

การบูรณาการตัวรับรู้สำหรับระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่



นายภาณุ อุทัยศรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

SENSOR INTEGRATION FOR MOBILE MAPPING SYSTEM



Mr. Phanu Uthaisri

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Survey Engineering

Department of Survey Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบูรณาการตัวรับรู้สำหรับระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่
โดย	นายภาณุ อุทัยศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ
(พันเอก ดร. กนก วีรวงศ์)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(พันเอก ดร. โชคชัย พัวธนาโชคชัย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาณุ อุทัยศรี : การบูรณาการตัวรับรู้สำหรับระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่. (SENSOR INTEGRATION FOR MOBILE MAPPING SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์, 115 หน้า.

ภาพพานอรามาที่มีข้อได้เปรียบที่มีมุมรับภาพที่กว้างกว่า และครอบคลุมข้อมูลมากกว่า เมื่อเทียบกับภาพทัศนมิติ ระบบนำหนด้วยความเฉื่อยในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่สามารถให้ค่าพารามิเตอร์การวางตัวของภายนอกของภาพ ประกอบไปด้วยตำแหน่ง และการวางตัวของกล้องบันทึกภาพ และยานพาหนะได้ ค่าการวางตัวของภายนอกมีความสำคัญในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพ งานวิจัยนี้แบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับภาพพานอรามาทรงกลม และการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของจุดที่สนใจในภาพด้วยวิธีบล็อกกล่าแสง โดยอาศัยการใช้จุดผ่านจากวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับจุดวัดสอบที่ทำการรังวัดค่าพิกัดด้วยกล้องสถานีรวม และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส ผลการทดลองได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับภาพพานอรามาทรงกลมที่ผลิตจากกล้อง Ladybug3 และกระบวนการสำหรับจับคู่ภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับใช้เป็นจุดผ่านในการคำนวณพิกัดตำแหน่งของจุดวัดสอบด้วยวิธีการบล็อกกล่าแสง ผลการเปรียบเทียบเมื่อใช้ค่าการวางตัวของภายนอกจากระบบนำหนด้วยความเฉื่อยค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.216 ม., ± 0.357 ม. และ ± 0.308 ม.ตามลำดับ เมื่อใช้ค่าการวางตัวของภายนอกจากการคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้ายโดยใช้จุดผ่านจากการกำหนดเองค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.079 ม., ± 0.099 ม. และ ± 0.039 ม.ตามลำดับ เมื่อเพิ่มจุดควบคุมภาพเป็นทุกภาพค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.081 ม., ± 0.106 ม. และ ± 0.040 ม.ตามลำดับ เมื่อใช้จุดผ่านจากวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้ายค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.214 ม., ± 0.409 ม. และ ± 0.130 ม.ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มจุดควบคุมภาพในทุกภาพ และใช้จุดผ่านจากกระบวนการคอมพิวเตอร์วิทัศน์ค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.128 ม., ± 0.224 ม. และ ± 0.070 ม.ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับกระบวนการในการหาจุดผ่านด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และจุดควบคุมภาพสามารถใช้คำนวณหาพิกัดตำแหน่งของจุดสนใจในภาพได้ในเกณฑ์เดียวกับที่ใช้ค่าจากระบบนำหนด้วยความเฉื่อยในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ
สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5171823321 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: MOBILE MAPPING SYSTEM / SPHERICAL PHOTOGRAMMETRY / IMAGE
MATCHING / BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT

PHANU UTHAISRI: SENSOR INTEGRATION FOR MOBILE MAPPING SYSTEM.
ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. PHISAN SANTITUMNONT, 115 pp.

The wide field of view of panoramic image provides more information than normal perspective image. While taking images, an Inertial Navigation System (INS) in a mobile mapping system (MMS) can acquire image exterior orientation parameters such as a location and orientation of the camera platform and vehicle. The exterior orientation parameters are important and can be used to compute the coordinates of the point of interest in an image. This research was conducted with two objectives. Firstly, it was aimed to develop a mathematical model of collinearity equation for a spherical panoramic image. Secondly, the model would use computer vision to find a tie point for bundle block adjustment that can determine accuracy based on 20 check points that are provided by a ground survey using a total station and GPS. The research was able to develop a mathematical model for producing a panoramic spherical image from Ladybug3 camera. Subsequently, using bundle block adjustment, the model provided a new method for matching interest points on images for tie points. There were 5 cases to test and evaluate the quality of exterior orientation parameters determined from control points and tie points from computer vision. Case 1, when using the exterior orientation from INS, the RMSE in X, Y and Z direction, the obtained results were ± 0.216 m., ± 0.357 m. and ± 0.308 m. respectively. Case 2, when the exterior orientation parameters were computed by manual tie points and photo control points which were added in first and last image, the corresponding RMSE results were ± 0.079 m., ± 0.099 m. and ± 0.039 m. respectively. Case 3, when the exterior orientation parameters were obtained by photo control points to all images the results of RMSE in X, Y and Z direction were ± 0.081 m., ± 0.106 and ± 0.040 m. respectively. Case 4, when using tie points from computer vision and control points for first and last image to obtain these parameters, the results of RMSE in X, Y and Z direction were ± 0.214 m., ± 0.409 m. and ± 0.130 m. Lastly, Case 5, when adding control points and tie points from computer vision to all images, the X, Y and Z RMSE results were decreased noticeably giving accuracy to ± 0.128 m., ± 0.224 m. and ± 0.070 m. In conclusion, both the mathematical model and its application affirmed that a lesser number of control points on first and last images can be used to determine position with the same level of accuracy when GPS location data are lost from the MMS.

Department: Survey Engineering

Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาใช้เวลาในการให้คำปรึกษา สนับสนุนด้านเครื่องมือ และคำแนะนำอีกทั้งข้อชี้แนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่แนะนำสั่งสอนและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ วิเชียรเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์ พันเอก ดร. กนก วีรวงศ์ และ พันเอก ดร. โชคชัย พัธนา โชคชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาในการอ่านและการตรวจสอบข้อบกพร่อง รวมถึงข้อแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ ที่เป็นกำลังสำคัญในการทดลอง ขอขอบคุณ ดร. วิโรจน์ ละอองมณี ดร.วีรพงศ์ เกิดสิน คุณสวรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข คุณชัยภัทร เนื่องคำมา คุณภูริต มีพร้อม และคุณอรุณ บุรีรักษ์ ในการเก็บข้อมูลสนามในช่วงแรกของการทดลอง ขอขอบคุณ คุณมรกต แก้วมณี และ Dr. Khoo Boo Teik ที่ให้คำปรึกษา และชี้แนะในส่วนภาษาอังกฤษ ขอขอบคุณ คุณกฤษณา ชูลิตะพันธ์พงศ์ และคุณธเนศ จรุงจินันท์ที่ช่วยตรวจสอบคำผิดในเนื้อหา และรูปแบบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่อำนวยความสะดวกในเรื่องเอกสาร และเครื่องมือ และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจที่ทำให้กำลังใจตลอดเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวงที่อนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับงานวิจัย

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณแม่วิภา เอี่ยมลักษณะชัย คุณนฤมล อุทัยศรี และคุณลณินยา อุทัยศรี ครอบครัวอันเป็นที่รักที่ทำให้กำลังใจ กำลังกาย และอดทนมาตลอดระยะเวลาการศึกษา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	3
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่	7
2.1.1 ตัวรับรู้.....	7
2.1.2 พาหนะ.....	7
2.1.3 ระบบประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล.....	7
2.2 ภาพพานอรามา.....	8
2.3 กล้อง Ladybug3	12
2.3.1 การฉายภาพของภาพพานอรามา.....	14
2.3.2 การประกอบภาพพานอรามาทรงกลม	16
2.3.3 การส่งออกภาพพานอรามา.....	18
2.4 พารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้องถ่ายภาพในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่	19
2.5 สมการสภาวะร่วมเส้นของภาพถ่ายทางอากาศ.....	20
2.6 สมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอรามา	23
2.7 การวัดสเก็ดย้อนและการวัดสเก็บบนภาพพานอรามา.....	28
2.7.1 การวัดสเก็ดย้อนบนภาพพานอรามา.....	28

2.7.2 การวัดสกัดบนภาพพานอรามา.....	30
2.8 การจับคู่ภาพอัตโนมัติ.....	33
2.8.1 วิธีการหาจุดสนใจ FAST.....	33
2.8.2 วิธีการหาจุดสนใจ SIFT	34
2.8.2.1 การสร้างปริภูมิค่าในมิติขนาดและระยะทาง	35
2.8.2.2 การกำหนดตำแหน่งจุดสนใจ	37
2.8.2.3 การกำหนดทิศทางของจุดสนใจ.....	38
2.8.2.4 การสร้างคำอธิบายลักษณะเด่นของภาพ	38
2.8.3 วิธีการหาจุดสนใจ SURF	40
2.8.3.1 Orientation Assignment	40
2.8.3.2 Descriptor Components	41
2.8.4 ตัวแปรที่ใช้ในการจับคู่ภาพ.....	42
2.8.5 วิธีการจับคู่ภาพแบบเพื่อนบ้านใกล้สุดโดยประมาณ (ANN)	43
2.8.6 วิธีการจับคู่ภาพ FLANN.....	43
2.9 การปรับแก้แบบบล็อกลำแสงของภาพพานอรามา.....	44
2.9.1 รูปแบบทั่วไปของการปรับแก้บล็อกลำแสงสำหรับภาพพานอรามา	44
2.9.2 ตัวอย่างการสร้างสมการสำหรับการปรับแก้บล็อกลำแสงของภาพพานอรามา	46
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	52
3.1 ระบบแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	52
3.2 การจับคู่ภาพอัตโนมัติ.....	56
3.3 การหาตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามา.....	58
บทที่ 4 วิธีดำเนินการศึกษา	61
4.1 การเตรียมข้อมูล	61
4.2 การปรับการวางตัวของภาพด้วยเส้นตรงและเส้นโค้ง.....	61
4.3 การคำนวณค่าการวางตัวของภาพนอกภาพพานอรามา.....	61
4.4 การจับคู่ภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์.....	64
4.5 การลดความคลาดเคลื่อนในการการจับคู่ภาพ.....	64
4.6 การหาตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามา.....	65

4.7 การแสดงภาพ และตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามา	71
บทที่ 5 ผลการศึกษา.....	72
5.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	72
5.2 ผลการปรับการวางตัวของภาพด้วยเส้นตรงและเส้นโค้ง	72
5.3 การคำนวณค่าพิกัดจุดควบคุม และจุดวัดสอบ	74
5.4 ผลการคำนวณหาค่าการวางตัวภายนอกภาพพานอรามา.....	75
5.5 ผลการจับคู่ภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์	79
5.6 ผลการลดความคลาดเคลื่อนในการจับคู่ภาพ	85
5.7 ผลการหาค่าตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามา.....	92
5.8 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งของวัตถุ	97
5.9 ผลการแสดงภาพ และตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามา.....	98
บทที่ 6 อภิปราย สรุปผล และข้อเสนอแนะ	100
6.1 อภิปรายผลการศึกษา.....	100
6.2 สรุปผลการศึกษา.....	107
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	109
รายการอ้างอิง.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	115

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	2
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะเฉพาะของกล้อง Ladybug3 (Point Grey Research Inc. 2009)	13
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของกล้อง Ladybug 3 (Point Grey Research Inc. 2009).....	13
ตารางที่ 2.3 ค่าพิกัดบนภาพพานอรามาทรวงกลม.....	46
ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณเทียบกับจุดวัดสอบ (Oh and Lee 2010).....	59
ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัดจุดควบคุมบริเวณสนามบาสเก็ตบอล.....	63
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีที่ 2.....	67
ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีที่ 3.....	68
ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีที่ 4.....	69
ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีที่ 5.....	70
ตารางที่ 5.1 ค่าพิกัดจุดควบคุมสำหรับใช้งานในการเก็บข้อมูลจุดควบคุมภาพ และจุดวัดสอบ	75
ตารางที่ 5.2 ค่าพิกัดของจุดควบคุม และจุดวัดสอบ	75
ตารางที่ 5.3 ผลการปรับแก้เพื่อหาค่าการวางตัวภายนอก	76
ตารางที่ 5.4 ค่าการวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	78
ตารางที่ 5.5 ค่าการวางตัวภายนอกจากการคำนวณจากภาพด้วยวิธี Bundle block adjustment	78
ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบเวลาและจำนวนจุดในแต่ละวิธีการค้นหาจุดเด่นชัดในภาพ	81
ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบจำนวนจุด และเวลาที่ใช้ในการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วย วิธี SURF และวิธี SURF ร่วมกับหน้าฉากกรอง	86
ตารางที่ 5.8 ค่าตัวเลขความสว่างจุดภาพในแต่ละโซนของหน้าฉากกรอง	88
ตารางที่ 5.9 ค่าจำนวนจุดภาพต่ำสุดและสูงสุดในการตรวจสอบการเลื่อนของจุดภาพ	89
ตารางที่ 5.10 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	92
ตารางที่ 5.11 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่กำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้าย.....	93
ตารางที่ 5.12 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่กำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ	94

หน้า

ตารางที่ 5.13 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสง จากจุดผ่านที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ และมีจุดควบคุมภาพในภาพ แรก และภาพสุดท้าย	95
ตารางที่ 5.14 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสง จากจุดผ่านที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ และมีจุดควบคุมภาพในทุก ภาพ	96
ตารางที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของจุดวัดสอบในแต่ละกรณีศึกษา.....	97



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	รถสำรวจในโครงการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะสภาพความเสียหายของทาง	2
รูปที่ 1.2	รถสำรวจในโครงการวิจัยร่วมกรมทางหลวงชนบท	3
รูปที่ 1.3	กล้องบันทึกภาพชนิดหลายเลนส์.....	3
รูปที่ 2.1	กล้องบันทึกภาพพานอรามา 360 องศา สร้างขึ้นเมื่อ ค.ศ. 1901 (http://www.spiracollection.com/).....	8
รูปที่ 2.2	รูปแบบการบันทึกภาพพานอรามา (ก) บันทึกโดยควบคุมทิศทางกล้องบันทึกภาพ (ข) บันทึกโดยไม่ได้ควบคุมทิศทางกล้องบันทึกภาพ (Huang et al., 2008).....	9
รูปที่ 2.3	ภาพพานอรามาบริเวณทางเดินหน้าอาคาร 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ด้วยวิธีต่อภาพ	9
รูปที่ 2.4	อุปกรณ์เสริม Panoramic Tripod Head สำหรับช่วยในการบันทึกภาพเพื่อประกอบเป็น ภาพพานอรามา (http://www.plantpath.cornell.edu/PhotoLab/MakingPanoramas.htm).....	10
รูปที่ 2.5	อุปกรณ์และตัวอย่างภาพ Catadioptric panorama (Huang et al., 2008).....	11
รูปที่ 2.6	กล้องบันทึกภาพพานอรามา EYESCAN M3 (Schneider and Maas, 2003).....	11
รูปที่ 2.7	กล้อง Ladybug3 และตัวอย่างภาพแต่ละเลนส์และภาพพานอรามา.....	12
รูปที่ 2.8	กล้อง Ladybug3 (Point Grey Research Inc., 2009)	13
รูปที่ 2.9	กระบวนการประมวลผลภาพภายในกล้อง Ladybug3	14
รูปที่ 2.10	ภาพพานอรามาการฉายแบบทรงกระบอก	15
รูปที่ 2.11	ภาพพานอรามาการฉายแบบทรงกลม.....	15
รูปที่ 2.12	ภาพพานอรามาการฉายแบบทรงโดม.....	15
รูปที่ 2.13	การวัดระบบพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมเมื่อฉายลงบนระนาบราบ	16
รูปที่ 2.14	กระบวนการผลิตภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug3 (Point Grey Research 2013)	17
รูปที่ 2.15	แบบจำลองตาข่ายรูปปิด 2 มิติ	17
รูปที่ 2.16	แบบจำลองตาข่ายรูปปิด 2 มิติซ้อนทับบนภาพพานอรามา.....	18
รูปที่ 2.17	พารามิเตอร์ภายในของกล้องถ่ายภาพ.....	19
รูปที่ 2.18	พารามิเตอร์การวางตัวภายนอกของภาพ.....	20
รูปที่ 2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพ พิกัดวัตถุ และลำแสงบนภาพถ่ายทางอากาศ	21
รูปที่ 2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพ พิกัดวัตถุและลำแสงบนภาพพานอรามาทรงกลม	24

หน้า

รูปที่ 2.21 การอ้างอิงพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมด้วยการฉายภาพแบบ Equirectangular....	24
รูปที่ 2.22 การอ้างอิงพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3.....	25
รูปที่ 2.23 การอ้างอิงพิกัดของจุด a บนทรงกลม	26
รูปที่ 2.24 ระบบพิกัดภาพถ่ายที่ทำมุมหมุน $\Omega = 0^\circ$ $\phi = 90^\circ$ และ $\kappa = 90^\circ$ กับระบบพิกัดโลก..	28
รูปที่ 2.25 การวัดสเกลที่ย้อนสำหรับภาพพานอรามาทรงกลม.....	29
รูปที่ 2.26 การวัดสเกลบนภาพคู่พานอรามาทรงกลม.....	31
รูปที่ 2.27 การหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี FAST (http://www.edwardrosten.com/work/fast.html).....	34
รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการหาลักษณะเด่นของภาพด้วยวิธี SIFT.....	35
รูปที่ 2.29 Scale space image in SIFT	36
รูปที่ 2.30 Difference of Gaussian (DOG) (Lowe 2004)	37
รูปที่ 2.31 จำนวนจุดภาพในการตรวจสอบสำหรับการกำหนดตำแหน่งจุดสนใจ (Lowe 2004)	37
รูปที่ 2.32 การแบ่งพื้นที่รอบจุดสนใจสำหรับหาลักษณะเด่น http://www.aishack.in/2010/05/sift-scale-invariant-feature-transform/7/	38
รูปที่ 2.33 ฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียน http://www.aishack.in/2010/05/sift-scale-invariant-feature-transform/7/	39
รูปที่ 2.34 เวกเตอร์ของทิศทางทั้ง 8	39
รูปที่ 2.35 เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของจุดสนใจ ขนาด 128 มิติ.....	40
รูปที่ 2.36 ตัวอย่าง Orientation Assignment (Bay et al. 2006).....	41
รูปที่ 2.37 แสดงพื้นที่ที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสและทิศทางที่คำนวณได้ของจุดที่สนใจ (Bay et al. 2006).....	42
รูปที่ 2.38 การขนาดและทิศทางเป็นเวกเตอร์ผลลัพธ์ (Bay et al. 2006).....	42
รูปที่ 2.39 ภาพพานอรามา 3 ภาพพร้อมจุดควบคุมภาพและจุดผ่าน.....	44
รูปที่ 2.40 ตำแหน่งจุดควบคุม และจุดผ่านบนภาพพานอรามาทรงกลม.....	47
รูปที่ 3.1 GPSVan TM โดย Center for Mapping (http://www.cfm.ohio-state.edu).....	52
รูปที่ 3.2 ระบบ VISAT TM (http://mycoordinates.org/visat-mapping-what-you-see/all/1/)	53
รูปที่ 3.3 ระบบ TruckMAP TM (Reed et al. 1996).....	53
รูปที่ 3.4 Indoor MMS by National Research Council (http://www.cs.ubc.ca/~pai/RealityWorkshop/boulanger/bio.html)	54

รูปที่ 3.5 The 3-D geometric model and the geometric model plus texture maps (El-Hakim et al. 1997).....	54
รูปที่ 3.6 MOSES system (Graefe, Caspary, Heister et al. 2001)	55
รูปที่ 3.7 การติดตั้งกล้องในตำแหน่งต่างๆ บนระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	55
รูปที่ 3.8 พัฒนาการของกระบวนการหาจุดเด่นชัดในภาพ(Jazayeri and Fraser 2010).....	57
รูปที่ 4.1 ระบบพิกัดของกล้อง Ladybug3.....	62
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะศูนย์กลางกล้อง Ladybug3.....	62
รูปที่ 4.3 ภาพพานอรามาบริเวณสนามบาสเก็ตบอลจากกล้อง Ladybug3	63
รูปที่ 4.4 การแบ่งพื้นที่ในภาพพานอรามาเพื่อใช้เป็นหน้ากากกรอง	64
รูปที่ 4.5 หน้าการสำหรับใช้กรองการค้นหาจุดสนใจในภาพ.....	65
รูปที่ 4.6 แสดงพื้นที่สำหรับใช้เป็นพื้นที่วัดสอบ	66
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งข้อมูลภาพพานอรามา(สามเหลี่ยม) ตำแหน่งจุดควบคุม(วงกลม).....	67
รูปที่ 5.1 ภาพที่บันทึกในแนวระดับ.....	73
รูปที่ 5.2 ภาพที่บันทึกในแนวเอียง	73
รูปที่ 5.3 ภาพที่ปรับการวางตัวด้วยเส้นดิ่งในภาพ	74
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบทั้ง 3 ภาพในบริเวณเดียวกัน.....	74
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างจุดควบคุมภาพบนภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ภาพที่ 065.....	76
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างจุดควบคุมภาพบนภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ภาพที่ 073.....	77
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งจุดวัดสอบบนภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ภาพที่ 067	77
รูปที่ 5.8 ภาพทดสอบจากกล้อง Ladybug3.....	79
รูปที่ 5.9 ผลการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี FAST.....	79
รูปที่ 5.10 ผลการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี SIFT	80
รูปที่ 5.11 ผลการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี SURF	80
รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบการหาจุดเด่นชัดในภาพพานอรามา.....	82
รูปที่ 5.13 การเชื่อมต่อในรอยต่อของภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3	83
รูปที่ 5.14 ผลการจับคู่ภาพด้วยวิธี FLANN.....	84
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี SURF แบบไม่ใช้ และใช้หน้ากากกรอง ...	85
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างผลการจับคู่จุดสนใจในภาพด้วยวิธี FLANN.....	87
รูปที่ 5.17 ผลการจับคู่หลังทำการกรองด้วยโซน	88
รูปที่ 5.18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของจุดภาพในแต่ละโซน.....	89

	หน้า
รูปที่ 5.19 ผลการจับคู่หลังกรองด้วยการเลื่อนของจุดภาพ.....	90
รูปที่ 5.20 ผลจากการกรองด้วยระยะห่างรอบจุด.....	91
รูปที่ 5.21 การแสดงภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล Matplotlib	98
รูปที่ 5.22 การแสดงภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล OpenCV	98
รูปที่ 5.23 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล Matplotlib	99
รูปที่ 5.24 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล OpenCV..	99
รูปที่ 6.1 พฤติกรรมของฟังก์ชัน arctangent และฟังก์ชัน arccosine.....	100
รูปที่ 6.2 ทิศทางการวัดพิกัดบนภาพพานอรามา	100
รูปที่ 6.3 ทิศทางการวัดค่ามุมตั้งบน(V) และมุมสูง(v)	101
รูปที่ 6.4 ตัวอย่างภาพพานอรามาจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่.....	102
รูปที่ 6.5 การพิจารณาตำแหน่งสำหรับหน้ากากรองด้วยพื้นที่	103
รูปที่ 6.6 หน้ากากรองที่ใช้ในการกรองพื้นที่ค้นหา และจับคู่จุดภาพ	103
รูปที่ 6.7 การเคลื่อนที่ของจุดภาพในแต่ละหน้ากล้อง.....	104
รูปที่ 6.8 ตัวอย่างตำแหน่งของจุดที่มีผลกับเรขาคณิตของระบบสมการ.....	106
รูปที่ 6.9 แผนภูมิแสดงกระบวนการจับคู่จุดภาพ.....	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่เป็นระบบสำรวจและทำแผนที่ยุคใหม่ที่มีความสำคัญ มีบทบาทในการทำแผนที่รายละเอียดและสำรวจข้อมูลสำหรับงานภูมิสารสนเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตพื้นที่ตัวเมืองที่มีการขยายตัวสูงมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใช้สอยตามการขยายตัว ความต้องการแผนที่ที่มีความทันสมัยก็มีความต้องการสูงขึ้นไปด้วยสำหรับการวางผังเมือง(El-Sheimy 1996) การวางแผนรองรับการขยายตัวของเมือง ด้วยความสามารถที่ทำการสำรวจที่สามารถทำได้บนยานพาหนะที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทาง เป็นวิธีที่ปรับปรุงข้อมูลแผนที่ในระหว่างเส้นทางที่มีประสิทธิภาพและประหยัด(El-Sheimy and Schwarz 1993) ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปลายทศวรรษ 80 ภายหลังมีการให้บริการระบบกำหนดพิกัดบนพื้นพิภพด้วยดาวเทียมจีพีเอสแก่ประชาชนทั่วไป(Li 1997) โดยใช้เพื่ออ้างอิงตำแหน่งบนพื้นพิภพโดยตรงและยังบูรณาการกับเครื่องวัดความเร่งด้วยความเฉื่อยและเครื่องวัดมุมด้วยไจโรสโคปเป็นระบบนำหนด้วย ความเฉื่อย(Inertial Navigation System; INS) ที่ให้ค่าการเคลื่อนที่และการวางตัวเพื่อหาตำแหน่งโดยละเอียด โดยการพัฒนาระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่ถูกพัฒนาขึ้นทั้งในอากาศยานและพาหนะที่เคลื่อนที่ได้บนพื้นพิภพ(เช่น รถยนต์ รถไฟ สามล้อ) รวมถึงพาหนะบนผิวน้ำและใต้น้ำระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่บนพื้นพิภพที่ถือว่าเป็นระบบแรกถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นในปลายทศวรรษที่ 80 ถึง ต้นทศวรรษที่ 90 ที่ Ohio State University โดยCenter for Mapping เริ่มต้นพัฒนาระบบที่ใช้ชื่อ GPSVanTM (Novak and Bossler 1995, Bossler and Toth 1996) และในช่วงปีค.ศ. 1993 ระบบ VISAT ได้ถูกพัฒนาขึ้นที่ University of Calgary โดยจุดประสงค์ใช้สำหรับงานเก็บข้อมูลทางหลวง (El-Sheimy and Schwarz 1993) หลังจากนั้นระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ก็มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นจากหลายหน่วยงาน ดังตัวอย่างในตารางที่ 1.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเห็นความสำคัญของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ในการเก็บข้อมูลบริเวณเส้นทางมีงานวิจัยถึง 2 โครงการในการเก็บข้อมูลทางหลวงโดยใช้ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ร่วมกับกรมทางหลวงในชื่อโครงการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะสภาพความเสียหายของทาง(สำนักบำรุงผิวทาง กรมทางหลวง 2549)ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และงานวิจัยร่วมกับกรมทางหลวงชนบทในการเก็บข้อมูลสภาพพื้นผิวทางดังแสดงระบบในรูปที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

Name	Developers	Platform	Sensors		Reference
			Navigation	Mapping	
GPSVan™	Ohio State University	Van, Train	GPS, 2 Gyros, 2 odometers (wheel counter)	2 monochrome CCD digital cameras, 2 colour VHS cameras (for archival purposes)	Goad, 1991; Novak, 1991
VISAT™	University of Calgary	Van	Dual frequency GPS, Navigation-grade IMU	8 monochrome CCD digital cameras, 1 colour VHS Camera (for archival purposes)	Schwarz et al., 1993; El-Sheimy and Schwarz, 1999
GIM™	NAVSYS Corp.	Truck	GPS, Low-cost IMU	1 CCD digital camera, 1 VHS Camera	Coetsee and Brown, 1994
KISS™	University of the Federal Armed Forces Munich	Van	GPS, IMU (2 gyros, 3 accel), Odometer, Barometer, Inclinator, Compass	2 monochrome CCD Digital Cameras, colour VHS camera (for archival purposes)	Hock et al., 1995; Sternberg et al., 2001
TruckMAP™	John E. Chance and Associates, Inc.	Van	Dual-antenna GPS, Digital attitude sensor	Reflectorless laser range-finder	Reed, M.D., C.E. Landry, and K.C. Werther, 1996
Gator Communicator™	University of Florida	Person	GPS, Digital Compass, Inclinator	2 CCD digital Cameras	Alexander, 1996; Barker-Benfield, 2000
Indoor MMS	National Research Council, Canada	Mobile Robotic Platform	Wheel Encoders	8 CCD digital cameras, Bi-iris Laser scanner (also used for navigation)	El-Hakim et al., 1997
GI-EYE™	NAVSYS Corp.	Any Land-Based Vehicle	GPS, Low-cost IMU	1 CCD digital camera	Brown, 1998
CDSS	Geodetic Institute Aachen	Van	C/A code GPS, 2 odometers, barometer	2 monochrome CCD digital cameras	Benning and Aussems, 1998
WUMMS	Wuhan Technical University	Truck	GPS, unspecified dead-reckoning sensor	CCD digital camera, Laser range finder	Li et al., 1999
GPSVision™	Lamda Tech Int. Inc.	Van	GPS, Navigation-grade IMU	2 colour CCD digital cameras	Lamda Tech, 2001
ON-SIGHT™	Transmap Corp.	Van	GPS, Navigation-grade IMU	Up to 5 digital CCD cameras	TransMap, 2001
MoSES	University of the Federal Armed Forces Munich	Van	GPS, Navigation-grade IMU, Odometer, Barometer, Inclinator	2 CCD digital cameras (possible laser scanner and colour video camera)	Graefe et al., 2001
Laser scanner MMS	Wuhan Technical University	Truck	GPS	CCD digital camera, laser scanner	Li et al., 2001
Backpack MMS	University of Calgary	Person	GPS, Digital Compass, Inclinator	Colour consumer digital camera	Ellum and El-Sheimy, 2001

(Ellum and El-Sheimy 2002)



รูปที่ 1.1 รถสำรวจในโครงการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะสภาพความเสียหายของทาง



รูปที่ 1.2 รถสำรวจในโครงการวิจัยร่วมกรมทางหลวงชนบท

จากตารางที่ 1.1 จะพบว่าระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่นั้นส่วนมากที่พัฒนากันมาใช้กล้องบันทึกภาพแบบทัศนมิติ(perspective) สำหรับสกัดข้อมูลภาพเป็นข้อมูลของระบบภูมิสารสนเทศไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งของวัตถุต่างๆ หรือข้อมูลอธิบายรายละเอียดของสิ่งต่างๆเหล่านั้น โดยอาศัยวิธีการทำแผนที่จากภาพถ่ายทำให้ติดตั้งกล้องตั้งแต่ 2 กล้องขึ้นไปเพื่อให้ได้ข้อมูลในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งให้ได้มากที่สุด กอปรกับวิธีต่อภาพในระบบดิจิทัลสามารถทำให้ได้ภาพที่มีมุมมองที่กว้างขึ้น ได้ข้อมูลมากขึ้นในภาพเดียว มีการติดตั้งกล้องเดี่ยวหลายตำแหน่งบนยานพาหนะเพื่อสามารถประกอบภาพเป็นภาพพานอรามาได้ จนถึงการใช้กล้องบันทึกภาพที่มีหลายเลนส์ ตัวอย่างรูปที่ 1.3 ได้แก่กล้อง Ladybug2 กล้อง Ladybug3 กล้อง Ladybug5 เป็นต้นหรือกล้อง Dodeca 2360 ที่ทางกูเกิ้ลได้นำมาใช้งานเพื่อแสดงภาพรอบทิศทางใน Street View ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2007 เป็นการแสดงภาพในมุมมองรอบทิศทางจากถนน มีผลทำให้ความนิยมในการใช้ภาพพานอรามาเพิ่มมากขึ้นในการใช้งานระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่



