมือนการติดตั้งกล้องถ่ายภาพพานอรามาบนระบบการเก็บข้อมูลแบบเคลื่อนที่ กล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง เพราะติดตั้งบนรถยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ และไม่มีระบบสนับสนุนให้ปรับตัวเองในแนวตั้งได้

#### 4.3.2.1 ข้อมูลทดสอบห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก ห้องวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก (ภาพที่ 4-8)



ภาพที่ 4-8 การทดสอบแบบจำลองกรณีทั่วไป

ทำการวัดพิกัดภาพในระบบ Equirectangular แล้วแปลงเป็น Spherical ได้  
ดังนี้ (ตารางที่ 4-18)

ตารางที่ 4-18 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีทั่วไป

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$V$ (Degree)
A1	2709.11	1278.00	0.60733	4.80000
A2	3614.17	1325.24	60.94467	1.65067
A3	4257.26	1394.11	103.81733	-2.94067
A4	4820.52	1437.36	141.36800	-5.82400
A5	4913.29	1443.62	147.55267	-6.24133
A6	359.58	1453.30	-156.02800	-6.88667
A7	729.52	1425.98	-131.36533	-5.06533
A8	1625.51	1338.90	-71.63267	0.74000

เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 4-16 แล้วทำการปรับแก้ค่าของตัวไม่ทราบค่าซึ่งก็คือ  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, K$  จะได้ผลลัพธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้ (ตารางที่ 4-19)

ตารางที่ 4-19 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีทั่วไป

Parameter	Value	$\sigma$
$X_0$	100.004 ม.	4.0 มิลลิเมตร
$Y_0$	200.156 ม.	3.9 มิลลิเมตร
$Z_0$	1.425 ม.	2.8 มิลลิเมตร
$\omega$	6.19723 องศา	6.7ฟิลิปดา
$\varphi$	0.02279 องศา	6.7ฟิลิปดา
$K$	-0.70010 องศา	4.8ฟิลิปดา

ทำการคำนวณย้อนกลับ จะได้ค่าทางสถิติดังนี้ (ตารางที่ 4-20)

ตารางที่ 4-20 ผลทางสถิติ สำหรับค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้

	x (Pixel)	y (Pixel)
RMSE	3.47	0.47
ระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัด	0.008 ม.	0.001 ม.

จากผลการคำนวณ ได้ว่า จุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้คือ  $X_0 = 100.004$  เมตร  $Y_0 = 100.004$  เมตร  $Z_0 = 1.425$  เมตร  $\omega = 6.19723$  องศา  $\varphi = 0.02279$  องศา และ  $K = -0.70010$  องศา โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X_0, Y_0$  และ  $Z_0$  เท่ากับ 4.0, 3.9 และ 2.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม  $\omega, \varphi$  และ  $K$  เท่ากับ 6.7, 6.7 และ 4.9 ฟิลิปดา ตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบพิกัดภาพที่คำนวณออกมาได้ กับพิกัดภาพที่ทำการวัดบนภาพจะมี RMSE ทางแกน X มีค่า 3.47 จุดภาพ และทางแกน Y มีค่า 0.47 จุดภาพ แล้วเมื่อนำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระยะทางเทียบกับรัศมีเฉลี่ยประมาณ 2 เมตร จะได้ว่าในทางแกน X มีระยะทางที่คลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.008 เมตร และในทางแกน Y เท่ากับ 0.001 เมตร

#### 4.3.2.2 ข้อมูลทดสอบ อาคารปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างขนาดจริง อาคารปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างขนาดจริง (ภาพที่ 4-9)



ภาพที่ 4-9 การทดสอบแบบจำลองกรณีทั่วไป  
(อาคารปฏิบัติการทดสอบโครงสร้างขนาดจริง)

- การคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด ใช้พิกัดของจุดควบคุม ดังนี้  
(ตารางที่ 4-21)

ตารางที่ 4-21 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีทั่วไป

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$V$ (Degree)
13	1620.97	1869.81	-71.93533	-34.65400
17	2446.89	1379.51	-16.87400	-1.96733
29	3132.53	1284.55	28.83533	4.36333
33	3630.68	1219.88	62.04533	8.67467
35	3865.13	1173.51	77.67533	11.76600

เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 4-16 แล้วทำการปรับแก้ค่าของตัวไม่ทราบค่าซึ่งก็คือ  $X_0 Y_0 Z_0 \omega \varphi K$  จะได้ผลลัพธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้ (ตารางที่ 4-22)

ตารางที่ 4-22 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีทั่วไป

Parameter	Value	$\sigma$
$X_0$	999.873 ม.	12.7 มิลลิเมตร
$Y_0$	499.948 ม.	22.7 มิลลิเมตร
$Z_0$	101.045 ม.	12.8 มิลลิเมตร
$\omega$	-6.08245 องศา	5.6 ฟลิปดา
$\phi$	-7.16646 องศา	3.4 ฟลิปดา
$K$	108.09420 องศา	5.6 ฟลิปดา

ทำการคำนวณย้อนกลับจะได้พิกัดภาพ ดังนี้ (ตารางที่ 4-23)

ตารางที่ 4-23 การเปรียบเทียบระหว่างพิกัดภาพจากภาพถ่ายกับพิกัดภาพ  
ที่คำนวณได้

Target	$x_p'$ (Pixel)	$y_p'$ (Pixel)	$x_p' - x_p$ (Pixel)	$y_p' - y_p$ (Pixel)
13	1621.04	1869.73	0.07	-0.08
17	2447.02	1379.20	0.13	-0.31
29	3132.20	1285.08	-0.33	0.53
33	3632.24	1219.09	1.56	-0.79
35	3864.13	1173.95	-1.00	0.44
Mean			0.09	-0.04
RMSE			0.84	0.49
ระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัด			0.012 ม.	0.007 ม.

จากผลการคำนวณ ได้ว่า จุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้คือ  $X_0 = 999.873$  เมตร  $Y_0 = 499.948$  เมตร  $Z_0 = 101.045$  เมตร  $\omega = -6.08245$  องศา  $\phi = -7.16646$  องศา และ  $K = 108.09420$  องศา โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X_0$ ,  $Y_0$  และ  $Z_0$  เท่ากับ 12.7, 22.7 และ 12.8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม  $\omega$ ,  $\phi$  และ  $K$  เท่ากับ 5.6, 3.4 และ 5.6 ฟลิปดา ตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบพิกัดภาพที่คำนวณออกมาได้ กับพิกัดภาพที่ทำการวัดบนภาพ จะมี RMSE ทางแกน X มีค่า 0.84 จุดภาพ และทางแกน Y มีค่า 0.49 จุดภาพ แล้วเมื่อนำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระยะทางเทียบกับรัศมีเฉลี่ยประมาณ 12.5 เมตร จะได้ว่า ในทางแกน X มีระยะทางที่คลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.012 เมตร และในทางแกน Y เท่ากับ 0.007 เมตร

- การคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย 18 จุด ใช้พิกัดของจุดควบคุม ดังนี้ (ตารางที่ 4-24)

ตารางที่ 4-24 พิกัดภาพของจุดควบคุม กรณีทั่วไป

Target	$x_p$ (Pixel)	$y_p$ (Pixel)	$\mu$ (Degree)	$\nu$ (Degree)
13	1620.97	1869.81	-71.93533	-34.65400
15	2223.10	1541.05	-31.79333	-12.73667
16	2426.80	1152.28	-18.21333	13.18133
17	2446.89	1379.51	-16.87400	-1.96733
18	2449.72	1146.46	-16.68533	13.56933
19	2468.27	1376.53	-15.44867	-1.76867
24	2910.55	1256.73	14.03667	6.21800
25	2918.79	1309.03	14.58600	2.73133
26	2979.59	1248.23	18.63933	6.78467
27	2986.04	1299.75	19.06933	3.35000
28	3092.08	1052.68	26.13867	19.82133
29	3132.53	1284.55	28.83533	4.36333
30	3118.83	1050.36	27.92200	19.97600
31	3156.45	1280.69	30.43000	4.62067
32	3599.77	1019.18	59.98467	22.05467
33	3630.68	1219.88	62.04533	8.67467
34	3831.12	942.92	75.40800	27.13867
35	3865.13	1173.51	77.67533	11.76600

เมื่อนำมาเข้าสมการที่ 4-16 แล้วทำการปรับแก้ค่าของตัวไม่ทราบค่าซึ่งก็คือ  $X_0 Y_0 Z_0 \omega \varphi K$  จะได้ผลลัพธ์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้ (ตารางที่ 4-25)

ตารางที่ 4-25 จุดเปิดถ่ายภาพคำนวณได้ กรณีทั่วไป

Parameter	Value	$\sigma$
$X_0$	999.868 ม.	5.8 มิลลิเมตร
$Y_0$	499.937 ม.	9.8 มิลลิเมตร
$Z_0$	101.050 ม.	6.2 มิลลิเมตร
$\omega$	-6.02713 องศา	2.4ฟิลิปดา
$\varphi$	-7.19539 องศา	1.7ฟิลิปดา
$K$	108.05155 องศา	2.9ฟิลิปดา



เมื่อทำการคำนวณย้อนกลับ ก็จะได้ค่าทางสถิติดังนี้ (ตารางที่ 4-26)

ตารางที่ 4-26 ผลทางสถิติ สำหรับค่าพิกัดภาพที่คำนวณได้

	x (Pixel)	y (Pixel)
RMSE	0.98	0.87
ระยะที่คลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัด	0.014 ม.	0.013 ม.

จากผลการคำนวณ ได้ว่า จุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้คือ  $X_0 = 999.868$  เมตร  $Y_0 = 499.937$  เมตร  $Z_0 = 101.050$  เมตร  $\Omega = -6.02713$  องศา  $\Phi = -7.19539$  องศา และ  $K = 108.05155$  องศา โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $X_0$ ,  $Y_0$  และ  $Z_0$  เท่ากับ 5.8, 9.8 และ 6.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุม  $\Omega$ ,  $\Phi$  และ  $K$  เท่ากับ 2.4, 1.7 และ 2.9 พิลิปดา ตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบพิกัดภาพที่คำนวณออกมาได้ กับพิกัดภาพที่ทำการวัดบนภาพ จะมี RMSE ทางแกน X มีค่า 0.98 จุดภาพ และทางแกน Y มีค่า 0.87 จุดภาพ แล้วเมื่อนำมาคำนวณเปลี่ยนเป็นระยะทางเทียบกับรัศมีเฉลี่ยประมาณ 12.5 เมตร จะได้ว่า ในทางแกน X มีระยะทางที่คลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.014 เมตร และในทางแกน Y เท่ากับ 0.013 เมตร

#### 4.3.3 สรุปผลการคำนวณการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา

จากผลการคำนวณการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา ได้ผลสรุปดังตารางที่ 4-27 ซึ่งในกรณีรัศมีของข้อมูลมีขนาดประมาณ 1-2 เมตร จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 2.8 - 4 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมอยู่ระหว่าง 4.7 - 6.8 พิลิปดา ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 0.008 เมตร และกรณีรัศมีของข้อมูลมีขนาดประมาณ 10-15 เมตร สำหรับกรณีการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 12.7 - 26.3 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมอยู่ระหว่าง 3.4 - 6.6 พิลิปดา ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 0.014 เมตร กรณีการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย 18 จุด มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 5.8 - 10.5 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมอยู่ระหว่าง 1.7 - 3.2 พิลิปดา ระยะคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 0.016 เมตร

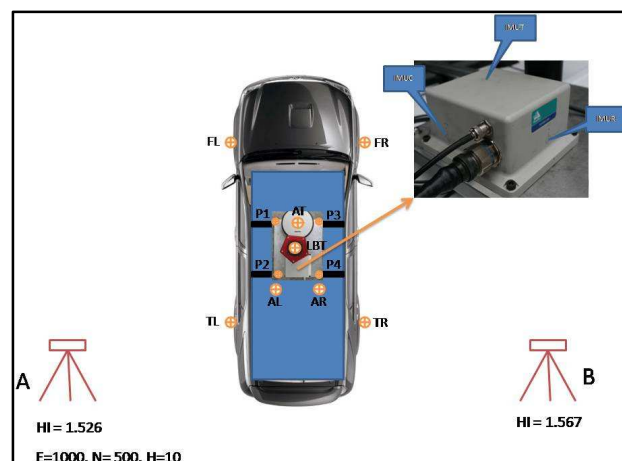
ตารางที่ 4-27 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา

Case	$\sigma_{x0}$	$\sigma_{y0}$	$\sigma_{z0}$	$\sigma_{\omega}$	$\sigma_{\phi}$	$\sigma_{\kappa}$	ระยะที่กลาดเคลื่อน (ม.)
	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(ฟิลิปดา)	(ฟิลิปดา)	(ฟิลิปดา)	
รัศมีข้อมูล 1-2 เมตร กล้องตั้งอยู่ในแนวตั้ง	4.0	3.8	2.8	6.6	6.5	4.7	0.008
รัศมีข้อมูล 10-15 เมตร กล้องตั้งอยู่ในแนวตั้ง จุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด	14.3	26.3	15.0	6.6	4.1	6.6	0.014
รัศมีข้อมูล 10-15 เมตร กล้องตั้งอยู่ในแนวตั้ง จุดควบคุมภาพถ่าย 18 จุด	6.0	10.5	6.7	2.7	1.8	3.2	0.016
รัศมีข้อมูล 1-2 เมตร กล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง	4.0	3.9	2.8	6.7	6.7	4.8	0.008
รัศมีข้อมูล 10-15 เมตร กล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง จุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด	12.7	22.7	12.8	5.6	3.4	5.6	0.012
รัศมีข้อมูล 10-15 เมตร กล้องไม่อยู่ในแนวตั้ง จุดควบคุมภาพถ่าย 18 จุด	5.8	9.8	6.2	2.4	1.7	2.9	0.014

#### 4.4 ผลการเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

##### 4.4.1 ผลการหาตำแหน่งของอุปกรณ์

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์บนแพลตฟอร์มแล้ว ก็ทำการกำหนดจุดอ้างอิงสองจุด ห่างกันประมาณ 20 เมตร (ภาพที่ 4-10 ภาพที่ 4-11 และภาพที่ 4-12) แล้วทำการเก็บข้อมูลเพื่อคำนวณหาตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ แล้วนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม GNU GAMA ได้ผลดังนี้ (ตารางที่ 4-28 และตารางที่ 4-29)



ภาพที่ 4-10 ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ

ตารางที่ 4-28 ความสูงของอุปกรณ์เมื่อเทียบกับพื้น

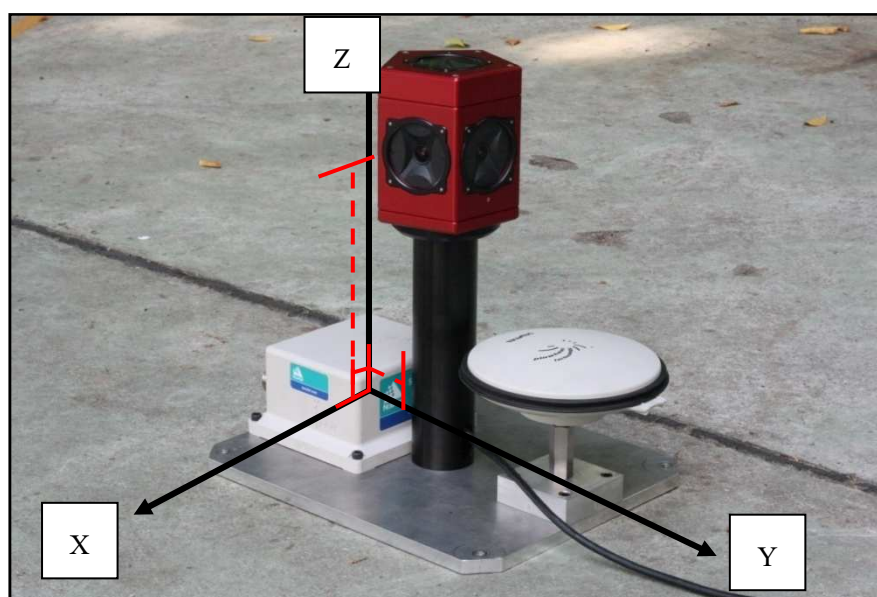
ความสูงอุปกรณ์บน MMS เทียบกับพื้น			
	Plate	IMU	Ladybug
MMS Chula	1.797	1.828	2.101