รูปที่ 1.3 กล้องบันทึกภาพชนิดหลายเลนส์

ในการหาตำแหน่งของวัตถุต่างๆ ในภาพของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ใช้กระบวนการการทำแผนที่จากภาพถ่าย (photogrammetry) ที่ปรับปรุงมาเป็นการทำแผนที่จากภาพถ่ายระยะใกล้ (close-range photogrammetry) จำเป็นที่ต้องทราบตำแหน่งและทิศทางของตัวกล้องถ่ายภาพและทิศทางที่บันทึกภาพเรียกจุดเปิดถ่ายภาพ ซึ่งในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำหนเป็นเครื่องมือกำหนดตำแหน่งบนพื้นพิภพ (Novak 1993, Novak and Bossler 1995) นอกจากการหาตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพจากการรังวัดตำแหน่งด้วยดาวเทียมนำหนแล้วในกระบวนการทางการทำแผนที่จากภาพถ่ายด้วยความสัมพันธ์ของสภาวะร่วมเส้นทำการวัดสกัดย้อนกลับหาตำแหน่งของจุดฉายภาพได้จากการคำนวณด้วยภาพหนึ่งภาพและทราบค่าพิกัดของจุดบนพื้นที่อย่างน้อย 3 จุด โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพถ่ายเดี่ยว (ไพศาล สันติธรรมนนท์ 2553)

จากงานวิจัยต่างๆ โดยการทบทวนวรรณกรรมพบว่าความต้องการในการทำแผนที่ในเมือง โดยการใช้วิธีการที่รวดเร็วขึ้นเช่น การใช้ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่มีปัญหาหลักอย่างเดียวกันคือ การหาตำแหน่งของยานพาหนะในเขตตัวเมือง ซึ่งในการหาตำแหน่งของยานพาหนะของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่นั้นอาศัยระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นพิภพด้วยดาวเทียมเป็นหลัก อาศัยการรับสัญญาณตรงจากดาวเทียมทำให้เกิดปัญหาเมื่อใช้งานในเขตตัวเมืองเนื่องจากการบดบังของอาคารสูงหรืออาคารที่หนาแน่น ทำให้สัญญาณเกิดการขาดหาย หรือสัญญาณสะท้อน แม้การแก้ไขระบบโดยใช้ระบบนำหนด้วยความเฉื่อยซึ่งช่วยแก้ไขการขาดหายของสัญญาณดาวเทียมได้ในช่วงสั้นๆ เมื่อเวลาที่สัญญาณขาดหายนานขึ้นทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น (Grejner-bzezlinska, Toth and Yudan 2005) โดยเฉพาะเมื่อยานพาหนะเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ขณะสัญญาณดาวเทียมขาดหาย ในขณะเดียวกันระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่มีการบินถ่ายภาพสำหรับดูรายละเอียดและหรือวัดตำแหน่งของจุดที่สนใจในภาพโดยกระบวนการทำแผนที่จากภาพระยะใกล้ได้ อาศัยหลักการทางการทำแผนที่จากภาพถ่ายสามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดฉายภาพได้เมื่อประมวลผลกลับทำให้สามารถหาตำแหน่งของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ได้

ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าหากใช้ภาพพานอราามาที่มีจุดเด่นที่มีมุมมองที่กว้างมาใช้คำนวณหาตำแหน่งของวัตถุในภาพได้ด้วยกระบวนการทางการทำแผนที่ด้วยภาพในส่วนที่สัญญาณขาดหาย จะสามารถลดการสูญเสียข้อมูลในช่วงที่สัญญาณกำหนดตำแหน่งจากดาวเทียมขาดหาย หรือขาดหายเป็นเวลานานจนเครื่องนำหนด้วยความเฉื่อยมีค่าคลาดเคลื่อนมากจนทำให้การคำนวณพิกัดของจุดที่สนใจในภาพคลาดเคลื่อนมากกว่ามาตราส่วนของแผนที่ ที่ต้องการสร้างหรือปรับปรุงได้ เป็นการบูรณาการตัวรับรู้ในการทำแผนที่ ช่วยในการกำหนดตำแหน่ง และชดเชยส่วนที่ขาดไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้กระบวนการทางการทำแผนที่จากภาพถ่ายด้วยภาพพานอรามาในการหาตำแหน่งฉายภาพเพื่อคำนวณตำแหน่งของจุดที่สนใจสำหรับการปรับปรุงแผนที่ในบริเวณตัวเมือง โดยกำหนดวัตถุประสงค์เป็นข้อเพื่อประกอบการใช้กระบวนการทางการทำแผนที่จากภาพพานอรามาในการหาตำแหน่งของจุดฉายภาพเพื่อการหาตำแหน่งในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.2.1. ศึกษาการหาตำแหน่งจุดฉายภาพด้วยวิธีบล็อกลำแสงจากข้อมูลดาวเทียมนำหน้า ข้อมูลจากเครื่องวัดการวางตัวและความเร่งด้วยความเฉื่อย และข้อมูลภาพพานอรามาทรงกลม
- 1.2.2. ศึกษากระบวนการหาจุดโยงยึดในภาพด้วยกระบวนการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์
- 1.2.3. ศึกษากระบวนการทำแผนที่ภาพจากภาพพานอรามาเพื่อใช้ประโยชน์ในการวัดหาค่าพิกัดของจุดที่สนใจภายในภาพ
- 1.2.4. ศึกษาการแสดงผลภาพ และแสดงตำแหน่งของจุดที่สนใจในภาพ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในการวิจัยนี้จะทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการสถานะร่วมเส้นของภาพถ่ายทางอากาศเป็นพื้นฐาน เพื่อพัฒนาใช้สำหรับภาพพานอรามาทรงกลมที่ได้จากกล้อง Ladybug3

การประมวลผลตำแหน่งจุดฉายภาพของกล้องบันทึกภาพแบบรอบตัวจากกล้อง Ladybug3 จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ด้วยวิธีบล็อกลำแสงโดยใช้ข้อมูลจากตัวรับรู้หลายชนิด ดังนี้

- ข้อมูลดาวเทียมนำหน้า
- ข้อมูลจากเครื่องนำหน้าด้วยความเฉื่อย
- ข้อมูลภาพพานอรามา

ผู้วิจัยมุ่งเน้น ปรับปรุงและพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้ข้อมูลภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ด้วยกระบวนการการทำแผนที่จากภาพถ่ายระยะใกล้ประมวลผลร่วมกับข้อมูลจากตัวรับรู้อื่นโดยจัดองค์ประกอบการคำนวณดังนี้

- คำนวณจากข้อมูลดาวเทียมนำหน้า และข้อมูลจากเครื่องนำหน้าด้วยความเฉื่อยที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ และข้อมูลภาพ

- คำนวณจากข้อมูลดาวเทียมนำหน และข้อมูลจากเครื่องนำหนด้วยความเฉื่อยที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ และข้อมูลภาพ และจุดควบคุม
- คำนวณจากข้อมูลภาพ และจุดควบคุม

โดยในการวิจัยนี้ถือว่าภาพที่ได้จากการฉายของกล้องบันทึกภาพนี้มีคุณสมบัติเป็นภาพเสมือนที่มีการฉายภาพทรงกลม หรือทรงกระบอกหรือมีความละเอียดถูกต้องเพียงพอที่จะทำแผนที่ได้

เนื่องจากการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาข้อมูลในเมืองดังนั้นในการศึกษาแบบจำลองเพื่อปรับปรุงแบบจำลองบล็อกลำแสง มุ่งเน้นที่จะใช้กระบวนการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์(computer vision) ช่วยสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับแบบจำลองบล็อกลำแสง

กระบวนการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์เพื่อหาจุดเด่นชัดในภาพ สำหรับใช้เป็นจุดโยงยึดสำหรับการคำนวณบล็อกลำแสง ผู้วิจัยศึกษากระบวนการคิดทางคอมพิวเตอร์(algorithm) สำหรับหาจุดเด่นในภาพด้วยวิธี SIFT, SURF และ FAST เพื่อหาวิธีการสำหรับหาจุดเด่นในภาพที่ชัดเจน และกระบวนการคิดทางคอมพิวเตอร์วิธี SIFT และ SURF ในการหาคุณลักษณะเด่นของแต่ละจุดเด่นในภาพ

กระบวนการทำแผนที่จากภาพพานอรามาผู้วิจัยมีจุดประสงค์ที่จะใช้หาตำแหน่งใน 3 มิติของจุดในภาพสำหรับใช้เป็นข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแต่ละการจัดองค์ประกอบในการคำนวณ เทียบกับข้อมูลที่สำรวจด้วยกล้องสถานีรวมและประเมินผลความถูกต้อง

ผู้วิจัยศึกษาการแสดงผลภาพ และแสดงตำแหน่งของจุดที่สนใจในภาพ และในแผนที่โดยที่ไม่ได้มุ่งพัฒนาการแสดงผลภาพด้วยวิธีใหม่เพียงแต่ศึกษาหาวิธีแสดงผลภาพ และตำแหน่งของจุดที่สนใจในภาพ และแสดงบนแผนที่ได้เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. สามารถสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับข้อมูลภาพพานอรามาทรงกลมที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้เพื่อใช้สำหรับการปรับแก้แบบบล็อกลำแสง
- 1.4.2. สามารถใช้กระบวนการคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการหาจุดโยงยึดในแต่ละภาพพานอรามาเพื่อใช้เป็นจุดผ่านของการปรับแก้ด้วยวิธีบล็อกลำแสงได้
- 1.4.3. สามารถหาพิกัดของจุดที่สนใจในภาพด้วยวิธีการทำแผนที่จากภาพพานอรามาทรงกลมได้
- 1.4.4. สามารถแสดงผลภาพพานอรามาทรงกลม และตำแหน่งของจุดบนภาพพานอรามาทรงกลมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่(mobile mapping system) เป็นระบบการทำแผนที่ที่อาศัยการนำเครื่องมือสำรวจติดตั้งบนพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ได้ มีส่วนประกอบของระบบที่สำคัญคือ ตัวรับรู้(sensor) และพาหนะ สำหรับพาหนะ ส่วนมากจะหมายถึงรถยนต์เป็นหลัก ส่วนตัวรับรู้ส่วนมากจะหมายถึงกล้องบันทึกภาพ เลเซอร์สแกนเนอร์ และจีพีเอส การทำงานของระบบเป็นการทำงานแบบการรังวัดด้วยภาพระยะใกล้ สามารถจำแนกส่วนประกอบหลักของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ออกเป็น 3 ส่วนคือ ตัวรับรู้ พาหนะ และระบบประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล(El-Sheimy 2008)

2.1.1 ตัวรับรู้

ตัวรับรู้ในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ยังสามารถแยกออกได้เป็นตัวรับรู้รับภาพ(image sensor) หมายถึงตัวรับรู้ที่ใช้สำหรับบันทึกสถานะแวดล้อม ณ เวลานั้น ได้แก่กล้องถ่ายภาพนิ่ง กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว รวมไปถึงเลเซอร์สแกนเนอร์(laser scanner) และเทคโนโลยีอื่นที่จะตามมาในอนาคต และตัวรับรู้กำหนดตำแหน่ง(position sensor) หมายถึงตัวรับรู้ที่ใช้หาตำแหน่งของจุดถ่ายภาพตามหลักการของการรังวัดด้วยภาพ โดยตัวรับรู้นี้ได้แก่ จีพีเอส เครื่องมือวัดการเร่งและการหมุน(inertial measuring unit; IMU) และเครื่องมือวัดระยะทางจากการหมุนของล้อ(distance measuring instrument; DMI)

2.1.2 พาหนะ

พาหนะในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้คือสิ่งที่สามารถบรรทุกอุปกรณ์และพาไปยังพื้นที่ที่ต้องการเก็บข้อมูลได้ จึงหมายรวมถึง คน อากาศยานได้แก่เครื่องบินต่างๆ รถจักรยาน รถจักรยานยนต์ รถสามล้อ รถยนต์ และยังรวมถึงเรือในแบบต่างๆ ด้วย

2.1.3 ระบบประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล

ระบบประมวลผลและจัดเก็บข้อมูล ได้แก่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจัดการควบคุมอุปกรณ์ ประมวลผล บีบอัดและจัดเก็บข้อมูลภาพ จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลทางตำแหน่ง การเชื่อมโยงข้อมูลภาพและข้อมูลทางตำแหน่งให้สัมพันธ์สอดคล้องกัน และควบคุมคุณภาพของข้อมูล

2.2 ภาพพานอรามา

พานอรามา(panorama) มีความหมายถึงมุมมองที่กว้าง ดังนั้นภาพพานอรามา(panoramic image) จึงหมายถึงภาพที่มีมุมมองกว้างกว่ามุมมองของภาพถ่ายปกติ(Huang, Klette and Scheibe 2008) ภาพถ่ายปกติในความหมายนี้คือภาพที่บันทึกด้วยฟิล์มขนาด 35 มิลลิเมตรด้วยเลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร ภาพที่ได้คือภาพทัศนมิติ(perspective) มีสัดส่วนใกล้เคียงเช่นเดียวกับการมองเห็นด้วยตา

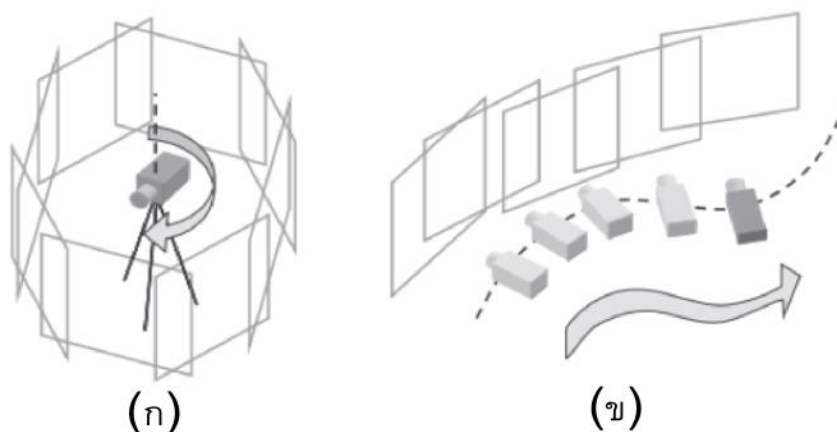
ภาพพานอรามาในยุคแรกเป็นการบันทึกภาพมุมกว้าง โดยใช้เลนส์ที่มีระยะโฟกัสสั้นทำให้สามารถรับภาพได้มุมกว้าง จนกระทั่งมีการประดิษฐ์กล้องบันทึกภาพที่สามารถบันทึกภาพด้วยเลนส์ได้มุม 360° เมื่อปีค.ศ. 1901 ในประเทศฝรั่งเศสดังรูปที่ 2.1 ภาพพานอรามาในยุคเริ่มต้นเรื่อยมาเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์มใบเดียว ไม่สามารถบันทึกภาพเป็นภาพถ่ายปกตินำมาต่อกันในระบบฟิล์มได้ แม้มีการนำภาพถ่ายปกติมาต่อกันก็เป็นการต่อภาพหลังอัดภาพลงบนกระดาษ



รูปที่ 2.1 กล้องบันทึกภาพพานอรามา 360 องศา สร้างขึ้นเมื่อ ค.ศ. 1901

(<http://www.spiracollection.com/>)

เมื่อเข้าสู่ยุคบันทึกภาพในแบบดิจิทัลนอกจากบันทึกภาพพานอรามาจากกล้องเพียงครั้งเดียวแล้วด้วยเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ยังสามารถต่อภาพจากภาพถ่ายปกติ หรือภาพถ่ายมุมกว้างหลายๆ ภาพให้เป็นภาพพานอรามาได้วิธีการนี้เรียกStitching ซึ่งในการบันทึกภาพเพื่อต้องการต่อภาพเป็นภาพพานอรามาวิธีการบันทึกทั้งในแบบที่กำหนดจุดตั้งกล้องบันทึกภาพที่แน่นอนและควบคุมมุมและระยะชัดของภาพได้ และบันทึกภาพแบบไม่ควบคุมทิศทางที่แน่นอนเพียงแต่ให้มีส่วนซ้อนเหลื่อมของภาพก็เพียงพอดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบการบันทึกภาพพานอรามา
 (ก) บันทึกโดยควบคุมทิศทางการกล้องบันทึกภาพ
 (ข) บันทึกโดยไม่ได้ควบคุมทิศทางการกล้องบันทึกภาพ
 (Huang et al., 2008)

ตัวอย่างภาพพานอรามาจากการต่อภาพถ่ายปกติหลายภาพ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์ทั้งทางพาณิชย์ และซอฟต์แวร์ฟรีสำหรับสร้างภาพพานอรามาด้วยวิธีต่อภาพได้อย่างไม่ยุ่งยากสามารถทำได้ และพัฒนาไปจนถึงสามารถต่อให้อัตโนมัติภายในกล้องถ่ายภาพที่มีขายทั่วไป ในท้องตลาดหลังจากบันทึกภาพเสร็จโดยอาศัยซอฟต์แวร์ภายในกล้อง(Sony Electronics 2010)



รูปที่ 2.3 ภาพพานอรามาบริเวณทางเดินหน้าอาคาร 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ด้วยวิธีต่อภาพ

สำหรับงานที่ต้องการประกอบภาพเป็นภาพพานอรามาทรงกลม ในกระบวนการถ่ายภาพจะมีอุปกรณ์เสริม ดังรูปที่ 2.4 ใช้สำหรับให้จุดศูนย์กลางเลนส์เป็นจุดหมุนขณะถ่ายภาพ อุปกรณ์นี้จะช่วยให้ตำแหน่งของเลนส์อยู่ใกล้เคียงจุดฉายภาพของภาพพานอรามา เมื่อนำภาพที่บันทึกได้มาประกอบเป็นภาพพานอรามาภาพในส่วนซ้อนทับจะมีใกล้เคียงกันเนื่องจากมาจากจุดฉายภาพบริเวณเดียวกันทำให้เกิดภาพเหลื่อมน้อยมาก ภาพพานอรามาทรงกลมที่ได้จะมีความต่อเนื่องเป็นภาพเดียวกัน

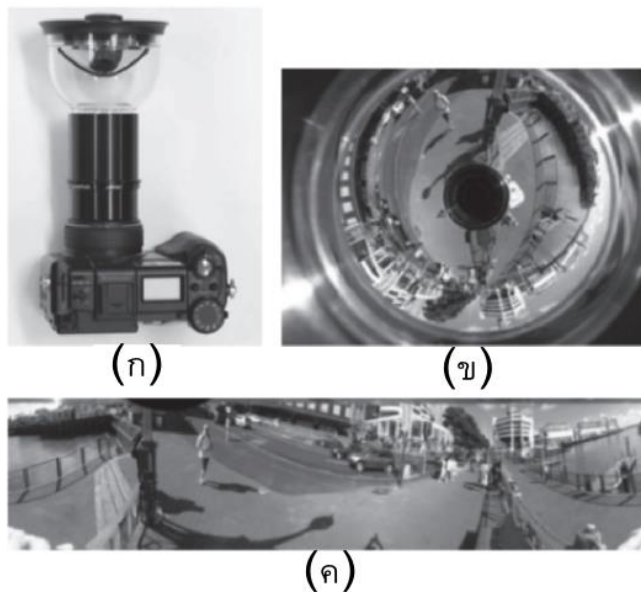


รูปที่ 2.4 อุปกรณ์เสริม Panoramic Tripod Head สำหรับช่วยในการบันทึกภาพเพื่อประกอบเป็นภาพพานอรามา

(<http://www.plantpath.cornell.edu/PhotoLab/MakingPanoramas.htm>)

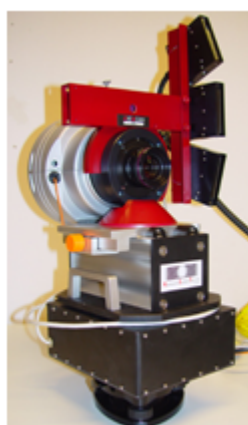
นอกจากการบันทึกภาพเพื่อมาต่อภาพเป็นภาพพานอรามาแล้วยังมีการประดิษฐ์เลนส์สำหรับบันทึกภาพพานอรามาจากกล้องถ่ายภาพปกติด้วยตัวอย่างเช่นภาพพานอรามาแบบ Catadioptric เป็นภาพถ่ายที่มองเห็นภาพแบบ ครึ่งทรงกลมในการบันทึกเพียงครั้งเดียวอาศัยอุปกรณ์ผิวโค้งสะท้อนภาพเข้าสู่เลนส์ดังรูปที่ 2.5(ก) ต่อเข้ากับกล้องบันทึกภาพใช้งานได้ทั้งกล้องแบบฟิล์มและกล้องดิจิทัล เมื่อบันทึกภาพแล้วจะได้ภาพดังรูปที่ 2.5(ข) หลังจากฉายภาพกลับมาเป็นภาพปกติจะได้ภาพพานอรามาแบบครึ่งทรงกลมดังรูปที่ 2.5(ค)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์และตัวอย่างภาพ Catadioptric panorama (Huang et al., 2008)

เนื่องจากข้อมูลภาพครึ่งทรงกลมถูกบันทึกเพียงครั้งเดียวในขนาดภาพปกติทำให้เมื่อฉายภาพมาเป็นภาพพานอรามาแล้วส่วนของภาพมีความบิดเบี้ยวสูงโดยเฉพาะบริเวณขอบบนและขอบล่าง ในงานการทำแผนที่จากภาพถ่ายระยะใกล้ยังมีการใช้กล้องบันทึกภาพชนิด Rotating sensor-line camera ซึ่งเป็นกล้องบันทึกภาพแบบหมุนได้มีตัวรับรู้ภาพเรียงเป็นเส้นในแนวตั้งเป็นกล้องที่ให้ความละเอียดสูง เช่นกล้อง KST EYESCAN M3 (Luhmann and Tecklenburg 2005) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.6 ถ้าใช้เลนส์ 35 มิลลิเมตรเมื่อบันทึกภาพ 360° ภาพที่ได้มีขนาด 31400x10200 จุดภาพต้องการพื้นที่จัดเก็บ 1.7 GB (Schneider and Maas 2003)



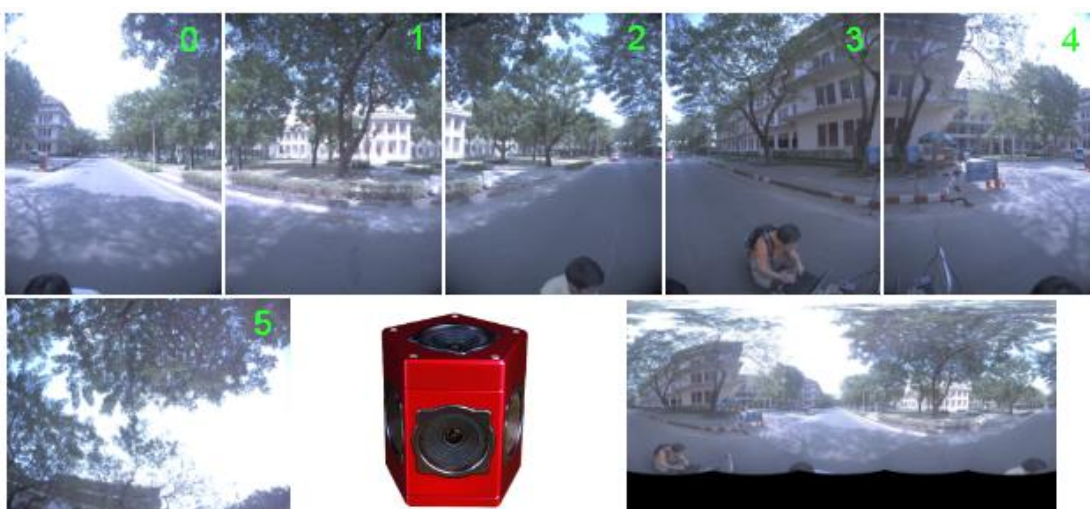
Lens	35 mm	45 mm	60 mm	100 mm
Image format (360°)	31,400x 10,200	40,400x 10,200	53,800x 10,200	89,700x 10,200
Data Volume (360°)	1.7 GB	2.3 GB	3.1 GB	5.1 GB
Radiometric resolution	16 bit per channel			
Pixel pitch	7 μm x 7 μm			

Ref: http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~ds627255/instpage/EYESCAN_M3/Oktober_2002/page/FrameSet.htm

รูปที่ 2.6 กล้องบันทึกภาพพานอรามา EYESCAN M3 (Schneider and Maas, 2003)

กล้องบันทึกภาพพานอรามาแบบหลายเลนส์เป็นการใช้เลนส์รับภาพหลายเลนส์จัดวางในตำแหน่งที่สามารถประกอบเป็นภาพพานอรามาได้ภายหลังบันทึกภาพแล้ว เช่นกล้อง Point Grey

Ladybug2 และ Ladybug3 เป็นต้น กล้อง Ladybug3 จัดเป็นกล้องวิดีโอทัศนแบบทรงกลม ชนิด multi-head camera ประกอบไปด้วยเลนส์ขนาดเล็กคุณภาพสูงจำนวน 6 เลนส์และ CCD ขนาด 2 ล้านพิกเซลต่อเลนส์จึงทำให้สามารถประกอบภาพพานอรามาขนาด 5400 x 2700 จุดภาพด้วยซอฟต์แวร์ที่มากับกล้องได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 ภาพที่บันทึกจากกล้อง Ladybug3 สามารถบันทึกภาพต่อเนื่องในอัตราสูงสุด 15 ภาพต่อวินาที สามารถผลิตเป็นภาพพานอรามาออกมาพร้อมใช้งาน



รูปที่ 2.7 กล้อง Ladybug3 และตัวอย่างภาพแต่ละเลนส์และภาพพานอรามา

2.3 กล้อง Ladybug3

กล้องถ่ายภาพสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เป็นกล้องพานอรามาแบบmulti-head camera ดังรูปที่ 2.8 ที่มีตัวรับภาพ CCD ขนาด 1600 x 1200 จุดภาพและเลนส์ขนาดเล็กคุณภาพสูง จำนวน 6 ชุด ติดตั้งแบบตายตัวบนโครงรูป 5 เหลี่ยมด้านเท่าพื้นที่บันทึกภาพครอบคลุม 80%ของทรงกลม (ด้านล่างไม่มีข้อมูล) ทำการวัดสอบกล้องสำหรับต่อภาพพานอรามาทรงกลมมาจากโรงงาน เชื่อมต่อระบบคอมพิวเตอร์ด้วยการเชื่อมต่อแบบ IEEE-1394b ความเร็ว 800Mb/s โดยมีคุณสมบัติเฉพาะดังตารางที่ 2.1 และคุณสมบัติเชิงทัศนดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.8 กล้อง Ladybug3 (Point Grey Research Inc., 2009)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเฉพาะของกล้อง Ladybug3 (Point Grey Research Inc. 2009)

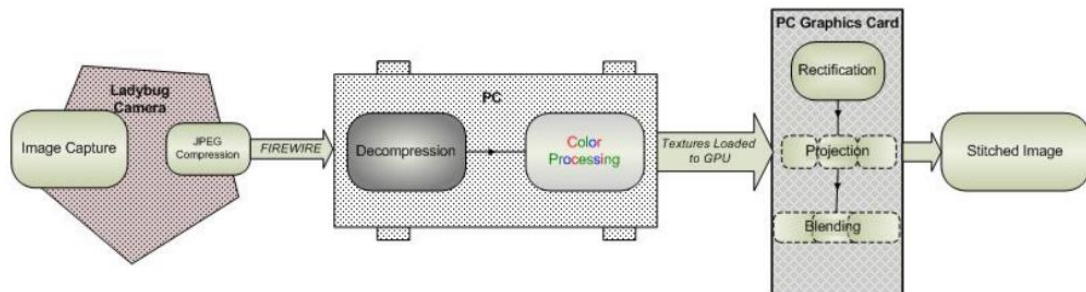
General Camera Specifications	
Camera Model	LD3-20S4C
Overview	Single unit, high-resolution IEEE-1394b spherical digital video camera
Imaging Sensor Type	Six (6) Sony progressive scan color CCDs (five in horizontal ring, one on top)
Image Sensor Model	Sony 2.0 MP 1/1.8" ICX274
Maximum Resolution	1616(H) x 1232(V) (each sensor)
Pixel Size	4.4 μm (H) x 4.4 μm (V)
A/D Converter	Analog Devices 12-bit ADC
Effective Imager Size	6.26 mm(H) x 5.01 mm(V)
Video Data Output	8-bit raw Bayer (color) digital data
Signal To Noise Ratio	62 dB at 0 dB gain
Digital Interfaces	9-pin 1394b (FireWire) 800 Mb/s for camera control, video data transmission and power.

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของกล้อง Ladybug 3 (Point Grey Research Inc. 2009)

Optical Specifications	
Lenses	Six (6) 3.3 mm focal length microlenses
Field of view	>80% of full sphere
Spherical Distance	Calibrated at 20 m
Parallax	48 mm offset between optical centers of side cameras 72 mm offset between optical centers of top camera and side cameras

การผลิตภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug3 เริ่มจากภาพที่ถูกบันทึกด้วยกล้องจำนวน 6 เลนส์ในกล้อง Ladybug3 แล้วถูกบีบอัดในรูปแบบ Jpeg ถูกส่งผ่านไปซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ทำการขยายไฟล์ภาพที่ถูกบีบอัดและประมวลผลคุณภาพสี และปรับแก้ความคลาดเคลื่อนจากเลนส์ที่ทำ

การทดสอบค่าปรับแก้เฉพาะแต่ละกล้อง และฉายภาพให้อยู่ในการฉายแบบทรงกลมหรือทรงกระบอกจากนั้นประกอบเป็นภาพพานอรามาโดยปรับแก้บริเวณส่วนซ้อนเหลื่อม ดังแสดงเป็นไดอะแกรมในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการประมวลผลภาพถ่ายในกล้อง Ladybug3

(Point Grey Research 2009)

2.3.1 การฉายภาพของภาพพานอรามา

ภาพพานอรามามีการฉายในหลายรูปแบบและวิธีการเหมือนการฉายแผนที่ แต่ส่วนมากนิยมฉายภาพแบบระนาบ แบบทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบทรงลูกบาศก์ (James 2010) การฉายภาพแบบ Equirectangular เป็นการฉายภาพทรงกลมไปบนพื้นราบ มีการเรียกการฉายแบบนี้ว่า การฉายแบบสี่เหลี่ยม(rectangular projection) การฉายบนพื้นราบ(plane chart) หรือแผนที่แบบไม่มีการฉาย(unprojection map) ที่มีขนาดตารางกว้างและยาวเท่ากันและมักถูกใช้แสดงเป็นภาพพานอรามาต้นแบบก่อนแปลงไปเป็นการฉายภาพในแบบต่างๆ เช่น ทรงกระบอก ทรงลูกบาศก์ หรือทรงกลม เป็นต้น

กล้อง Ladybug3 สามารถผลิตภาพพานอรามาในการฉายแบบ ทรงกระบอก ทรงกลม และทรงโดมดังตัวอย่างรูปที่ 2.10 รูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 ภาพพานอรามาการฉายแบบทรงกระบอก



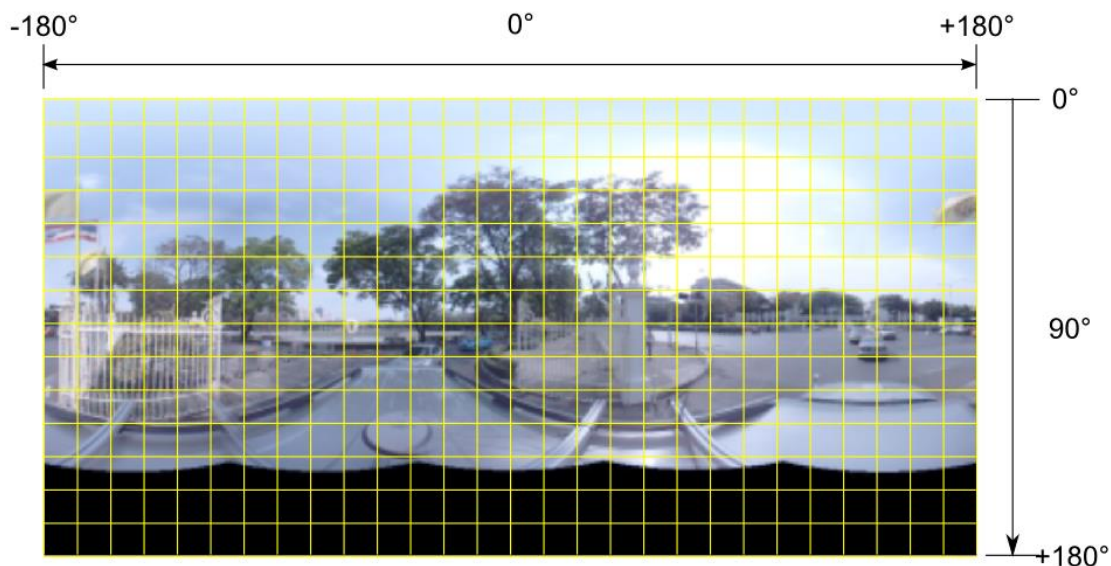
รูปที่ 2.11 ภาพพานอรามาการฉายแบบทรงกลม



รูปที่ 2.12 ภาพพานอรามาการฉายแบบทรงโดม

ในรูปที่ 2.13 การวัดระบบพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมเมื่อฉายลงบนระนาบราบ แสดงการวัดบนภาพพานอรามาทรงกลมแบบ Equirectangular โดยแบ่งแนวราบเป็น

360° โดยศูนย์กลางภาพเป็นจุดเริ่มต้นไปทางซ้าย -180° ไปทางขวา +180° ในแนวตั้ง
 แบ่งเป็น ไปทางขวา 180° วัดที่ขอบภาพด้านบนเป็นจุดเริ่มต้นลงมาทางด้านล่าง +180°



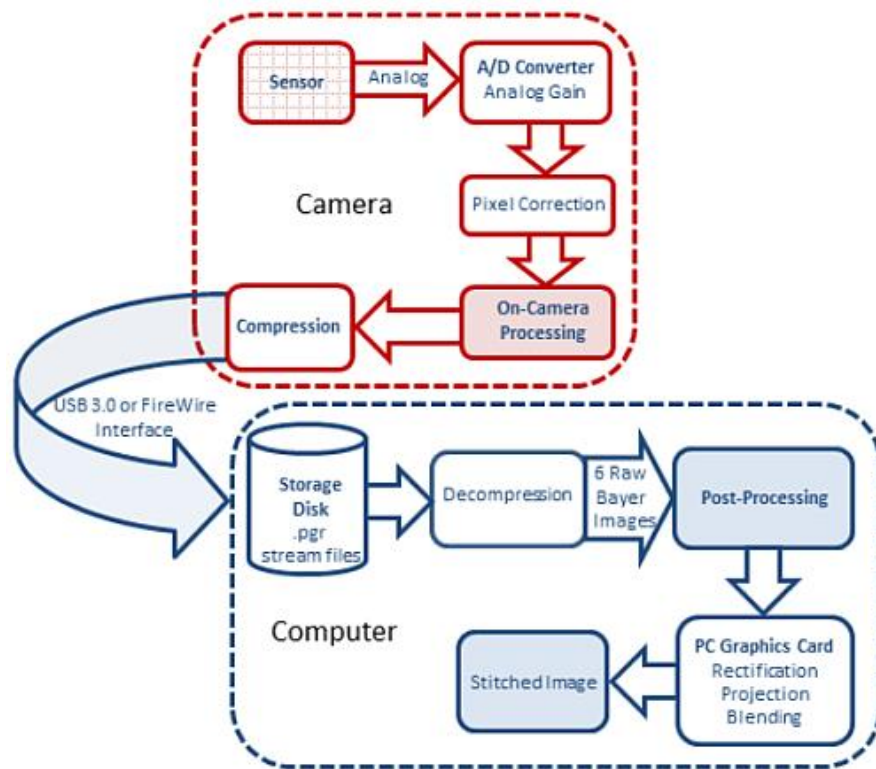
รูปที่ 2.13 การวัดระบบพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมเมื่อฉายลงบนระนาบราบ

ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพจากกล้อง Ladybug3 ที่มีการถ่ายภาพแบบ Equirectangular ซึ่งต่อไปจะเรียกภาพชนิดนี้ว่า ภาพพานอรามาทรงกลม ขนาดของภาพเลือกใช้ค่าสูงสุดที่กล้องสามารถทำได้คือ 5400 x 2700 จุดภาพในรูปแบบไฟล์ Jpeg

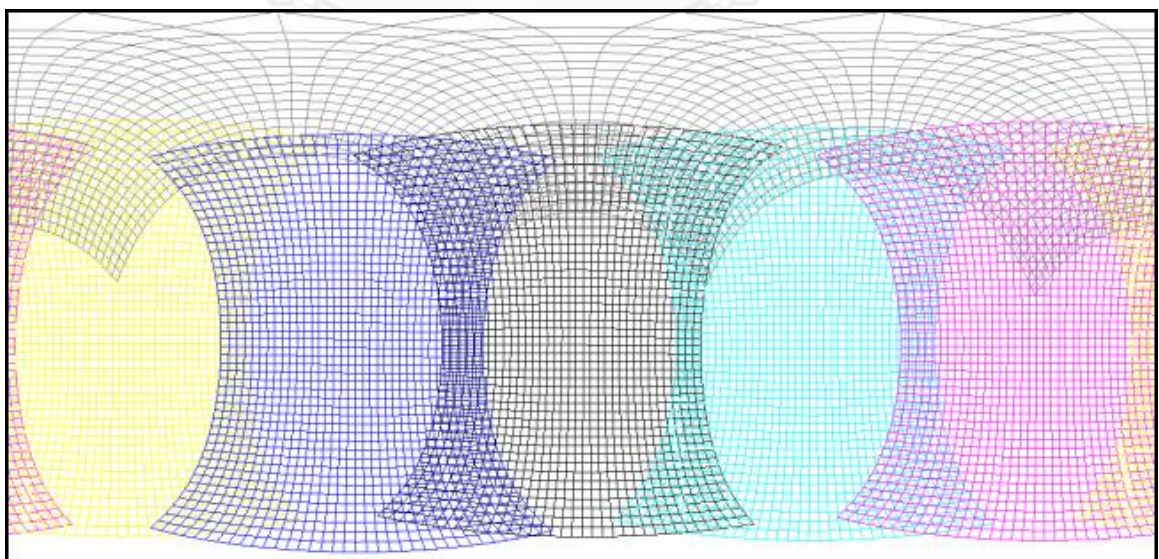
2.3.2 การประกอบภาพพานอรามาทรงกลม

ภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3 เป็นภาพเสมือนที่เกิดจากการประกอบภาพทั้ง 6 ภาพเข้าด้วยกันโดยกระบวนการผลิตภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 แสดงในรูปที่ 2.14 ภาพที่บันทึกจากกล้อง Ladybug3 จะถูกเก็บอยู่ใช้ชุดข้อมูลที่เรียกสตรีมไฟล์ และถูกประมวลผลในคอมพิวเตอร์ภายหลังด้วยซอฟต์แวร์เฉพาะที่ใช้งานกับสตรีมไฟล์ของกล้อง Ladybug ชื่อโปรแกรม LadybugCapPro ในส่วนการผลิตภาพพานอรามา นั้น ในขั้นตอนสุดท้ายก่อนได้ภาพพานอรามา กระบวนการ Rectification จะทำการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ โดยใช้ค่าปรับแก้ที่ทางโรงงานผู้ผลิตทำการวัดสอบและให้ค่าเพื่อปรับแก้ความคลาดเคลื่อนนั้น ในส่วนกระบวนการ Projection จะทำการประกอบภาพในระบบพิกัด 2 มิติ หรือ 3 มิติตามการถ่ายภาพที่ได้กำหนดไว้ โดยภาพพานอรามาจะเป็นการวางภาพในระบบพิกัด 2 มิติ(Point Grey Research 2013) โดยตำแหน่งการวางภาพได้ถูกกำหนดไว้แล้วในลักษณะตาข่ายรูปปิด จุดภาพใดของกล้องใดอยู่ใน

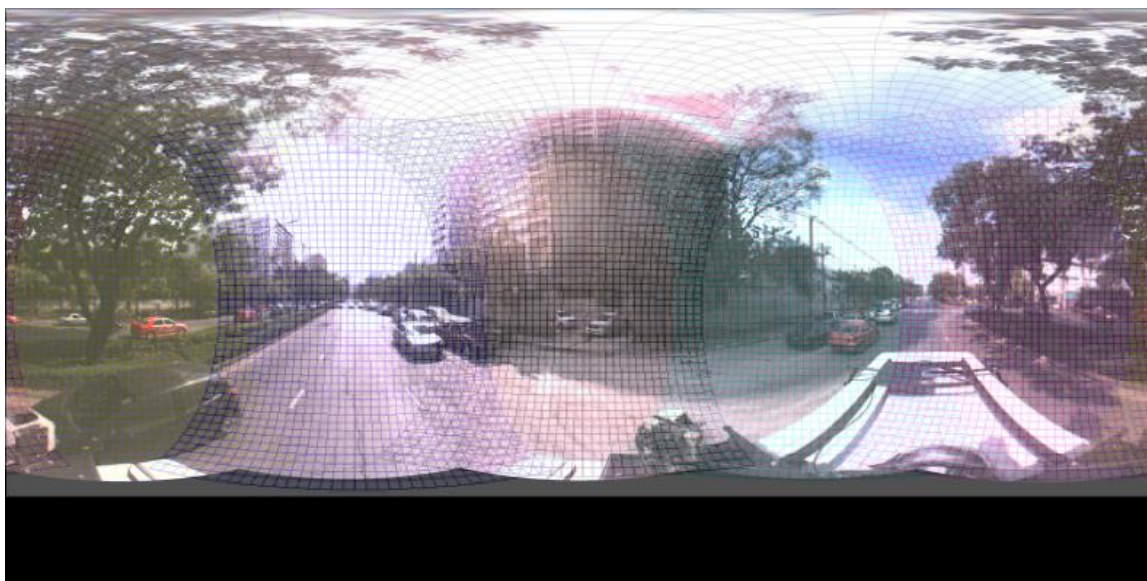
ตำแหน่งใดโดยยึดถือตามแบบจำลองดังรูปที่ 2.15 แบบจำลองตาข่ายรูปปิด 2 มิติ และแสดงตัวอย่างในรูปการซ้อนทับของตาข่ายรูปปิดบนภาพพานอรามาในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตภาพพานอรามาของกล้อง Ladybug3
(Point Grey Research 2013)



รูปที่ 2.15 แบบจำลองตาข่ายรูปปิด 2 มิติ



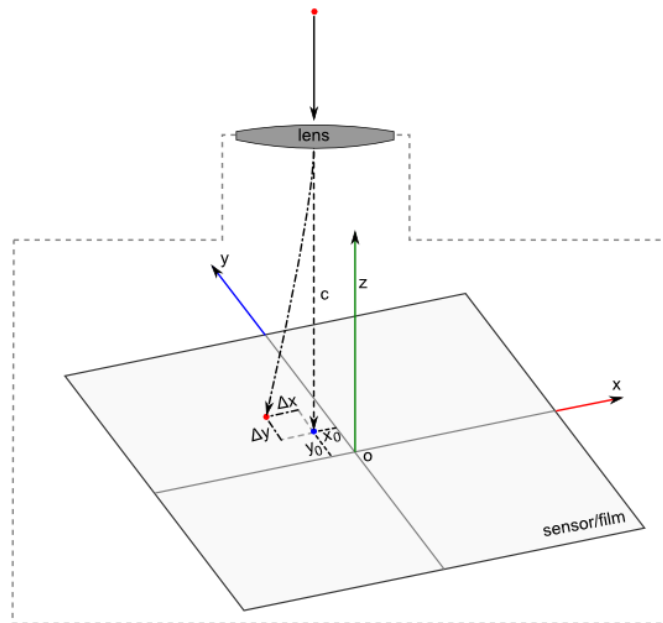
รูปที่ 2.16 แบบจำลองตาข่ายรูปปิด 2 มิติซ้อนทับบนภาพพานอรามา

2.3.3 การส่งออกภาพพานอรามา

กล้อง Ladybug3 บันทึกไฟล์ไว้ในรูปแบบเฉพาะที่เก็บทั้งภาพดิบ และข้อมูลประกอบอื่นๆ ในการส่งออกภาพพานอรามา กล้อง Ladybug3 สามารถส่งออกภาพพานอรามาออกเป็นรูปแบบไฟล์ BMP และ Jpeg โดยขนาดภาพสูงสุดที่สามารถส่งออกได้ สำหรับกล้อง Ladybug3 นั้นคือขนาด 5400 x 2700 จุดภาพ

2.4 พารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้องถ่ายภาพในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

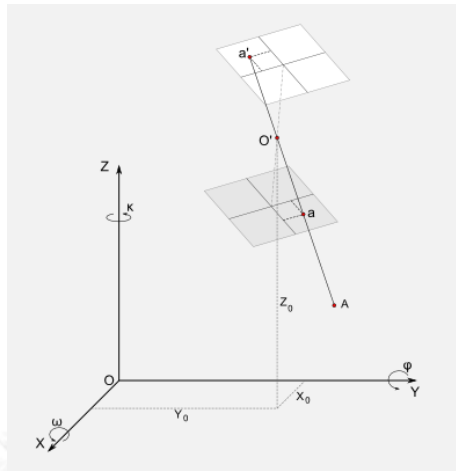
พารามิเตอร์ภายในกล้องสำหรับบันทึกภาพที่ใช้ในงานทำแผนที่หรือเรียกว่าแบบจำลองตัวรับรู้ ใช้อธิบายคุณลักษณะของตัวรับรู้หรือกล้องถ่ายภาพ ซึ่งประกอบด้วยระยะมุขยสำคัญ(principal distance; c) ตำแหน่งจุดมุขยสำคัญ(principal point; x_0, y_0) และความคลาดเคลื่อนของเลนส์(lens distorsion; $\Delta x, \Delta y$)(Mikhail, Bethel and McGlone 2001) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 พารามิเตอร์ภายในของกล้องถ่ายภาพ

การหาค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้องบันทึกภาพสามารถหาได้จากการทำการวัดสอบกล้อง โดยการบันทึกภาพของเป้า ที่ทราบค่าพิกัดแล้ววัดระยะในภาพเปรียบเทียบกับระยะจริงเพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ภายในกล้องต่อไป

ค่าการวางตัวภายนอกเป็นค่าที่แสดงถึงตำแหน่งและมุมหมุนรอบแกนของระบบพิกัดกล้องเทียบกับระบบพิกัดที่อ้างอิงดังรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นถึงค่าการวางตัวภายนอกของภาพถ่ายทางอากาศที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 6 ค่าได้แก่ ค่าพิกัดของตำแหน่งจุดศูนย์กลางการฉายภาพ 3 ค่า (X_0, Y_0, Z_0) มุมหมุนรอบแกนอ้างอิงอีก 3 ค่า (ω, ϕ, κ)



รูปที่ 2.18 พารามิเตอร์การวางตัวภายนอกของภาพ

สำหรับภาพนอราามาทรกกลมที่ได้จากกล้อง Ladybug3 เป็นภาพที่ถูกสร้างขึ้นมาจากกระบวนการถ่ายภาพของตัวกล้องภาพผลลัพธ์ที่ได้เป็นภาพนอราามาทรกกลม ที่มีการจัดปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ และพารามิเตอร์ภายในกล้องเรียบร้อยแล้วคงเหลือแต่พารามิเตอร์การวางตัวภายนอกที่ต้องดำเนินการวัดขณะบันทึกภาพหรือภายหลังการบันทึกภาพ

2.5 สมการสภาวะร่วมเส้นของภาพถ่ายทางอากาศ

สมการสภาวะร่วมเส้นของภาพถ่ายทางอากาศ เป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจุดบนภาพถ่ายและจุดบนพื้นดินในตำแหน่งเดียวกันจากรูปที่ 2.19 แสดงถึงเวกเตอร์ลำแสงจากจุดฉายภาพ (projection center) ผ่านระนาบภาพจุด a ไปยังจุด A บนพื้นดินเป็นเส้นตรง ทั้งจุด a และ A อยู่บนเส้นตรง (เวกเตอร์ลำแสง) เดียวกัน จากระบบพิกัดของภาพสามารถเขียนสัญลักษณ์ของเวกเตอร์ \vec{a} ได้ดังนี้

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ z_a - z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดยที่

x_a, y_a = พิกัดของจุด a บนภาพ

x_0, y_0 = พิกัดของจุดที่แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของฟิล์มหรือตัวรับรู้อไปยังจุดฉายภาพ มี ศัพท์ เรียกว่า จุดमुखยสำคัญ (Principal point)

f = ระยะโฟกัสของเลนส์ (สำหรับภาพถ่ายทางอากาศ ระยะโฟกัส f จะมีความยาวเท่ากับ

c คือระยะจากระนาบของฟิล์มหรือตัวรับรู้อไปยังจุดฉายภาพ มีศัพท์เรียกเฉพาะว่า ระยะ मुखยสำคัญ (Principal distance))

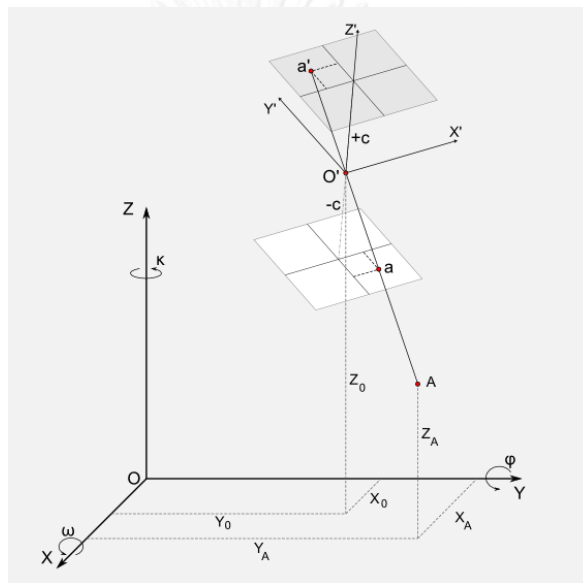
และจากระบบพิกัดบนพื้นดินสามารถเขียนสัญลักษณ์ของเวกเตอร์ \vec{A} ได้ดังนี้

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} X_A - X_L \\ Y_A - Y_L \\ Z_A - Z_L \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

โดยที่

X_A, Y_A, Z_A = พิกัดของจุด A บนพื้นดิน

X_L, Y_L, Z_L = พิกัดของจุดฉายภาพที่อ้างอิงจากระบบพิกัดบนพื้นดิน



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพ พิกัดวัตถุ และลำแสงบนภาพถ่ายทางอากาศ

จุด a และจุด A ที่เป็นจุดเดียวกัน อยู่คนละระบบอ้างอิงจึงสามารถแปลงระบบพิกัดไปมาหากันได้ โดยพารามิเตอร์สำหรับการแปลงระบบพิกัดได้แก่ มาตรการส่วน(scale) การหมุนรอบแกน (rotation) และการย้ายแกน(translation) และเนื่องจากใช้เวกเตอร์ \vec{a} และเวกเตอร์ \vec{A} อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันแสดงความสัมพันธ์ของจุดทั้งสอง ด้วยเวกเตอร์คือปริมาณที่มีขนาดและทิศทาง ไม่สนใจตำแหน่งจึงไม่พิจารณาเรื่องการย้ายแกน คงเหลือแต่มาตรการส่วน และการหมุนรอบแกนเท่านั้น สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\vec{a} = kM\vec{A} \quad (2.3)$$

โดยที่

\vec{a} เวกเตอร์จุด a

k = มาตรการส่วน

\mathbf{M} = เมทริกซ์การหมุน

\vec{A} = เวกเตอร์ของจุด A

แทนค่าเวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{A}

$$\begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = k\mathbf{M} \begin{bmatrix} X_A - X_L \\ Y_A - Y_L \\ Z_A - Z_L \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

แทนค่าเมทริกซ์การหมุนด้วยสัญลักษณ์แทนสมาชิก

$$\begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A - X_L \\ Y_A - Y_L \\ Z_A - Z_L \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

กระจายออกได้เป็น

$$(x_a - x_0) = k(m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)) \quad (2.6)$$

$$(y_a - y_0) = k(m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)) \quad (2.7)$$

$$(-f) = k(m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)) \quad (2.8)$$

กำจัดค่า k ออกการนำสมการ (2.8) ไปหารทั้งสมการ (2.6) และ (2.7) ผลลัพธ์ที่ได้คือ สมการสถานะร่วมเส้น

$$(x_a - x_0) = -f \frac{(m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L))}{(m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L))} \quad (2.9)$$

$$(y_a - y_0) = -f \frac{(m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L))}{(m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L))} \quad (2.10)$$

โดยเมทริกซ์การหมุนนั้นมีสมาชิกดังนี้

กำหนดการหมุนรอบแกน X แกน Y และแกน Z มีมุมเป็น ω ϕ และ κ ตามลำดับ เมทริกซ์การหมุนนี้เรียงลำดับของการหมุนรอบแกนเป็น X Y และ Z ตามลำดับเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_\kappa \mathbf{M}_\phi \mathbf{M}_\omega \quad (2.11)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.6 สมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอรามา

สมการสภาวะร่วมเส้นของภาพถ่ายพานอรามาทรงกลมเป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างจุดบนภาพถ่ายและจุดบนพื้นดินในตำแหน่งเดียวกัน เวกเตอร์ลำแสงจากจุดฉายภาพ O' ผ่านระนาบผิวของทรงกลมจุด a ไปยังจุด A บนพื้นดินเป็นเส้นตรง ทรงกลมในรูปที่ 2.20 คือภาพพานอรามาทรงกลมที่มีการวัดตำแหน่งจุดใดๆ บนภาพด้วย มุมราบ (μ) และมุมตั้งบน (ν) ในการใช้งานจริงเนื่องจากเป็นข้อมูลดิจิทัลภาพพานอรามาแสดงในรูปแบบสี่เหลี่ยมด้วยการฉายภาพแบบ Equirectangular projection ดังรูปที่ 2.21 การอ่านค่าตำแหน่งจุดภาพของภาพพานอรามาแบบดิจิทัลตำแหน่งในแนวแกน x จะอ่านจากทางซ้ายเริ่มต้นจุดภาพที่ศูนย์ไปทางขวาเป็นค่า x ส่วนตำแหน่งในแนวแกน y จะอ่านจากด้านบนเริ่มต้นจุดภาพที่ศูนย์ลงไปด้านล่างเป็นค่า y

ค่าพิกัด x และ y บนภาพสามารถหาได้จากสมการ (2.13) และ(2.14)

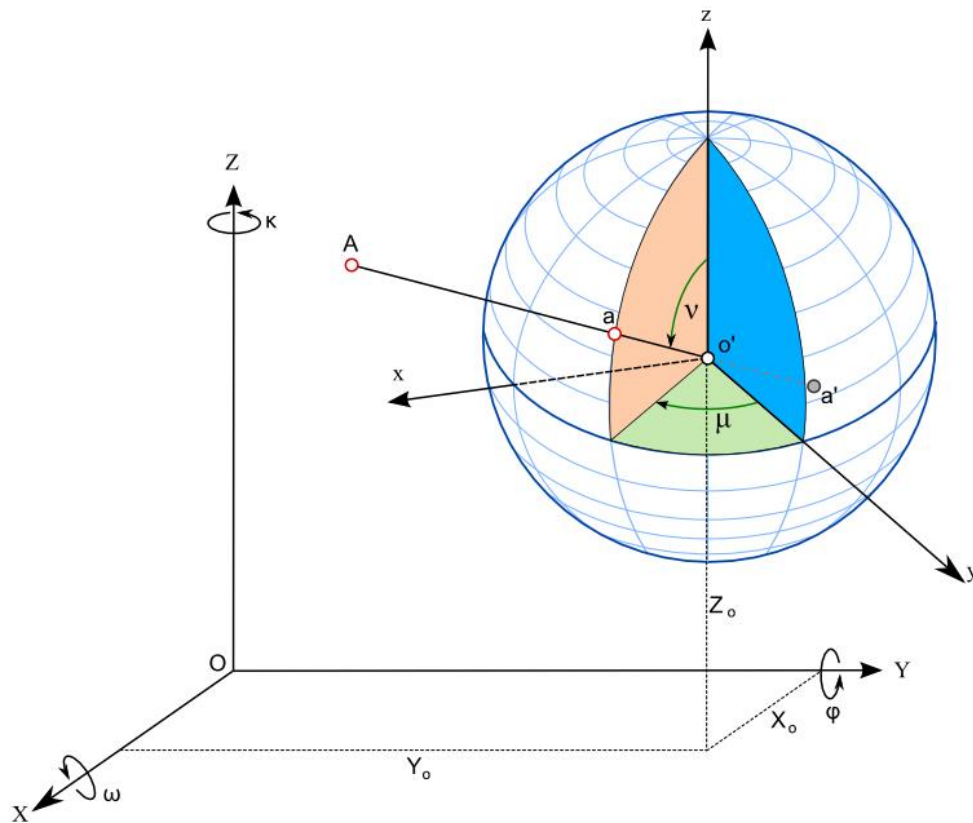
$$x = \frac{\mu W}{360^\circ} \quad (2.13)$$

$$y = \frac{\nu H}{180^\circ} \quad (2.14)$$

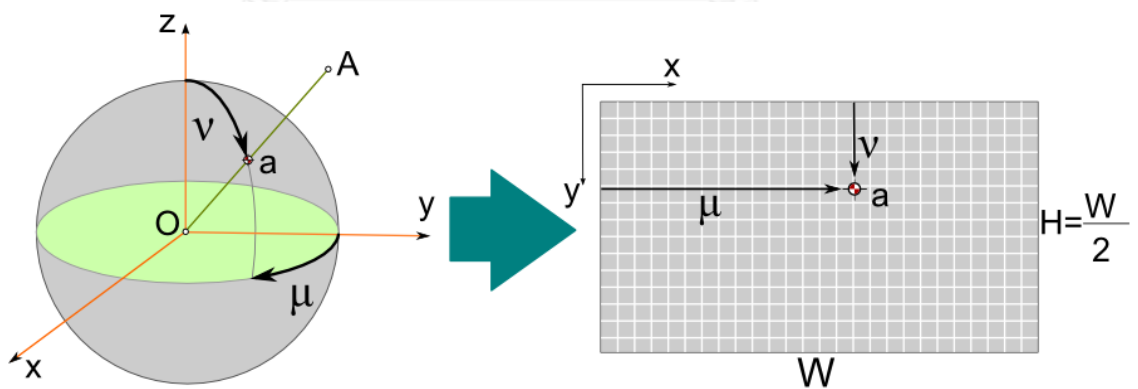
และค่า μ และ ν สามารถหาได้จากสมการ (2.15) และ(2.16)

$$\mu = \frac{360^\circ x}{W} \quad (2.15)$$

$$\nu = \frac{180^\circ y}{H} \quad (2.16)$$

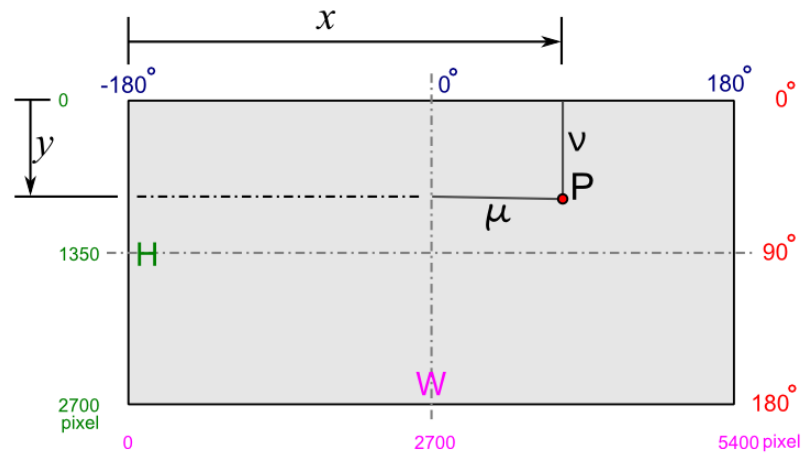


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพ พิกัดวัตถุและลำแสงบนภาพพานอรามาทรงกลม



รูปที่ 2.21 การอ้างอิงพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมด้วยการฉายภาพแบบ Equirectangular

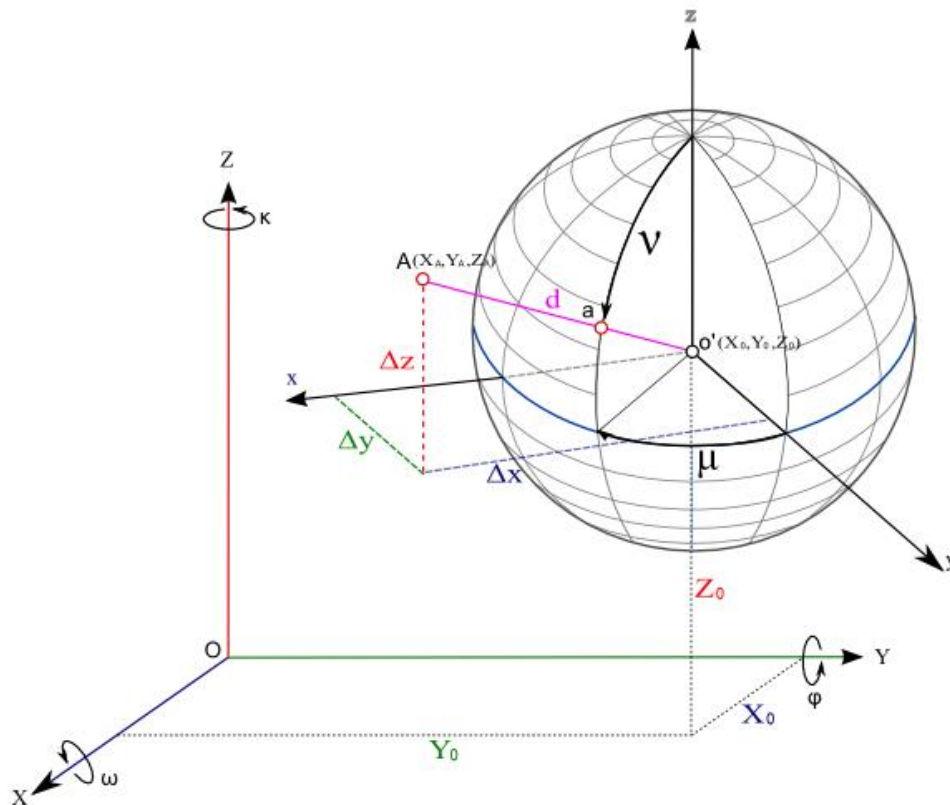
สำหรับภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3 มีทิศทางเริ่มต้นอยู่ตรงกลางภาพที่
 เกลนส์ 0 ของกล้องดังนั้นระบบอ้างอิงพิกัดบนภาพในการฉายภาพแบบ Equirectangular สำหรับ
 ภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3 แสดงในรูปที่ 2.22 และค่า μ และ ν สามารถหาได้
 จากสมการ (2.17) และ(2.18)



รูปที่ 2.22 การอ้างอิงพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3

$$\mu = \left(x - \frac{W}{2} \right) \times \frac{360^\circ}{W} \quad (2.17)$$

$$\nu = y \times \frac{180^\circ}{H} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.23 การอ้างอิงพิกัดของจุด a บนทรงกลม