ภาพที่ 4-11 ความสูงของอุปกรณ์บนยานพาหนะเทียบกับพื้น

ตารางที่ 4-29 ระยะห่างของกล้องถ่ายภาพพานอรามากับ GPS/IMU

Offset อุปกรณ์บนเพลท เทียบกับ GPS/IMU			
	X	Y	Z
Ladybug	0.032	0.096	0.273



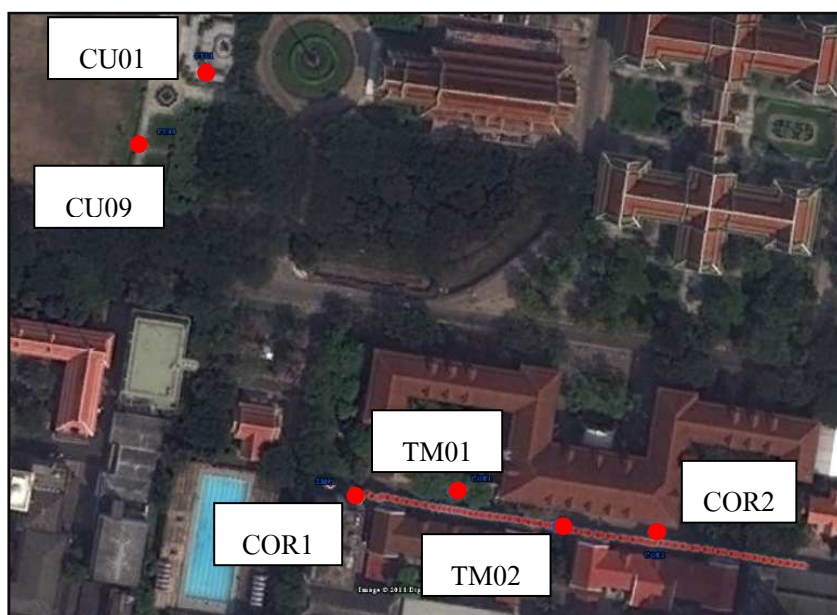
ภาพที่ 4-12 ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์

#### 4.4.2 ผลการทำวงรอบและจุดควบคุมภาพถ่าย

การทำวงรอบสำหรับกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายนั้น ใช้วิธีโยงยึดค่าพิกัดจากหมุด CU01 และ CU09 โดยจะถ่ายไปยังหมุด COR1 และ COR2 ที่อยู่ระหว่างอาคาร 1 กับอาคาร 3 และอาคาร 2 กับอาคาร 3 ตามลำดับ (ภาพที่ 4-13) โดยในการทำได้มีการเพิ่มหมุดวงรอบอีก 2 หมุด คือ TM01 และ TM02 แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกไปคำนวณโดยใช้โปรแกรม GNU GAMA ซึ่งได้ออกมาดังนี้ (ตารางที่ 4-30)

ตารางที่ 4-30 ค่าพิกัดหมุดวงรอบ

	X	Y	Z
CU01	665607.377	1519310.243	-28.789
CU09	665581.084	1519281.989	-29.857
COR1	665711.127	1519141.275	-29.952
COR2	665792.940	1519125.706	-29.893
TM01	665670.399	1519139.744	-29.934
TM02	665753.029	1519127.735	-30.138



ภาพที่ 4-13 ตำแหน่งหมุดวงรอบ

จุดควบคุมภาพถ่าย และจุดตรวจสอบอิสระนั้น จะแบ่งเป็นสองกรณี กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง จะมีจุดควบคุมภาพถ่าย 15 จุด และจุดตรวจสอบอิสระ 20 จุด ส่วนในกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง มีจุดควบคุมภาพถ่าย 5 จุด และจุดตรวจสอบอิสระ 10 จุด

#### 4.4.2.1 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

ในกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายทั้งหมด 15 จุด (ภาพที่ 4-14) ซึ่งมีค่าพิกัดดังตารางที่ 4-31

ตารางที่ 4-31 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

Point	X	Y	Z
p21	665724.508	1519125.509	-26.472
p25	665724.495	1519125.489	-21.947
p27	665723.877	1519125.609	-22.845
p45	665708.069	1519128.096	-26.472
p48	665709.067	1519127.950	-27.466
p51	665704.309	1519128.659	-21.993
p52	665704.315	1519128.665	-22.839
p76	665746.547	1519126.442	-19.909
p94	665791.903	1519115.126	-27.290
p95	665791.904	1519115.128	-26.303
p98	665791.894	1519115.112	-22.300
p104	665783.561	1519116.420	-27.320
p107	665786.019	1519116.036	-26.293
p116	665785.774	1519133.213	-27.723
p118	665789.673	1519132.592	-27.734



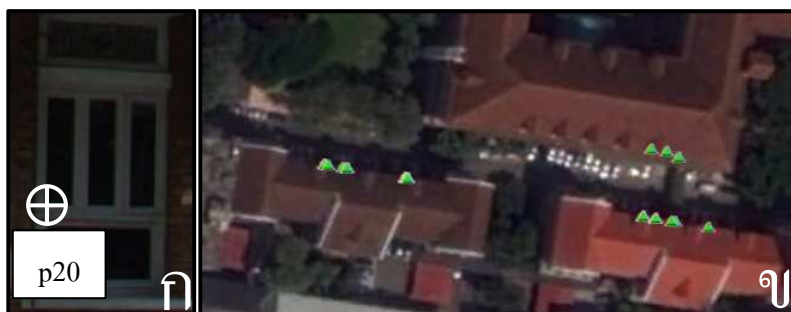
ภาพที่ 4-14 จุดควบคุมกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

ก) ตัวอย่างจุดควบคุม ข) จุดควบคุมทั้งหมด

สำหรับจุดตรวจสอบอิสระในกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรงมีทั้งหมด 20 จุด (ภาพที่ 4-15) ซึ่งมีค่าพิกัดดังนี้ (ตารางที่ 4-32)

ตารางที่ 4-32 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

Point	X	Y	Z
p20	665724.518	1519125.504	-27.005
p22	665723.895	1519125.614	-26.555
p41	665703.349	1519128.813	-26.152
p42	665703.345	1519128.807	-27.292
p44	665704.317	1519128.672	-27.348
p46	665708.075	1519128.103	-27.463
p49	665703.319	1519128.813	-21.662
p54	665708.066	1519128.073	-22.896
p55	665709.059	1519127.916	-22.153
p90	665800.299	1519113.808	-26.605
p92	665800.072	1519113.867	-27.209
p96	665790.923	1519115.277	-26.305
p97	665790.925	1519115.284	-27.299
p100	665790.909	1519115.259	-21.186
p103	665783.556	1519116.416	-26.350
p110	665786.924	1519115.878	-22.377
p112	665785.939	1519116.017	-21.216
p114	665781.364	1519134.017	-27.829
p119	665792.392	1519132.174	-27.889
p121	665796.950	1519130.556	-26.778



ภาพที่ 4-15 จุดตรวจสอบอิสระกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

ก) ตัวอย่างจุดตรวจสอบอิสระ ข) จุดตรวจสอบอิสระทั้งหมด

#### 4.4.2.2 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

ในกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายทั้งหมด 5 จุด (ภาพที่ 4-16) ซึ่งมีค่าพิกัดดังตารางที่ 4-33

ตารางที่ 4-33 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่าย กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

Point	X	Y	Z
t04	665723.892	1519125.625	-27.053
t18	665739.069	1519140.593	-25.761
t33	665744.562	1519123.877	-26.625
t37	665744.140	1519121.013	-26.651
t53	665744.641	1519121.962	-28.437



ภาพที่ 4- 16 จุดควบคุมกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

ก) ตัวอย่างจุดควบคุม ข) จุดควบคุมทั้งหมด

สำหรับจุดตรวจสอบอิสระ มีทั้งหมด 10 จุด (ภาพที่ 4-17) ซึ่งมีค่าพิกัดดังนี้  
(ตารางที่ 4-34)

ตารางที่ 4-34 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

Point	X	Y	Z
t01	665724.518	1519125.504	-27.005
t19	665739.087	1519140.605	-24.724
t21	665740.268	1519140.410	-26.036
t31	665744.512	1519123.493	-26.532
t34	665744.560	1519123.878	-27.377
t36	665744.105	1519120.809	-26.597
t43	665744.654	1519115.892	-25.770
t48	665744.999	1519124.682	-25.507
t51	665745.012	1519124.438	-28.195
t54	665743.830	1519116.701	-28.285



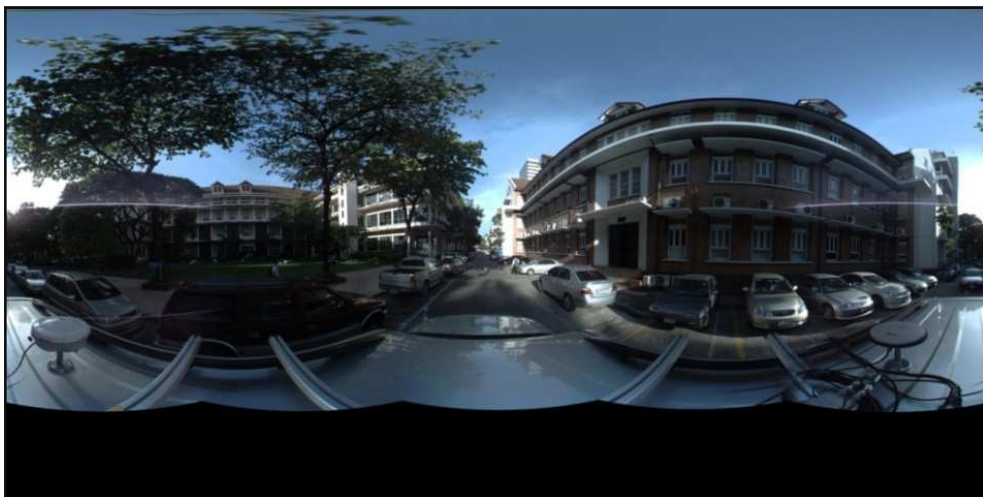
ภาพที่ 4- 17 จุดตรวจสอบอิสระกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง  
ก) ตัวอย่างจุดตรวจสอบอิสระ ข) จุดตรวจสอบอิสระทั้งหมด



#### 4.4.3 ผลการปรับแก้ของบล็อกคำสั่งและการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระ

##### 4.4.3.1 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

ใช้ข้อมูลบริเวณถนนระหว่างอาคาร 1 อาคาร 2 และ อาคาร 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทั้งหมด 32 ภาพ หมุดควบคุมทั้งหมด 15 หมุด (ภาพที่ 4-18 และภาพที่ 4-19)



ภาพที่ 4-18 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 8312)



ภาพที่ 4-19 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 8344)

จากการปรับแก้ของบล็อกลำแสงจะได้ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา  
และค่าการวางตัวของเซนเซอร์ ซึ่งค่าที่ได้มีดังนี้ (ตารางที่ 4-35)

ตารางที่ 4-35 ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้  
กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

Photo	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$\omega$	$\phi$	$\kappa$
8312	665707.021	1519137.045	-27.838	1.82337	0.02833	104.83469
8314	665708.502	1519136.809	-27.824	-0.09976	-0.15358	105.04437
8316	665709.876	1519136.611	-27.811	-1.74205	-0.12290	105.31905
8320	665712.765	1519136.162	-27.702	1.16072	0.00237	105.65669
8323	665714.771	1519135.697	-27.698	1.49576	0.37961	105.97488
8326	665716.803	1519135.357	-27.740	4.14787	0.56645	106.10188
8328	665718.318	1519135.105	-27.738	4.29672	0.54429	105.86503
8332	665721.651	1519134.515	-27.825	1.03175	-0.08083	105.44355
8335	665724.325	1519134.087	-27.807	0.91577	-0.32692	105.13972
8338	665727.144	1519133.641	-27.773	0.76768	-0.33080	104.67855
8341	665730.060	1519133.195	-27.727	0.82369	-0.87113	104.15418
8344	665733.026	1519132.784	-27.691	0.78713	-0.82080	103.38963
8347	665735.961	1519132.389	-27.653	0.80417	-1.30130	103.38474
8350	665739.228	1519131.890	-27.692	-0.47674	-0.35877	104.15189
8353	665743.164	1519131.293	-27.656	0.50302	-0.20454	105.11103
8356	665747.613	1519130.636	-27.600	1.24970	-0.31067	105.39873
8359	665752.156	1519129.923	-27.581	1.30570	0.65922	105.45442
8362	665756.595	1519129.201	-27.576	1.07588	0.10773	105.36428
8365	665761.641	1519128.374	-27.581	1.60921	-0.39792	105.44253
8368	665767.022	1519127.506	-27.652	1.87841	-0.88663	104.78319
8371	665772.358	1519126.756	-27.695	1.66734	-1.03368	104.66294
8374	665777.509	1519126.059	-27.701	1.32513	-0.89637	104.76522
8377	665782.534	1519125.282	-27.697	1.57915	-0.55157	104.73965
8380	665786.927	1519124.597	-27.693	1.62207	-0.08424	104.91029
8382	665789.040	1519124.260	-27.688	1.25679	-0.20114	104.98194
8387	665793.244	1519123.603	-27.513	-0.59697	-0.50664	104.91039
8390	665795.866	1519123.187	-27.476	2.09696	0.17860	104.93891
8392	665797.628	1519122.925	-27.534	0.70284	0.46684	104.99232
8394	665799.461	1519122.643	-27.512	1.45545	0.33479	104.89596
8398	665803.396	1519122.087	-27.669	0.98262	0.71387	104.46016
8400	665805.706	1519121.742	-27.670	1.07333	0.31815	104.43082
8404	665811.778	1519120.847	-27.646	0.46550	0.30321	104.87276

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณออกมาได้ ดังแสดงในตารางที่ 4-36