ในรูปที่ 2.23 แสดงถึงการอ้างอิงพิกัดของจุด A ในพื้นที่มาเป็นจุด a บนผิวทรงกลมโดยอ้างอิงเปรียบเทียบกับระบบพิกัดฉาก(rectangular coordinate) และระบบพิกัดเชิงขั้ว(Polar coordinate) สามารถหาค่าจุด P เทียบจากจุดศูนย์กลางทรงกลมได้ดังสมการ(2.19)

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A - X_0 \\ Y_A - Y_0 \\ Z_A - Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

และสามารถคำนวณหาพิกัดของจุด a บนทรงกลมได้ดังนี้

$$\mu = \tan^{-1} \frac{\Delta X}{\Delta Y} \quad (2.20)$$

$$v = \cos^{-1} \frac{\Delta Z}{d} \quad (2.21)$$

$$d = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (2.22)$$

เมื่อรวมเข้ากับมุมหมุนรอบแกน X Y และ Z สามารถหาค่าพิกัดของจุด a เทียบกับศูนย์กลางของทรงกลมได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

สามารถแยกได้เป็น

$$\Delta x' = R_{11}\Delta X + R_{12}\Delta Y + R_{13}\Delta Z \quad (2.24)$$

$$\Delta y' = R_{21}\Delta X + R_{22}\Delta Y + R_{23}\Delta Z \quad (2.25)$$

$$\Delta z' = R_{31}\Delta X + R_{32}\Delta Y + R_{33}\Delta Z \quad (2.26)$$

ดังนั้นค่า μ และ ν จะสามารถหาได้จากสมการ

$$\mu = \tan^{-1} \frac{\Delta x'}{\Delta y'} = \tan^{-1} \frac{R_{11}\Delta X + R_{12}\Delta Y + R_{13}\Delta Z}{R_{21}\Delta X + R_{22}\Delta Y + R_{23}\Delta Z} \quad (2.27)$$

$$\nu = \cos^{-1} \frac{\Delta z'}{d} = \cos^{-1} \frac{R_{31}\Delta X + R_{32}\Delta Y + R_{33}\Delta Z}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}} \quad (2.28)$$

แทนค่าสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.27) และ (2.28) ค่า μ และ ν จะหาได้จากสมการ

$$\mu = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_0) + R_{12}(Y_A - Y_0) + R_{13}(Z_A - Z_0)}{R_{21}(X_A - X_0) + R_{22}(Y_A - Y_0) + R_{23}(Z_A - Z_0)} \quad (2.29)$$

$$\nu = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_0) + R_{32}(Y_A - Y_0) + R_{33}(Z_A - Z_0)}{\sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2}} \quad (2.30)$$

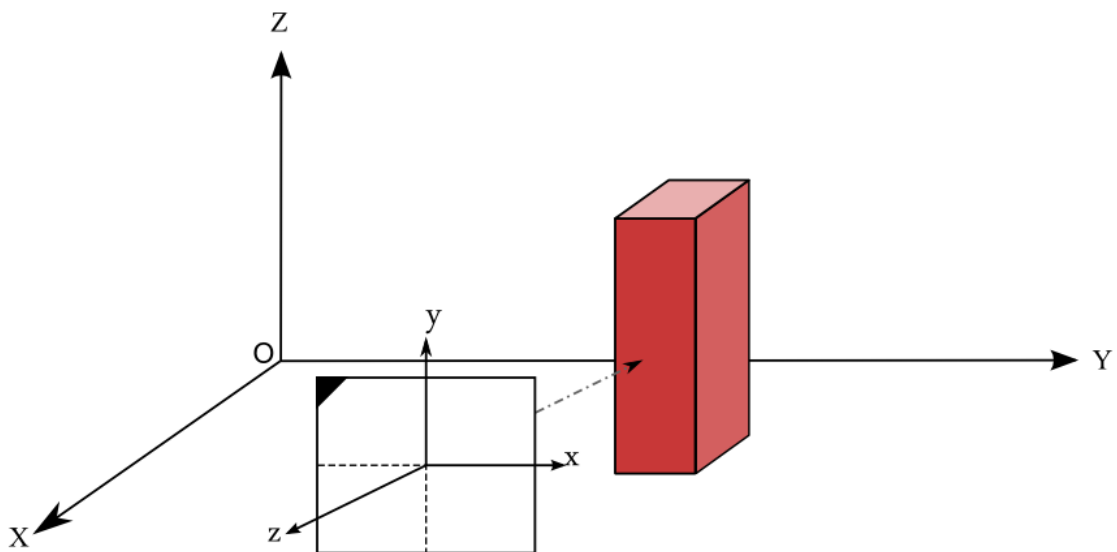
โดยที่เมทริกซ์การหมุนมีสมาชิกดังนี้

กำหนดให้การหมุนรอบแกน X แกน Y และแกน Z มีมุมเป็น ω , φ และ κ ตามลำดับ สำหรับเมทริกซ์การหมุนของแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้เรียงลำดับของการหมุนรอบแกนเป็น Y, X และ Z ทำมุมหมุนรอบแกนเรียงลำดับใหม่เป็น φ , ω และ κ ตามลำดับเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\kappa \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\varphi \quad (2.31)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa & \sin \varphi \cos \omega \\ \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & \sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

ลำดับของการหมุนแตกต่างจากลำดับของการหมุนในการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ จากรูปที่ 2.24 ระบบพิกัดภาพถ่ายที่ทำมุมหมุน $\omega = 0^\circ$ $\varphi = 90^\circ$ และ $\kappa = 90^\circ$ ในกรณีที่การหมุนลำดับที่สองทำมุมเข้าใกล้ 90° จะทำให้การหมุนในลำดับที่หนึ่ง และลำดับที่สองสามารถสลับกันได้ โดยสามารถเรียงลำดับการหมุนได้เป็น φ , ω และ κ ซึ่งในงานการทำแผนที่ภาพถ่ายระยะใกล้ใช้การเรียงลำดับการหมุนแบบนี้ เนื่องจากทิศทางของมุมที่ถ่ายภาพเข้าใกล้ระนาบราบหลีกเลี่ยงการเกิดมุม gimbal lock (Luhmann 2011)

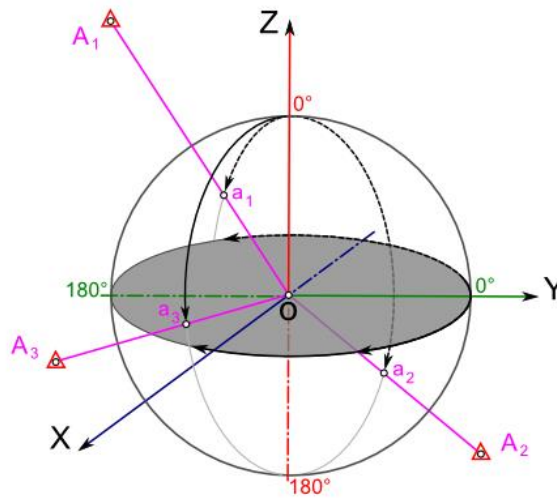


รูปที่ 2.24 ระบบพิกัดภาพถ่ายที่ทำมุมหมุน $\omega = 0^\circ$ $\varphi = 90^\circ$ และ $\kappa = 90^\circ$ กับระบบพิกัดโลก

2.7 การวัดสกัดยอนและการวัดสกัดบนภาพพานอรามา

2.7.1 การวัดสกัดยอนบนภาพพานอรามา

การวัดสกัดยอนบนภาพพานอรามา(panoramic image resection) จากสมการที่ใช้แทนสมการร่วมเส้นของภาพพานอรามา(สมการ (2.29) และ(2.30)) มีพารามิเตอร์ค่าการวางตัวภายนอกที่ไม่ทราบค่าจำนวน 6 ตัวได้แก่ $(\varphi, \omega, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$ หนึ่งจุดบนภาพสามารถสร้างได้ 2 สมการดังนั้นจำนวนจุดที่น้อยที่สุดที่ต้องการคือ 3 จุดที่ทราบตำแหน่งบนภาพและตำแหน่งบนพื้นดินเพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ค่าการวางตัวภายนอกที่ไม่ทราบค่าทั้ง 6 พารามิเตอร์



รูปที่ 2.25 การวัดสเกลด์ยอนสำหรับภาพพานอรามาทรงกลม

รูปที่ 2.25 การวัดสเกลด์ยอนสำหรับภาพพานอรามาทรงกลม แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดวัตถุ พิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลมและจุดฉายภาพในรูปของเวกเตอร์ลำแสงจากจุดฉายภาพผ่านจุดบนภาพพานอรามาทรงกลมไปยังจุดบนวัตถุแต่ละเวกเตอร์ลำแสงสามารถเขียนเป็นสมการสถานะร่วมเส้นของภาพพานอรามา(สมการ (2.29) และ(2.30))ได้เป็น 6 สมการดังนี้

$$\mu_{a_1} = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_{A_1} - X_0) + R_{12}(Y_{A_1} - Y_0) + R_{13}(Z_{A_1} - Z_0)}{R_{21}(X_{A_1} - X_0) + R_{22}(Y_{A_1} - Y_0) + R_{23}(Z_{A_1} - Z_0)} \quad (2.33)$$

$$v_{a_1} = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_{A_1} - X_0) + R_{32}(Y_{A_1} - Y_0) + R_{33}(Z_{A_1} - Z_0)}{\sqrt{(X_{A_1} - X_0)^2 + (Y_{A_1} - Y_0)^2 + (Z_{A_1} - Z_0)^2}} \quad (2.34)$$

$$\mu_{a_2} = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_{A_2} - X_0) + R_{12}(Y_{A_2} - Y_0) + R_{13}(Z_{A_2} - Z_0)}{R_{21}(X_{A_2} - X_0) + R_{22}(Y_{A_2} - Y_0) + R_{23}(Z_{A_2} - Z_0)} \quad (2.35)$$

$$v_{a_2} = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_{A_2} - X_0) + R_{32}(Y_{A_2} - Y_0) + R_{33}(Z_{A_2} - Z_0)}{\sqrt{(X_{A_2} - X_0)^2 + (Y_{A_2} - Y_0)^2 + (Z_{A_2} - Z_0)^2}} \quad (2.36)$$

$$\mu_{a_3} = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_{A_3} - X_0) + R_{12}(Y_{A_3} - Y_0) + R_{13}(Z_{A_3} - Z_0)}{R_{21}(X_{A_3} - X_0) + R_{22}(Y_{A_3} - Y_0) + R_{23}(Z_{A_3} - Z_0)} \quad (2.37)$$

$$v_{a_3} = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_{A_3} - X_0) + R_{32}(Y_{A_3} - Y_0) + R_{33}(Z_{A_3} - Z_0)}{\sqrt{(X_{A_3} - X_0)^2 + (Y_{A_3} - Y_0)^2 + (Z_{A_3} - Z_0)^2}} \quad (2.38)$$

หากมีจำนวนจุดเพิ่มขึ้นสามารถสร้างสมการได้ 2 สมการต่อหนึ่งจุด และด้วยวิธีการปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุด สามารถจัดรูปแบบของสมการเงื่อนไขในการปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุดได้ดังนี้(Mikhail and Ackermann 1982)

$$\mathbf{v} + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{f} \quad (2.39)$$

โดยที่

\mathbf{v} = เวกเตอร์ของค่าเศษเหลือ

\mathbf{B} = เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์

Δ = เวกเตอร์ของพารามิเตอร์

$\mathbf{f} = (d - l)$ เวกเตอร์ของค่าคงที่ (d) และค่ารังวัด (l)

ด้วยสมมุติฐานที่ว่าค่ารังวัดแต่ละค่ามีความเชื่อถือได้ไม่เท่ากันข้อกำหนดของการปรับแก้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะเป็นดังนี้

$$\phi = \mathbf{v}^T \mathbf{W} \mathbf{v} \rightarrow \text{มีค่าน้อยที่สุด} \quad (2.40)$$

โดยที่

\mathbf{W} = เมทริกซ์ของน้ำหนัก (weight)

ถ้าให้ \mathbf{W} เป็นเมทริกซ์ของน้ำหนักจะสามารถหาคำตอบของพารามิเตอร์ ของการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดได้จากสมการ

$$\Delta = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{t} \quad (2.41)$$

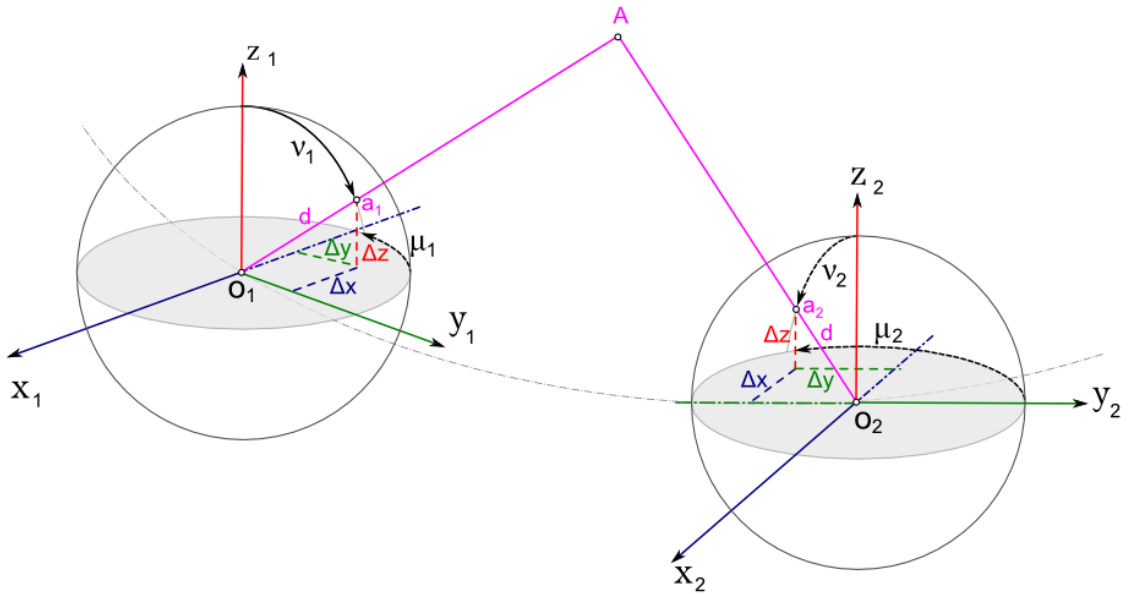
โดยกำหนดให้

$$\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B} \quad (2.42)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{f} \quad (2.43)$$

2.7.2 การวัดสกัดบนภาพพานอรามา

การวัดสกัดบนภาพพานอรามา(panoramic image intersection) เป็นการหาพิกัดของวัตถุใดๆ ที่ปรากฏอยู่ในภาพตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไปแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.26 การวัดสกัดบนภาพคู่พานอรามาทรงกลม โดยอาศัยสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอรามาทรงกลมของทั้ง 2 ภาพตัดกันที่จุดบนวัตถุ(A)



รูปที่ 2.26 การวัดสกัดบนภาพคู่พานอรามาทรงกลม

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.26 การวัดสกัดบนภาพคู่พานอรามาทรงกลม ค่าการวางตัวภายนอกของภาพพานอรามาทั้งสองกำหนดให้เป็น $O_1 (X_{0_1}, Y_{0_1}, Z_{0_1}, \varphi_1, \omega_1, \kappa_1)$ สำหรับภาพที่ 1 และ $O_2 (X_{0_2}, Y_{0_2}, Z_{0_2}, \varphi_2, \omega_2, \kappa_2)$ และภาพที่ 2 ตามลำดับและพิกัดในภาพพานอรามาของวัตถุที่จุด A สามารถวัดได้เป็น $a_1(\mu_1, v_1)$ บนภาพที่ 1 และ $a_2(\mu_2, v_2)$ บนภาพที่ 2 ตามลำดับอาศัยความสัมพันธ์ของสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอรามาทรงกลมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\mu_{a_1} = \tan^{-1} \frac{R_{11}^{[1]} (X_A - X_0^{[1]}) + R_{12}^{[1]} (Y_A - Y_0^{[1]}) + R_{13}^{[1]} (Z_A - Z_0^{[1]})}{R_{21}^{[1]} (X_A - X_0^{[1]}) + R_{22}^{[1]} (Y_A - Y_0^{[1]}) + R_{23}^{[1]} (Z_A - Z_0^{[1]})} \quad (2.44)$$

$$v_{a_1} = \cos^{-1} \frac{R_{31}^{[1]} (X_A - X_0^{[1]}) + R_{32}^{[1]} (Y_A - Y_0^{[1]}) + R_{33}^{[1]} (Z_A - Z_0^{[1]})}{\sqrt{(X_A - X_0^{[1]})^2 + (Y_A - Y_0^{[1]})^2 + (Z_A - Z_0^{[1]})^2}} \quad (2.45)$$

$$\mu_{a_2} = \tan^{-1} \frac{R_{11}^{[2]} (X_A - X_0^{[2]}) + R_{12}^{[2]} (Y_A - Y_0^{[2]}) + R_{13}^{[2]} (Z_A - Z_0^{[2]})}{R_{21}^{[2]} (X_A - X_0^{[2]}) + R_{22}^{[2]} (Y_A - Y_0^{[2]}) + R_{23}^{[2]} (Z_A - Z_0^{[2]})} \quad (2.46)$$

$$v_{a_2} = \cos^{-1} \frac{R_{31}^{[2]} (X_A - X_0^{[2]}) + R_{32}^{[2]} (Y_A - Y_0^{[2]}) + R_{33}^{[2]} (Z_A - Z_0^{[2]})}{\sqrt{(X_A - X_0^{[2]})^2 + (Y_A - Y_0^{[2]})^2 + (Z_A - Z_0^{[2]})^2}} \quad (2.47)$$

จากสมการ (2.44) (2.45) (2.46) และ (2.47) ตัวไม่ทราบค่าในสมการคือ (X_A, Y_A, Z_A) หาคำตอบของระบบสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยกำหนดให้ F_i เป็น ฟังก์ชันของสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอราามาทรกมลดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \mu_{a_1} - \tan^{-1} \frac{R_{11}^{[1]}(X_A - X_0^{[1]}) + R_{12}^{[1]}(Y_A - Y_0^{[1]}) + R_{13}^{[1]}(Z_A - Z_0^{[1]})}{R_{21}^{[1]}(X_A - X_0^{[1]}) + R_{22}^{[1]}(Y_A - Y_0^{[1]}) + R_{23}^{[1]}(Z_A - Z_0^{[1]})} \\
 F_2 &= \nu_{a_1} - \cos^{-1} \frac{R_{31}^{[1]}(X_A - X_0^{[1]}) + R_{32}^{[1]}(Y_A - Y_0^{[1]}) + R_{33}^{[1]}(Z_A - Z_0^{[1]})}{\sqrt{(X_A - X_0^{[1]})^2 + (Y_A - Y_0^{[1]})^2 + (Z_A - Z_0^{[1]})^2}} \\
 F_3 &= \mu_{a_2} - \tan^{-1} \frac{R_{11}^{[2]}(X_A - X_0^{[2]}) + R_{12}^{[2]}(Y_A - Y_0^{[2]}) + R_{13}^{[2]}(Z_A - Z_0^{[2]})}{R_{21}^{[2]}(X_A - X_0^{[2]}) + R_{22}^{[2]}(Y_A - Y_0^{[2]}) + R_{23}^{[2]}(Z_A - Z_0^{[2]})} \\
 F_4 &= \nu_{a_2} - \cos^{-1} \frac{R_{31}^{[2]}(X_A - X_0^{[2]}) + R_{32}^{[2]}(Y_A - Y_0^{[2]}) + R_{33}^{[2]}(Z_A - Z_0^{[2]})}{\sqrt{(X_A - X_0^{[2]})^2 + (Y_A - Y_0^{[2]})^2 + (Z_A - Z_0^{[2]})^2}}
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

เมื่อแทนค่า (X_A, Y_A, Z_A) ด้วยค่าประมาณเริ่มต้น $\mathbf{x} = (X_A^0, Y_A^0, Z_A^0)$ จะสามารถหาค่าเมทริกซ์ \mathbf{f} ได้จาก

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

เมทริกซ์ \mathbf{B} ได้จากการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน \mathbf{f} เทียบกับตัวไม่ทราบค่า (X_A, Y_A, Z_A)

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial X_A} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_A} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_A} \\ \frac{\partial F_2}{\partial X_A} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_A} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_A} \\ \frac{\partial F_3}{\partial X_A} & \frac{\partial F_3}{\partial Y_A} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_A} \\ \frac{\partial F_4}{\partial X_A} & \frac{\partial F_4}{\partial Y_A} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_A} \end{bmatrix} \tag{2.50}$$

คำตอบของการคำนวณปรับแก้ด้วยค่าประมาณคือ

$$\Delta^0 = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{t} \tag{2.51}$$

หากผลลัพธ์มีค่ามากกว่าความละเอียดของผลลัพธ์ที่กำหนดนำคำตอบไปรวมกับค่าประมาณครั้งแรกแล้วใช้เป็นค่าประมาณครั้งต่อไป

$$\mathbf{x}_{new} = \mathbf{x} + \Delta^0 \quad (2.52)$$

ทำการวนรอบหาคำตอบจนกระทั่ง $\Delta \leq \varepsilon$

โดยที่ ε คือค่าที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการหยุดวนรอบ

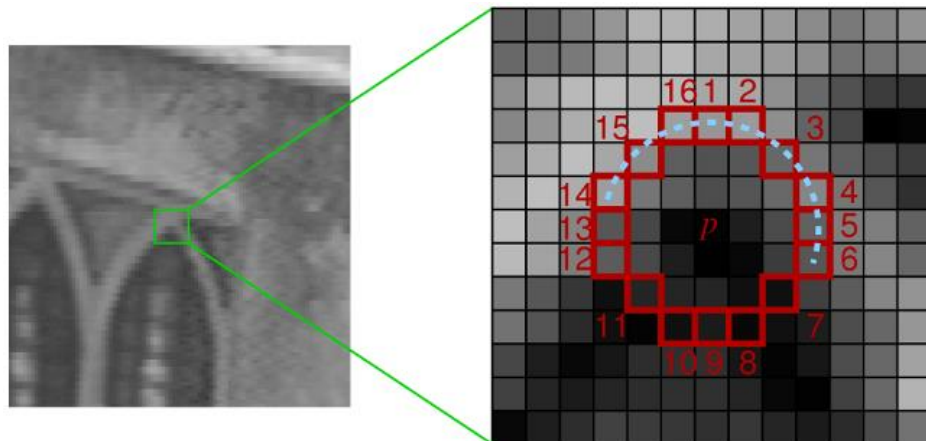
2.8 การจับคู่ภาพอัตโนมัติ

การจับคู่ภาพ(Image matching) เป็นการหาจุดที่เป็นจุดเดียวกันบนภาพ 2 ภาพ ในหลักการพื้นฐานของการมองเห็นของมนุษย์ เมื่อเรามองภาพแรกที่ใช้เป็นภาพอ้างอิงเราจะมองจุดที่มองเห็นเป็นจุดเด่น หรือจุดที่เราสนใจแล้วไปมองหาจุดเด่นนั้นในภาพอีกภาพ ในกระบวนการการมองเห็นของคอมพิวเตอร์นั้นมีการคล้ายกัน กล่าวคือต้องทำการหาจุดที่น่าสนใจในภาพแรกก่อน จากนั้นหาจุดที่น่าสนใจในภาพที่สอง ทำการเปรียบเทียบแต่ละจุดสนใจในภาพแรกเปรียบเทียบกับจุดที่น่าสนใจในรูปที่สองที่ละจุดว่าจุดใดมีความน่าสนใจใกล้เคียงกันมากที่สุดจึงทำการจับคู่จุดสองจุดนั้นทำเช่นนี้ไปจนครบจุดที่น่าสนใจทุกจุด

การมองเห็นของคอมพิวเตอร์มีกระบวนการคิดทางคอมพิวเตอร์(algorithm) สำหรับหาจุดสนใจหรือจุดเด่นในภาพหลายวิธีดังนี้

2.8.1 วิธีการหาจุดสนใจ FAST

FAST ย่อมาจาก Features from Accelerated Segment Test เป็นวิธีการหาจุดที่สนใจในภาพที่มีความเร็วในการค้นหาจุดที่สนใจสูงนำเสนอโดย Edward Rosten และ Tom Drummond(2006) โดยการเลือกหาจุดตัด หรือหามุมโดยอาศัยวงกลมที่มีจุดภาพรอบเส้นวงกลม 16 จุดภาพสำหรับหาจุดสนใจโดยอาศัยความแตกต่างกันของความสว่างของสีเทียบกับจุดภาพที่พิจารณาดังตัวอย่างใน รูปที่ 2.27 จุด p เป็นจุดที่พิจารณาวงกลมล้อมรอบจุด p จำนวนเส้นรอบรูป 16 จุดภาพบริเวณเส้นประในภาพจะมีความสว่างกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้เมื่อเทียบกับจุด p ดังนั้นจุด p จึงถูกเลือกให้เป็นจุดที่สนใจในภาพ วิธีการนี้จะได้ขอบหรือจุดตัดกันในภาพ จากการใช้งานหากทำการปรับปรุงคุณภาพภาพด้วยตัวกรองวอลลิส (Wallis filter) ทำให้การหาจุดที่สนใจมีความชัดเจนมากขึ้น(Fraser, Jazayeri and Cronk 2010)



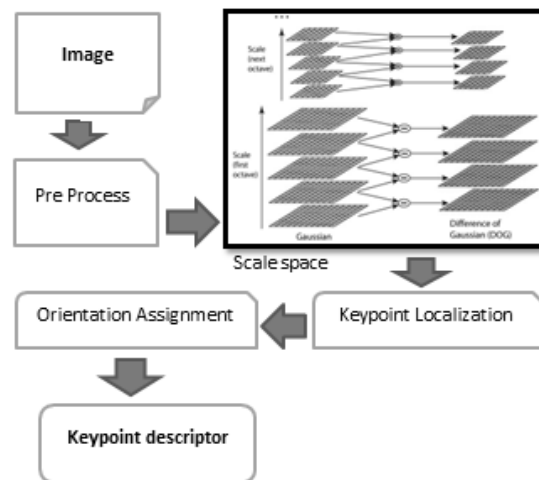
รูปที่ 2.27 การหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี FAST
(<http://www.edwardrosten.com/work/fast.html>)

2.8.2 วิธีการหาจุดสนใจ SIFT

SIFT ย่อมาจาก Scale Invariant Feature Transform ที่ตั้งชื่อตามวิธีการที่มีการแปลงข้อมูลภาพไปสู่ระบบพิกัดที่ไม่แปรผันตามมาตราส่วนสัมพันธ์กับพีเจอร์ท้องถิ่น นำเสนอโดย David G. Lowe (2004) ซึ่งวิฑูลย์ ดอนพรพัน, สิริภัทร เชี่ยวชาญวัฒนา และ คำนธ สุนันติ(2553) ได้เรียบเรียงและอธิบายหลักการของ SIFT ว่าเป็นวิธีการหาลักษณะเด่นแบบท้องถิ่นที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของและมุมมองของภาพ วิธีการทำงานของ SIFT ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ

- Scale-space extrema detection: การสร้างปริภูมิค่าในมิติขนาดและระยะทาง
- Keypoint localization: การกำหนดตำแหน่งจุดสนใจ
- Orientation assignment: การกำหนดทิศทางของจุดสนใจ
- Keypoint descriptor: การสร้างคำอธิบายลักษณะเด่นของภาพ

ขั้นตอนของการค้นหาจุดสนใจของภาพเริ่มต้นด้วยการสังวัตนาการภาพ (convolution) ด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียนหลายระดับ และหาความแตกต่างของชั้นข้อมูลที่อยู่ติดกัน ด้วยวิธีการ Difference-of-Gaussian (DOG) จากนั้นหาค่าสูงสุดและต่ำสุดสำหรับเลือกเป็นจุดที่สนใจโดยการเทียบค่ากับจุดข้างเคียงและชั้นข้อมูลที่อยู่ติดกัน เมื่อได้จุดที่สนใจแล้วทำการหาขนาดและทิศทางเพื่อนำไปสร้างลักษณะเด่นของภาพดังแสดงเป็นแผนภูมิไว้ในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการหาลักษณะเด่นของภาพด้วยวิธี SIFT

2.8.2.1 การสร้างปริภูมิค่าในมิติขนาดและระยะทาง

ในขั้นตอนนี้ SIFT ทำการเบลอแบบก้าวหน้า(Progressive blur)ภาพต้นฉบับ จากนั้นลดขนาดภาพต้นฉบับลงครึ่งหนึ่งแล้วทำการเบลอแบบก้าวหน้ากับภาพที่ลดขนาดลงครึ่งหนึ่ง ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.29 ภาพมีการทำออกเทพ(octave) 4 ลำดับ แต่ละออกเทพภาพมีขนาดเท่ากันมี 5 ภาพแต่ละภาพมีการเพิ่มสเกล(scale)ของการเบลอ ทั้งนี้จำนวนของออกเทพและขนาดของการเบลอขึ้นอยู่กับขนาดของภาพต้นฉบับ ขนาด 4 ออกเทพ และสเกลการเบลอ 5 ลำดับเป็นค่ามาตรฐานเริ่มต้นที่ SIFT ใช้ ความหมายของการเบลอในกระบวนการ SIFT คือการสังวัตนาการภาพโดยใช้ตัวดำเนินการแบบเกาส์เซียน (Gaussian operator) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (2.53)

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2.53)$$

โดยที่

L = ภาพที่เบลอ

G = ตัวดำเนินการแบบเกาส์เซียน

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$$

I = ภาพที่ต้องการเบลอ

x, y = พิกัดภาพ

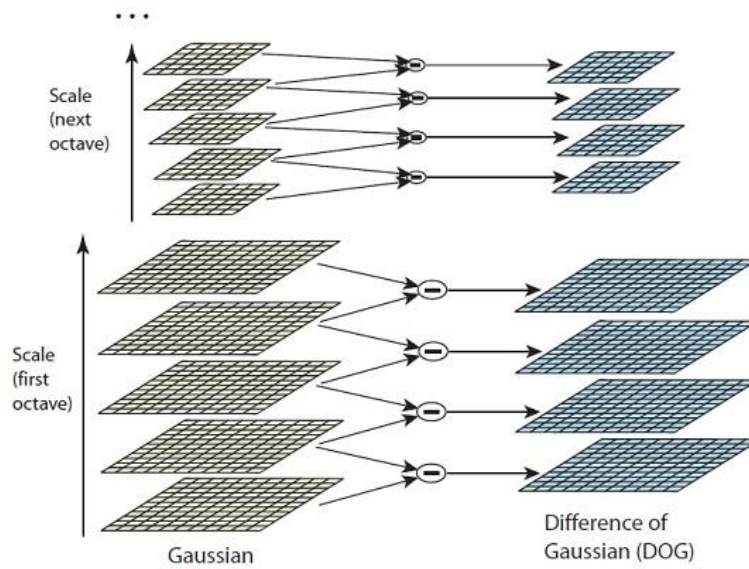
σ = สเกลสำหรับการเบลอ

$*$ = ตัวดำเนินการสังวัตนาการใน x, y



รูปที่ 2.29 Scale space image in SIFT

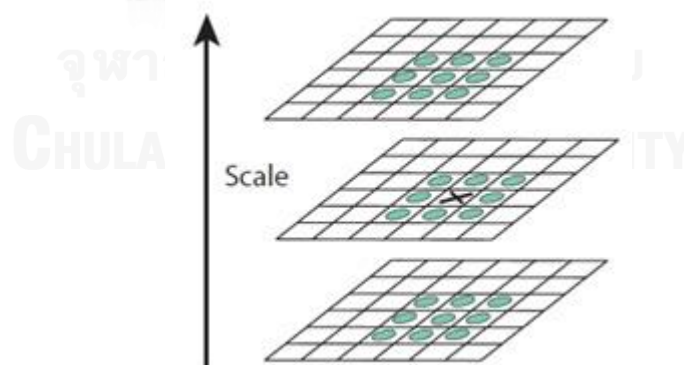
จากนั้นทำการคำนวณค่าอนุพันธ์ลำดับที่สองของภาพหรือเรียกวิธีของลาปลาเซียน (Laplacian) ในรูปที่ 2.30 ด้วยกระบวนการนี้จะทำให้เกิดขอบและมุมขึ้นในภาพเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งจุดสนใจต่อไป



รูปที่ 2.30 Difference of Gaussian (DOG)
(Lowe 2004)

2.8.2.2 การกำหนดตำแหน่งจุดสนใจ

เริ่มต้นด้วยการหาค่าสูงสุดและต่ำสุดแบบหยาบๆ บนภาพ DOG จากนั้นทำการตรวจสอบในแต่ละจุดภาพ และจุดภาพที่อยู่รอบ การตรวจสอบนี้กระทำในภาพที่ตรวจสอบ และภาพที่มีสเกลลดลง และเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.31 จุด X เป็นจุดที่ตรวจสอบโดยมีวงกลมเป็นจุดภาพล้อมรอบ เงื่อนไขในการกำหนดจุดที่ตรวจสอบว่าจะจะเป็นจุดสนใจคือจุด X มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดเมื่อเทียบกับจุดล้อมรอบทั้ง 26 จุด



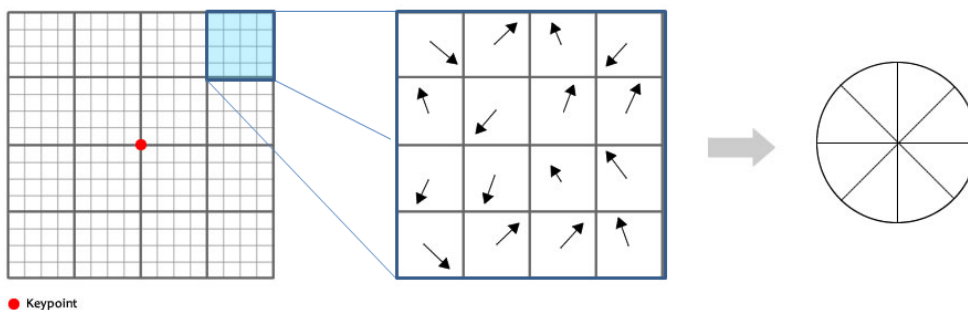
รูปที่ 2.31 จำนวนจุดภาพในการตรวจสอบสำหรับการกำหนดตำแหน่งจุดสนใจ
(Lowe 2004)

2.8.2.3 การกำหนดทิศทางของจุดสนใจ

การกำหนดทิศทางของจุดที่สนใจได้จากการหาการไล่ระดับสี และค่าสูงสุดของสีในแต่ละจุดสนใจ โดยทิศทางของจุดที่สนใจจะถูกกำหนดจากทิศทางที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น ด้วยวิธีการนี้การคำนวณใดๆ ที่เกิดขึ้นในภายหลังที่สัมพันธ์กับทิศทางนี้จะไม่ทำให้การหมุนของทิศทางเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นข้อเด่นของวิธีการ SIFT

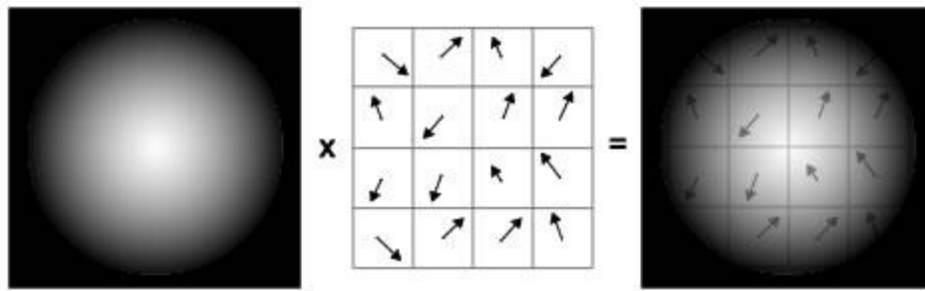
2.8.2.4 การสร้างคำอธิบายลักษณะเด่นของภาพ

ในการหาคุณลักษณะเด่นของจุดสนใจทำได้โดยการแบ่งพื้นที่รอบจุดสนใจเป็น 4×4 ส่วน แต่ละส่วนแบ่งเป็นส่วนย่อย 4×4 ส่วน ในส่วนย่อยแต่ละส่วนจะนำค่าทิศทางและการไล่ระดับสีเป็นกลุ่มใหม่ที่มีทิศทางใน 8 ช่องทิศทางรูปที่ 2.32 แต่ละช่องทิศทางมีขนาดเท่ากับ 45° และจำนวนที่จะคำนวณลงไปในช่วงทิศทางขึ้นอยู่กับขนาดของการไล่ระดับสี และระยะทางจากจุดสนใจนั้น คือยิ่งห่างจากจุดสนใจออกไปค่าที่นำมาคำนวณจะมีปริมาณน้อยลง ในการนี้กระบวนการ SIFT ได้ใช้ฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียน (Gaussian weighting function) โดยการใช้ตัวกรองในการไล่ระดับค่าน้ำหนักที่สูงสุดอยู่ตรงกลาง และไล่ระดับเมื่อห่างจากตรงกลางออกไปคูณกับค่าปริมาณของทิศทาง ผลลัพธ์ได้เป็นน้ำหนักสำหรับคำนวณดังตัวอย่างในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.32 การแบ่งพื้นที่รอบจุดสนใจสำหรับหาทิศทางเด่น

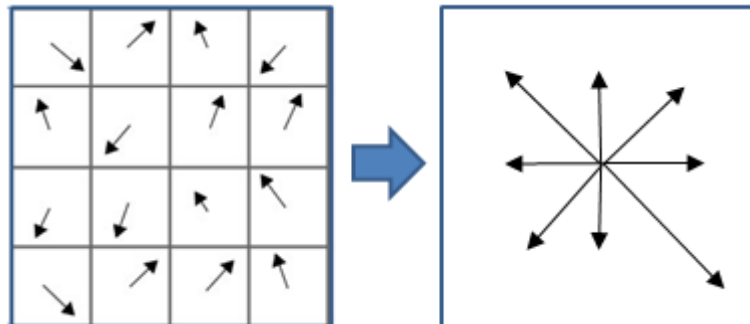
<http://www.aishack.in/2010/05/sift-scale-invariant-feature-transform/7/>



รูปที่ 2.33 ฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียน

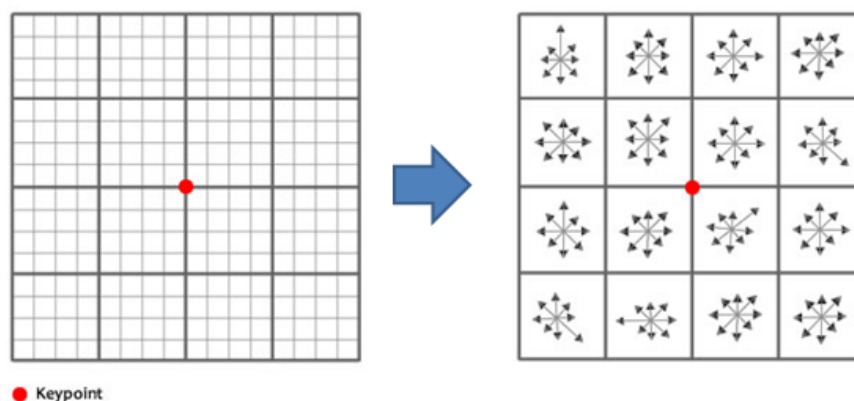
<http://www.aishack.in/2010/05/sift-scale-invariant-feature-transform/7/>

ต้องทำการถ่วงน้ำหนักในพื้นที่รอบจุดสนใจทั้ง 16 จุด (4x4) ในพื้นที่ส่วนย่อย คำนวณร่วมกับค่าใน 8 ช่องทิศทางจะได้เวกเตอร์ของทิศทางทั้ง 8 ดังรูปที่ 2.34 ทำการคำนวณด้วยวิธีเดียวกับทั้งพื้นที่ 4x4 รอบจุดสนใจจะได้ เวกเตอร์ $4 \times 4 \times 8 = 128$ มิติ รอบจุดที่สนใจดังรูปที่ 2.35 ซึ่งถือเป็นคุณลักษณะเฉพาะของจุดที่สนใจที่ทำการคำนวณ



รูปที่ 2.34 เวกเตอร์ของทิศทางทั้ง 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.35 เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของจุดสนใจ ขนาด 128 บิต

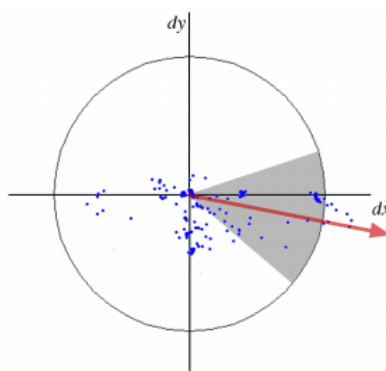
2.8.3 วิธีการหาจุดสนใจ SURF

SURF ย่อมาจาก Speeded Up Robust Features กระบวนการ SURF ถูกนำเสนอโดย Bay Herbert, Tuytelaars และ Van Gool Luc (2006) เป็นการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการ SIFT เพื่อหาลักษณะเด่นของภาพ เริ่มต้นด้วยการสังวัตนาการภาพ โดยทำการคำนวณบนภาพปริพันธ์ร่วมกับค่าอนุพันธ์เกาส์เซียนอันดับสองแทนการใช้ตัวกรองแบบเกาส์เซียนทำให้ใช้เวลาเฉลี่ยน้อยลง ในการเลือกว่าจุดใดๆ เป็นจุดสนใจหรือไม่ SURF ใช้ Hessian matrix-base ในการกำหนดตำแหน่งจุดที่สนใจในหลายมาตราส่วนในลักษณะพีระมิดภาพ และยังใช้วิธีการของ 2D Haar wavelet ใช้ตัวกรองเพื่อตอบสนองต่อขนาดและทิศทางของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงในการหาจุดที่สนใจ ด้วยข้อมูลต่างๆ ในพื้นที่วงกลมรอบจุดที่สนใจลักษณะแบบเดียวกับกับวิธีของกระบวนการ SIFT จากนั้นทำการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่วางตัวตามทิศทางที่ได้เลือกจากข้อมูลต่างๆในพื้นที่ที่กำหนดรอบจุดที่สนใจ กระบวนการดังกล่าวมาแล้วแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

2.8.3.1 Orientation Assignment

เริ่มต้นด้วยการคำนวณค่าตอบสนองของ Harr-wavelet ในทิศทาง x และ y ในพื้นที่วงกลม รัศมี $6s$ รอบจุดที่สนใจที่สเกล s มีขนาดตามที่จุดสนใจคำนวณได้ ในขั้นตอนการลดหรือเพิ่มขนาดขึ้นอยู่กับทางเลือกค่าของ s ซึ่งในการทำงานที่มาตราส่วนต่างๆ นั้นได้คงขนาดของ Harr-wavelet เท่ากับ $4s$ และทำงานบนภาพปริพันธ์เพื่อความรวดเร็วโดยดำเนินการเพียง 6 ครั้งในการคำนวณการตอบสนองทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y ในทุกๆ มาตราส่วน การตอบสนองต่อ Harr-wavelet คำนวณและถ่วงน้ำหนักด้วยการถ่วงน้ำหนักแบบเกาส์เซียนที่มีศูนย์กลางที่จุดสนใจ ค่าการตอบสนองแสดงในรูปของจุดบนปริภูมิที่ประกอบไปด้วยแรงตอบสนองทางแกนนอนและแรงตอบสนองทางแกนตั้ง ค่าประมาณลักษณะเด่นของทิศทางการวางตัวถูกคำนวณจากผลรวมของการตอบสนองทั้งหมดโดยใช้

การเลื่อนหน้าตาต่างการหมุนครอบคลุมขนาดมุม $\frac{\pi}{3}$ ตัวอย่างในรูปที่ 2.36 แสดงถึงผลรวมของค่าการตอบสนองทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ทั้งสองการตอบสนองให้ค่าเวกเตอร์ทิศทางท้องถิ่นเวกเตอร์ท้องถิ่นที่มีค่ามากที่สุดเป็นตัวแทนทิศทางของจุดที่สนใจ



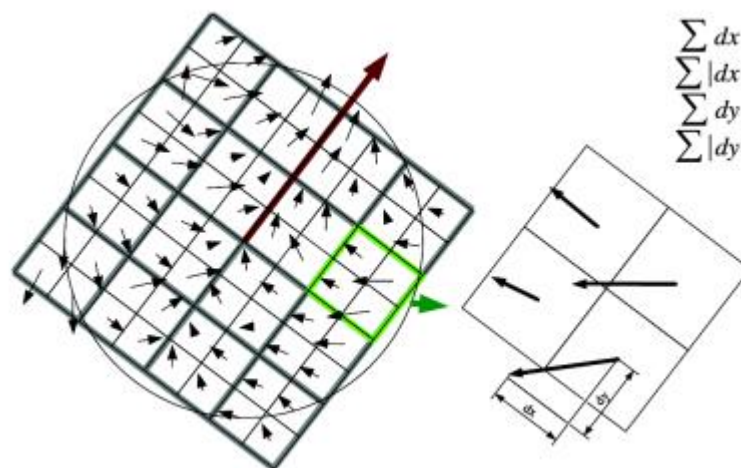
รูปที่ 2.36 ตัวอย่าง Orientation Assignment (Bay et al. 2006)

2.8.3.2 Descriptor Components

ในขั้นตอนนี้เริ่มต้นด้วยการสร้างสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20s โดยมีจุดสนใจเป็นศูนย์กลางมีการหมุนของรูปสี่เหลี่ยมตามทิศทางที่คำนวณได้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ ดังแสดงตัวอย่างการแสดงผลพื้นที่สี่เหลี่ยม และทิศทางรอบจุดสนใจในรูปที่ 2.37 พื้นที่จัตุรัสรอบจุดสนใจนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 4x4 ส่วนเท่าๆ กันแต่ละส่วนแบ่งเป็นส่วนย่อย 4x4 อีกครั้ง จากนั้นคำนวณในแต่ละส่วนย่อยด้วยค่าการตอบสนอง Haar wavelet ในทั้งแกนแนวนอนและแกนตั้งโดยให้ค่าตอบสนองในแกนแนวนอนคือ d_x และค่าตอบสนองในแกนตั้งคือ d_y โดยทำการคำนวณหาขนาด และทิศทางเป็นเวกเตอร์ผลลัพธ์ของส่วนย่อยแต่ละส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.38 เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต และความคลาดเคลื่อนในการกำหนดตำแหน่ง ค่าตอบสนองทางแกนแนวนอนและแกนตั้งจะถูกกำหนดน้ำหนักเริ่มต้นด้วยค่าเกาส์เซียน ($\sigma=3.3s$) ศูนย์กลางอยู่ที่จุดสนใจ ค่าตอบสนองทั้งแกนแนวนอน และแกนตั้งจะถูกสุปรวมในแต่ละส่วนย่อย และรูปแบบชุดแรกของรายการในเวกเตอร์คุณลักษณะ



รูปที่ 2.37 แสดงพื้นที่สี่เหลี่ยมจตุรัสและทิศทางที่คำนวณได้ของจุดที่สนใจ
(Bay et al. 2006)



รูปที่ 2.38 การขนาดและทิศทางเป็นเวกเตอร์ผลลัพธ์
(Bay et al. 2006)

2.8.4 ตัวแปรที่ใช้ในการจับคู่ภาพ

ตัวแปรทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับจับคู่จุดที่เหมือนกันระหว่างภาพต้นทาง และภาพปลายทางนั้นในการคำนวณระยะทางระหว่างเวกเตอร์พีเจอร์จุดบนภาพต้นทาง และภาพปลายทาง โดยใช้เมตริกซ์ระยะทางยูคลีเดียนตามสมการ (2.54)

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2} \quad (2.54)$$

ระยะทางนี้ถูกใช้ในวิธีการค้นหาโดยเทียบภาพอ้างอิงกับภาพเปรียบเทียบไปที่ละจุดภาพ(วิธีการ Simple linear search)ซึ่งใช้เวลานานที่สุด วิธีการค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด (Nearest Neighbor: NN) ซึ่งเป็นการค้นหาโดยการเทียบระยะทางที่ใกล้ที่สุดใน D มิติของยูคลีเดียนสเปส(Euclidean Space) (\mathbb{R}^D) (Marshall 2006) เป็นวิธีการตรงไปตรงมาเทียบไปที่ละเวกเตอร์แต่ก็ใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ และเวลาในการค้นหามาก

2.8.5 วิธีการจับคู่ภาพแบบเพื่อนบ้านใกล้สุดโดยประมาณ (ANN)

สืบเนื่องจากการค้นหาแบบเพื่อนบ้านใกล้สุดใช้เวลานาน และกินทรัพยากรมาก วิธีการค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุดโดยประมาณ(Approximate Nearest Neighbor: ANN) ที่อาศัยหลักการคิดแบบคอมพิวเตอร์แบบ the Euclidean Locality-Sensitive Hashing (E2LSH) ในการหาค่าประมาณของเพื่อนบ้านใกล้สุดสำหรับตรวจสอบการจับคู่ โดยการพิจารณาจากคุณภาพ และประสิทธิภาพเพื่อการคัดทิ้งจุดที่ไม่สนใจ กระนั้นหลักการคิดแบบคอมพิวเตอร์ E2LSH ก็ยังใช้หน่วยความจำของเครื่องสูงอยู่(Arya, Mount, Netanyahu et al. 1998, Buaba, Homaifa and Kihn 2013)

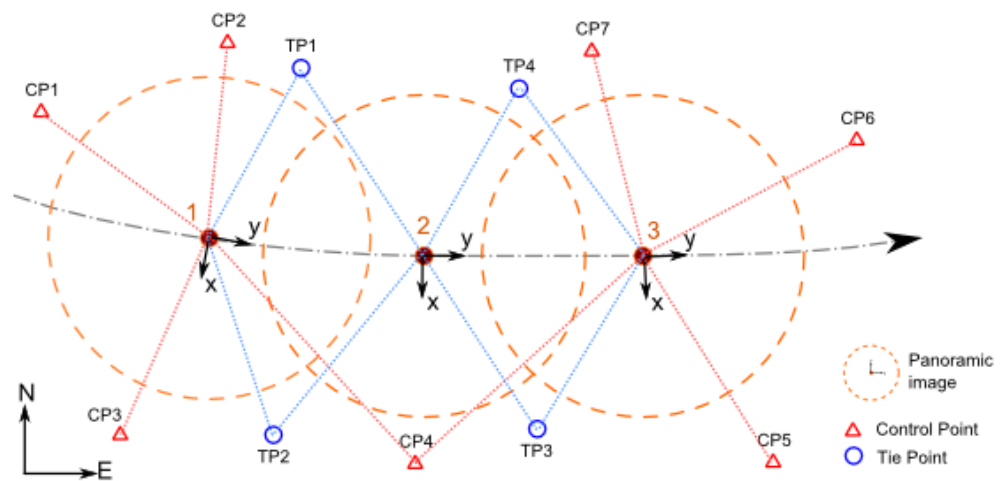
2.8.6 วิธีการจับคู่ภาพ FLANN

หลักการคิดแบบคอมพิวเตอร์แบบต้นไม้ KD แบบสุ่ม(Randomized KD-trees) และต้นไม้ k-means แบบลำดับ(Hierarchical k-means tree)เพื่อช่วยให้การค้นหาเร็วและมีประสิทธิภาพ KD-trees แบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการหาค่าเพื่อนบ้านใกล้สุดในข้อมูลในมิติระดับต่ำ (low dimension) แต่สูญเสียประสิทธิภาพอย่างรวดเร็วเมื่อมิติของข้อมูลสูงขึ้น Silpa-Anan และ Hartley(2008) ได้พัฒนาให้เร็วขึ้นโดยใช้วิธีการสร้างข้อมูลที่ใช้การแบ่งส่วนในปริภูมิในรูปของต้นไม้แบบสุ่มโดยการเลือกมิติที่แยกโดยการสุ่มจากมิติแรกของ D มิติโดยพิจารณาจากข้อมูลที่มีความแปรปรวนมากที่สุด ในการค้นหาข้อมูลในต้นไม้จะเหลือปัจจัยเดียวในทุกต้นไม้แบบสุ่มดังนั้นการค้นหาสามารถเรียงลำดับโดยการเพิ่มระยะทางไปยังขอบเขตของพื้นที่เก็บข้อมูล ระดับของการประมาณจะถูกกำหนดโดยการตรวจสอบจำนวนคงที่ของปมใบ (leaf node) จุดที่ค้นหาจะถูกแทนที่ด้วยจุดที่มีค่าดีที่สุดตามเงื่อนไข ส่วน ต้นไม้ k-means แบบลำดับเป็นกระบวนการคิดทางคอมพิวเตอร์ที่มีการ

สร้างต้นไม้โดยการแยกจุดข้อมูลในแต่ละระดับในขอบเขต K ที่แตกต่างกันโดยใช้การจัดกลุ่มแบบ k -means แล้วใช้วิธีการเดียวกันวนซ้ำกับจุดในแต่ละขอบเขต และหยุดวนซ้ำเมื่อค่าตัวเลขของจุดในภูมิภาคขอบเขตน้อยกว่า K (Muja and Lowe 2009)

2.9 การปรับแก้แบบบล็อกลำแสงของภาพพานอรามา

การหาตำแหน่งของจุดสนใจในภาพพานอรามาสามารถใช้การปรับแก้แบบบล็อกลำแสงในการหาคำตอบได้ จากแนวความคิดพื้นฐานของการทำแผนที่ด้วยภาพถ่ายทางอากาศ ตัวอย่างในรูปที่ 2.39 เป็นบล็อกของภาพพานอรามาทรงกลม 3 ภาพมีจุดควบคุมภาพ 7 จุด และจุดโยงยึดหรือจุดผ่านจำนวน 4 จุด



รูปที่ 2.39 ภาพพานอรามา 3 ภาพพร้อมจุดควบคุมภาพและจุดผ่าน

2.9.1 รูปแบบทั่วไปของการปรับแก้แบบบล็อกลำแสงสำหรับภาพพานอรามา

รูปแบบทั่วไปของการปรับแก้แบบบล็อกลำแสงสำหรับภาพพานอรามาทรงกลมจากรูปที่ 2.39 ในการแก้ปัญหาการพิจารณาตัวไม่ทราบค่าสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) ภาพพานอรามาทรงกลมทุกภาพต้องการค่าการวางตัวภายนอก 6 ค่า หากมี i ภาพ จะทำให้มีตัวไม่ทราบค่าทั้งหมด $6 \times i$ ตัว
- 2) จุดบนพื้นดินที่ใช้เป็นจุดผ่านจะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าขึ้น 3 ตัว หากมี p จุด จะทำให้มีตัวไม่ทราบค่า $3 \times p$ ตัว

สำหรับการพิจารณาค่าสังเกต สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) หากมีจุดควบคุมภาพ(cp) ปรากฏอยู่อย่างน้อยหนึ่งภาพ การนับจะนับจำนวนจุดในแต่ละภาพรวมกันคือ n_{cp} แต่แต่ละจุดที่ปรากฏอยู่จะสามารถสร้างสมการค่าสังเกตได้จุดละ 2 ค่า จะทำให้มีสมการค่าสังเกต $2 \times n_{cp}$
- 2) จุดโยงยึดหรือจุดผ่าน(pp) ปรากฏอยู่อย่างน้อยสองภาพขึ้นไป การนับจะนับจำนวนจุดในแต่ละภาพรวมกันคือ n_{pp} แต่แต่ละจุดที่ปรากฏอยู่จะสามารถสร้างสมการค่าสังเกตได้จุดละ 2 ค่า จะทำให้มีสมการค่าสังเกต $2 \times n_{pp}$

ดังนั้นจำนวนตัวไม่ทราบค่าทั้งหมดในบล็อก หาได้จากสมการ (2.55)

$$u = 6 \times i + 3 \times p \quad (2.55)$$

และจำนวนสมการค่าสังเกตทั้งหมดสามารถหาได้จากสมการ(2.56)

$$n = 2 \times n_{cp} + 2 \times n_{pp} \quad (2.56)$$

วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะสามารถแก้ปัญหาได้ก็ต่อเมื่อจำนวนของสมการ (n) มีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนตัวไม่ทราบค่า (u) หรือ $n \geq u$ จากสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอรามาทรงกลม สมการที่ (2.28) และสมการ (2.29)

กำหนดให้ภาพพานอราามีขนาดความกว้างเท่ากับ W จุดภาพและความสูงเท่ากับ H จุดภาพ จากสมการ (2.17) และ (2.18) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x, y และค่า μ, v ที่จุด p ใดๆ แสดงดังสมการ (2.57) และ (2.58)

$$\mu_p = \left(x_p - \frac{W}{2} \right) \times \frac{360^\circ}{W} \quad (2.57)$$

$$v_p = y_p \times \frac{180^\circ}{H} \quad (2.58)$$

ฟังก์ชัน fx และ fy ของแต่ละจุดในภาพจะเท่ากับ

$$fx = \left(\left(x_p^{[i]} - \frac{W}{2} \right) \times \frac{360^\circ}{W} \right) - \tan^{-1} \frac{R_{11}^{[i]}(X_P - X_0^{[i]}) + R_{12}^{[i]}(Y_P - Y_0^{[i]}) + R_{13}^{[i]}(Z_P - Z_0^{[i]})}{R_{21}^{[i]}(X_P - X_0^{[i]}) + R_{22}^{[i]}(Y_P - Y_0^{[i]}) + R_{23}^{[i]}(Z_P - Z_0^{[i]})} \quad (2.59)$$

$$fy = \left(y_p^{[i]} \times \frac{180^\circ}{H} \right) - \cos^{-1} \frac{R_{31}^{[i]}(X_P - X_0^{[i]}) + R_{32}^{[i]}(Y_P - Y_0^{[i]}) + R_{33}^{[i]}(Z_P - Z_0^{[i]})}{\sqrt{(X_P - X_0^{[i]})^2 + (Y_P - Y_0^{[i]})^2 + (Z_P - Z_0^{[i]})^2}} \quad (2.60)$$

โดยที่

p = ลำดับจุดใดๆ ในภาพ

P = ลำดับของจุดใดๆ บนพื้นดิน

i = ลำดับภาพ

การแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากสมการ (2.41), (2.42) และ(2.43)

ถ้าให้ k = จำนวนจุดบนภาพรวมกัน ($n_{cp} + n_{pp}$)

n_g = จำนวนจุดบนพื้นดิน

เมทริกซ์ **B** หาได้จากหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน fx และ fy เทียบกับตัวไม่ทราบค่าทั้งหมด มีขนาด $[2k, (6i + 3n_g)]$

เมทริกซ์ **f** คือเมทริกซ์ของค่าคงที่ และค่ารังวัดโดยการแทนค่าเริ่มต้นเพื่อหาคำตอบของสมการมีขนาด $[2k, 1]$

เมทริกซ์ **w** คือเมทริกซ์ของน้ำหนักมีขนาด $[(6i + 3n_g), (6i + 3n_g)]$

ดำเนินการแก้ปัญหตามกระบวนการกำลังสองน้อยที่สุด

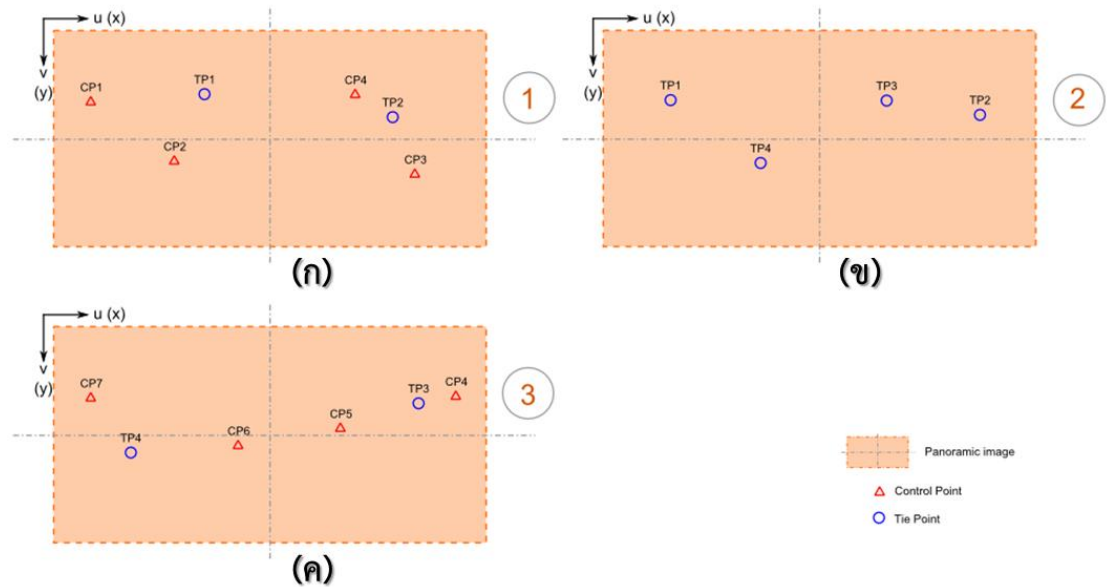
2.9.2 ตัวอย่างการสร้างสมการสำหรับการปรับแก้บล็อกสำแสงของภาพพานอรามา

การสร้างระบบสมการจากรูปที่ 2.39 จะเห็นได้ว่า ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพจะเป็นค่าคงที่ ค่าพิกัดของจุดผ่านจะเป็นตัวไม่ทราบค่า ค่าพิกัดภาพของแต่ละจุดแสดงในตารางที่ 2.3 เป็นค่าสังเกตที่วัดได้จากภาพพานอรามาทรงกลมแต่ละภาพ

ตารางที่ 2.3 ค่าพิกัดบนภาพพานอรามาทรงกลม

จุดบังคับภาพ	ภาพที่ 1 (รูปที่ 2.40 (ก))	ภาพที่ 2 (รูปที่ 2.40 (ข))	ภาพที่ 3 (รูปที่ 2.40 (ค))
CP1	x_{CP1}^1, y_{CP1}^1	-	-
CP2	x_{CP2}^1, y_{CP2}^1	-	-
CP3	x_{CP3}^1, y_{CP3}^1	-	-
CP4	x_{CP4}^1, y_{CP4}^1	-	x_{CP4}^3, y_{CP4}^3
CP5	-	-	x_{CP5}^3, y_{CP5}^3
CP6	-	-	x_{CP6}^3, y_{CP6}^3
CP7	-	-	x_{CP7}^3, y_{CP7}^3
TP1	x_{TP1}^1, y_{TP1}^1	x_{TP1}^2, y_{TP1}^2	-
TP2	x_{TP2}^1, y_{TP2}^1	x_{TP2}^2, y_{TP2}^2	-
TP3	-	x_{TP3}^2, y_{TP3}^2	x_{TP3}^3, y_{TP3}^3
TP4	-	x_{TP4}^2, y_{TP4}^2	x_{TP4}^3, y_{TP4}^3

จุดควบคุมภาพ และจุดผ่านปรากฏบนภาพแต่ละภาพดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ตำแหน่งจุดควบคุม และจุดผ่านบนภาพพานอรามาทรงกลม