ตารางที่ 4-36 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณออกมาได้

กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

$\sigma$	$\sigma X_0$ (มม.)	$\sigma Y_0$ (มม.)	$\sigma Z_0$ (มม.)	$\sigma \omega$ (ฟิลิปดา)	$\sigma \varphi$ (ฟิลิปดา)	$\sigma \kappa$ (ฟิลิปดา)
8312	35.9	26.8	31.6	7.7	12.3	12.7
8314	31.8	27.9	30.5	7.3	12.4	12.0
8316	28.4	33.3	30.4	7.2	12.5	11.4
8320	31.1	46.2	34.9	13.7	13.4	10.7
8323	36.9	18.8	31.9	4.2	12.5	8.1
8326	38.5	25.0	34.1	6.7	11.9	7.6
8328	34.1	43.5	35.9	9.0	12.0	7.6
8332	24.6	35.5	31.2	8.1	11.9	6.9
8335	20.9	30.9	28.8	7.0	12.1	6.7
8338	22.0	27.8	28.0	7.0	12.1	6.7
8341	25.5	28.2	26.2	6.8	11.5	7.2
8344	29.9	26.5	25.0	6.4	11.4	7.0
8347	30.3	28.2	25.3	7.0	11.7	7.0
8350	30.2	31.3	25.6	7.5	11.7	7.8
8353	16.7	30.5	23.9	6.4	11.6	6.5
8356	16.3	31.8	23.5	6.8	11.8	6.2
8359	27.9	31.4	24.4	7.3	12.2	5.8
8362	35.9	32.9	23.7	7.0	12.4	5.6
8365	46.5	40.6	29.8	6.6	14.9	5.6
8368	43.6	40.3	33.2	6.1	16.5	5.1
8371	32.0	27.7	19.4	5.0	5.7	4.7
8374	14.3	22.5	12.8	4.5	3.0	4.6
8377	7.3	18.4	7.4	3.7	2.3	3.4
8380	5.2	11.2	4.6	3.3	2.1	1.8
8382	5.1	10.4	4.5	3.4	2.1	1.8
8387	5.7	12.0	6.3	3.5	2.2	2.3
8390	6.9	13.6	8.3	3.7	2.4	2.9
8392	9.4	15.4	10.1	3.9	2.6	3.3
8394	12.5	19.1	12.0	4.5	3.2	4.0
8398	19.3	22.3	15.9	5.8	3.6	5.6
8400	23.7	25.0	19.0	6.0	3.7	6.3
8404	37.1	39.9	35.6	8.9	4.8	8.0

ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่จะนำมาเปรียบเทียบ ได้จากการหาระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณได้จากการปรับแก้ด้วยวิธีบล็อกลำแสง และนำพิกัดนั้นมาเปรียบเทียบ ซึ่งตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จะมีค่าตามตารางที่ 4-37 และยานพาหนะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (ภาพที่ 4-20)

ตารางที่ 4-37 ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่จะนำมาเปรียบเทียบ

กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

Date (YMD)	GPSTime (HMS)	Easting (m)	Northing (m)	H-Ell (m)	Omega (Deg)	Phi (Deg)	Heading (Deg)
20/7/2010	10:26:56	665706.858	1519136.654	-28.174	0.35917	1.12624	98.80202
20/7/2010	10:26:57	665708.468	1519136.420	-28.170	0.04262	0.34466	99.04586
20/7/2010	10:26:58	665709.876	1519136.205	-28.138	-0.49286	-2.31273	99.39985
20/7/2010	10:26:59	665712.666	1519135.750	-28.037	0.09221	0.63526	99.71296
20/7/2010	10:27:00	665714.744	1519135.405	-28.042	0.07961	1.21873	100.04545
20/7/2010	10:27:01	665716.751	1519135.069	-28.094	0.34352	3.15539	100.14066
20/7/2010	10:27:02	665718.376	1519134.796	-28.119	0.59751	3.89941	100.04443
20/7/2010	10:27:03	665721.566	1519134.261	-28.223	0.31766	0.71837	99.68299
20/7/2010	10:27:04	665724.216	1519133.829	-28.221	0.48052	0.71847	99.40823
20/7/2010	10:27:05	665727.013	1519133.404	-28.217	0.48513	0.70850	98.97297
20/7/2010	10:27:06	665729.918	1519132.968	-28.205	0.85878	0.62048	98.51967
20/7/2010	10:27:07	665732.889	1519132.572	-28.193	0.76430	0.70712	97.74142
20/7/2010	10:27:08	665735.860	1519132.195	-28.189	1.22547	0.94509	97.44607
20/7/2010	10:27:09	665739.060	1519131.739	-28.185	1.52099	0.18290	98.27731
20/7/2010	10:27:10	665742.971	1519131.147	-28.163	1.42834	0.44604	98.95951
20/7/2010	10:27:11	665747.372	1519130.446	-28.141	1.43863	0.68967	99.25150
20/7/2010	10:27:12	665752.273	1519129.684	-28.119	0.43181	0.99899	99.41918
20/7/2010	10:27:13	665756.659	1519128.983	-28.125	0.86884	0.68040	99.28438
20/7/2010	10:27:14	665761.631	1519128.158	-28.124	1.32256	0.92931	99.29495
20/7/2010	10:27:15	665766.966	1519127.316	-28.168	1.90726	1.08692	98.56068
20/7/2010	10:27:16	665772.240	1519126.536	-28.174	1.71880	0.92727	98.53955
20/7/2010	10:27:17	665777.416	1519125.777	-28.170	1.49105	0.68065	98.48784
20/7/2010	10:27:18	665782.485	1519125.043	-28.156	1.14200	1.08934	98.61908
20/7/2010	10:27:19	665786.939	1519124.380	-28.165	0.88751	1.37380	98.85012
20/7/2010	10:27:20	665788.901	1519124.080	-28.173	0.92669	1.07843	98.96686
20/7/2010	10:27:21	665793.253	1519123.427	-28.057	0.62908	-0.99127	98.93238
20/7/2010	10:27:22	665795.841	1519123.053	-28.029	0.65491	1.31869	98.87504
20/7/2010	10:27:23	665797.716	1519122.827	-28.085	0.13289	0.65133	98.92763
20/7/2010	10:27:24	665799.373	1519122.573	-28.075	0.37868	1.40303	98.83006
20/7/2010	10:27:25	665803.506	1519122.017	-28.247	0.09496	1.81676	98.38858
20/7/2010	10:27:26	665805.531	1519121.719	-28.273	0.26964	1.20103	98.29438
20/7/2010	10:27:27	665811.814	1519120.790	-28.319	0.15320	0.66321	98.77064

และตำแหน่งที่ได้จาก SPAN-CPT มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังนี้  
(ตารางที่ 4-38)

ตารางที่ 4-38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT

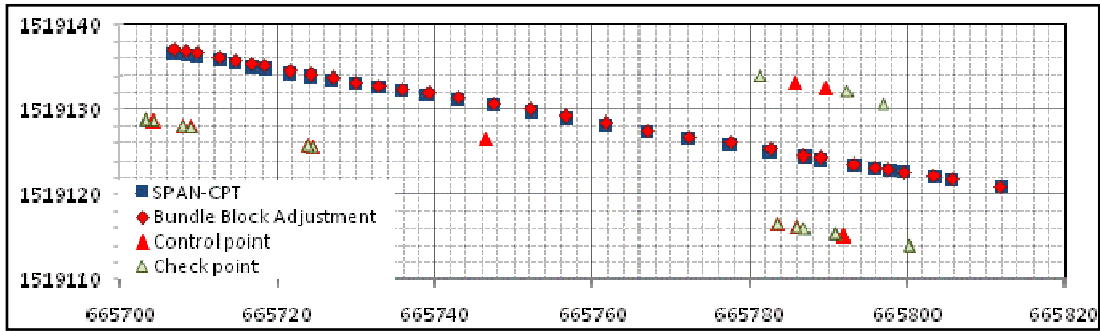
กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

GPSTime (HMS)	SDHoriz (มม.)	SDHeight (มม.)	OmPhSD (ฟิลิปดา)	HdngSD (ฟิลิปดา)	Q
10:26:56	501.0	314.0	24.0	130.0	5
10:26:57	499.0	313.0	24.1	130.0	5
10:26:58	497.0	311.0	24.1	130.0	5
10:26:59	493.0	308.0	24.2	129.9	5
10:27:00	490.0	306.0	24.3	129.9	5
10:27:01	487.0	303.0	24.4	129.8	6
10:27:02	484.0	301.0	24.4	129.8	6
10:27:03	480.0	298.0	24.5	129.8	5
10:27:04	477.0	295.0	24.5	129.8	5
10:27:05	474.0	292.0	24.6	129.8	5
10:27:06	471.0	289.0	24.6	129.7	5
10:27:07	468.0	285.0	24.6	129.7	5
10:27:08	465.0	282.0	24.6	129.7	5
10:27:09	462.0	279.0	24.6	129.7	5
10:27:10	459.0	275.0	24.6	129.6	5
10:27:11	456.0	272.0	24.6	129.6	5
10:27:12	453.0	268.0	24.6	129.6	5
10:27:13	450.0	265.0	24.5	129.6	5
10:27:14	447.0	261.0	24.5	129.5	5
10:27:15	445.0	258.0	24.5	129.5	5
10:27:16	442.0	254.0	24.5	129.5	5
10:27:17	440.0	251.0	24.5	129.5	5
10:27:18	437.0	248.0	24.4	129.5	5
10:27:19	435.0	244.0	24.4	129.5	5
10:27:20	434.0	242.0	24.4	129.4	5
10:27:21	431.0	237.0	24.4	129.4	5
10:27:22	429.0	234.0	24.3	129.4	6
10:27:23	428.0	232.0	24.3	129.3	6
10:27:24	427.0	231.0	24.3	129.3	6
10:27:25	425.0	227.0	24.2	129.3	5
10:27:26	424.0	226.0	24.2	129.3	6
10:27:27	422.0	223.0	24.1	129.3	5

และเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT จะได้  
ดังนี้ (ตารางที่ 4-39)

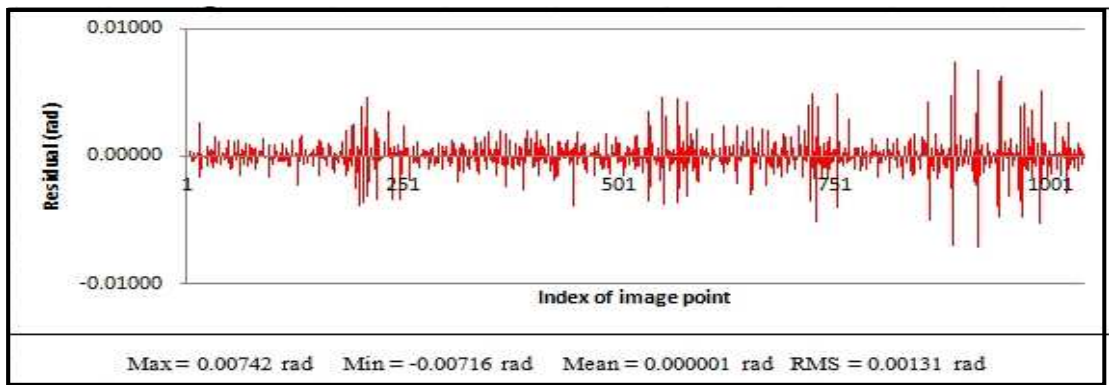
ตารางที่ 4-39 ค่าต่างระหว่างค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้กับค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพ  
จาก SPAN-CPT กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

Photo	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta \omega$	$\Delta \varphi$	$\Delta K$
8312	-0.163	-0.391	-0.336	-1.46420	1.09791	-6.03267
8314	-0.034	-0.389	-0.346	0.14237	0.49823	-5.99850
8316	0.000	-0.406	-0.327	1.24919	-2.18983	-5.91920
8320	-0.099	-0.412	-0.335	-1.06851	0.63289	-5.94374
8323	-0.027	-0.292	-0.344	-1.41614	0.83912	-5.92943
8326	-0.052	-0.288	-0.354	-3.80435	2.58894	-5.96122
8328	0.058	-0.309	-0.381	-3.69921	3.35512	-5.82059
8332	-0.085	-0.254	-0.398	-0.71409	0.79920	-5.76056
8335	-0.109	-0.258	-0.414	-0.43526	1.04539	-5.73149
8338	-0.131	-0.237	-0.444	-0.28256	1.03930	-5.70558
8341	-0.142	-0.227	-0.478	0.03509	1.49161	-5.63451
8344	-0.137	-0.212	-0.502	-0.02283	1.52792	-5.64821
8347	-0.101	-0.194	-0.536	0.42130	2.24639	-5.93868
8350	-0.168	-0.151	-0.493	1.99773	0.54166	-5.87458
8353	-0.193	-0.146	-0.507	0.92532	0.65057	-6.15152
8356	-0.241	-0.190	-0.541	0.18893	1.00034	-6.14723
8359	0.117	-0.239	-0.538	-0.87388	0.33977	-6.03525
8362	0.064	-0.218	-0.549	-0.20704	0.57267	-6.07989
8365	-0.010	-0.216	-0.543	-0.28665	1.32724	-6.14758
8368	-0.056	-0.190	-0.516	0.02886	1.97355	-6.22251
8371	-0.118	-0.220	-0.479	0.05146	1.96095	-6.12339
8374	-0.093	-0.282	-0.469	0.16592	1.57701	-6.27738
8377	-0.049	-0.239	-0.459	-0.43714	1.64091	-6.12057
8380	0.012	-0.217	-0.472	-0.73456	1.45804	-6.06017
8382	-0.139	-0.180	-0.485	-0.33009	1.27957	-6.01508
8387	0.009	-0.176	-0.544	1.22605	-0.48464	-5.97801
8390	-0.025	-0.134	-0.553	-1.44205	1.14009	-6.06387
8392	0.088	-0.098	-0.551	-0.56995	0.18449	-6.06469
8394	-0.088	-0.070	-0.563	-1.07677	1.06824	-6.06590
8398	0.110	-0.070	-0.578	-0.88766	1.10289	-6.07158
8400	-0.175	-0.023	-0.603	-0.80369	0.88289	-6.13644
8404	0.036	-0.057	-0.673	-0.31231	0.36000	-6.10212
Mean	-0.061	-0.218	-0.478	-0.45115	1.04839	-5.99257
RMSE	0.109	0.239	0.486	1.24031	1.40502	5.99471



ภาพที่ 4-20 ตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug 3  
กรณียานพาหนะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

สำหรับค่าเศษเหลือได้จากการคำนวณรวมทั้งค่าทางสถิติต่างๆสามารถ  
นำมาแสดงได้ตามภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 เศษเหลือและค่าทางสถิติ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

สำหรับค่าพิคคของจุดตรวจสอบอิสระที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการ  
ปรับแก้ของบล็อกลำแสงมีดังนี้คือ (ตารางที่ 4-40)

ตารางที่ 4-40 ค่าพิคคของจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้  
กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

Point	X	Y	Z	$\sigma_x$ (มม.)	$\sigma_y$ (มม.)	$\sigma_z$ (มม.)
p20	665724.512	1519125.486	-27.386	4.1	9.3	3.5
p22	665723.901	1519125.599	-26.454	3.5	6.3	3.2
p41	665703.296	1519128.768	-26.459	20.6	25.4	8.6
p42	665703.310	1519128.794	-27.394	24.4	30.1	9.0
p44	665704.242	1519128.610	-27.390	34.1	66.9	9.6
p46	665708.081	1519128.107	-27.429	4.3	9.0	3.1
p49	665703.349	1519128.834	-21.986	20.8	28.2	21.6
p54	665708.107	1519128.104	-22.924	10.7	20.4	14.2
p55	665709.087	1519127.928	-21.998	2.6	10.8	7.7
p90	665800.264	1519113.827	-26.307	4.2	8.8	3.9
p92	665800.048	1519113.879	-27.217	4.0	9.2	3.7
p96	665790.935	1519115.287	-26.344	5.6	8.8	3.9
p97	665790.923	1519115.266	-27.252	6.8	10.6	4.5
p100	665790.902	1519115.304	-21.382	2.8	4.9	4.2
p103	665783.559	1519116.421	-26.346	4.5	6.3	3.1
p110	665786.927	1519115.932	-22.314	9.2	24.2	17.0
p112	665785.949	1519116.072	-21.389	4.7	6.2	5.4
p114	665781.420	1519133.963	-27.731	8.2	14.4	6.7
p119	665792.413	1519132.169	-27.714	3.8	6.5	3.2
p121	665796.977	1519130.553	-26.802	6.0	10.2	4.9