ตัวไม่ทราบค่าของการคำนวณบล็อกนี้ได้แก่

พารามิเตอร์การวางตัวภายนอก ($\varphi, \omega, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$) ของแต่ละภาพรวม 3 ภาพรวมเท่ากับ 18 ตัวไม่ทราบค่า

พิกัดของของจุดผ่าน (X_{TP}, Y_{TP}, Z_{TP}) จำนวน 4 จุดรวมเท่ากับ 12 ตัวไม่ทราบค่ารวมมีตัวไม่ทราบค่าทั้งหมด 30 ตัว

จำนวนค่าสังเกตที่เป็นค่าพิกัดของจุดที่ปรากฏอยู่ในภาพแต่ละภาพตามตารางที่ 2.3 มีจำนวนจุดในภาพรวมทั้งหมด 16 จุด แต่ละจุดสร้างได้ 2 สมการ รวมสามารถสร้างสมการจากค่าสังเกตได้ 32 สมการ

วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะสามารถแก้ปัญหาได้ก็ต่อเมื่อจำนวนของสมการ

(n) มีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนตัวไม่ทราบค่า (u) หรือ $n \geq u$

ในบล็อกการคำนวณนี้

$$n = 32, \quad u = 30$$

$n \geq u$ สามารถหาคำตอบสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดได้

จากสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพพานอรามาทรงกลม (สมการ (2.28) และสมการ (2.29))

$$\mu = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_0) + R_{12}(Y_A - Y_0) + R_{13}(Z_A - Z_0)}{R_{21}(X_A - X_0) + R_{22}(Y_A - Y_0) + R_{23}(Z_A - Z_0)} \quad (2.28)$$

$$v = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_0) + R_{32}(Y_A - Y_0) + R_{33}(Z_A - Z_0)}{\sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2}} \quad (2.29)$$

เมื่อภาพพานอรามาที่ใช้งานมีขนาด $W=5400$ จุดภาพและ $H = 2700$ จุดภาพแทนค่า W และ H ลงในสมการ (2.15) และ (2.16) ค่าของ μ และ ν หาได้จากสมการ (2.61) และ (2.62)

$$\mu = \frac{x}{15} - 180^\circ \quad (2.61)$$

$$\nu = \frac{y}{15} \quad (2.62)$$

แทนค่าของ μ และ ν ลงในสมการ(2.28) และ (2.29) และจัดให้อยู่ในรูปสมการของฟังก์ชัน fx และ fy จะเท่ากับ

$$fx = \left(\frac{x}{15} - 180^\circ \right) - \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_0) + R_{12}(Y_A - Y_0) + R_{13}(Z_A - Z_0)}{R_{21}(X_A - X_0) + R_{22}(Y_A - Y_0) + R_{23}(Z_A - Z_0)} \quad (2.63)$$

$$fy = \frac{y}{15} - \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_0) + R_{32}(Y_A - Y_0) + R_{33}(Z_A - Z_0)}{\sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2}} \quad (2.64)$$

ตัวอย่างฟังก์ชัน fx และ fy ของจุด CP1 ในภาพที่ 1 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$fx_{CP1}^{[1]} = \left(\frac{x_{CP1}^{[1]}}{15} - 180^\circ \right) - \tan^{-1} \frac{R_{11}^{[1]}(X_{CP1} - X_0^{[1]}) + R_{12}^{[1]}(Y_{CP1} - Y_0^{[1]}) + R_{13}^{[1]}(Z_{CP1} - Z_0^{[1]})}{R_{21}^{[1]}(X_{CP1} - X_0^{[1]}) + R_{22}^{[1]}(Y_{CP1} - Y_0^{[1]}) + R_{23}^{[1]}(Z_{CP1} - Z_0^{[1]})} \quad (2.65)$$

$$fy_{CP1}^{[1]} = \frac{y_{CP1}^{[1]}}{15} - \cos^{-1} \frac{R_{31}^{[1]}(X_{CP1} - X_0^{[1]}) + R_{32}^{[1]}(Y_{CP1} - Y_0^{[1]}) + R_{33}^{[1]}(Z_{CP1} - Z_0^{[1]})}{\sqrt{(X_{CP1} - X_0^{[1]})^2 + (Y_{CP1} - Y_0^{[1]})^2 + (Z_{CP1} - Z_0^{[1]})^2}} \quad (2.66)$$

สมการในรูปทั่วไปของสำหรับเทคนิคการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบใช้พารามิเตอร์ตั้งสมการ (2.40)

$$\mathbf{v} + \mathbf{B}\Delta = \mathbf{f} \quad (2.40)$$

การหาค่าของ \mathbf{B} คือจาโคเบียนเมทริกส์การหาค่าอนุพันธ์ของสมการค่าสังเกตเทียบกับตัวไม่ทราบค่า เพื่อสะดวกในการแสดงผล \mathbf{B} มีค่าตั้งสมการ (2.61)

$$\mathbf{B} = [\dot{\mathbf{B}}|\ddot{\mathbf{B}}] \quad (2.67)$$

โดยที่

$\dot{\mathbf{B}}$ = เมทริกส์การหาค่าอนุพันธ์ของสมการค่าสังเกตเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของการวางตัวภายนอกภาพ

$\ddot{\mathbf{B}}$ = เมทริกส์การหาค่าอนุพันธ์ของสมการค่าสังเกตเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของพิกัดจุดผ่าน

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} fx(x_{CP1}^1) \\ fy(y_{CP1}^1) \\ \vdots \\ fx(x_{TP2}^1) \\ fy(y_{TP2}^1) \\ fx(x_{TP1}^2) \\ fy(y_{TP1}^2) \\ \vdots \\ fx(x_{TP4}^3) \\ fy(y_{TP4}^3) \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์น้ำหนัก \mathbf{W}

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_{CP1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_{CP1}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{x_{CP2}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{y_{CP2}}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{x_{TP4}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{y_{TP4}}^2 \end{bmatrix}^{-1}$$

สามารถหาคำตอบของการคำนวณปรับแก้ได้จากสมการ (2.41)

$$\Delta = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{t} \quad (2.41)$$

โดยที่

$$\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{B}$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{B}^T \mathbf{W} \mathbf{f}$$

\mathbf{B} คือเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์

\mathbf{W} คือเมทริกซ์น้ำหนัก

Δ คือเมทริกซ์ของพารามิเตอร์

\mathbf{f} คือเมทริกซ์ของค่าคงที่ และค่ารังวัด

หากกำหนด \mathbf{x}_0 คือค่าประมาณของตัวไม่ทราบค่า และค่า Δ_x คือ Δ ค่าแก้ของค่าประมาณ ดังนั้นค่าที่ปรับแก้แล้วของตัวไม่ทราบค่าคือ

$$x_1 = x_0 + \Delta_x$$

ทำการวนรอบทำซ้ำโดยให้ค่า x_1 เป็นค่าประมาณตัวใหม่แล้วคำนวณหาค่าแก้ใหม่ ทำการวนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าแก้จะน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

เกณฑ์กำหนดสำหรับการวนรอบของการปรับแก้

สำหรับมุม φ , ω , $\kappa = 0.00001$ องศา

สำหรับระยะทาง X_0 , Y_0 , $Z_0 = 0.001$ เมตร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ระบบแผนที่แบบเคลื่อนที่

ตั้งแต่ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานจริงเมื่อต้นทศวรรษที่ 90 วัตถุประสงค์หลักเพื่อทำแผนที่จากข้อมูลภาพที่ได้จากระบบโดยระบบ GPSVanTM ถือเป็นระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ระบบแรกพัฒนาขึ้นที่ Ohio State University โดย Center for Mapping แสดงในรูปที่ 3.1 วัตถุประสงค์เพื่อทำแผนที่เส้นทาง และเก็บข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานบนสายทาง ระบบสามารถติดตั้งได้บนรถยนต์ และรถไฟ ใช้จีพีเอส ไจโร และโอโดมิเตอร์เป็นตัวรับรู้ในการกำหนดตำแหน่ง และใช้กล้องดิจิทัล CCD แบบขาวดำ และ กล้องวิดีโอแบบสีเป็นตัวรับรู้สำหรับทำแผนที่



รูปที่ 3.1 GPSVanTM โดย Center for Mapping
(<http://www.cfm.ohio-state.edu>)

ในช่วงเวลาใกล้เคียงกันระบบ VISATTM ได้ถูกพัฒนาขึ้นที่ University of Calgary สำหรับใช้เก็บข้อมูลทางหลวง(El-Sheimy and Schwarz 1993) แสดงรูประบบในรูปที่ 3.2 ระบบนี้ได้ใช้ตัวรับรู้สำหรับกำหนดตำแหน่งคือ จีพีเอสแบบสองความถี่ และเครื่องมือวัดการเร่งและการหมุนระดับนำหน และใช้กล้องดิจิทัล CCD แบบขาวดำจำนวน 8 ตัว และกล้องวิดีโออีกหนึ่งตัวเป็นตัวรับรู้ในการทำแผนที่สำหรับเก็บข้อมูลรอบๆ เส้นทางที่ผ่านไป ระบบ GPSVanTM และ VISATTM ทั้งสองระบบนี้ใช้วิธีการทางการทำแผนที่จากภาพถ่ายแบบเดียวกับกับวิธีการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศใน

การหาตำแหน่งวัตถุในภาพที่อาศัยหลักการที่ว่าหากจุดของวัตถุที่ปรากฏอยู่บนภาพที่บันทึกต่างมุมกับตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไปสามารถคำนวณหาพิกัดตำแหน่งได้ ปี ค.ศ. 1996 ได้มีการใช้ Reflectorless laser range finder เป็นตัวรับรู้สำหรับทำแผนที่ร่วมกับการใช้กล้องวิดีโอที่บันทึกภาพในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่ชื่อ TuckMap™ ระบบนี้สามารถติดตั้งทั้งบนเครื่องบิน และรถยนต์ (Reed, Landry and Werther 1996) แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ระบบ VISAT™

(<http://mycoordinates.org/visat-mapping-what-you-see/all/1/>)



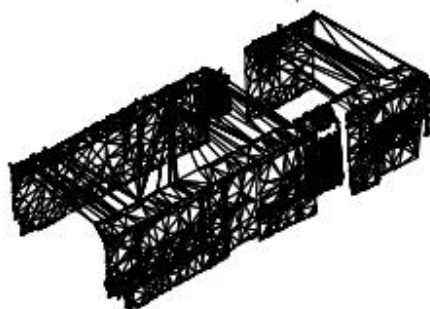
รูปที่ 3.3 ระบบ TruckMAP™ (Reed et al. 1996)

มีการนำเลเซอร์สแกนเนอร์มาใช้ในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่สำหรับในอาคาร (Indoor MMS) โดย National Research Council Canada ที่ใช้กล้อง CCD และเลเซอร์สแกนเนอร์ทำงานร่วมกันดังรูปที่ 3.4 โดยระบบนี้ใช้จุดจำนวนมากจากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่มีค่าพิกัดสามมิติมา

เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมเพื่อสร้างแบบจำลองสภาพภายในอาคารและใช้ภาพถ่ายซ้อนทำ
ในแต่ละด้านของแบบจำลองดังรูปที่ 3.5 (El-Hakim, Boulanger, Blais et al. 1997)



รูปที่ 3.4 Indoor MMS by National Research Council
(<http://www.cs.ubc.ca/~pai/RealityWorkshop/boulanger/bio.html>)



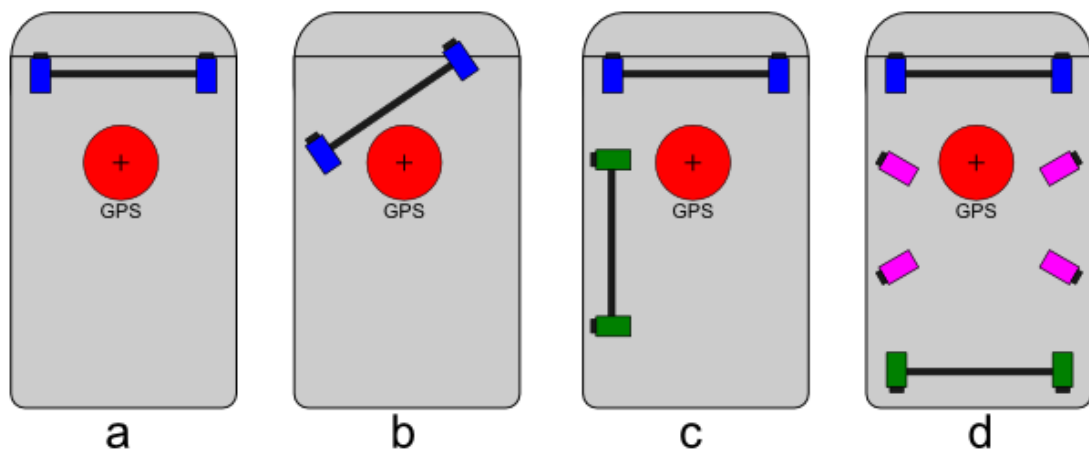
รูปที่ 3.5 The 3-D geometric model and the geometric model plus texture maps
(El-Hakim et al. 1997)

เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ถูกนำมาใช้ภายนอกอาคารในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ระบบ
ทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ MOSES ของ University of the Federal Armed Forces Munich ดัง
รูปที่ 3.6 ระบบใช้กล้อง CCD บันทึกภาพสองตัวผ่านกระบวนการการทำแผนที่ด้วยภาพได้ค่าพิกัด
สามมิติของจุดที่สนใจ และมีกล้องวัดทิศทางและเลเซอร์สแกนเนอร์เป็นตัวรับรู้ในการทำแผนที่ ส่วนตัว
รับรู้ในการกำหนดตำแหน่งใช้ Applanix POS/LV 420 ทำงานร่วมกับ เครื่องวัดความกดอากาศ
เครื่องมือวัดระยะทางจากการหมุนของล้อ และเครื่องวัดความเอียง(inclinometer)



รูปที่ 3.6 MOSES system (Graefe, Caspary, Heister et al. 2001)

นอกจากการใช้ติดตั้งกล้องบันทึกภาพ สองตัวสำหรับภาพสเตอริโอเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งด้วยวิธีการทำแผนที่จากภาพแล้วยังมีการเพิ่มจำนวนกล้องบันทึกภาพสเตอริโอในมุมอื่น นอกจากด้านหน้าด้วยเหตุผลเดียวกันและยังติดตั้งในรูปแบบรอบตัวดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อรอบตัว ณ ตำแหน่งที่บันทึกภาพและยังสามารถซ้อนทับกับข้อมูลจุดจากเลเซอร์วัดระยะเพื่อการประเมินและสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อม



รูปที่ 3.7 การติดตั้งกล้องในตำแหน่งต่างๆ บนระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

การใช้กล้องบันทึกภาพหลายตัวในการสร้างภาพเสมือนของพื้นที่บริเวณนั้น ระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่สำหรับในอาคาร (Indoor MMS) โดย National Research Council Canada ได้ใช้

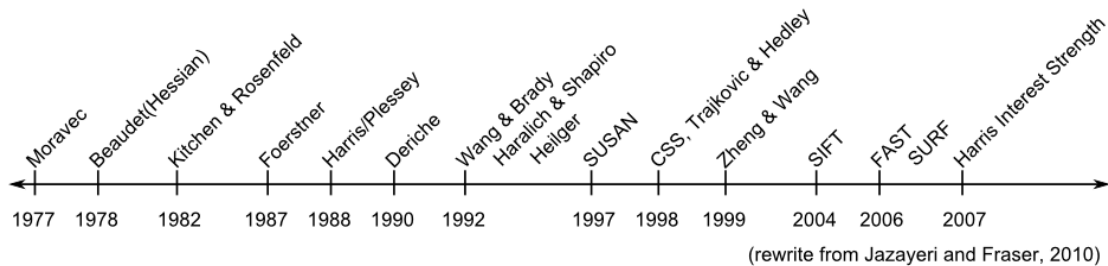
สร้างเป็นภาพเสมือนร่วมกับข้อมูลจุดจากเลเซอร์วัดระยะ (Boulanger and El-Hakim 1999) และมีการใช้งานในลักษณะเดียวกันบนระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่แบบอื่นที่ใช้งานนอกอาคารด้วย ตัวอย่างเช่นระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ของ Wuhan Technical University ที่ใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ร่วมกับภาพจากกล้อง CCD และระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ MOSES เป็นต้น

การทำแผนที่ด้วยภาพพานอรามาถูกใช้ในงานการทำแผนที่ด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ในยุคดิจิทัลที่ใช้ตัวรับรู้แทนการใช้ฟิล์ม กล้องต้นแบบเป็นแบบ rotating CCD sensor-line panorama camera พัฒนาขึ้นโดย DLR ใช้ชื่อ Photokina ในปี ค.ศ. 1998 ปีต่อมา Panoscan ได้ผลิตกล้อง MK-1 ออกจำหน่าย DLR พัฒนาร่วมกับ KST ผลิตกล้องบันทึกภาพแบบ rotating sensor-line camera ในชื่อ Eyescan M3 (รูปที่ 2.6) ออกจำหน่ายและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักทำแผนที่จากภาพถ่ายระยะใกล้(Huang et al. 2008) ภาพที่ได้มีความละเอียดสูงมากเมื่อเทียบกับกล้องแบบ sensor-matrix ที่บันทึกภาพทีละเฟรมดังตัวอย่างความจุที่ใช้ในการเก็บภาพแสดงในรูปที่ 2.6 ภาพที่ได้เป็นภาพพานอรามาตรงกระบอกตามลักษณะที่กล้องได้บันทึกมา Fay Huang, Reinhard Klette, และKarsten Scheibe(2008) ได้อธิบายคุณลักษณะของกล้องบันทึกภาพพานอรามาชนิด Sensor-line camera และ Laser Range-Finders การคำนวณในการทำแผนที่ด้วยภาพพานอรามาตรงกระบอก ความนิยมในการใช้งานภาพพานอรามาเพิ่มขึ้นในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่จนกระทั่งบริษัท Point Grey Research Inc. ผลิตกล้อง Ladybug2 ขึ้นใช้งานในปี ค.ศ. 2005 เป็นกล้องบันทึกภาพพานอรามาแบบหลายเลนส์ ขนาดภาพ 0.8 ล้านจุดภาพประกอบไปด้วยกล้องจำนวน 6 ตัวประกอบสำเร็จรูปจากโรงงานสามารถผลิตภาพพานอรามาพร้อมใช้งานได้เลย และพัฒนาความเร็วและความจุของภาพเพิ่มขึ้นเป็น 12 ล้านจุดภาพต่อภาพบนกล้อง Ladybug3 ในปี 2008 ซึ่งกล้องรุ่นนี้มีการใช้งานกับระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ในหลายระบบจนปี ค.ศ. 2013 ได้เพิ่มขนาดของภาพไปอีกเป็น 30 ล้านจุดภาพในกล้อง Ladybug5 นอกจากการใช้กล้องแบบพานอรามาตรงกลมสำหรับเป็นภาพซ้อนทับกับข้อมูลจุดจากเลเซอร์สแกนเนอร์แล้วยังมีการเริ่มใช้ภาพพานอรามาตรงกลมเพื่อคำนวณหาพิกัดของจุดที่ปรากฏในภาพด้วย กล่าวได้ว่าเป็นการทำแผนที่ด้วยภาพพานอรามาตรงกลม

3.2 การจับคู่ภาพอัตโนมัติ

การจับคู่ภาพอัตโนมัติเป็นกระบวนการที่ใช้หาจุดที่เป็นจุดเดียวกันในภาพต้นทาง ไปยังอีกภาพปลายทางวิธีการนี้พัฒนาขึ้นเมื่อมีการใช้คอมพิวเตอร์ในงานการทำแผนที่ด้วยภาพ งานการรับรู้ระยะไกล (Remote sensing) และงานคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ด้วยหลักการพื้นฐานแบบเดียวกับการจับคู่ภาพด้วยตาของมนุษย์ที่เริ่มจากการมองหาจุดที่เด่นชัดในภาพต้นทาง และมองหาจุดที่เหมือนกันในภาพปลายทางทำให้การจับคู่ภาพอัตโนมัติมีกระบวนการหาจุดเด่นชัดในภาพเพื่อใช้สำหรับจับคู่กับจุดเด่นชัดในอีกภาพหนึ่ง การหาจุดเด่นชัดในภาพถูกเผยแพร่ครั้งแรกโดย Hans P. Moravec(1977)

ในปี ค.ศ. 1977 ที่ Stanford University ในงานวิจัยเพื่อการควบคุมยานพาหนะโดยอาศัยภาพจากกล้องวิดีโอ จากนั้นมีการพัฒนาวิธีการหาจุดเด่นชัดในภาพในแบบต่างๆ ดังแสดงตามห้วงเวลาในรูปที่ 3.8 แต่ละวิธีการมีความทนทานต่อการหมุน การวางตัว มาตรฐาน การเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงของภาพได้ไม่เหมือนกันจึงไม่สามารถใช้วิธีการใด วิธีการหนึ่งได้ทุกกรณี



รูปที่ 3.8 พัฒนาการของกระบวนการหาจุดเด่นชัดในภาพ(Jazayeri and Fraser 2010)

สำหรับกระบวนการทำแผนที่จากภาพระยะใกล้ นั้น ภาพที่ใช้งานมีหลายมุม หลายทิศทาง และหลายมาตรฐาน ดังนั้นวิธีการหาจุดเด่นในภาพที่เหมาะสมนั้นควรเป็นวิธีการที่มีความคงทนต่อการหมุน การวางตัว และมาตรฐาน ซึ่งวิธีการที่มีความนิยมในช่วงหลังปี ค.ศ. 2000 มา นั้นคือวิธีการ SIFT, FAST และ SURF Maridalia Guerrero Peña (2011) ได้ทำการเปรียบเทียบกระบวนการทำงานของ SIFT, FAST and SURF สรุปได้ว่าวิธี FAST สามารถหาจุดสนใจได้มากกว่าอีกสองวิธีแต่ไม่สามารถหาคุณลักษณะเด่นในภาพได้ และ FAST สามารถจับคู่ภาพแบบกำหนดเลือกเอง ได้ดีกว่าแต่ไม่สามารถจับคู่ภาพแบบอัตโนมัติได้ SIFT จับคู่ภาพได้ดีกว่า SURF แต่ทำงานได้ช้ากว่าคอมพิวเตอร์นั้นไม่สามารถทำงานได้เหมือนสมองมนุษย์ในการจับคู่จุดที่เหมือนกันในภาพจำเป็นต้องสร้างเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ในการจับคู่จุดที่เหมือนกันซึ่งเป็น 2 กลุ่มคือ Area-base Matching (ABM) และ Feature-base Matching (FBM) (Zitova and Flusser 2003)

ในกลุ่มการจับคู่ภาพแบบ Area-base Matching จะใช้การสร้าง template จากภาพอ้างอิง จากนั้นทำการเปรียบเทียบหาส่วนที่เหมือนกันกับ template ในภาพปลายทาง การจับคู่ภาพแบบนี้มีข้อจำกัดคือ การสร้าง template จากภาพอ้างอิงนั้นบางกรณีอาจไม่ปรากฏลักษณะเด่นชัดเพียงพอต่อการจับคู่ภาพ โดยทั่วไปนิยมหาหลักคุณลักษณะเด่นชัดในภาพต้นทางก่อนแล้วจึงสร้าง template ให้ครอบคลุมลักษณะดังกล่าว เทคนิคในการเปรียบเทียบหาส่วนที่เหมือนกันในภาพทั้งสองคือ Cross-correlation template matching โดยจะทำการคำนวณค่า cross-correlation ระหว่าง template จากภาพอ้างอิงและ template ที่กำลังเปรียบเทียบในภาพปลายทางบริเวณในมีค่า cross-correlation สูงสุดจะถือว่าเป็นบริเวณเดียวกับ template บนภาพอ้างอิง (พงศธร อ่อนสำลี 2554)

ในกลุ่มการจับคู่ภาพแบบ Feature-base Matching จะทำการเปรียบเทียบและจับคู่ฟีเจอร์ จากภาพอ้างอิง และภาพเปรียบเทียบโดยฟีเจอร์นั้นสามารถเป็นได้ทั้ง จุด เส้น หรือบริเวณที่มีความเด่นชัด (Jiao, Fang and He 2008) ซึ่งการเปรียบเทียบสามารถทำได้กับภาพที่มีการหมุน การเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน และการเลื่อนแกน ฟีเจอร์ที่มีการใช้มากที่จุดได้แก่ จุด โดยมีการหาคุณลักษณะรอบๆจุดเด่นชัดที่เรียกว่า รายละเอียดท้องถิ่น (local descriptions) หรือลักษณะเฉพาะ (descriptor) ภายหลังจากหาจุดเด่นชัดในภาพได้เพื่อใช้ในการจับคู่จุดระหว่างภาพอ้างอิงกับภาพเปรียบเทียบต่อไป เมื่อการจับคู่ภาพต้องใช้จุดสนใจและลักษณะเฉพาะรอบจุดสนใจจึงมีการพัฒนาวิธีการที่ทำทั้งสองอย่างกล่าวคือ หาจุดที่สนใจในภาพ และหาลักษณะเฉพาะรอบจุดสนใจวิธีการที่ทำทั้งสองอย่างได้แก่วิธีการ SIFT และ SURF

3.3 การหาตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามา

การหาตำแหน่งของวัตถุในภาพในงานการทำแผนที่ด้วยภาพในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ได้เริ่มมาพร้อมกับระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ระบบ GPSVAN™ ใช้ภาพคู่สเตอริโอในการหาตำแหน่งในภาพ(El-Sheimy 1996, Center for Mapping 2014) รวมทั้งระบบ VISAT™ และระบบอื่นๆ ตามตารางที่ 1.1 ที่ใช้กล้องบันทึกภาพเป็นตัวรับรู้สำหรับทำแผนที่ต่างก็ใช้ค่าที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้มาคำนวณค่าการวางตัวภายนอกสำหรับภาพที่บันทึกได้แต่ละภาพและใช้การคำนวณปรับแก้ทางการทำแผนที่ด้วยภาพในการหาตำแหน่งของจุดที่สนใจหรือวัตถุในภาพ(Ellum and El-Sheimy 2002, geoVISAT 2014) และยังคงใช้วิธีการนี้จนถึงปัจจุบัน

สำหรับการใช้ภาพพานอรามาในการหาตำแหน่งของวัตถุในภาพนั้น Fangi ได้ใช้ภาพพานอรามาทรงกลมจากการใช้กล้อง DSLR พร้อมกับใช้อุปกรณ์ช่วยบันทึกภาพสำหรับประกอบภาพเป็นภาพพานอรามาทรงกลมด้วยซอฟต์แวร์(Fangi 2006, Fangi 2007) เป็นการตั้งกล้องถ่ายภาพแบบกำหนดมุมหมุนของการถ่ายภาพ และใช้กระบวนการปรับแก้แบบบล็อกลำแสงโดยใช้สมการสำหรับภาพพานอรามาจำนวน 3 ภาพ ในการหาตำแหน่งของวัตถุในภาพโดยการคำนวณยังไม่ได้นำพารามิเตอร์ภายในมาเกี่ยวข้อง และใช้การกำหนดจุดผ่านด้วยคน โดยแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณสำหรับภาพพานอรามาแสดงในสมการ (3.1) และสมการ (3.2) เป็นสมการที่ภาพพานอรามาอยู่ในแนวระดับ

$$\theta = \operatorname{atg} \left(\frac{X' - da_z \cdot Y' - da_z z'}{da_z X' + Y' + da_x \cdot Z'} \right) \quad (3.1)$$

$$\varphi = \operatorname{acos} \frac{-da_y X' + da_x Y' + Z'}{d} \quad (3.2)$$

ผลที่ได้ค่า RMSE เฉลี่ยเท่ากับ ± 0.021 ม. ± 0.026 ม. และ ± 0.006 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ(Fangi 2013)

T. Oh, K. Choi และ I. Lee(2010) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกล้องถ่ายภาพแบบหลายทิศทางแสดงในสมการ (3.3) และใช้กระบวนการปรับแก้แบบบล็อกค่าแสงสำหรับภาพพานอรามาที่ตรงกลมจากกล้องบันทึกภาพแบบหลายเลนส์ที่ใช้ค่าการวางตัวภายนอกจากระบบนำหนในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้

$$\rho = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(c_{P_y}, c_{P_x}) \\ \text{asin}(c_{P_y}/\|c_P\|) \end{bmatrix} + e, e \sim (0, \sigma_0^2 I_2) \quad (3.3)$$

โดยแบ่งกรณีทดสอบเป็น 4 กรณีดังนี้

1. กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆ เป็นตัวไม่ทราบค่า และใช้ข้อมูลจาก GPS/INS คำนวณ
2. กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆ และค่าการวางตัวภายนอกเป็นตัวไม่ทราบค่า และใช้ข้อมูลจาก GPS/INS ช่วยในการคำนวณ
3. กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆ และค่าการวางตัวภายนอกเป็นตัวไม่ทราบค่า และใช้ข้อมูลจุดควบคุมภาพคำนวณ
4. กำหนดให้ค่าพิกัดจุดต่างๆ และค่าการวางตัวภายนอกเป็นตัวไม่ทราบค่า และใช้ข้อมูลจาก GPS/INS และจุดควบคุมภาพช่วยในการคำนวณ

ผลการทดสอบจุดวัดสอบจำนวน 13 จุดแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณเทียบกับจุดวัดสอบ (Oh and Lee 2010)

ID	Type A : No Constraints and Fixed EOP			Type B : Only EOP Constraints			Type C : Only GCP Constraints			Type D : Both EOP and GCP Constraints		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
1	-0.334	-0.055	-0.734	-0.337	-0.036	-0.759	0.000	0.000	0.000	-0.140	-0.042	-0.289
2	-0.401	-0.137	-0.683	-0.387	-0.122	-0.704	0.019	-0.042	0.019	-0.370	-0.116	-0.658
3	-0.253	-0.169	-0.567	-0.261	-0.148	-0.600	0.020	-0.015	0.036	-0.213	-0.125	-0.545
4	-0.538	-0.481	-0.840	-0.542	-0.455	-0.824	0.000	0.000	-0.001	-0.049	-0.025	-0.073
5	-0.551	-0.289	-0.901	-0.557	-0.261	-0.883	0.003	-0.012	-0.019	-0.541	-0.257	-0.857
6	-0.315	-0.482	-0.931	-0.301	-0.505	-0.936	-0.013	0.003	0.050	-0.253	-0.516	-0.904
7	-0.349	-0.441	-0.926	-0.338	-0.463	-0.930	-0.023	0.048	0.056	-0.290	-0.475	-0.898
8	-0.302	-0.491	-0.956	-0.289	-0.514	-0.959	0.000	0.000	0.001	-0.106	-0.052	-0.184
9	-0.290	-0.201	-0.571	-0.290	-0.210	-0.569	0.082	-0.044	0.130	-0.277	-0.199	-0.544
10	-0.236	-0.442	-0.742	-0.248	-0.439	-0.768	0.000	0.000	0.000	-0.052	-0.109	-0.184
11	-0.238	-0.444	-0.739	-0.251	-0.442	-0.765	-0.015	-0.001	0.001	-0.202	-0.441	-0.709
12	-0.234	-0.434	-0.735	-0.241	-0.438	-0.761	0.011	-0.015	-0.004	-0.197	-0.432	-0.704
13	-0.250	-0.417	-0.737	-0.257	-0.420	-0.762	0.006	0.000	-0.005	-0.214	-0.416	-0.705
AVG	-0.330	-0.345	-0.774	-0.331	-0.342	-0.786	0.007	-0.006	0.020	-0.223	-0.247	-0.558
STD	0.103	0.148	0.124	0.102	0.157	0.116	0.025	0.022	0.038	0.128	0.177	0.276
RMSE	0.360	0.390	0.816	0.360	0.392	0.827	0.027	0.024	0.045	0.268	0.316	0.648