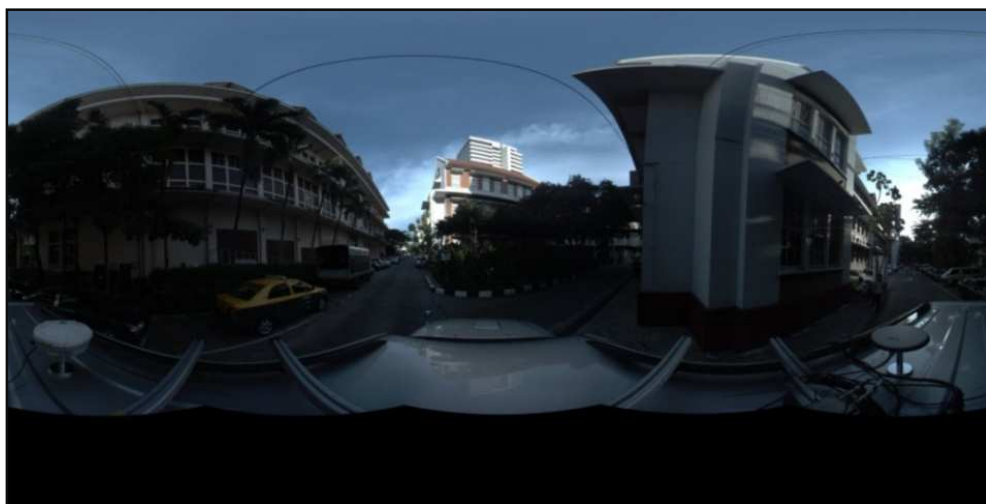
ซึ่งในแต่ละจุด เมื่อเปรียบเทียบค่าพิกัดที่คำนวณได้กับค่าพิกัดที่ได้จากการ  
รังวัดภาคพื้นดินจะมีค่าคลาดเคลื่อนดังนี้ (ตารางที่ 4-41)

ตารางที่ 4-41 ค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากกล้อง Total Station  
กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง

point	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
p20	0.006	0.018	0.381
p22	-0.006	0.015	-0.101
p41	0.054	0.045	0.307
p42	0.035	0.013	0.102
p44	0.075	0.062	0.042
p46	-0.006	-0.004	-0.034
p49	-0.030	-0.021	0.324
p54	-0.041	-0.030	0.028
p55	-0.028	-0.012	-0.155
p90	0.035	-0.019	-0.298
p92	0.024	-0.012	0.008
p96	-0.012	-0.010	0.039
p97	0.002	0.018	-0.047
p100	0.007	-0.045	0.196
p103	-0.003	-0.005	-0.004
p110	-0.003	-0.054	-0.063
p112	-0.010	-0.055	0.173
p114	-0.056	0.054	-0.098
p119	-0.021	0.005	-0.175
p121	-0.027	0.003	0.023
MEAN	0.009	0.006	0.060
RMSE	0.038	0.029	0.219

#### 4.4.3.2 กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

ใช้ข้อมูลบริเวณทางโค้งระหว่างอาคาร 1 และ อาคาร 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทั้งหมด 10 ภาพ หมุดควบคุมทั้งหมด 5 หมุด (ภาพที่ 4-22 และภาพที่ 4-23)



ภาพที่ 4-22 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 12241)



ภาพที่ 4-23 ภาพที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (ภาพหมายเลข 12253)

จากการปรับแก้ของบล็อกลำแสงจะได้ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา  
และค่าการวางตัวของเซนเซอร์ ซึ่งค่าที่ได้มีดังนี้ (ตารางที่ 4-42)

ตารางที่ 4-42 ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้  
กรณีเส้นทางวงของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

Photo	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$\omega$	$\phi$	$\kappa$
12226	665723.233	1519134.110	-27.339	2.55132	-0.97315	102.79227
12229	665728.166	1519133.643	-27.451	2.50013	-0.56195	102.01770
12232	665733.570	1519133.012	-27.574	2.86467	-0.70580	103.51499
12235	665738.531	1519132.230	-27.718	3.04581	-1.62666	106.23910
12238	665742.321	1519131.355	-27.796	3.09515	-0.41676	110.43482
12241	665745.247	1519129.770	-27.903	3.74796	-0.81506	130.77497
12244	665747.237	1519126.848	-28.045	1.43813	1.15993	157.82158
12247	665748.023	1519123.299	-28.132	2.45948	1.67182	178.92568
12250	665748.005	1519119.721	-28.161	2.09595	1.29002	188.63692
12253	665747.658	1519116.169	-28.217	2.01103	1.25904	192.64353

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณออกมาได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-43

ตารางที่ 4-43 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณออกมาได้  
กรณีเส้นทางวงของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

$\sigma$	$\sigma X_0$ (มม.)	$\sigma Y_0$ (มม.)	$\sigma Z_0$ (มม.)	$\sigma \omega$ (ฟิลิปดา)	$\sigma \phi$ (ฟิลิปดา)	$\sigma \kappa$ (ฟิลิปดา)
12226	16.2	36.2	13.7	5.0	4.4	5.8
12229	19.5	21.7	11.7	4.1	4.8	3.7
12232	14.5	13.8	8.3	4.0	4.0	2.6
12235	12.3	26.8	12.2	6.1	7.2	4.2
12238	11.2	25.0	8.4	5.7	7.1	3.0
12241	8.7	21.2	8.8	5.1	8.2	3.0
12244	10.5	10.4	12.8	7.1	9.1	6.4
12247	8.5	6.3	13.2	4.3	11.9	4.0
12250	10.4	8.1	12.0	5.3	11.6	4.7
12253	15.4	17.9	16.0	6.7	12.6	7.0

พิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่จะนำมาเปรียบเทียบ ได้จากการหาระยะทางที่ใกล้ที่สุดจากพิกัดที่คำนวณ ได้จากการปรับแก้ด้วยวิธีบล็อกลำแสง และนำพิกัดนั้นมาเปรียบเทียบ ซึ่งพิกัดที่ได้จะมีค่าตามตารางที่ 4-44

ตารางที่ 4-44 ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT ที่จะนำมาเปรียบเทียบ

กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

Date (YMD)	GPSTime (HMS)	Easting (m)	Northing (m)	H-Ell (m)	Omega (Deg)	Phi (Deg)	Heading (Deg)
20/7/2010	10:49:21	665723.322	1519135.342	-28.003	0.38900	0.49699	95.56973
20/7/2010	10:49:22	665728.394	1519134.827	-27.954	0.54583	0.57818	95.58722
20/7/2010	10:49:23	665733.799	1519134.156	-27.903	0.65776	1.08055	97.51251
20/7/2010	10:49:24	665738.909	1519133.242	-27.866	1.41324	0.87474	99.97154
20/7/2010	10:49:25	665742.655	1519132.181	-27.840	1.11909	0.87623	110.16776
20/7/2010	10:49:26	665745.417	1519129.749	-27.879	1.79051	0.12226	138.47105
20/7/2010	10:49:27	665746.748	1519126.762	-27.902	0.91767	0.15940	160.94441
20/7/2010	10:49:28	665747.118	1519123.163	-27.892	1.28392	-0.07080	177.06617
20/7/2010	10:49:29	665746.981	1519119.930	-27.900	1.25106	-0.04903	183.35116
20/7/2010	10:49:30	665746.605	1519116.400	-27.897	1.50098	-0.07283	186.76582

และตำแหน่งที่ได้จาก SPAN-CPT มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงใน  
ตารางที่ 4-45

ตารางที่ 4-45 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT

กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

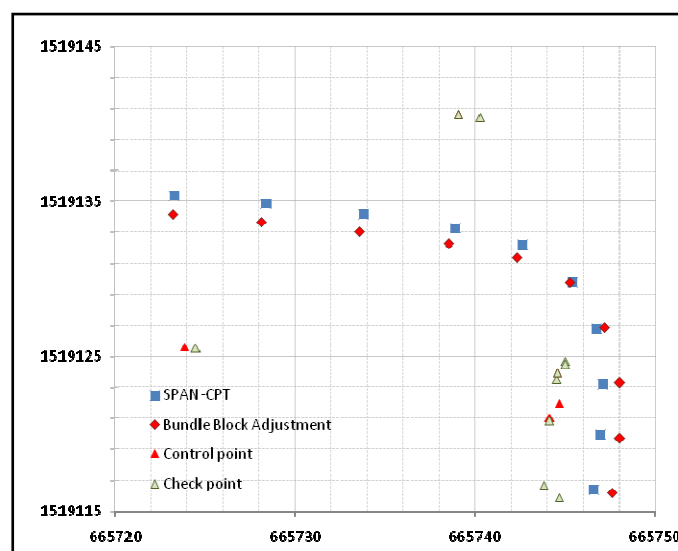
GPSTime (HMS)	SDHoriz (มม.)	SDHeight (มม.)	OmPhSD (ฟิลิปดา)	HdngSD (ฟิลิปดา)	Q
10:49:21	879.0	627.0	24.0	172.6	6
10:49:22	883.0	630.0	24.1	172.7	6
10:49:23	887.0	633.0	24.2	172.8	6
10:49:24	891.0	636.0	24.2	172.9	6
10:49:25	896.0	639.0	24.3	173.1	6
10:49:26	900.0	642.0	24.5	173.5	6
10:49:27	903.0	644.0	24.4	173.5	6
10:49:28	906.0	647.0	24.5	173.8	6
10:49:29	909.0	649.0	24.6	173.9	6
10:49:30	913.0	652.0	24.7	174.1	6

และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จาก SPAN-CPT จะได้  
ดังนี้ (ตารางที่ 4-46)

ตารางที่ 4-46 ค่าต่างระหว่างค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่คำนวณออกมาได้กับค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพ  
จาก SPAN-CPT กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

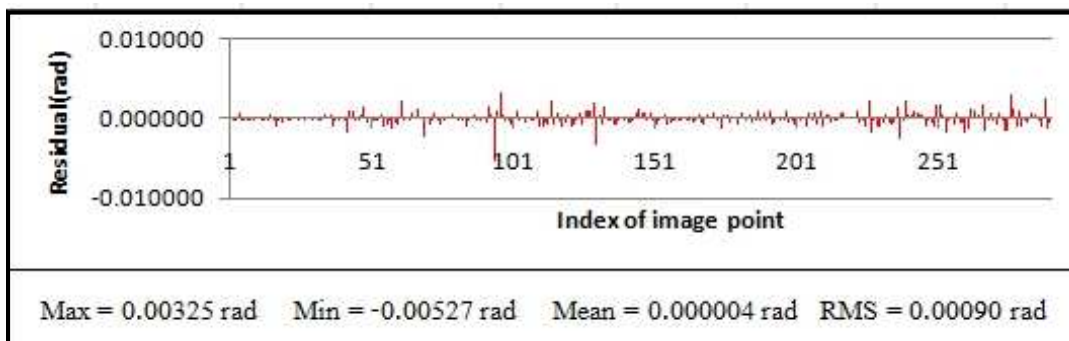
Photo	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta \omega$	$\Delta \phi$	$\Delta \kappa$
12226	0.089	1.232	-0.664	-2.16231	1.47015	-7.22254
12229	0.228	1.184	-0.503	-1.95429	1.14012	-6.43048
12232	0.229	1.144	-0.329	-2.20691	1.78635	-6.00248
12235	0.378	1.012	-0.148	-1.63257	2.50139	-6.26756
12238	0.334	0.826	-0.044	-1.97607	1.29300	-0.26707
12241	0.170	-0.021	0.024	-1.95745	0.93732	7.69609
12244	-0.489	-0.086	0.143	-0.52046	-1.00053	3.12283
12247	-0.905	-0.136	0.240	-1.17556	-1.74261	-1.85951
12250	-1.024	0.209	0.261	-0.84490	-1.33905	-5.28577
12253	-1.053	0.231	0.320	-0.51005	-1.33186	-5.87771
Mean	-0.204	0.559	-0.070	-1.49406	0.37143	-2.83942
RMSE	0.565	0.541	0.320	0.63811	1.47257	4.72444

กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง สามารถนำมา Plot ตำแหน่ง  
ของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug 3 ดังแสดงในภาพที่ 4-24



ภาพที่ 4-24 ตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug 3  
กรณียานพาหนะเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง

สำหรับค่าเศษเหลือได้จากการคำนวณรวมทั้งค่าทางสถิติต่างๆสามารถนำมาแสดงได้ตามภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-25 เศษเหลือและค่าทางสถิติ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

ในส่วนค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสงมีดังนี้คือ (ตารางที่ 4-47)

ตารางที่ 4-47 ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้ กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

Point	X	Y	Z	$\sigma_x$ (มม.)	$\sigma_y$ (มม.)	$\sigma_z$ (มม.)
t01	665724.502	1519125.539	-27.071	9.2	28.6	8.2
t19	665739.107	1519140.579	-24.742	6.1	11.7	6.7
t21	665740.229	1519140.451	-25.794	3.5	11.8	4.0
t31	665744.516	1519123.492	-26.628	7.1	4.7	5.0
t34	665744.553	1519123.891	-27.558	4.5	3.4	2.8
t36	665744.141	1519120.807	-26.657	10.3	6.3	6.5
t43	665744.671	1519115.915	-25.870	17.4	10.0	14.8
t48	665744.978	1519124.653	-25.767	4.4	3.0	4.5
t51	665744.980	1519124.449	-28.426	7.2	6.0	4.7
t54	665743.855	1519116.768	-28.501	14.0	8.3	6.9

ซึ่งในแต่ละจุด เมื่อเปรียบเทียบค่าพิกัดที่คำนวณได้กับค่าพิกัดที่ได้จากการใช้ Total Station จะมีค่าคลาดเคลื่อนดังนี้ (ตารางที่ 4-48)

ตารางที่ 4-48 ค่าต่างของค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากกล้อง Total Station กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง

Point	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
t01	0.016	-0.034	0.065
t19	-0.020	0.026	0.018
t21	0.040	-0.041	-0.242
t31	-0.004	0.000	0.096
t34	0.007	-0.013	0.181
t36	-0.036	0.002	0.059
t43	-0.016	-0.023	0.100
t48	0.021	0.030	0.260
t51	0.032	-0.011	0.231
t54	-0.025	-0.066	0.216
MEAN	0.001	-0.013	0.099
RMSE	0.024	0.031	0.169

#### 4.4.4 สรุปผลการคำนวณการปรับแก้ของบล็อกลำแสงและการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระ

จากผลการคำนวณการปรับแก้ของบล็อกลำแสงและการเปรียบเทียบค่าพิกัดของจุดตรวจสอบอิสระ ในกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรง ผลการปรับแก้ของบล็อกลำแสงสำหรับคำนวณหาตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพ จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 4.5 - 46.5 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมอยู่ระหว่าง 2.1 - 16.5 พิลิปดา และผลการปรับแก้ของบล็อกลำแสงสำหรับคำนวณหาพิกัดจุดตรวจสอบอิสระจะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 2.8 - 66.9 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาจากข้อมูลของ SPAN-CPT กับ ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาที่คำนวณได้จากวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสง ได้  $RMSE_x = 0.109$  เมตร  $RMSE_y = 0.239$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.486$  เมตร ส่วน RMSE ของมุม  $\omega$   $\phi$   $K$  จะมีค่าเท่ากับ 1.24031, 1.40502 และ 5.99471 องศา ตามลำดับ ในส่วนค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้จากการปรับแก้ของบล็อกลำแสง จะมี  $RMSE_x = 0.038$  เมตร  $RMSE_y = 0.029$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.219$  เมตร

กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรง ผลการปรับแก้ของบล็อกลำแสง สำหรับคำนวณหาตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพ จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 6.3 - 36.2 มิลลิเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมอยู่ระหว่าง 2.6 - 12.6 ฟลิปดา และผลการปรับแก้ของบล็อกลำแสงสำหรับคำนวณหาพิกัดจุดตรวจสอบอิสระจะมี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเส้นอยู่ระหว่าง 2.8 - 28.6 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาจากข้อมูลของ SPAN-CPT กับ ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาที่คำนวณได้จากวิธีการปรับแก้ของ บล็อกลำแสง ได้  $RMSE_x = 0.565$  เมตร  $RMSE_y = 0.541$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.320$  เมตร ส่วน  $RMSE$  ของมุม  $\omega$   $\phi$   $\kappa$  จะมีค่าเท่ากับ 0.63811, 1.47257 และ 4.72444 องศา ตามลำดับ ในส่วนค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้จากการปรับแก้ของบล็อกลำแสง จะมี  $RMSE_x = 0.024$  เมตร  $RMSE_y = 0.031$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.169$  เมตร



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาเรื่องเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา นั้น สามารถสรุปงานวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของภาพพานอรามาในระบบพิกัดภาพแบบ Equirectangular กับระบบพิกัดภาพแบบ Spherical และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการแปลงพิกัดระหว่างระบบพิกัดภาพทั้งสอง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแปลงพิกัดระหว่างพิกัดภาพพานอรามาแบบ Spherical กับพิกัดวัตถุ

การประมาณความคลาดเคลื่อนของระยะราบและระยะดิ่งที่คำนวณได้ ในกรณีกล้องถ่ายภาพพานอรามาอยู่ในแนวตั้งนั้น ถ้าวัดพิกัดภาพพานอรามาไปยังฐานของอาคารมากกว่าความเป็นจริงจะทำให้ระยะราบและระยะดิ่งที่คำนวณได้ มีค่าน้อยกว่าค่าที่ถูกต้อง และในทางกลับกัน ถ้าวัดพิกัดได้น้อยกว่าความเป็นจริงจะทำให้ ระยะราบและระยะดิ่งที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่าค่าที่ถูกต้อง

จากผลการคำนวณการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพพานอรามา จะเห็นได้ว่าในกรณีรัศมีของข้อมูลมีขนาดประมาณ 10-15 เมตร เมื่อใช้จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายไม่เท่ากัน จะทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ต่างกันด้วย กรณีที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายในการคำนวณมาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใช้จุดควบคุมน้อยกว่า และระยะคลาดเคลื่อนระหว่างการคำนวณกับการวัดพิกัดจากภาพพานอรามาของทุกกรณีจะอยู่ระหว่าง 0.008-0.016 เมตร

การทำ Interior Orientation ของกล้อง Ladybug 3 เพื่อประมาณความสูงของจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องนั้น สามารถวัดความสูงจากพื้นเทียบกับฐานกล้อง แล้วบวกระยะห่างระหว่างฐานกล้องไปยังจุดศูนย์กลางเลนส์ ซึ่งก็คือ 6.6 เซนติเมตร ก็จะได้ความสูงโดยประมาณของอุปกรณ์เทียบกับพื้น ซึ่งนำไปใช้สำหรับการหาค่าพิกัดหรือความสูงของวัตถุต่อไป

การเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ มีการหาระยะห่างของอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรม GNU GAMA ซึ่งได้ระยะห่างระหว่าง SPAN-CPT กับ กล้อง Ladybug 3 ในแกนต่างๆ ดังนี้ แกน X = 3.2 เซนติเมตร แกน Y = 9.6 เซนติเมตร และแกน Z = 27.3 เซนติเมตร และความสูงของกล้อง Ladybug 3 กับ SPAN-CPT เมื่อเทียบกับพื้นคือ 2.101 เมตร และ 1.828 เมตร ตามลำดับ

การเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาจากข้อมูลของ SPAN-CPT กับ ตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาที่คำนวณได้จากวิธีการปรับแก้ของบล็อกลำแสง กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรงได้  $RMSE_x = 0.109$  เมตร  $RMSE_y = 0.239$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.486$  เมตร ส่วน  $RMSE$  ของมุม  $\omega$   $\phi$   $\kappa$  จะมีค่าเท่ากับ 1.24031, 1.40502 และ 5.99471 องศาตามลำดับ ส่วนกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรงได้  $RMSE_x = 0.565$  เมตร  $RMSE_y = 0.541$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.320$  เมตร และ  $RMSE$  ของมุม  $\omega$   $\phi$   $\kappa$  จะมีค่าเท่ากับ 0.63811, 1.47257 และ 4.72444 องศาตามลำดับ ในส่วนการเปรียบเทียบค่าพิกัดจุดตรวจสอบอิสระที่คำนวณได้จากการปรับแก้ของบล็อกลำแสงกับการรังวัดภาคพื้นดินนั้น กรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะเป็นเส้นตรงจะมี  $RMSE_x = 0.038$  เมตร  $RMSE_y = 0.029$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.219$  เมตร ส่วนกรณีเส้นทางวิ่งของยานพาหนะไม่เป็นเส้นตรงจะมี  $RMSE_x = 0.024$  เมตร  $RMSE_y = 0.031$  เมตร และ  $RMSE_z = 0.169$  เมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ภาพที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้ภาพจากกล้อง Ladybug 3 ที่มีการผสานกันเสร็จเรียบร้อยแล้ว หากต้องการศึกษาเพิ่มเติม ควรมีการวัดสอบกล้องแต่ละกล้อง ทำการปรับแก้ค่าความเพี้ยนของเลนส์ ทั้งในแนวรัศมีและแนวสัมผัส และความเพี้ยนของเซนเซอร์รับภาพ แล้วค่อยนำภาพที่ได้ มาทำการผสานรวมกันเป็นภาพพานอรามาที่จะนำมาใช้งาน
- ในการศึกษาเรื่องการหาตำแหน่งของยานพาหนะ ควรมีการเลือกเส้นทางที่หลากหลาย เช่น เส้นทางที่สามารถประมวลผลค่าพิกัดได้ตำแหน่งที่มี  $Q = 1, 2, 3$  และ 4 ตามลำดับ รวมทั้งมีการหาตำแหน่งของยานพาหนะในกรณีที่ไม่สามารถรับสัญญาณทั้ง GPS และ IMU ได้ เช่น ยานพาหนะไม่ได้เคลื่อนที่และอยู่ภายในอาคารหรือใต้สะพาน เป็นต้น
- ในการเชื่อมต่อข้อมูลจากอุปกรณ์แต่ละตัว อาจจะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ เพราะจะได้ข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกันและเวลาที่เก็บข้อมูลพร้อมกัน
- ในการติดตั้งอุปกรณ์ ควรคำนึงถึงมุมมองหรือทิศทางของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย ควรจะหันไปในทิศทางเดียวกัน หรือทิศทางที่สามารถคำนวณได้สะดวก

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- วิชา จิวาลัย, ปรีชา ธีระวัฒนาสวัสดิ์.2523. หลักเบื้องต้นของการสำรวจด้วยภาพถ่าย.  
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.  
ไพศาล สันติธรรมนนท์. 2553. การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Brown, M., Lowe D. G. 2003. Recognising Panoramas. **Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference.** pp. 2228-2225
- El-Sheimy, N. 2008. Land mobile mapping systems. **Advance in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science: 2008 ISPRS Congress Book.** pp. 85-100. ISPRS.
- Fangi, G. 2007. The Multi-Image Spherical Panoramas As a Tool For Architectural Survey. **XXI International CIPA Symposium,** Athens, Greece.
- Huang, F., Klette, R., Scheibe, K. 2008. **Panoramic Imaging Sensor-Line Cameras and Laser Range-Finders.** JohnWiley & Sons.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. 2006. **Close Range Photogrammetry.** JohnWiley & Sons.
- Luhmann, T., Tecklenburg, W. 2004. **3-D Object Reconstruction from Multiple-Station Panorama Imagery.** International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing Dresden University of Technology.
- Mass, H.G. 2008. Close range photogrammetry sensor. **Advance in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science: 2008 ISPRS Congress Book.** pp. 63-72. ISPRS.
- NovAtel. 2011a. **SPAN-CPT System Performance Document.** [Online]. Available from: <http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Papers/SPAN-CPT.pdf> (2011, January 22)
- NovAtel. 2011b. **SPAN GrafNav / GrafNet User Guide.** [Online]. Available from: <http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Manuals/om-20000105.pdf> (2011, January 22)

- Oh, T., Choi, K., Lee, I. 2010. Bundle Block Adjustment of Omni-directional Images Obtained from a Ground Mobile Mapping System. **The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS**, Ablerta, Canada.
- Parian, J. A. 2007. **Sensor Modeling, Calibration and Point Positioning with Terrestrial Panoramic Cameras**. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETH Hönggerberg CH-8093 Zürich.
- Point Grey Research. 2008a. **Getting Started Manual**. [Online]. Available from: <http://www.ptgrey.com/support/downloads/documents/Ladybug3%20Getting%20Started%20Manual.pdf> (2011, March 1)
- Point Grey Research. 2008b. **Technical Application Note TAN2008010 Overview of the Ladybug image stitching process**. [Online]. Available from: [http://www.ptgrey.com/support/downloads/TAN2008010\\_Overview\\_LadybLa\\_Image\\_Stitching.pdf](http://www.ptgrey.com/support/downloads/TAN2008010_Overview_LadybLa_Image_Stitching.pdf) (2011, March 1)
- Schneider, D., Maas, H.G. 2006. A Geometric Model for Linear-array-based Terrestrial Panoramic Cameras. **The Photogrammetric Record**. 22,225(September): 298-220.

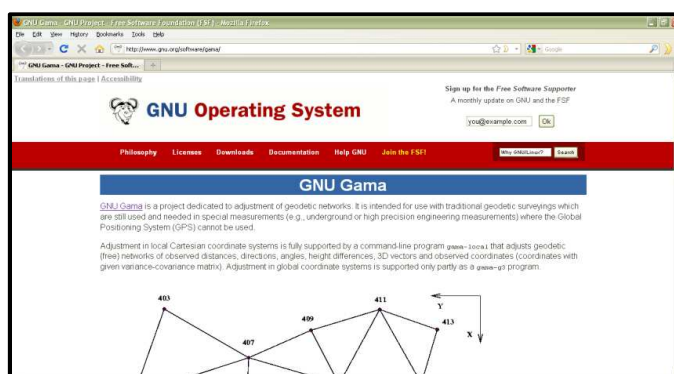
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรม GNU GAMA 1.10

GNU GAMA 1.10 เป็นโปรแกรมที่ทำขึ้นเพื่อการปรับแก้งาน Geodetic Networks โดยทางผู้จัดทำมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในงานสำรวจจริงวัดทั่วไป จนไปถึงงานรังวัดเฉพาะทาง เช่น การทำงานใต้ดิน หรือการทำงานที่ไม่สามารถใช้การหาตำแหน่งจากดาวเทียมได้ เป็นต้น

GNU GAMA เริ่มต้นที่ Department of Mapping and Cartography, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague (CTU) ประมาณปี 1998 โดยใช้ชื่อว่า GAMA ซึ่งย่อมาจาก Geodesy And MAPPING โปรแกรม GNU GAMA นี้สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://www.gnu.org/software/gama/> (ภาพที่ ก-1)



ภาพที่ ก-1 โปรแกรม GNU GAMA 1.10

โปรแกรมมีลักษณะเป็น Command Line เรียกใช้ผ่าน Command Prompt คำสั่งในการใช้งาน คือ

```
gama-local.exe (วรรค) input.xml (วรรค) [options]
```

โดยข้อมูลนำเข้าในการคำนวณต้องเป็นภาษา XML ในรูปแบบที่กำหนดเท่านั้นและใน Option จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

```
--algorithm      svd | gso | cholesky
--language       en | ca | cz | du | fi | fr | hu | ru | ua
--encoding       utf-8 | iso-8859-2 | iso-8859-2-flat | cp-1250 | cp-1251
--angles         400 | 360
--latitude       <latitude>
```

```

--ellipsoid    <ellipsoid name>
--text        adjustment_results.txt
--xml         adjustment_results.xml
--cov-band    covariance matrix of adjusted parameters in XML output
              n = -1 for full covariance matrix (implicit value)
              n >= 0 covariances are computed only for bandwidth n
--version
--help

```

ซึ่งส่วนที่สำคัญก็คือ

```

--angles      เป็นการกำหนดหน่วยขององศาในการคำนวณ ถ้าเป็น 400 จะเป็นระบบ
              กอน (Gon) และถ้าเป็น 360 จะเป็นระบบ องศา ลิปดา พิลิปดา
--text        เป็นการกำหนดไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาให้เป็น .txt เช่น
              adjustment_results.txt
--xml         เป็นการกำหนดไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาให้เป็น .xml เช่น
              adjustment_results.xml

```

การกำหนดข้อมูลนำเข้าจะต้องเป็นไปตามลักษณะดังนี้

```

<?xml version="1.0" ?>
<gama-local>
<network>
<description/>
<parameters />
<points-observations>
<obs>
...
</obs>
</points-observations>
</gama-local>

```

ในส่วนของ obs หรือค่าที่ไปเก็บข้อมูลสนามมา จะสามารถใส่ได้ทั้งหมด โดยคำสั่งดังนี้

- ทิศทางราบ Horizontal directions <direction ... />

```
<direction to= "2" val="0.0000" stdev="10.0" from_dh="1.365" to_dh="1.237" />
```

- ระยะราบ Horizontal distances <distance ... />

```
<distance from = "2" to = "1" val = "659.184" stdev="5.0" from_dh="1.526" to_dh="1.567"/>
```

- มุมราบ Horizontal angles <angle ... />

```
<angle from="433" bs="422" fs="402" val="128.6548" stdev="14.1" from_dh="1.567"
to_dh="0.100" />
```

- ระยะเอียง Slope distances <s-distance ... />

```
<s-distance from="B" to="AL" val="11.6698" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
```

- มุมค้ำบน Zenith angles <z-angle ... />

```
<z-angle from="A" to="B" val="89-44-49" stdev="5.0" from_dh="1.526" to_dh="1.567"/>
```

- ระยะต่างความสูง Height differences <dh ... />

```
<dh from="A" to="B" val=" 25.42" dist="18.1" />
```

ขั้นตอนการเรียกใช้งาน โปรแกรม GNU GAMA 1.10

### 1. เปิด Command Prompt (ภาพที่ ก-2)



ภาพที่ ก-2 การเรียกใช้งาน โปรแกรม GNU GAMA

### 2. เข้าไปที่ Directory GAMA (ภาพที่ ก-3)

```

C:\ Command Prompt
Microsoft Windows XP [Version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\ternngg>cd..
C:\Documents and Settings>cd\
C:\>cd GAMA
C:\GAMA>

```

ภาพที่ ก-3 การเรียกใช้งาน โปรแกรม GNU GAMA



### 3. ใส่ Tag คำสั่งการใช้งานโปรแกรม gama-local.exe (วรรค) input.xml (วรรค) [options]

- gama-local1.9.07.exe Offset01.xml --angles 360 --text Offset1output.txt (ภาพที่ ก-4)

```
C:\GAMA>
C:\GAMA>gama-local-1.9.07.exe Offset01.xml --angles 360 --text Offset1output.txt
```

ภาพที่ ก-4 การเรียกใช้งานโปรแกรม GNU GAMA

**Input data** Offset01.xml

**Output data** Offset1output.txt

### 4. ข้อมูลนำเข้า

```
1 <?xml version="1.0"?>
2 <!DOCTYPE gama-local
3     SYSTEM "http://www.gnu.org/software/gama/gama-local.dtd">
4 <gama-local>
5 <network axes-xy="en" angles="left-handed">
6
7 <description>
8     GNU GAMA 1.10
9     Determination of lever-arm offset, Equipment SPAN-CPT, R8, Novatel 703GGG
10    Geodetic Computation and Least Square Adjustment Session
11    Workshop on Python and FOSS4G For Geomatic Researchers
12    Survey Engineering Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
13    7-8 Oct 2010
14 </description>
15
16 <!-- parameters are expressed with empty-element tag -->
17 <parameters sigma-act = "aposteriori" />
18
19
20 <points-observations
21     direction-stdev="5.0"
22     zenith-angle-stdev="5.0" >
23
24 <!-- fixedpoint,constrainedpoint -->
25 <point id="A" x="500.000" y="1000.000" z="10.000" fix="xyz" />
26 <point id="B" x="520.000" y="1000.000" z="10.000" adj="XYZ" />
27
28 <!-- computed / adjustedpoints -->
29 <point id="P1" adj="xyz" />
30 <point id="P2" adj="xyz" />
31 <point id="P3" adj="xyz" />
32 <point id="P4" adj="xyz" />
33 <point id="AT" adj="xyz" />
34 <point id="AL" adj="xyz" />
35 <point id="AR" adj="xyz" />
36 <point id="IMUT" adj="xyz" />
37 <point id="IMUR" adj="xyz" />
38 <point id="FL" adj="xyz" />
39 <point id="TL" adj="xyz" />
40 <point id="TR" adj="xyz" />
41
```

```

42 <obs from="A">
43   <direction to="B" val="90-0-19" from_dh="1.526" to_dh="1.567"/>
44   <direction to="P1" val="62-31-45" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
45   <direction to="P2" val="64-8-18" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
46   <direction to="P3" val="63-11-18" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
47   <direction to="P4" val="64-46-10" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
48   <direction to="AT" val="62-57-1" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
49   <direction to="AL" val="65-23-57" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
50   <direction to="AR" val="66-29-20" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
51   <direction to="IMUT" val="64-2-41" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
52   <direction to="FL" val="53-2-22" from_dh="1.526" to_dh="0.000"/>
53   <direction to="TL" val="66-39-47" from_dh="1.526" to_dh="0.000"/>
54   <s-distance to="B" val="20.0227" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="1.567"/>
55   <s-distance to="P1" val="10.4267" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
56   <s-distance to="P2" val="10.2766" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
57   <s-distance to="P3" val="10.6551" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
58   <s-distance to="P4" val="10.5150" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
59   <s-distance to="AT" val="10.5357" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
60   <s-distance to="AL" val="10.0499" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
61   <s-distance to="AR" val="10.4927" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
62   <s-distance to="IMUT" val="10.3980" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
63   <s-distance to="FL" val="10.7369" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.000"/>
64   <s-distance to="TL" val="9.3449" stdev="2.0" from_dh="1.526" to_dh="0.000"/>
65   <z-angle to="B" val="89-44-49" from_dh="1.526" to_dh="1.567"/>
66   <z-angle to="P1" val="87-56-32" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
67   <z-angle to="P2" val="87-52-14" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
68   <z-angle to="P3" val="87-58-36" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
69   <z-angle to="P4" val="87-54-37" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
70   <z-angle to="AT" val="87-29-4" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
71   <z-angle to="AL" val="87-47-54" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
72   <z-angle to="AR" val="87-52-27" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
73   <z-angle to="IMUT" val="87-27-40" from_dh="1.526" to_dh="0.100"/>
74   <z-angle to="FL" val="96-33-52" from_dh="1.526" to_dh="0.000"/>
75   <z-angle to="TL" val="97-35-29" from_dh="1.526" to_dh="0.000"/>
76 </obs>
77 <obs from="B">
78   <direction to="A" val="270-0-14" from_dh="1.567" to_dh="1.526"/>
79   <direction to="P1" val="294-1-28" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
80   <direction to="P2" val="292-34-24" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
81   <direction to="P3" val="294-33-41" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
82   <direction to="P4" val="293-5-18" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
83   <direction to="AT" val="294-13-15" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
84   <direction to="AL" val="291-1-19" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
85   <direction to="AR" val="291-53-28" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
86   <direction to="IMUT" val="293-3-40" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
87   <direction to="IMUR" val="293-15-56" from_dh="1.567" to_dh="0.000"/>
88   <direction to="TR" val="290-31-33" from_dh="1.567" to_dh="0.000"/>
89   <s-distance to="A" val="20.0232" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="1.526"/>
90   <s-distance to="P1" val="11.8064" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
91   <s-distance to="P2" val="11.6786" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
92   <s-distance to="P3" val="11.5650" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
93   <s-distance to="P4" val="11.4353" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
94   <s-distance to="AT" val="11.6810" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
95   <s-distance to="AL" val="11.6698" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
96   <s-distance to="AR" val="11.2235" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
97   <s-distance to="IMUT" val="11.6139" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
98   <s-distance to="IMUR" val="11.4815" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.000"/>
99   <s-distance to="TR" val="10.5175" stdev="2.0" from_dh="1.567" to_dh="0.000"/>
100  <z-angle to="A" val="90-15-16" from_dh="1.567" to_dh="1.526"/>
101  <z-angle to="P1" val="88-37-2" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
102  <z-angle to="P2" val="88-34-5" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
103  <z-angle to="P3" val="88-34-46" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
104  <z-angle to="P4" val="88-31-31" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
105  <z-angle to="AT" val="88-10-1" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
106  <z-angle to="AL" val="88-32-32" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
107  <z-angle to="AR" val="88-28-6" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
108  <z-angle to="IMUT" val="88-10-15" from_dh="1.567" to_dh="0.100"/>
109  <z-angle to="IMUR" val="88-55-59" from_dh="1.567" to_dh="0.000"/>
110  <z-angle to="TR" val="97-14-42" from_dh="1.567" to_dh="0.000"/>
111 </obs>
112 </points-observations>
113 </network>
114 </gama-local>

```

## 5. จะได้ผลลัพธ์ในการคำนวณรอบสุดท้ายดังนี้

```

***** 3 - adjustment iteration *****

Approximate coordinates of computed points replaced by adjusted
*****

General parameters of the adjustment
*****

Coordinates          xyz      xy      z
Adjusted             :      13      0      0
Constrained *       :      1      0      0
Fixed                :      1      0      0
-----
Total                :      14      0      0

Number of directions :      22          Number of bearings:      2
Zenith angles       :      22
Slope distances     :      22
Total of observations :      66

Number of project equations:      66          Number of unknowns:      41
Degrees of freedom     :      26          Network defect      :      1

m0 apriori          :      10.00
m0' aposteriori:      13.54          [pvv] : 4.76957e+003

During statistical analysis we work

- with aposteriori standard deviation 13.54
- with confidence level 95 %

Ratio m0' aposteriori / m0 apriori: 1.354
95 % interval (0.730, 1.270) does not contain value m0'/m0
Maximal decrease of m0'/m0 on elimination of one observation: 1.169

Maximal studentized residual 2.72 exceeds critical value 1.94
on significance level 5 % for observation #35
<direction from="B" to="P1" val=" 294-01-28.0000" stdev="5.0" />

Fixed points
*****

point      x          y          z
-----
A          500.000    1000.000    10.000

```

## Adjusted coordinates

\*\*\*\*\*

i	point	approximate value	correction [m]	adjusted value	std.dev	conf.i. [mm]
----- value ----- [m] ----- value ----- [mm] ----						
	AL					
14	x	509.12444	0.00910	509.13353	0.9	1.8
15	y	995.82133	-0.00452	995.81681	0.4	0.9
30	z	11.81209	0.00030	11.81238	0.3	0.6
	AR					
16	x	509.60073	0.01075	509.61148	0.9	1.8
17	y	995.82222	-0.00464	995.81758	0.4	0.9
31	z	11.81522	-0.00028	11.81494	0.3	0.6
	AT					
12	x	509.36532	0.00993	509.37525	0.8	1.7
13	y	995.21680	-0.00526	995.21155	0.4	0.9
29	z	11.88842	0.00035	11.88877	0.3	0.6
	B					
2	X *	520.00000	0.02218	520.02218	1.0	2.1
3	Y *	1000.00000	0.00000	1000.00000	0.0	0.0
24	Z *	10.00000	0.04825	10.04825	0.2	0.4
	FL					
20	x	508.52248	-0.00008	508.52240	2.2	4.5
21	y	993.58582	-0.00011	993.58571	1.7	3.4
33	z	10.29855	0.00000	10.29855	0.4	0.7
	IMUR					
36	x	509.45365	0.02201	509.47566	2.7	5.5
37	y	995.46639	0.00012	995.46651	1.2	2.4
40	z	11.78079	0.04832	11.82911	0.6	1.2
	IMUT					
18	x	509.32905	0.01007	509.33912	0.9	1.8
19	y	995.45787	-0.00500	995.45287	0.4	0.9
32	z	11.88661	-0.00014	11.88646	0.3	0.6
	P1					
4	x	509.22979	0.01046	509.24025	0.8	1.7
5	y	995.20016	-0.00535	995.19481	0.5	0.9
25	z	11.80039	-0.00047	11.79992	0.3	0.6
	P2					
6	x	509.23124	0.00957	509.24080	0.9	1.8
7	y	995.52413	-0.00489	995.51924	0.4	0.9
26	z	11.80785	-0.00025	11.80760	0.3	0.6
	P3					
8	x	509.49536	0.00996	509.50532	0.8	1.7
9	y	995.20002	-0.00526	995.19476	0.4	0.9
27	z	11.80219	0.00021	11.80241	0.3	0.6
	P4					
10	x	509.49737	0.00978	509.50715	0.9	1.8
11	y	995.52362	-0.00490	995.51871	0.4	0.9
28	z	11.80942	0.00020	11.80962	0.3	0.6

## ภาคผนวก ข

### โปรแกรม Ladybug SDK 1.6

Ladybug SDK เป็นชุดโปรแกรมที่จัดทำขึ้นสำหรับควบคุมและจัดการข้อมูลที่ได้จากกล้อง Ladybug 2 และ Ladybug 3 โดยเฉพาะ พัฒนาโดยบริษัท Point Grey Research จำกัด ซึ่งชุดโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 รุ่น คือ LadybugCap กับ LadybugCapPro

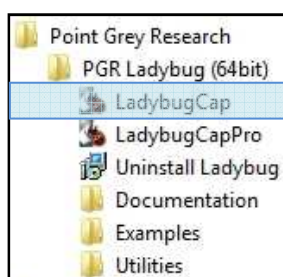
**LadybugCap** เป็นชุดโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมและจัดการกับข้อมูลโดยมีคุณสมบัติเด่น ดังนี้

- สามารถดูข้อมูลขณะเชื่อมต่อกับกล้องได้ทันที
- สามารถเลือกดูได้ว่าจะดูภาพในการฉายแบบใด เช่น Equirectangular Coordinate หรือ Spherical Coordinate เป็นต้น
- สามารถเลือกที่จะบันทึกภาพพานอรามาทีละภาพ(.jpeg, .bmp) หรือบันทึกเป็นไฟล์ภาพเคลื่อนไหว(.avi) ได้
- ปรับค่าความสามารถต่างๆของกล้องในการเก็บข้อมูลเช่น ความเร็วชัตเตอร์ ค่าสมดุลแสงขาว(White Balance) เป็นต้น

**LadybugCapPro** เป็นชุดโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมและจัดการกับข้อมูลเหมือนกัน แต่จะมีคุณสมบัติที่เพิ่มเติมจาก LadybugCap บางส่วน โดยคุณสมบัติที่เพิ่มเติมที่สำคัญคือ จะมีการเชื่อมต่อกับ Google Map เพื่อแสดงตำแหน่งของกล้อง (หากมีการรับสัญญาณดาวเทียมในขณะที่บันทึกภาพ) สามารถปรับรัศมีของทรงกลมที่นำมาสร้างเป็นภาพได้ สามารถปรับตั้งค่าแกนตั้งอ้างอิงได้ เป็นต้นและจะมี GUI ที่ใช้งานได้สะดวกกว่ารุ่น LadybugCap

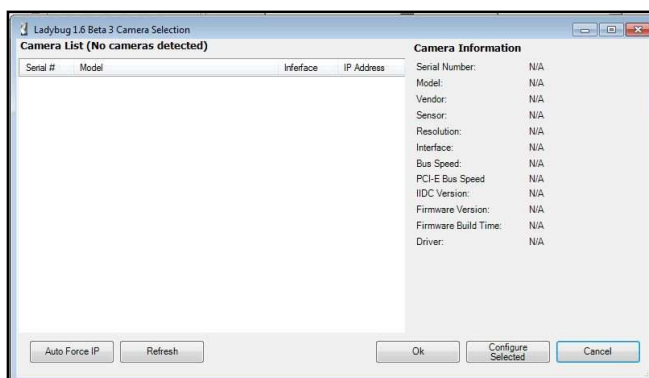
#### การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCap ในการจัดการข้อมูล

1. เลือกไอคอน LadybugCap.exe (ภาพที่ ข-1)



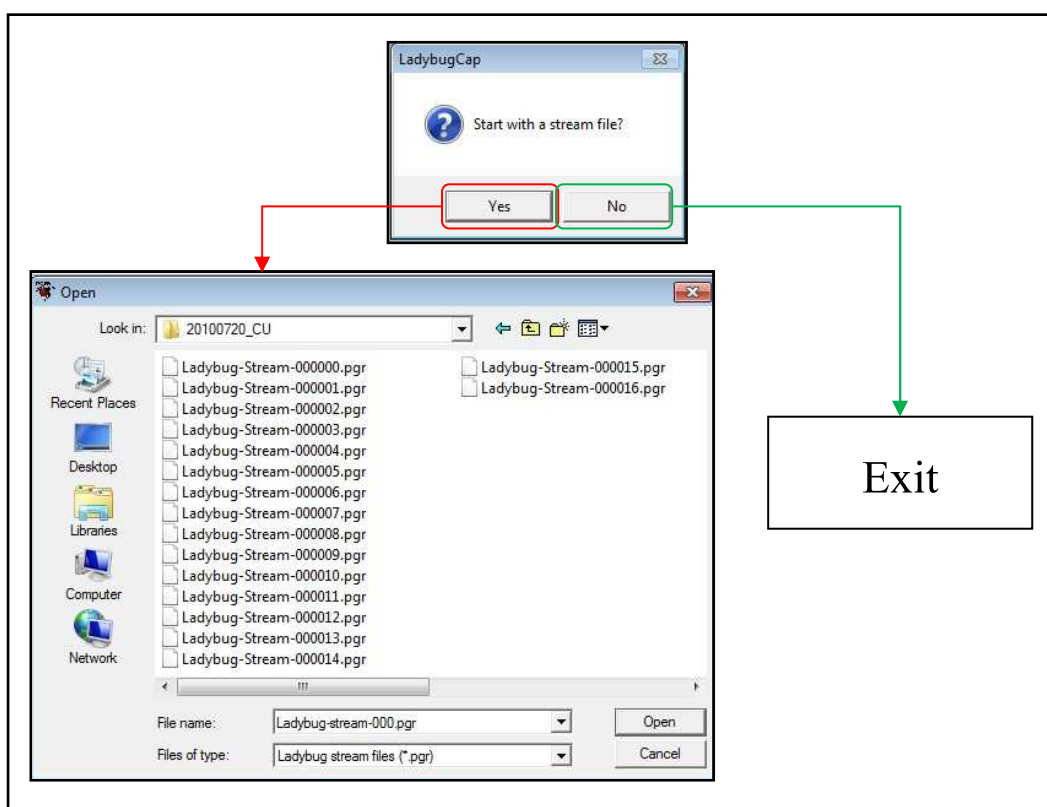
ภาพที่ ข-1 การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCap

2. ถ้ามีการเชื่อมต่อกับกล้องจะมีชื่อกล้องปรากฏอยู่ที่หน้าต่าง Select Camera เลือกกล้องที่ต้องการ แล้วกด OK แต่ถ้าต้องการจัดการข้อมูลที่มีการบันทึกมาแล้ว ให้เลือก Cancel ในหน้าต่างนี้ (ภาพที่ ข-2)



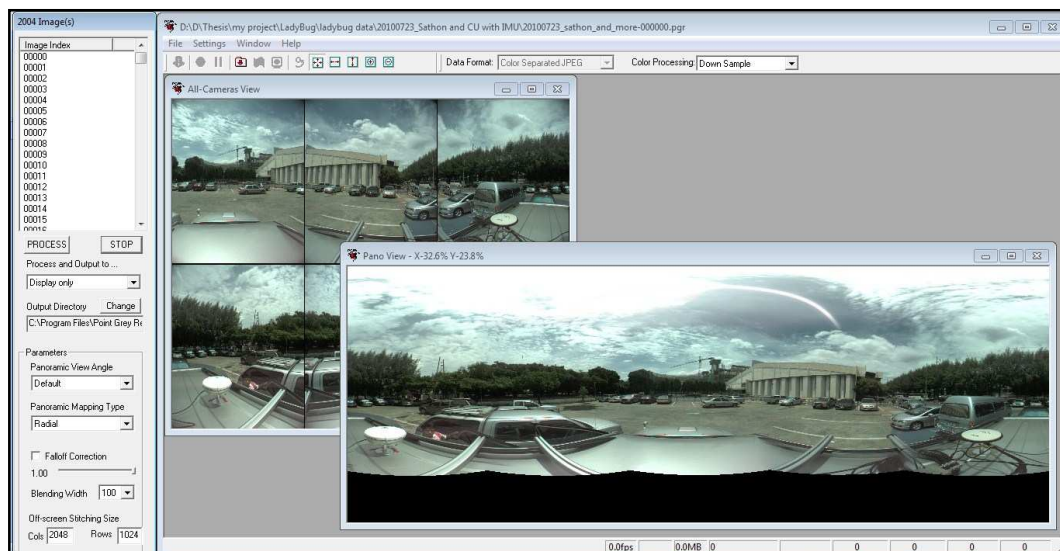
ภาพที่ ข-2 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCap

3. โปรแกรมจะถาม Start with a stream file? ถ้ากด Yes จะปรากฏหน้าต่างในการเลือกข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกมา แต่ถ้ากด No โปรแกรมจะปิดโดยอัตโนมัติ (ภาพที่ ข-3)



ภาพที่ ข-3 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCap

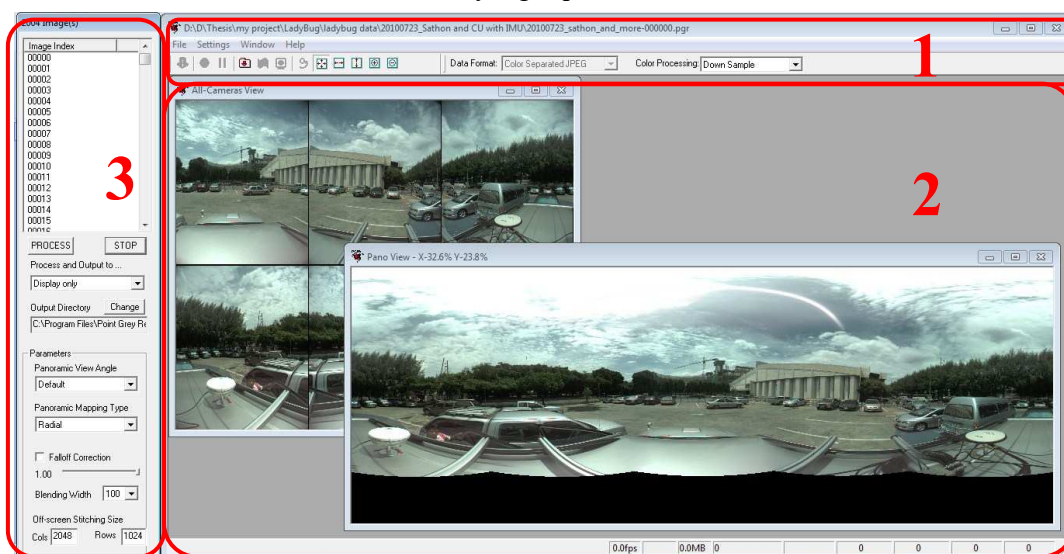
4. เมื่อทำการเลือกไฟล์ข้อมูลที่ได้บันทึกมาแล้ว โปรแกรมจะปรากฏ GUI ดังภาพ  
ที่ ข-4



ภาพที่ ข-4 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCap

ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCap

ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCap แสดงดังภาพที่ ข-5



ภาพที่ ข-5 ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCap

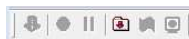
ส่วนที่ 1 เป็นแถบเครื่องมือหลัก

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบต่างๆ

ส่วนที่ 3 เป็นแถบเครื่องมือสำหรับจัดการข้อมูลที่ต้องการ

## ส่วนแถบเครื่องมือหลัก

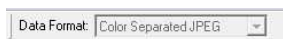
ประกอบด้วย



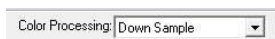
ใช้สำหรับควบคุมกล้องในการบันทึกข้อมูล ถ้าหากมีการเชื่อมต่อกับตัวกล้อง ปุ่มจะสามารถใช้งานได้ โดยจากซ้ายไปขวาคือ ปุ่มสำหรับตั้งค่าการเก็บข้อมูล เริ่ม/จบการเก็บข้อมูล หยุดการเก็บข้อมูลชั่วคราว ปุ่มสำหรับโหลดไฟล์ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลแล้ว การตั้งค่าการเชื่อมต่อของภาพ และหยุดการประมวลผลชั่วคราว



ใช้สำหรับแสดงผลภาพที่เปิดดูในส่วนการแสดงผลข้อมูล จากซ้ายไปขวาคือ ปรับให้ความกว้างและความสูงแสดงพอดีกับหน้าต่าง ปรับความกว้างให้แสดงพอดีกับหน้าต่าง ปรับความสูงให้แสดงพอดีกับหน้าต่าง ขยาย ย่อ ตามลำดับ



ใช้สำหรับปรับรูปแบบการแสดงผลในส่วนการแสดงผลข้อมูล



เป็นการตั้งค่าการประมวลผลของสีที่แสดง ซึ่งประกอบด้วย Edge Sensing, Nearest Neighbor, Nearest Neighbor Fast, Rigorous, High Quality Linear, Mono, Down Sample

## ส่วนการแสดงผลข้อมูล

ใช้สำหรับแสดงผลภาพทั้งเวลาเก็บข้อมูลและเวลาจัดการข้อมูล สามารถแสดงผลได้ 5 แบบ คือ ภาพทีละกล้อง, ภาพจากทุกกล้อง, ภาพแบบโดม, ภาพแบบ Equirectangular และภาพแบบ Spherical



ภาพทีละกล้อง (ภาพที่ ข-6)



ภาพที่ ข-6 การแสดงข้อมูลจากภาพแต่ละกล้อง

ภาพจากทุกกล้อง (ภาพที่ ข-7)



ภาพที่ ข-7 การแสดงข้อมูลจากทุกกล้อง

ภาพแบบโดม (ภาพที่ ข-8)



ภาพที่ ข-8 การแสดงข้อมูลภาพแบบ โดม

### ภาพแบบ Equirectangular (ภาพที่ ข-9)



ภาพที่ ข-9 การแสดงข้อมูลภาพแบบ Equirectangular

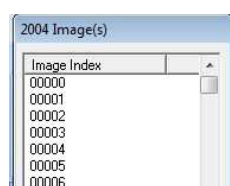
### ภาพแบบ Spherical (ภาพที่ ข-10)



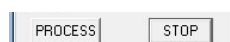
ภาพที่ ข-10 การแสดงข้อมูลภาพแบบ Spherical

### ส่วนแถบเครื่องมือสำหรับการจัดการข้อมูล

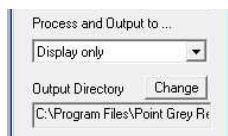
ประกอบด้วย



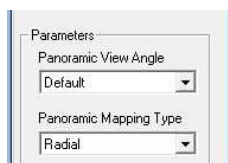
ใช้สำหรับการเลือกภาพที่ต้องการประมวลผล ซึ่งสามารถเลือกทีละภาพหรือหลายภาพก็ได้



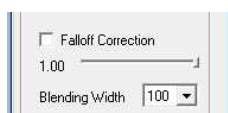
สำหรับสั่งให้ประมวลผล หรือหยุดการประมวลผล



ประเภทของไฟล์ผลลัพธ์ที่ต้องการ และสถานที่เก็บไฟล์



พารามิเตอร์ในการประมวลผล โดยจะสามารถกำหนดได้ว่า จะให้จุดกลางภาพเป็นภาพจากกล้องไหน และจะให้ภาพจากกล้องที่ 5 อยู่ด้านบนหรือด้านล่าง และจะฉายภาพในแบบรัศมีหรือแบบทรงกระบอก



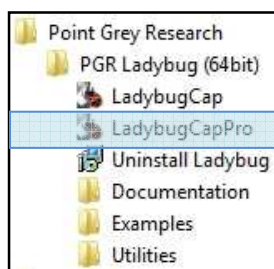
พารามิเตอร์ในการประมวลผลเช่นกัน โดยเมื่อนำภาพมาผสานกัน จะทำการปรับสีที่ขอบให้เข้ากัน และ ปรับระยะผสานของภาพ



ใช้สำหรับการปรับขนาดภาพผลลัพธ์ที่ต้องการ

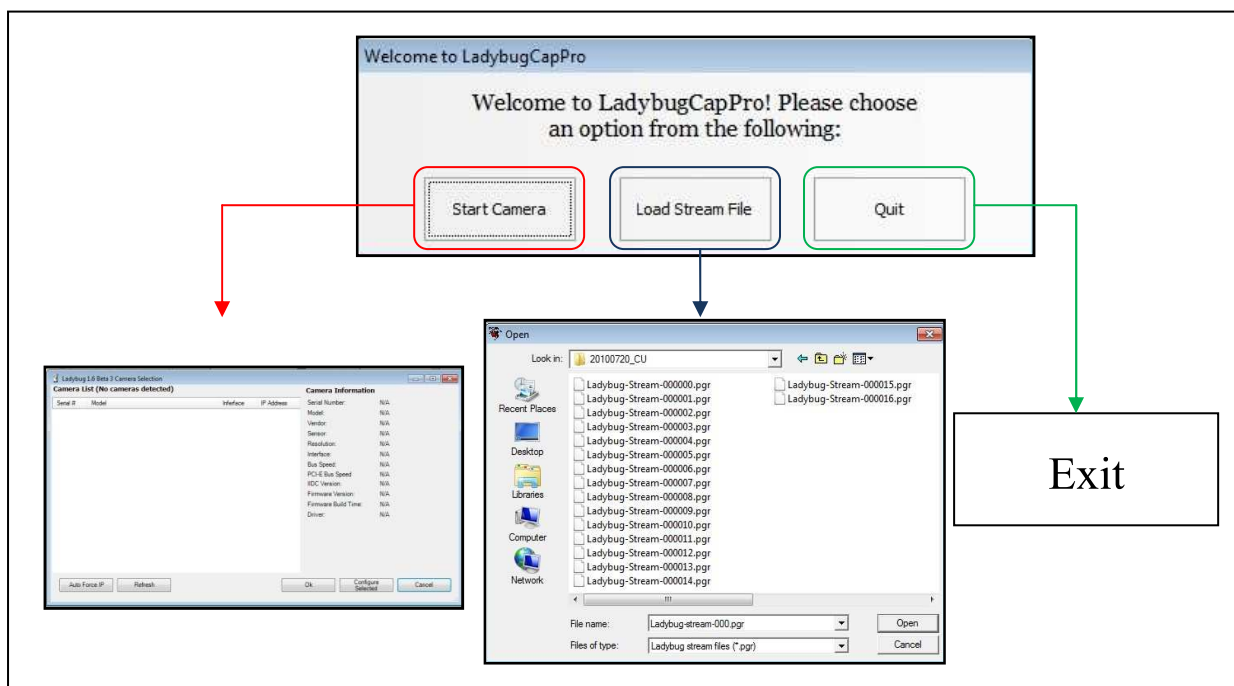
## การเรียกใช้งานโปรแกรม LadybugCapPro ในการจัดการข้อมูล

1. เลือกไอคอน LadybugCapPro.exe (ภาพที่ ข-11)



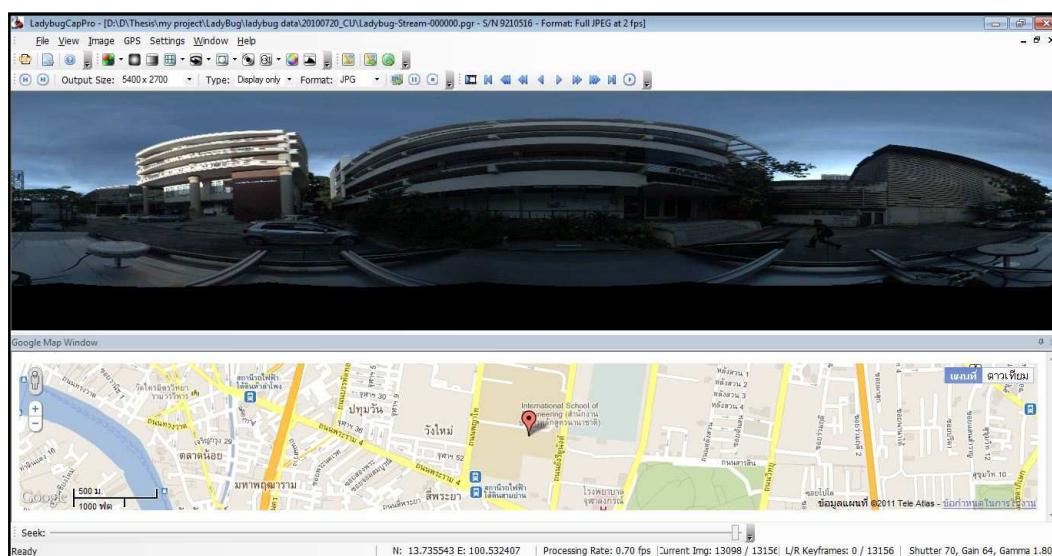
ภาพที่ ข-11 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCapPro

2. ในหน้าแรกของโปรแกรม จะให้เลือกว่าจะเชื่อมต่อกับกล้อง หรือจะเปิดข้อมูลที่บันทึกมา (ภาพที่ ข-12)