ในประเทศไทยมีการศึกษาการหาวิธีของยานพาหนะโดยใช้ดาวเทียมนำหนร่วมกับ IMU เป็นการศึกษาการคำนวณหาตำแหน่งของยานพาหนะในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่(อรุณ บุรีรักษ์ 2553) มีการศึกษาเลขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ต่างๆ

ระหว่างกล้อง Ladybug3 และภาพที่ผลิตออกมา(ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ 2554, ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ และไพศาล สันติธรรมนนท์ 2554) และทดสอบการคำนวณจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามาด้วยการปรับแก้ของบล็อกลำแสงเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จาก จีพีเอส และIMU(ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ และไพศาล สันติธรรมนนท์ 2554) โดยใช้แบบจำลองแสดงในสมการ(3.4)

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_0) + R_{12}(Y_A - Y_0) + R_{13}(Z_A - Z_0)}{R_{21}(X_A - X_0) + R_{22}(Y_A - Y_0) + R_{23}(Z_A - Z_0)} \\ \sin^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_0) + R_{32}(Y_A - Y_0) + R_{33}(Z_A - Z_0)}{\sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ผลการทดสอบได้ค่า RMSE ± 0.038 ม. ± 0.029 ม. และ ± 0.219 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับในกรณีที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และค่า RMSE ± 0.024 ม. ± 0.031 ม. และ ± 0.169 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับในกรณีที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ในทางโค้ง

บทที่ 4

วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การเตรียมข้อมูล

การเตรียมข้อมูลสำหรับการคำนวณจะเป็นการบันทึกข้อมูลด้วยกล้อง Ladybug3 และข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ และข้อมูลจากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยกล้องสถานีรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบ่งเป็น

- ข้อมูลภาพพานอรามาจากกล้องLadybug3 บนขาตั้งกล้องตั้งอยู่กับที่
- ข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ขอรับข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ของการไฟฟ้านครหลวง บริเวณรอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบไปด้วยข้อมูลภาพ ข้อมูลการโคจรของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ และข้อมูลพิกัดจุดที่สนใจ
- รังวัดหมุดควบคุมด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส รังวัดจุดวัดสอบและจุดควบคุมภาพด้วยกล้องสถานีรวม
- สกัดข้อมูลภาพจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ออกมาเป็นภาพพานอรามาทรงกลมขนาดภาพ 5400 x 2700 จุดภาพ
- สกัดข้อมูลการโคจรของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ อันมีตำแหน่งและมุมหมุนของยานพาหนะตามตำแหน่งที่บันทึกภาพ

4.2 การปรับการวางตัวของภาพด้วยเส้นตรงและเส้นดิ่ง

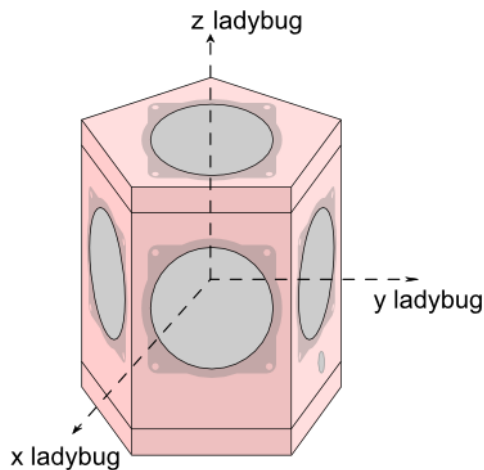
ในชุดซอฟต์แวร์ SDK ที่มากับกล้อง Ladybug3 นั้นสามารถปรับการวางตัวของภาพโดยใช้การกำหนดเส้นตรง หรือเส้นดิ่งให้กับภาพเพื่อปรับให้ภาพวางตัวในแนวระดับได้จึงได้ทำการทดสอบโดยการบันทึกภาพในแนวระดับ และบันทึกภาพโดยการเอียงกล้อง Ladybug3 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการปรับแก้ให้กลับมาอยู่ในแนวระดับด้วยชุดซอฟต์แวร์ SDK ของกล้อง Ladybug3

4.3 การคำนวณค่าการวางตัวของภาพนอกภาพพานอรามา

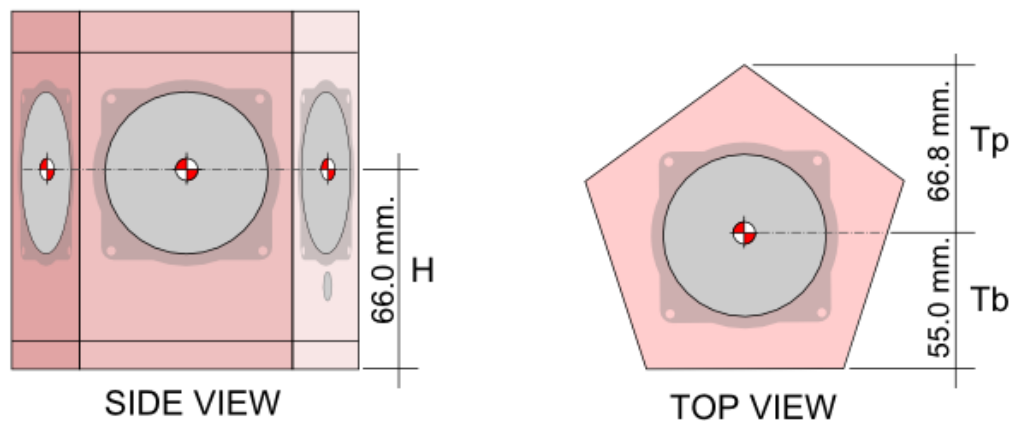
การคำนวณพารามิเตอร์ภายนอกภาพพานอรามา มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- คำนวณหาพารามิเตอร์การวางตัวของภาพนอกของภาพพานอรามาทรงกลม
- ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการสภาวะร่วมเส้นของภาพถ่ายพานอรามาทรงกลม

จากเอกสารการใช้งานกล้อง Ladybug3 ทำให้ทราบว่าตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางกล้องอยู่ที่กึ่งกลางเลนส์ 0 เป็นแกน x แกน z อยู่ตรงกลางเลนส์ 5 (ด้านบน) แกน y ทำมุมกับแกน x ตามกฎมือขวา(Point Grey Research 2014) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และวัดระยะตำแหน่งบนของกล้อง Ladybug3 โดยค่า $H = 66.0$ มม. $T_p = 66.8$ มม. และ $T_b = 55.0$ มม. ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ระบบพิกัดของกล้อง Ladybug3



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะศูนย์กลางกล้อง Ladybug3

วิธีการทดลองการคำนวณพารามิเตอร์ภายนอกของภาพพานอรามามีขั้นตอนดังนี้

- ใช้ข้อมูลบริเวณสนามบาสเก็ตบอลโดยติดตั้งกล้อง Ladybug3 บนขาตั้งกล้องอยู่กับที่เพื่อสามารถคำนวณหาตำแหน่งจุดตั้งกล้อง Ladybug3 การคำนวณหาค่าการวางตัวภายนอกของกล้องพานอรามาคำนวณย้อนกลับหาตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางการถ่ายภาพ และวัดย้อนกลับเป็นตำแหน่งบนกล้อง Ladybug3



รูปที่ 4.3 ภาพพานอรามาบริเวณสนามบาสเก็ตบอลจากกล้อง Ladybug3

- ในการคำนวณใช้จุดควบคุมจำนวน 5 จุดแสดงภาพที่บันทึกด้วยกล้อง Ladybug3 ในรูปที่ 4.3 ค่าพิกัดหมุดควบคุมแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพิกัดจุดควบคุมบริเวณสนามบาสเก็ตบอล

ID	X (m.)	Y (m.)	Z (m.)
10	1033.503	528.172	104.638
24	1012.988	485.664	113.986
33	1001.425	483.073	104.629
45	996.094	483.015	103.002
77	982.783	557.109	107.156

- ใช้ภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่บริเวณที่มีจุดควบคุมภาพได้แก่ภาพที่ 065, 066, 067, 068, 070, 071, 072 และ 073 ภาพที่ใช้มีขนาด 5400x2700 จุดภาพ
- กำหนดข้อมูลที่รังวัดในสนามสำหรับเป็นจุดควบคุม และจุดตรวจสอบ
- วัดพิกัดภาพของจุดควบคุมและ จุดตรวจสอบ
- คำนวณค่าพารามิเตอร์การวางตัวภายนอกของภาพพานอรามาจากพิกัดจุดควบคุม
- คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนพิกัดจุดตรวจสอบบนภาพจากพิกัดจุดตรวจสอบ
- ใช้ข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ในการคำนวณหาค่าการวางตัวภายนอกจากข้อมูลจุดควบคุมภาพ เปรียบเทียบกับค่าการวางตัวภายนอกที่ได้จากระบบ

4.4 การจับคู่ภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์

การจับคู่ภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดที่เหมือนกันบนภาพสองภาพโดยใช้วิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับใช้เป็นจุดผ่านในการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุในภาพต่อไป จากการทดสอบในเบื้องต้นพบว่าสามารถใช้วิธีการต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้หาจุดสนใจในภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3 ได้ และสามารถจับคู่ภาพด้วยวิธี FLANN ได้ โดยการทดสอบมีดังนี้

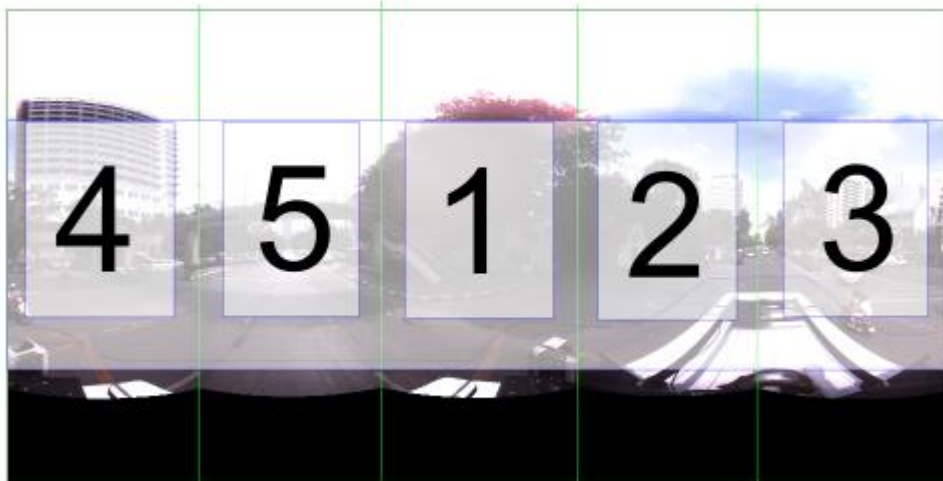
4.4.1 การค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี FAST, SIFT และ SURF โดยใช้หน้ากากรองพื้นที่

4.4.2 การหาลักษณะเด่นในภาพด้วยวิธีการ SIFT และ SURF

4.4.3 การจับคู่ภาพด้วยวิธี FLANN

4.5 การลดความคลาดเคลื่อนในการการจับคู่ภาพ

เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในการเลือกจุดบริเวณที่มีการเหลื่อมกันของภาพ และพื้นที่ในภาพที่เป็นภาพยานพาหนะที่ปรากฏอยู่เหมือนกัน ในทุกภาพ หน้ากากสำหรับจำกัดพื้นที่ในการเลือกจุดถูกนำมาใช้งาน จากรูปที่ 4.4 บริเวณส่วนบนของภาพที่โดยมากจะเป็นส่วนของท้องฟ้า และอาคารสูงที่มีระยะไกล ส่วนล่างที่เป็นสีดำเนื่องจากเป็นมุมอับของกล้องจะถูกตัดออก ในส่วนตรงกลางของภาพจะแบ่งเป็น 5 ส่วนตามตำแหน่งของกล้อง และลดขนาดลงข้างละ 10% ทำให้ได้พื้นที่ที่เป็นสี่เหลี่ยมจำนวน 5 รูปกำหนดชื่อรูปตามชื่อหน้ากล้องของกล้อง Ladybug3



รูปที่ 4.4 การแบ่งพื้นที่ในภาพพานอรามาเพื่อใช้เป็นหน้ากากรอง

หน้ากากสำหรับใช้เป็นตัวกรองที่ได้จะมีขนาดเท่าขนาดภาพที่ได้จากกล้อง Ladybug3 คือ 5400×2700 จุดภาพ ตัดพื้นที่ส่วนที่เป็นยานพาหนะด้านล่างออกคงเหลือแต่พื้นที่สี่เหลี่ยม กำหนดให้ส่วนที่ไม่สนใจเป็นสีดำสนิทดังรูปที่ 4.5 กำหนดเรียกชื่อพื้นที่สี่เหลี่ยมว่า โชน



รูปที่ 4.5 หน้าการสำหรับใช้กรองการค้นหาจุดสนใจในภาพ

ดำเนินการค้นหาจุดภาพที่ผิดเพื่อคัดออกโดยวิธีต่างๆ เรียงลำดับดังนี้

- 4.5.1 การกรองผลการจับคู่ด้วยวิธีพื้นที่ต่อพื้นที่
- 4.5.2 การกรองผลการจับคู่ด้วยวิธีการเลื่อนจุดภาพ
- 4.5.3 การลดจำนวนจุดด้วยการใช้พื้นที่วงกลมรอบจุด

4.6 การหาตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามา

การหาตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบค่าพิกัด 3D ของจุดที่สนใจที่ปรากฏในภาพพานอรามา มีขั้นตอนดังนี้

- ใช้ข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ วัดพิกัดของภาพในตำแหน่งของจุดวัดสอบที่ได้ทำการรังวัดค่าพิกัดในสนามแล้ว
- คำนวณหาค่าพิกัดของจุดวัดสอบด้วยวิธีปรับแก้กำลังสองน้อยที่สุด
- เปรียบเทียบผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากการรังวัดภาคสนาม แบ่งการทดสอบเป็น 5 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 คำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ และใช้เป็นตัวเปรียบเทียบผลการคำนวณกับแบบอื่น

กรณีที่ 2 คำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีกำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในภาพแรกและภาพสุดท้าย

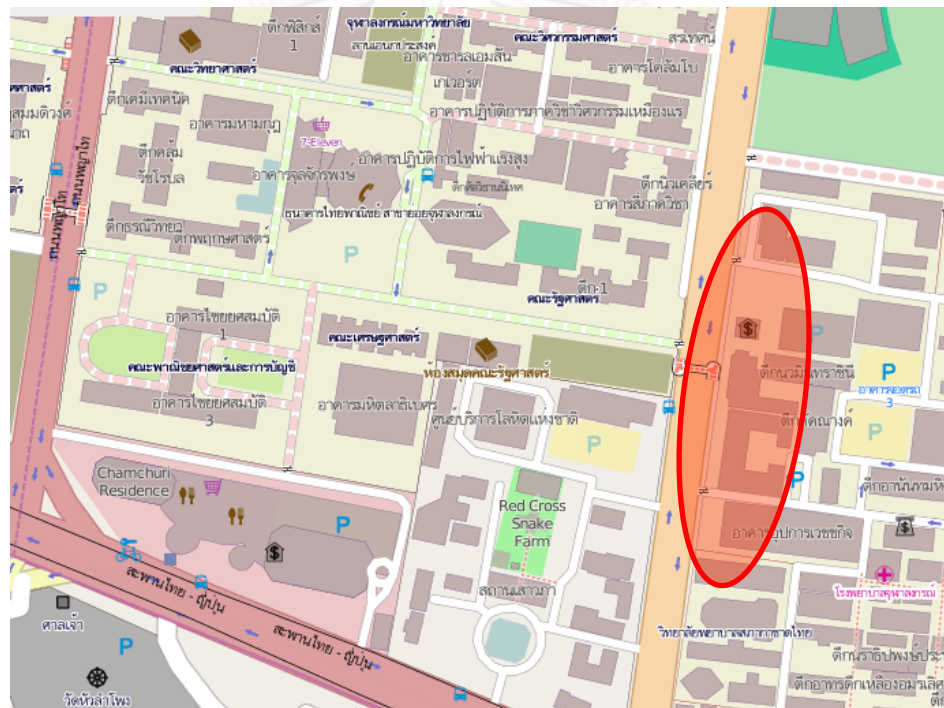
กรณีที่ 3 คำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีกำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ

กรณีที่ 4 คำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดด้วยการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรกและภาพสุดท้าย

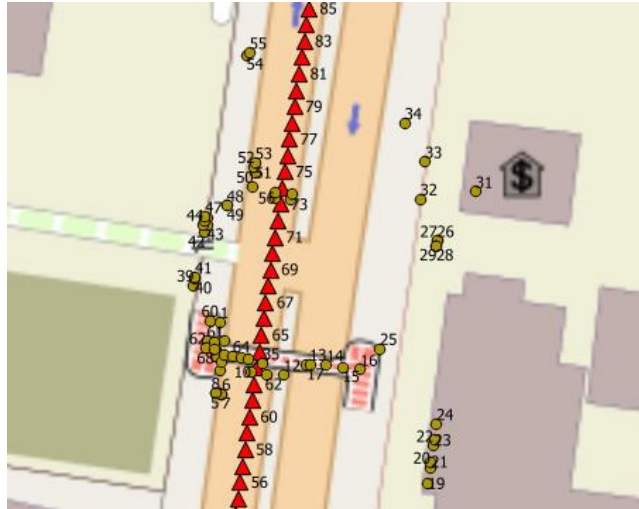
กรณีที่ 5 คำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์และมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ

พื้นที่สำหรับเก็บข้อมูลสนามและข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้บริเวณประตูด้านคณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนอังรีดูนัง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพพานอรามา และตำแหน่งของจุดควบคุมที่ได้จากการรังวัดพิกัดในสนาม การทดสอบใช้ภาพพานอรามาขนาด 5400 x 2700 จุดภาพ จำนวน 8 ภาพ เพื่อทดสอบการคำนวณ

สำหรับ กรณีที่ 1 ทำการคำนวณค่าพิกัดจุดวัดสอบจำนวน 20 จุด จากค่าการวางตัวภายนอกของภาพพานอรามาที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 4.6 แสดงพื้นที่สำหรับใช้เป็นพื้นที่วัดสอบ



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งข้อมูลภาพพานอรามา(สามเหลี่ยม) ตำแหน่งจุดควบคุม(วงกลม)

กรณีที่ 2 การทดสอบการหาค่าตำแหน่งวัตถุในภาพโดยการคำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีกำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในภาพแรกและภาพสุดท้าย จำนวนจุดผ่านและจุดควบคุมที่ปรากฏบนภาพแต่ละภาพที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีนี้ 2

		image number							
		65	66	67	68	70	71	72	73
Point number	1	o	o	o	o	o	o	o	o
	10	o	o	o	o	o	o	o	o
	14		o	o	o	o	o	o	o
	24		o	o	o	o	o	o	o
	25	o	o	o	o	o	o		
	26		o	o	o	o	o	o	o
	37	o	o	o	o	o	o		
	40	o	o	o	o	o	o	o	o
	44	o	o	o	o	o	o	o	o
	48						o	o	o
	57	o	o	o	o	o	o		
	61	o	o	o	o	o	o	o	o
	5	x							x
	17	x							x
	29								x
45	x							x	
56	x								

o จุดผ่าน
x จุดควบคุม

กรณีที่ 3 กรณีที่ 3 คำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีกำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ จำนวนจุดผ่านและจุดควบคุมที่ปรากฏบนภาพแต่ละภาพที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีที่ 3

		image number							
		65	66	67	68	70	71	72	73
Point number	1	o	o	o	o	o	o	o	o
	10	o	o	o	o	o	o	o	o
	14		o	o	o	o	o	o	o
	24		o	o	o	o	o	o	o
	25	o	o	o	o	o	o		
	26		o	o	o	o	o	o	o
	37	o	o	o	o	o	o		
	40	o	o	o	o	o	o	o	o
	44	o	o	o	o	o	o	o	o
	48						o	o	o
	57	o	o	o	o	o	o		
	61	o	o	o	o	o	o	o	o
	5	x	x	x	x	x	x	x	x
	17	x	x	x	x	x	x	x	x
	29		x	x	x	x	x	x	x
	45	x	x	x	x	x	x	x	x
56	x	x	x	x	x	x			

o	จุดผ่าน
x	จุดควบคุม

กรณีี่ 4 การทดสอบการหาค่าตำแหน่งวัตถุในภาพโดยการคำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้
การหมายจุดด้วยการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรกและภาพ
สุดท้าย จำนวนจุดผ่านและจุดควบคุมที่ปรากฏบนภาพแต่ละภาพที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีี่ 4

		image number							
		65	66	67	68	70	71	72	73
1	o	o							
4	o	o							
5	o	o							
12		o	o						
19		o	o						
20								o	o
25			o	o					
27		o	o						
38			o	o					
41				o	o				
45					o	o			
51					o	o			
62								o	o
67								o	o
68								o	o
53								o	o
57	o	o							
73				o	o				
81							o	o	
87							o	o	
88		o	o						
91		o	o	o					
94		o	o	o					
102					o	o			
107					o	o			
110					o	o			
125					o	o			
127							o	o	
5	x								x
17	x								x
29									x
45	x								x
56	x								

Point number

o	จุดผ่าน
x	จุดควบคุม

กรณีที่ 5 การทดสอบการหาค่าตำแหน่งวัตถุในภาพโดยการคำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์และมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ จำนวนจุดผ่านและจุดควบคุมที่ปรากฏบนภาพแต่ละภาพที่ทดสอบแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งของจุดผ่านและจุดควบคุมสำหรับกรณีที่ 5

		image number							
		65	66	67	68	70	71	72	73
1	o	o							
4	o	o							
5	o	o							
12		o	o						
19		o	o						
20								o	o
25			o	o					
27		o	o						
38			o	o					
41				o	o				
45					o	o			
51					o	o			
62								o	o
67								o	o
68								o	o
53								o	o
57	o	o							
73				o	o				
81							o	o	
87							o	o	
88		o	o						
91		o	o	o					
94		o	o	o					
102					o	o			
107					o	o			
110					o	o			
125					o	o			
127						o	o		
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x
17	x	x	x	x	x	x	x	x	x
29		x	x	x	x	x	x	x	x
45	x	x	x	x	x	x	x	x	x
56	x	x	x	x	x	x			

o จุดผ่าน
x จุดควบคุม

4.7 การแสดงภาพ และตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามา

เพื่อแสดงผลออกมาในรูปของภาพผู้วิจัยได้ใช้ภาษาไพธอน(Python) และโมดูลที่สามารถแสดงตำแหน่งของจุดที่สนใจในภาพบนภาพพานอรามา จำนวน 2 โมดูลดังนี้

[1] โมดูล Matplotlib

[2] โมดูล OpenCV

โดยการทดลองแบ่งดังนี้

- แสดงภาพพานอรามาด้วยโมดูล Matplotlib
- แสดงภาพพานอรามาด้วยโมดูล OpenCV
- แสดงตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามาด้วยโมดูล Matplotlib
- แสดงตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามาด้วยโมดูล OpenCV

บทที่ 5

ผลการศึกษา

5.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการพัฒนาสมการในข้อ 2.6 ได้สมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับภาพพานอรามาทรงกลม
สำหรับใช้คำนวณในงานวิจัยนี้ดังนี้

$$\mu = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_L) + R_{12}(Y_A - Y_L) + R_{13}(Z_A - Z_L)}{R_{21}(X_A - X_L) + R_{22}(Y_A - Y_L) + R_{23}(Z_A - Z_L)} \quad (2.28)$$

$$\nu = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_L) + R_{32}(Y_A - Y_L) + R_{33}(Z_A - Z_L)}{\sqrt{(X_A - X_L)^2 + (Y_A - Y_L)^2 + (Z_A - Z_L)^2}} \quad (2.29)$$

หรือแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับค่า x และ y ที่วัดได้ในภาพได้ดังสมการ (2.68) และ
สมการ(2.69)

$$\left(\frac{x}{15} - 180\right) = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_L) + R_{12}(Y_A - Y_L) + R_{13}(Z_A - Z_L)}{R_{21}(X_A - X_L) + R_{22}(Y_A - Y_L) + R_{23}(Z_A - Z_L)} \quad (2.68)$$

$$\frac{y}{15} = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_L) + R_{32}(Y_A - Y_L) + R_{33}(Z_A - Z_L)}{\sqrt{(X_A - X_L)^2 + (Y_A - Y_L)^2 + (Z_A - Z_L)^2}} \quad (2.69)$$

5.2 ผลการปรับการวางตัวของภาพด้วยเส้นตรงและเส้นโค้ง

การภาพทดสอบที่บันทึกภาพในแนวระดับในรูปที่ 5.1 และภาพที่บันทึกในแนวเอียงในรูปที่
5.2 เมื่อทำการปรับภาพที่บันทึกในแนวเอียงด้วยฟังก์ชัน set Z Axis ในซอฟต์แวร์ LadybugCapPro
ในชุดซอฟต์แวร์ SDK ของกล้อง Ladybug3 แล้วได้ผลดังรูปที่ 5.3 และขยายเปรียบเทียบในบริเวณ
เดียวกันในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.1 ภาพที่บันทึกในแนวระดับ



รูปที่ 5.2 ภาพที่บันทึกในแนวเอียง



รูปที่ 5.3 ภาพที่ปรับการวางตัวด้วยเส้นดิ่งในภาพ



ภาพในแนวระดับ

ภาพในแนวเอียง

ภาพที่ปรับแก้แล้ว

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบทั้ง 3 ภาพในบริเวณเดียวกัน

5.3 การคำนวณค่าพิกัดจุดควบคุม และจุดวัดสอบ

ในการคำนวณจุดวัดสอบในบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบผลการรังวัด ใช้กล้องสถานีรวมของ NIKON NPR-352 ในการรังวัดเก็บค่าพิกัดบนจุดควบคุมที่ได้ค่าจากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบสองความถี่ Trimble R7 คำนวณค่าพิกัดจุดควบคุม A1 และ A2 สำหรับออกงานโดยใช้จุดควบคุมในการรังวัดโดยมีจุด CU03 เป็นค่าพิกัดอ้างอิงได้ค่าพิกัดตั้งจุด A1 และ A2 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และได้ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพ และจุดวัดสอบแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าพิกัดจุดควบคุมสำหรับการใช้งานในการเก็บข้อมูลจุดควบคุมภาพ และจุดวัดสอบ

ID	E(m.)	N(m.)	Z(m.)	σ_E (m.)	σ_N (m.)	σ_Z (m.)
A1	665886.8006	1519008.669	-23.0971	0.008	0.006	0.012
A2	665878.5216	1518866.669	-23.2669	0.005	0.003	0.009

ตารางที่ 5.2 ค่าพิกัดของจุดควบคุม และจุดวัดสอบ

ID	E (m.)	N (m.)	Z (m.)	ID	E (m.)	N (m.)	Z (m.)
1	665862.215	1518849.072	-27.425	28	665901.998	1518863.294	-15.232
2	665861.597	1518844.188	-25.518	35	665870.116	1518841.569	-22.189
3	665861.401	1518842.806	-24.671	36	665862.322	1518840.217	-27.705
4	665861.394	1518842.731	-23.325	37	665862.527	1518841.700	-27.683
6	665862.651	1518835.936	-25.561	38	665863.001	1518845.712	-27.679
7	665862.624	1518835.932	-23.844	39	665857.314	1518855.793	-27.620
8	665861.481	1518836.119	-23.861	40	665857.497	1518856.998	-27.649
9	665861.502	1518836.117	-25.574	42	665859.299	1518865.455	-25.374
10	665867.977	1518839.963	-27.823	43	665859.640	1518866.800	-22.815
11	665870.950	1518839.616	-27.779	44	665859.027	1518866.890	-24.592
12	665873.976	1518839.456	-27.737	48	665863.299	1518870.415	-27.734
14	665881.875	1518841.311	-20.882	49	665863.308	1518870.408	-25.987
15	665884.863	1518840.940	-20.900	50	665868.154	1518873.951	-25.191
16	665888.141	1518840.531	-21.102	51	665868.432	1518876.485	-25.181
18	665878.838	1518841.394	-27.693	57	665872.348	1518872.977	-27.874
19	665900.698	1518819.769	-8.513	58	665875.106	1518871.509	-27.839
20	665901.101	1518822.734	-8.516	59	665875.265	1518872.728	-27.830
21	665901.245	1518823.723	-8.514	60	665860.347	1518849.343	-27.459
22	665901.656	1518826.697	-8.516	61	665859.796	1518845.591	-24.029
23	665901.803	1518827.695	-8.516	62	665859.637	1518844.329	-24.011
24	665902.215	1518830.657	-8.518	65	665866.076	1518842.650	-20.720
25	665891.732	1518844.424	-25.605	66	665867.570	1518842.464	-20.721
26	665902.119	1518864.219	-18.748	67	665861.265	1518845.411	-24.021
27	665902.119	1518864.211	-15.226	68	665861.095	1518844.145	-24.012

5.4 ผลการคำนวณหาค่าการวางตัวภายนอกภาพพานอรามา

การทดสอบข้อมูลจากกล้อง Ladybug3 โดยใช้ข้อมูลบริเวณสนามบาสเก็ตบอลเพื่อทดสอบแบบจำลองและวิธีการคำนวณ สำหรับคำนวณหาค่าการวางตัวภายนอกของกล้อง Ladybug3 ผลการคำนวณค่าการวางตัวด้วยวิธีการปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุดแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการปรับแก้เพื่อหาค่าการวางตัวภายนอก

EOP	Approx.	Adjusted
X0 (m.)	1000	1000.058
Y0 (m.)	500	500.021
Z0 (m.)	100	100.037
φ (deg.)	0	1.123
ω (deg.)	0	-1.502
κ (deg.)	0	0.008

จากการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ ในการคำนวณค่าการวางตัวภายนอกของตำแหน่งการบันทึกภาพด้วยกล้อง Ladybug3 โดยใช้ภาพพานอรามาจำนวน 8 ภาพ ได้แก่ภาพที่ 065, 066, 067, 068, 070, 071, 072 และ 073 ภาพที่ใช้มีขนาด 5400x2700 จุดภาพมีจุดควบคุมภาพจำนวน 5 จุดได้แก่จุดที่ 5, 17, 29, 45 และ 56 แบ่งเป็นจุดควบคุมบนภาพ 065 จำนวน 4 จุดได้แก่จุด 5, 17, 45 และ 56 ดังรูปที่ 5.5 และจุดควบคุมบนภาพ 073 จำนวน 4 จุดได้แก่ 5, 17, 29 และ 45 ดังรูปที่ 5.6 สำหรับคำนวณหาค่าการวางตัวภายนอกโดยตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้จุดวัดสอบจากภาพจำนวน 50 จุดแสดงตัวอย่างตำแหน่งจุดวัดสอบบนภาพที่ 067 ในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างจุดควบคุมภาพบนภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ภาพที่ 065



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างจุดควบคุมภาพบนภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ภาพที่ 073



รูปที่ 5.7 ตำแหน่งจุดวัดสอบบนภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3 ภาพที่ 067

ค่าการวางตัวภายนอกที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่จากภาพที่ใช้ทดสอบมีค่าดังตารางที่ 5.4 และค่าการวางตัวภายนอกที่ได้จากการคำนวณจากจุดควบคุมด้วยวิธีบล็อกลำแสงมีค่าดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 ค่าการวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