ภาพที่ ข-12 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCapPro

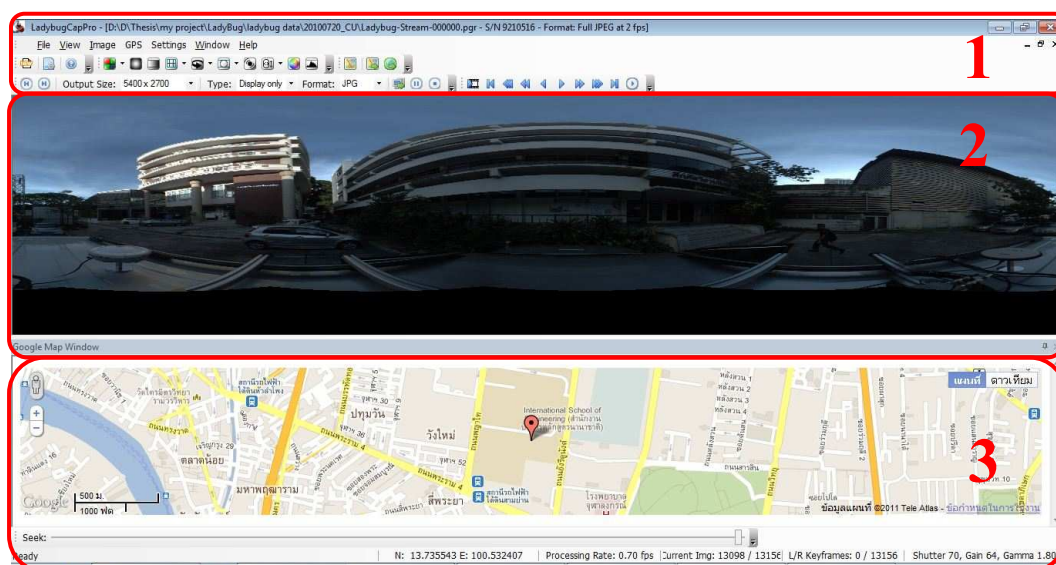
3. เมื่อทำการเลือกไฟล์ข้อมูลที่ได้บันทึกมาแล้ว ตัวโปรแกรมจะขึ้นมา โดยมี GUI ดังภาพที่ ข-13



ภาพที่ ข-13 การเรียกใช้งาน โปรแกรม LadybugCapPro

## ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCapPro

### ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCapProแสดงคั้งภาพที่ ข-14



ภาพที่ ข-14 ส่วนประกอบของโปรแกรม LadybugCapPro

ส่วนที่ 1 เป็นแถบเครื่องมือหลัก

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบต่างๆ

ส่วนที่ 3 เป็นส่วนแสดงแผนที่ที่เชื่อมต่อกับ Google Map

### ส่วนแถบเครื่องมือหลัก

ประกอบด้วย



ใช้สำหรับควบคุมกล้องในการบันทึกข้อมูล ถ้าหากมีการเชื่อมต่อกับตัวกล้อง ปุ่มจะสามารถใช้งานได้ โดยจากซ้ายไปขวาคือ ปุ่มสำหรับโหลดไฟล์ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลแล้ว ปุ่มสำหรับตั้งค่าการเก็บข้อมูล และHelp



เป็นการตั้งค่าการประมวลผลของสีที่แสดง ซึ่งประกอบด้วย Edge Sensing, Nearest Neighbor, Nearest Neighbor Fast, Rigorous, High Quality Linear, Mono, Down Sample



ใช้สำหรับการเลือกภาพที่ต้องการประมวลผล



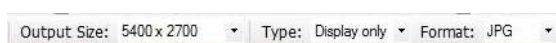
สำหรับสั่งให้ประมวลผล หรือหยุดการประมวลผล



ใช้สำหรับการเปิดฟังก์ชันกันภาพสั่น(Image Stabilization) และ ปรับขนาดของรัศมีทรงกลมอ้างอิง (Sphere size for stitching)



ใช้สำหรับการปรับสี(Image Adjustment) และปรับฮิสโตแกรม (Histogram) ของภาพ



ใช้สำหรับการปรับขนาดภาพผลลัพธ์ และประเภทของไฟล์ผลลัพธ์ที่ต้องการ



พารามิเตอร์ในการประมวลผล โดยจะสามารถกำหนดได้ว่า จะให้จุดกลางภาพเป็นภาพจากกล้องไหน และจะให้ภาพจากกล้องที่ 5 อยู่ด้านบนหรือด้านล่าง (Rotation angle) และ จะฉายภาพในแบบ Equirectangular หรือแบบ Cylindrical



พารามิเตอร์ในการประมวลผลเช่นกัน โดยเมื่อนำภาพมาผสานกัน จะทำการปรับสีที่ขอบให้เข้ากัน(Falloff Correction) ปรับระยะผสานของภาพ (Blending Width) และประเภทของภาพที่แสดงผล (Image Type)



ใช้สำหรับการรับสัญญาณ GPS ประกอบด้วย Start GPS, Stop GPS, สร้างไฟล์ HTML, สร้างไฟล์ KML

### ส่วนการแสดงผลข้อมูล

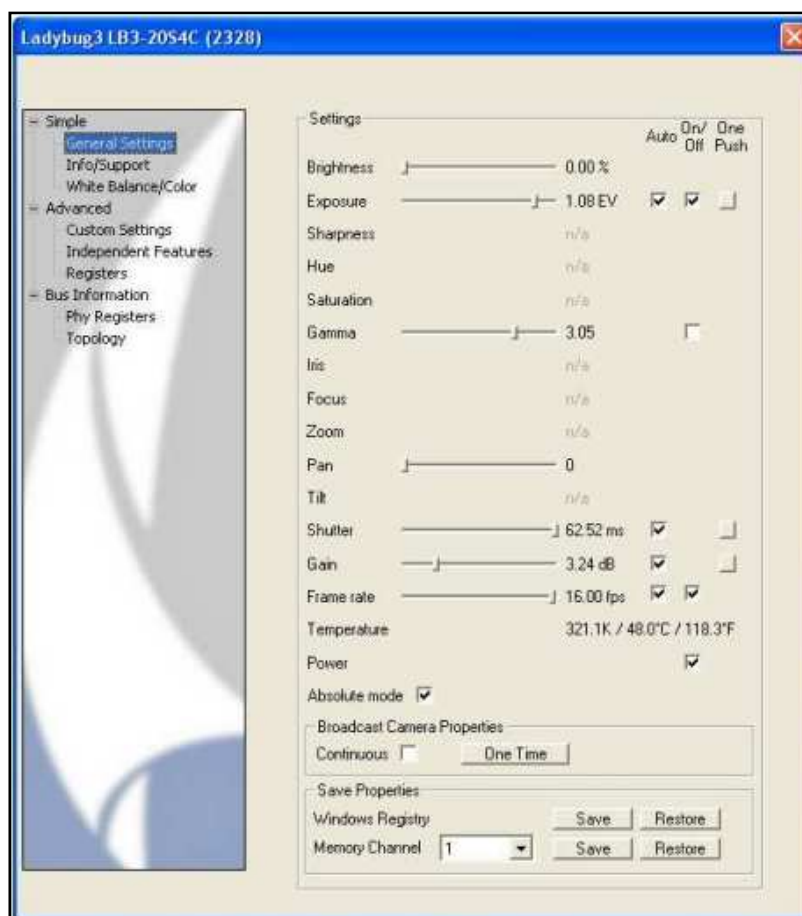
ความสามารถในส่วนนี้จะเหมือนกัน LadybugCap ก็จะสามารถแสดงผลได้ 5 แบบ เช่นเดียวกัน

### ส่วนแสดงแผนที่ที่เชื่อมต่อกับ Google Map

เป็นส่วนที่แตกต่างกับ LadybugCap จะมีการเชื่อมต่อกับ Google Map เพื่อแสดงตำแหน่งของกล้อง (หากมีการรับสัญญาณดาวเทียมในขณะที่ถ่ายภาพ)

### การตั้งค่ากล้อง Ladybug 3 ก่อนการบันทึกข้อมูล

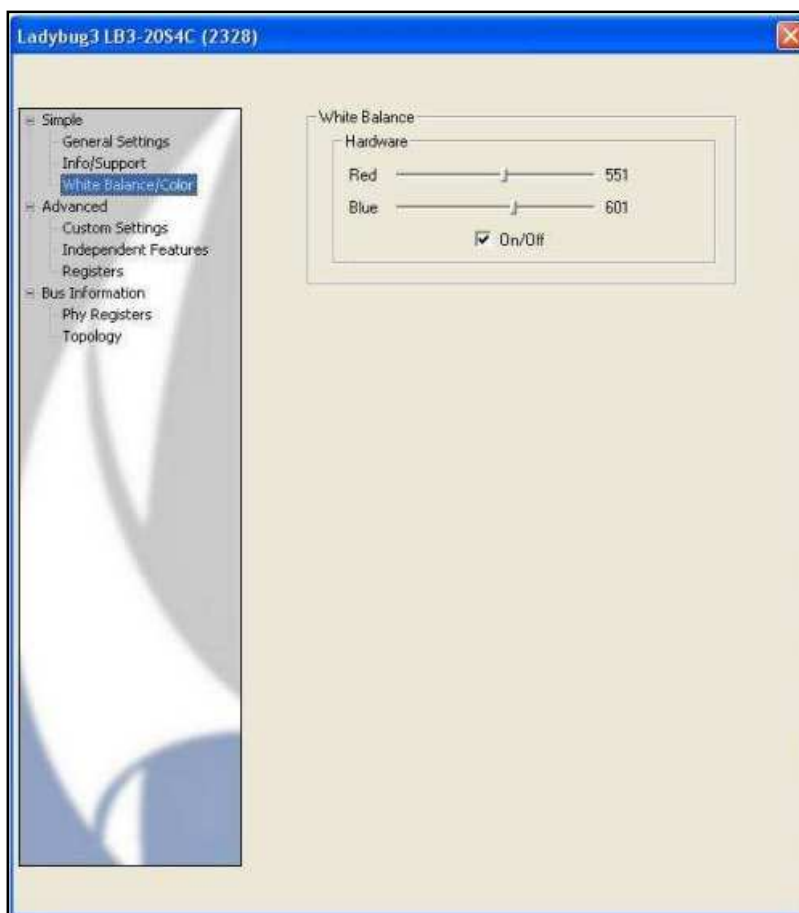
ในการตั้งค่ากล้องก่อนการบันทึกข้อมูลนี้ ทั้งชุดโปรแกรม LadybugCap และ LadybugCapPro จะใช้งานเหมือนกัน ในหน้าต่าง Select Camera หากมีการเชื่อมต่อกับกล้อง และเลือก Yes จะเข้าสู่โหมด Live View เตรียมพร้อมสำหรับการบันทึกข้อมูล โดยในการตั้งค่าต่างๆของกล้องนั้น ให้เข้าไปที่ Setting → Camera Control แล้วโปรแกรมจะปรากฏหน้าต่าง ดังภาพที่ ข-15



ภาพที่ ข-15 การตั้งค่าการควบคุมกล้อง Ladybug 3

Brightness	คือ การเพิ่มความสว่างของภาพโดยรวม
Exposure	คือ การชดเชยแสงในการบันทึกภาพ
Gamma	คือ การปรับสมดุลของแสง
Shutter	คือ การปรับความเร็วชัตเตอร์ มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที
Frame rate	คือ ความเร็วในการถ่ายภาพ มีหน่วยเป็นภาพต่อวินาที

หลังจากการปรับค่าทั่วไป ก็ทำการปรับสมดุลแสงขาว โดยเลือกที่ White Balance/Color (ภาพที่ ข-16)

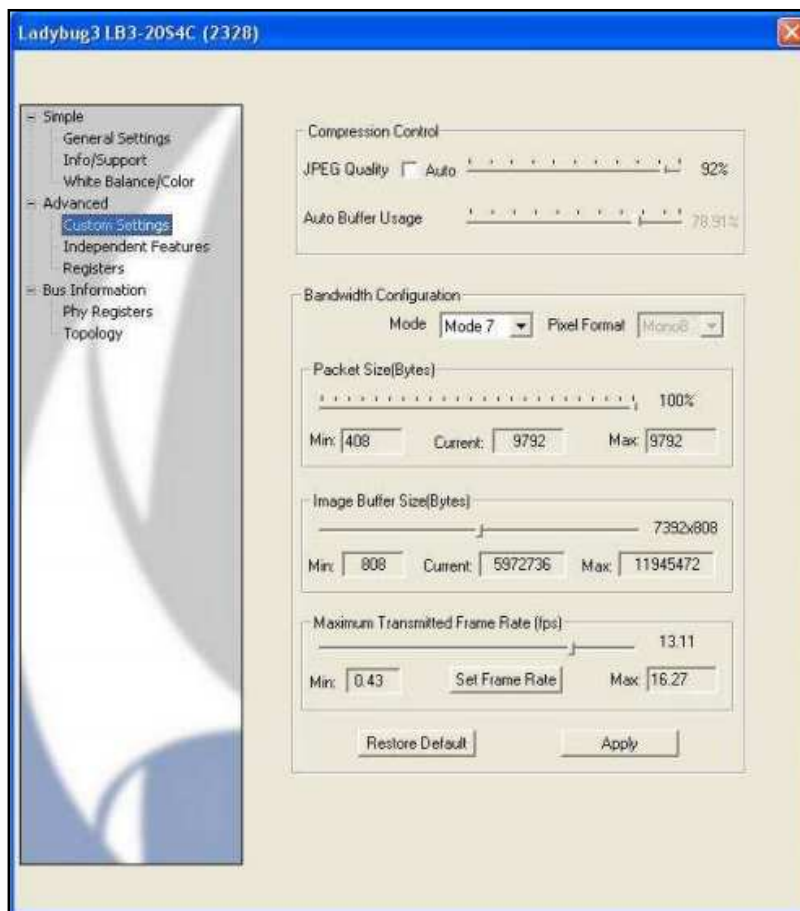


ภาพที่ ข-16 การตั้งค่าสมดุลแสงขาว

เลือกสมดุลของแสงสีแดงกับน้ำเงินให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่เป็นอยู่ ถ้าปรับสมดุลแสงขาวไม่ถูกต้องข้อมูลที่บันทึกได้ จะมีสีที่ไม่ตรงกับความเป็นจริง



ปรับการตั้งค่าการควบคุมกล้องโดยละเอียดในหน้า Custom setting (ภาพที่ ข-17)



ภาพที่ ข-17 การตั้งค่าการควบคุมกล้องโดยละเอียด

JPEG Quality	คือ ร้อยละการบีบอัดของภาพ ถ้าต้องการกำหนด ต้องเอาตัวเลือกที่ Auto ออกก่อน
Image Buffer Size	คือ ขนาดของบัฟเฟอร์ในการบันทึกภาพ จะสัมพันธ์กับความเร็วในการถ่ายภาพที่กำหนด
Maximum Transmitted Frame Rate	คือ การกำหนดความเร็วในการถ่ายภาพที่มากที่สุด

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

**ชื่อ:** นายธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์  
**วันเดือนปีเกิด:** 31 สิงหาคม พ.ศ. 2527  
**สถานที่เกิด:** กรุงเทพมหานคร  
**คุณวุฒิทางการศึกษา :**  
 พ.ศ. 2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประสบการณ์ทำงาน :

พ.ศ. 2548 วิศวกร บริษัท Briggs & Stratton Corporation จำกัด  
 พ.ศ. 2548-2549 วิศวกรโครงการ บริษัท มหาวงศ์ธุรกิจ จำกัด  
 พ.ศ. 2549-2553 วิศวกรสำรวจ บริษัท สเปน คอนซัลแตนท์ จำกัด  
 พ.ศ. 2552-2553 ผู้ช่วยสอน วิชา Surveying I, Surveying II, Surveying Principles และ  
 Surveying Applications ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ผลงานทางวิชาการ : บทความตีพิมพ์

1. ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ และ ไพศาล สันติธรรมนนท์. 2554. การศึกษาเรขาคณิตของ  
 กล้องถ่ายภาพพานอรามา. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์  
 แห่งประเทศไทย. 12 (พฤษภาคม - สิงหาคม).

2. ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ และ ไพศาล สันติธรรมนนท์. 2554. การปรับแก้ของบล็อกลำแสง  
 สำหรับการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศ  
 ภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย. 12 (พฤษภาคม - สิงหาคม).