Frame No	X0 (m.)	Y0 (m.)	Z0 (m.)	ω (degree)	ϕ (degree)	κ (degree)
65	665869.843	1518844.365	-24.995	-0.3684	-1.0182	260.1719
66	665870.241	1518847.337	-25.019	0.0836	-1.1894	260.2103
67	665870.648	1518850.335	-25.020	0.0053	-1.2524	260.2647
68	665871.050	1518853.346	-25.013	-0.2617	-1.7247	260.3088
70	665871.898	1518859.306	-25.066	0.3858	-1.0164	260.3094
71	665872.310	1518862.304	-25.035	-0.1133	-1.0975	260.3770
72	665872.731	1518865.310	-25.035	0.0183	-0.9701	260.3621
73	665873.150	1518868.295	-25.032	0.1071	-0.8836	260.4085

หมายเหตุ ค่า X0, Y0 และ Z0 อยู่ในระบบพิกัด UTM

ตารางที่ 5.5 ค่าการวางตัวภายนอกจากการคำนวณจากภาพด้วยวิธี Bundle block adjustment

Frame No	X0 (m.)	Y0 (m.)	Z0 (m.)	ω (degree)	ϕ (degree)	κ (degree)
65	665869.767	1518844.315	-24.905	1.1002	-0.9356	259.9150
66	665870.203	1518847.358	-24.968	1.0923	-0.5518	259.8452
67	665870.618	1518850.360	-24.965	0.8980	-0.5282	259.5783
68	665871.007	1518853.377	-25.979	1.4996	-1.0461	259.9327
70	665871.846	1518859.301	-25.019	1.1629	-0.1255	259.9219
71	665872.267	1518862.331	-24.983	0.9757	-0.6200	259.7130
72	665872.654	1518865.301	-25.039	1.0556	-0.5920	259.9307
73	665873.211	1518868.255	-25.024	0.9098	-0.5480	260.2412

หมายเหตุ ค่า X0, Y0 และ Z0 อยู่ในระบบพิกัด UTM

5.5 ผลการจับคู่ภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์

ด้วยวิธี FAST, SIFT และ SURF ได้ทดลองเปรียบเทียบการค้นหาจุดสนใจในภาพพานอรามา ได้ผลดังรูปที่ 5.8 แสดงภาพพานอรามาที่ใช้ทดสอบกระบวนการหาจุดสนใจในภาพผลลัพธ์ของการหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธีการ FAST, SIFT และ SURF แสดงในรูปที่ 5.9 รูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ



รูปที่ 5.8 ภาพทดสอบจากกล้อง Ladybug3



รูปที่ 5.9 ผลการหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี FAST



รูปที่ 5.10 ผลการหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี SIFT



รูปที่ 5.11 ผลการหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี SURF

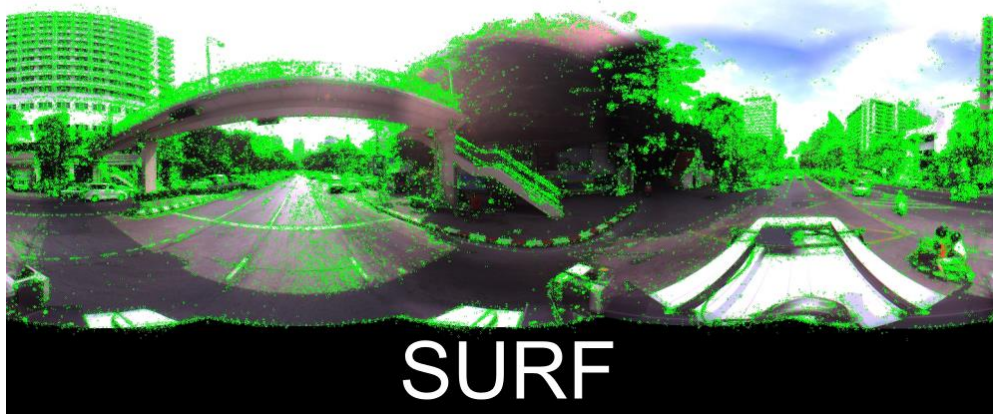
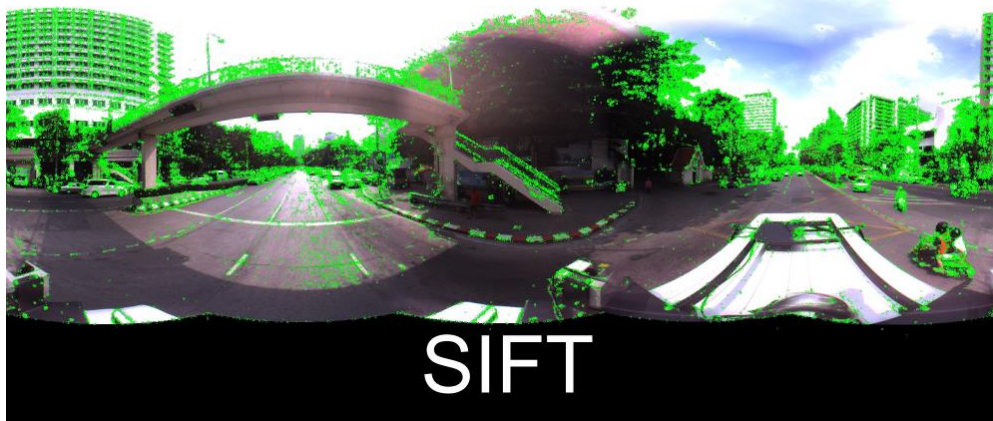
เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณและผลลัพธ์ของการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.6 และรูปภาพแสดงในรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบเวลาและจำนวนจุดในแต่ละวิธีการค้นหาจุดเด่นชัดในภาพ

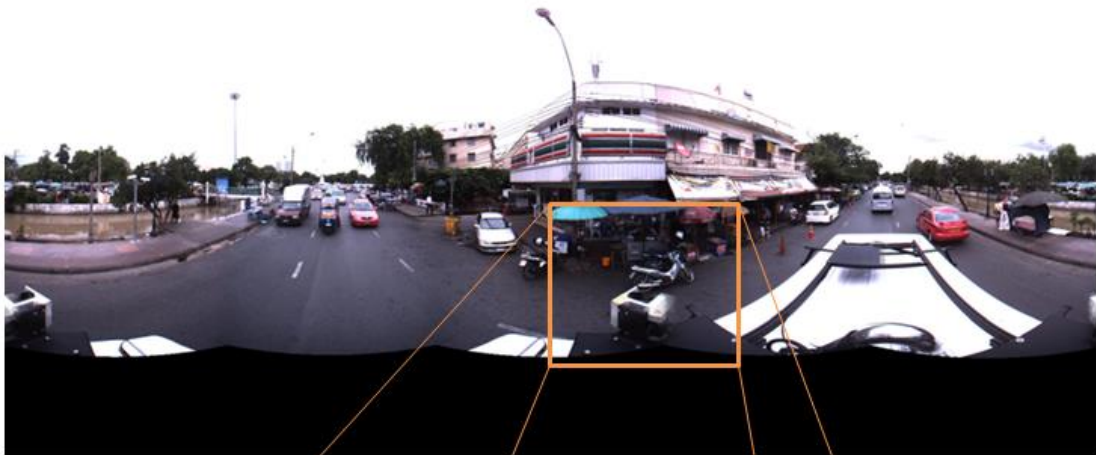
ครั้งที่	วิธี	FAST		SIFT		SURF	
		เวลา(วินาที)	จำนวนจุด	เวลา(วินาที)	จำนวนจุด	เวลา(วินาที)	จำนวนจุด
1		0.057	48898	15.726	22763	7.944	36039
2		0.057	48898	15.356	22763	7.957	36039
3		0.057	48898	15.260	22763	7.899	36039
4		0.058	48898	15.304	22763	8.087	36039
5		0.056	48898	15.332	22763	7.709	36039
	เฉลี่ย	0.057	48898	15.396	22763	7.919	36039

จากตารางที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการค้นหาจุดเด่นชัดในภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ มีความน่าเชื่อถือในการหาจำนวนจุดของแต่ละวิธี โดยจากการทดสอบภาพเดียวกันจำนวนวิธีละ 5 ครั้งจำนวนจุดที่ค้นหาได้เท่ากันทุกครั้ง และเวลาในการใช้ในการคำนวณแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ด้วยข้อจำกัดของภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3 ที่บริเวณรอยต่อของภาพแต่ละเฟรมของกล้องจะต่อกันสนิทที่ระยะใดระยะหนึ่งซึ่งต้องกำหนดก่อนการประกอบภาพในการทดลองนี้ใช้ค่ามาตรฐานที่ระยะ 20 เมตรวัตถุในภาพที่อยู่ใกล้ หรือไกลกว่า 20 เมตรจะทำให้เกิดการเหลื่อมในภาพพานอรามาที่ประกอบเสร็จจากระบบของกล้อง Ladybug3 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.13

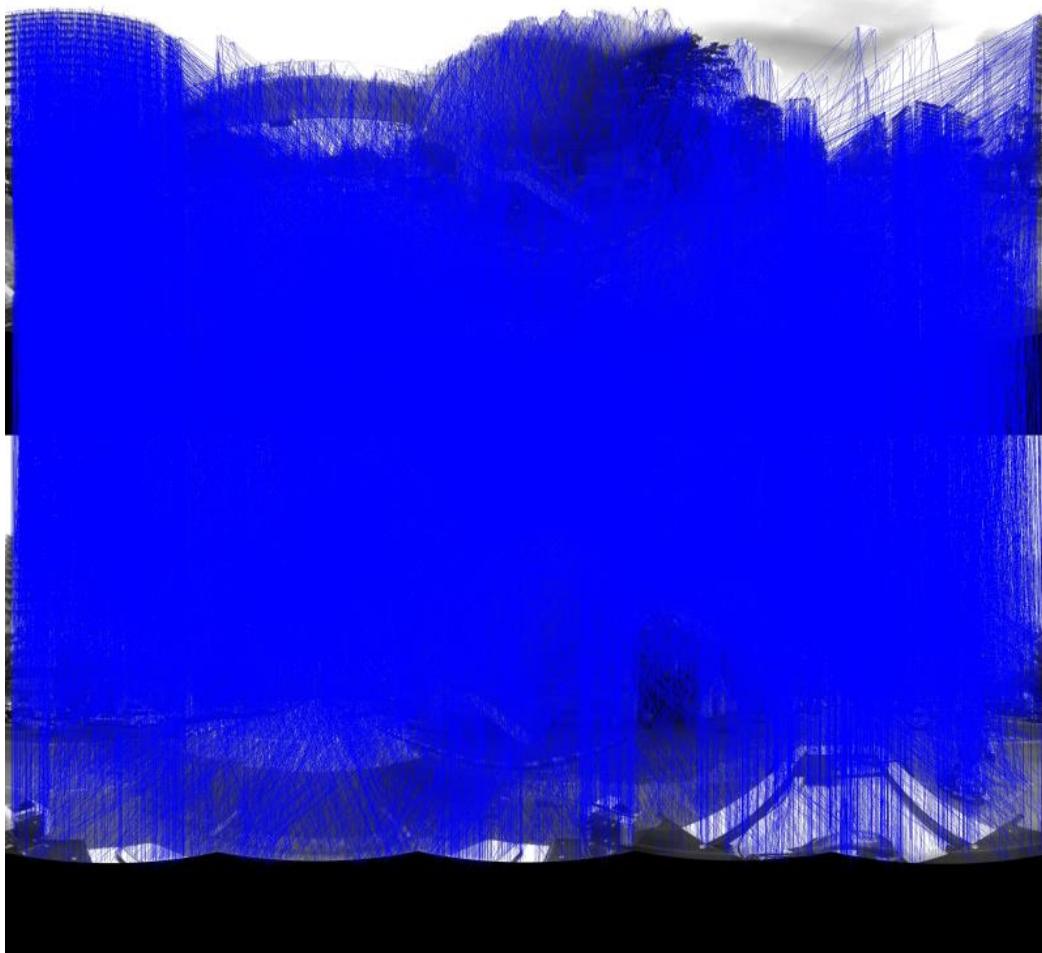


รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบการหาจุดเด่นชัดในภาพพานอรามา



รูปที่ 5.13 การเชื่อมต่อในรอยต่อของภาพพานอรามาจากกล้อง Ladybug3

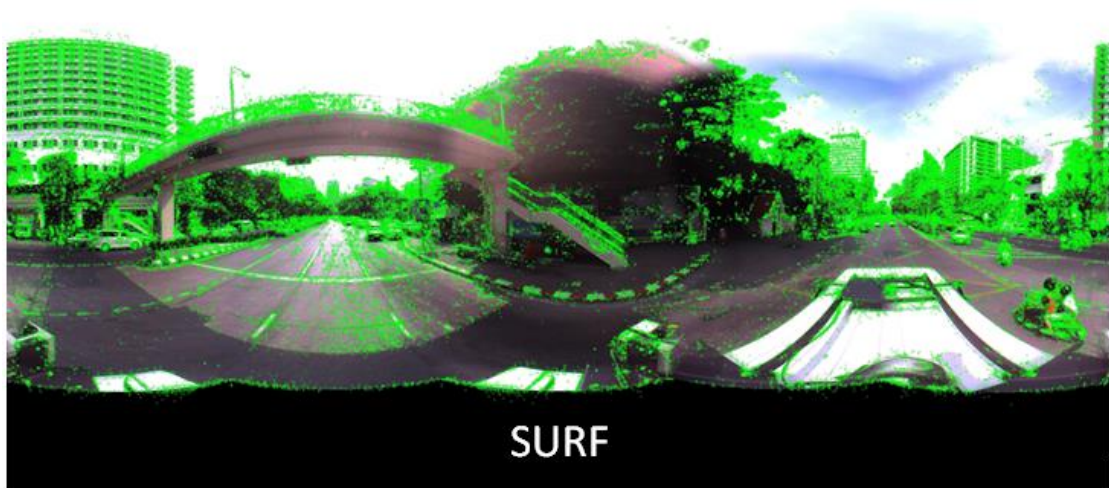
ผลการจับคู่ด้วยวิธีด้วยวิธี FLANN บนภาพพานอรามาทรงกลม 2 ภาพได้ผลดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ผลการจับคู่ภาพด้วยวิธี FLANN

5.6 ผลการลดความคลาดเคลื่อนในการจับคู่ภาพ

ผลการค้นหาจุดในภาพพานอรามาทรงกลมพร้อมใช้หน้ากากกรองด้วยวิธี SURF แสดงในรูปที่ 5.15 เปรียบเทียบกับการไม่ใช้หน้ากากกรอง



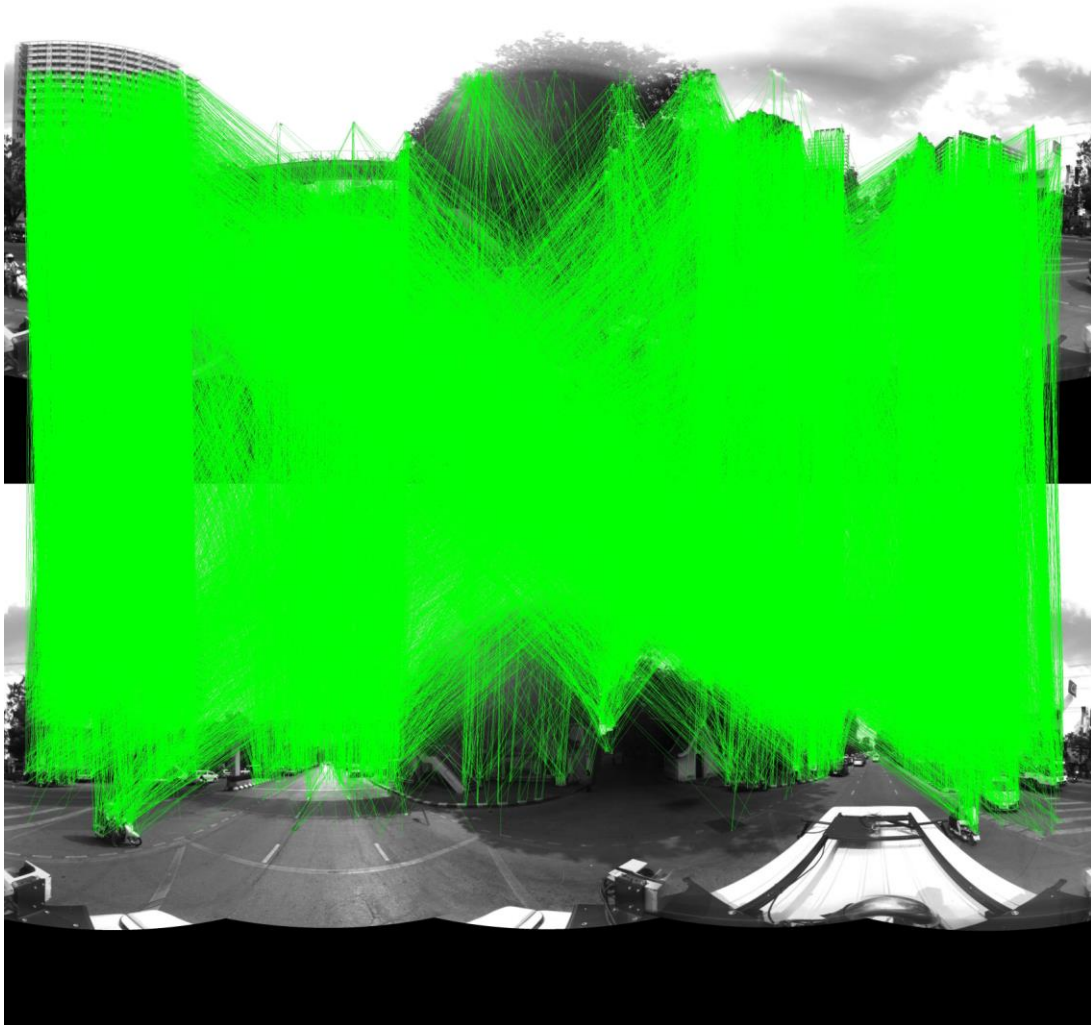
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี SURF แบบไม่ใช้ และใช้หน้ากากกรอง

การใช้หน้ากากกรองทำให้พื้นที่การค้นหาจุดสนใจลดลงส่งผลให้เวลาในการค้นหาลดลงด้วย ดังแสดงผลลัพธ์ด้านเวลา และจำนวนจุดสนใจในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบจำนวนจุด และเวลาที่ใช้ในการค้นหาจุดสนใจในภาพด้วย
วิธี SURF และวิธี SURF ร่วมกับหน้ากากกรอง

ครั้งที่	วิธี	SURF		SURF + Mask	
		เวลา (วินาที)	จำนวนจุด	เวลา (วินาที)	จำนวนจุด
1		7.944	36039	5.725	21438
2		7.957	36039	5.697	21438
3		7.899	36039	5.662	21438
4		8.087	36039	5.599	21438
5		7.709	36039	5.724	21438
	เฉลี่ย	7.919	36039	5.681	21438

การจับคู่ภาพด้วยวิธี FLANN ที่อาศัยจุดสนใจ และลักษณะเด่นของจุดในภาพทำการจับคู่แต่ละจุดได้ตัวอย่างการจับคู่ภาพที่ 068 และ 069 ผลการจับคู่ได้ทั้งหมด 32706 คู่ ดังแสดงในรูปเส้นเชื่อมโยงคู่จุดที่จับคู่ได้ในรูปที่ 5.16



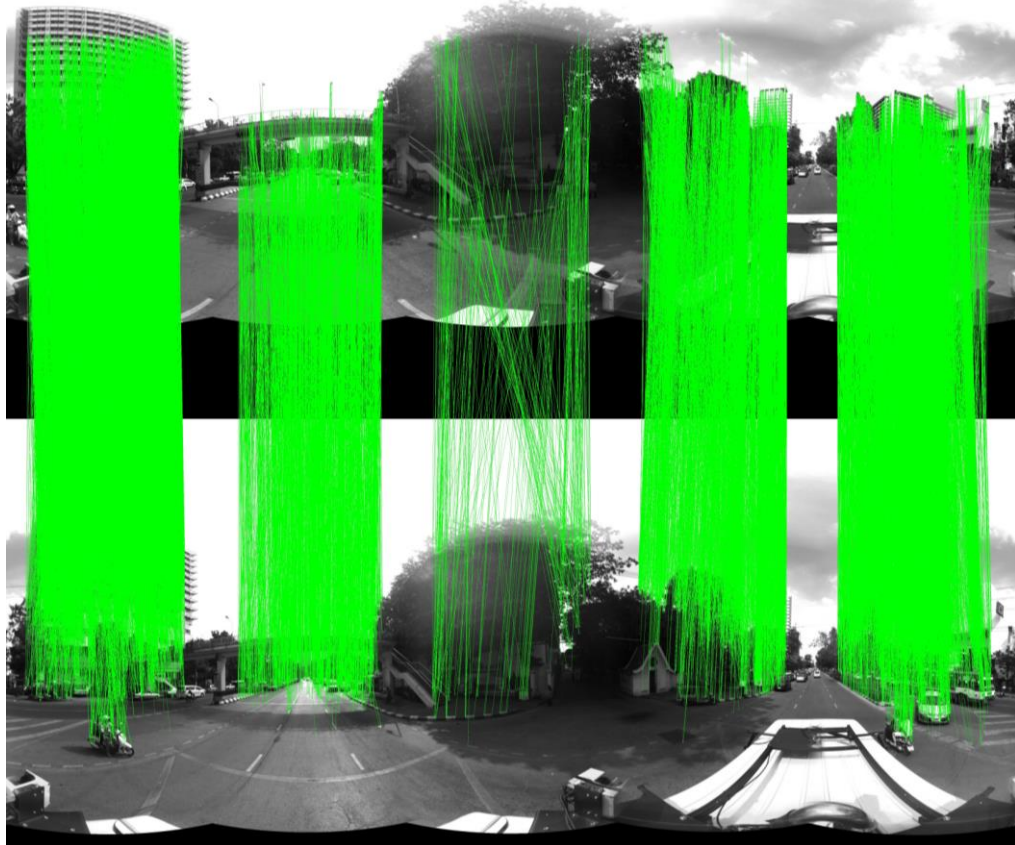
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างผลการจับคู่จุดสนใจในภาพด้วยวิธี FLANN

จากการจับคู่จุดสนใจในภาพด้วยวิธี FLANN (รูปที่ 5.16) เห็นได้ว่าการจับคู่จุดที่มีการไขว้ของเส้นในภาพซึ่งการจับคู่ภาพของภาพลักษณะที่มีการเคลื่อนที่ในระยะ 3 เมตรจากข้อมูลในระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ การจับคู่ควรอยู่ในโซนที่มีตำแหน่งตรงกันไม่ข้ามโซน ดังนั้นการจับคู่จุดสนใจในที่ข้ามโซนจึงถือว่าการจับคู่ที่ผิด เพื่อการแก้ไขการจับคู่ที่ผิดจึงได้พัฒนาหน้ากการกรองเพิ่มขึ้นโดยการกำหนดชื่อให้กับโซนแต่ละโซน โดยกำหนดชื่อโซนตามชื่อของหน้ากล้องที่ใช้บันทึกภาพโดยวิธีกำหนดนั้นในเทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าตัวเลขความสว่างจุดภาพ(digital number, DN) ที่ใช้แสดงสีขาของแต่ละโซน เนื่องจากภาพของหน้ากการกรองเป็นภาพขาวดำแบบ 8 บิตมีช่วงของตัวเลขที่ใช้แสดงสีจากสีดำไปยังสีขาว 256 ค่าโดยเริ่มจาก 0 ถึง 255 การกำหนดสีขาที่ใช้ในหน้ากการกรองกำหนดดัง ตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ค่าตัวเลขความสว่างจุดภาพในแต่ละโซนของหน้าากกรอง

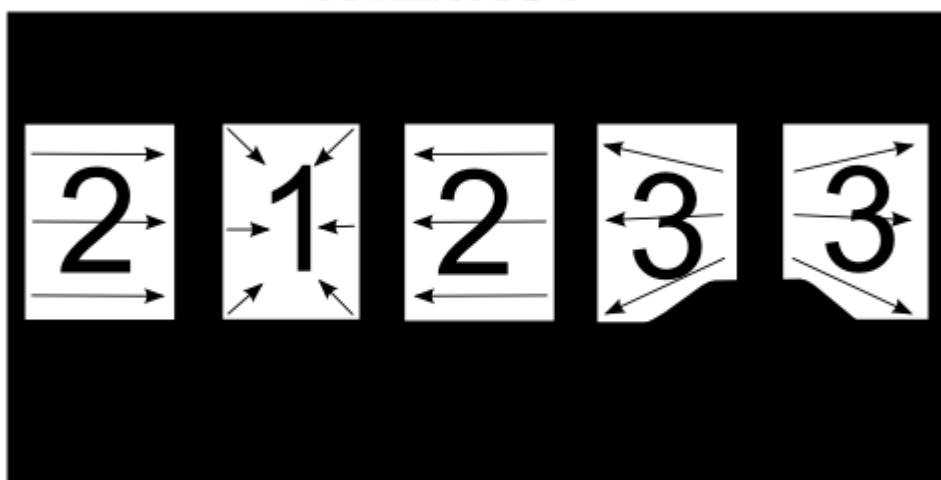
โซน	ค่าตัวเลขดิจิทัล
1	254
2	253
3	252
4	251
5	250

ในการใช้งานเมื่อเลือกจุดที่ต้องการจับคู่แล้วจะทำการดึงเอาค่าตัวเลขดิจิทัลที่ตำแหน่งเดียวกันบนภาพหน้าากกรอง โดยเอาตัวเลข 255 ตั้งลบด้วยค่าที่อ่านได้จะได้จะเป็นชื่อโซนโดยจุดที่ถือว่าจับคู่ได้นั้นกำหนดให้ต้องอยู่ในโซนเดียวกันหากไม่อยู่ในโซนเดียวกันจะทำการคัดออกดังตัวอย่างต่อเนื่องหลังจากการจับคู่ภาพที่ 068 และ 069 แล้วทำการกรองด้วยการเลือกเฉพาะจุดที่อยู่ในโซนเดียวกันได้ผลดังรูปที่ 5.17 ผลการกรองจุดที่จับคู่ได้ลดลงจาก 32706 คู่ เหลือ 18372 คู่



รูปที่ 5.17 ผลการจับคู่หลังทำการกรองด้วยโซน

ภาพที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดลองภาพถูกบันทึกทุกๆ ระยะเคลื่อนที่ 3 เมตร จุดบนภาพมีการเลื่อนที่ในภาพแต่ละเฟรมโดยทิศทางการเลื่อนของจุดเดียวกันบนภาพ และภาพถัดไปแสดงในรูปสัญลักษณ์ในแต่ละโซนในรูปที่ 5.18 โดยทิศทางการเลื่อนที่แบ่งได้ 3 แบบตามตัวเลขที่ปรากฏในภาพโดยแต่ละแบบมีการกำหนดไว้เป็นช่วงระยะโดยหลักเลี้ยวระยะที่ไกลมากๆ(การเลื่อนของจุดภาพจะน้อย) และระยะที่ใกล้มากๆ(การเลื่อนของจุดภาพจะมาก) แสดงค่าช่วงระยะในตารางที่ 5.9

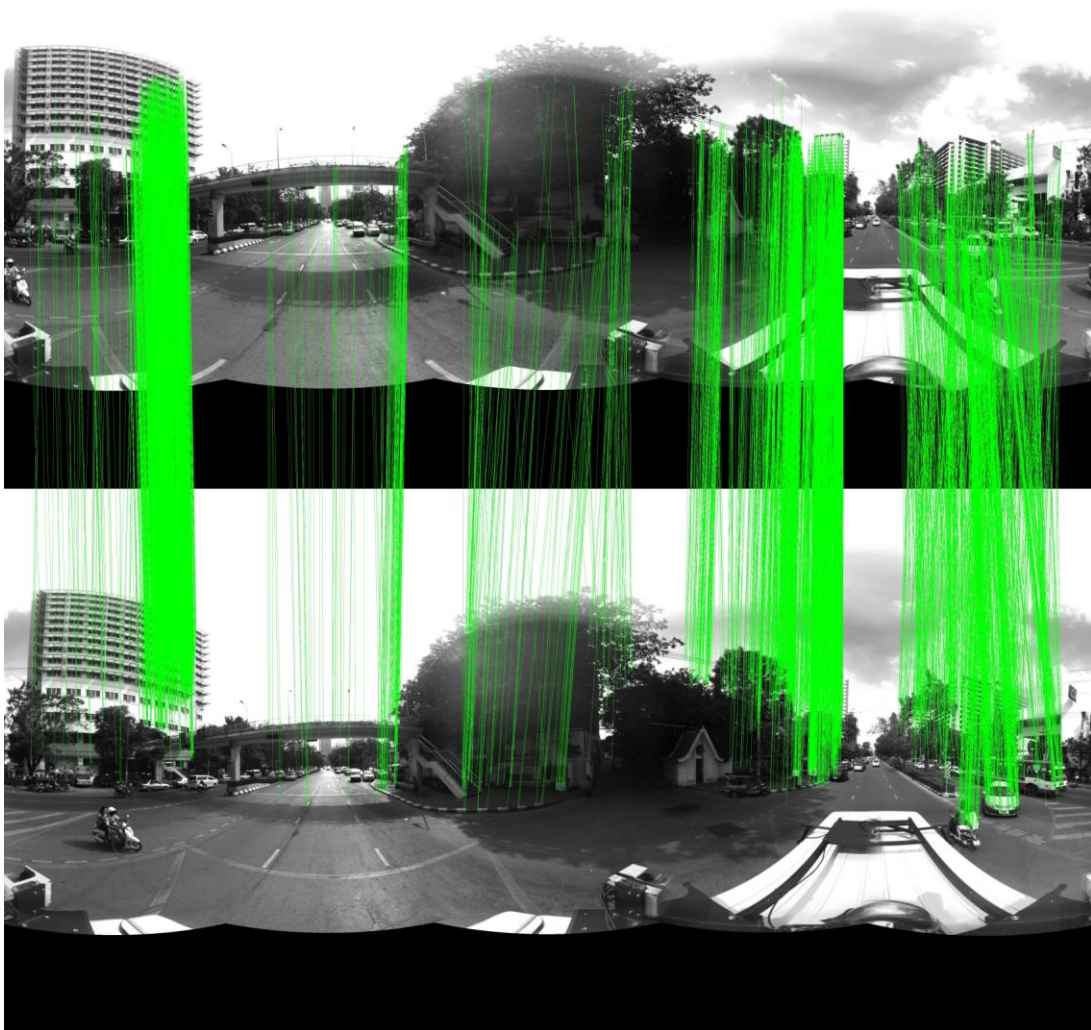


รูปที่ 5.18 ทิศทางการเคลื่อนที่ของจุดภาพในแต่ละโซน

ตารางที่ 5.9 ค่าจำนวนจุดภาพต่ำสุดและสูงสุดในการตรวจสอบการเลื่อนของจุดภาพ

ช่วงที่	ค่าต่ำสุด (จุดภาพ)	ค่าสูงสุด (จุดภาพ)
1	30	100
2	150	300
3	50	70

ค่าที่กำหนดในการตรวจสอบการเลื่อนของจุดภาพนี้ใช้สำหรับคัดกรองโดยตั้งอยู่ในสมมุติฐานที่ว่า การเลื่อนของจุดในตำแหน่งเดียวกันของคู่ภาพติดกันจะอยู่ในระยะที่กำหนดนี้ หากอยู่นอกระยะนี้จะทำการตัดออกโดย คู่ภาพที่ตัดออกจะถือว่าเป็นจุดที่จับคู่ไม่ถูกต้องแสดงตัวอย่างต่อเนื่อง ในรูปที่ 5.19 ภาพที่ผ่านการกรองด้วยโซนแล้วนำมากรองด้วยการตรวจสอบการเลื่อนของจุดภาพ ผลที่ได้คือจุดภาพลดลงเหลือ 4252 คู่จาก 18372 คู่



รูปที่ 5.19 ผลการจับคู่หลังกรองด้วยการเลื่อนของจุดภาพ

ทำการกรองจุดที่ซ้อนทับกันและจุดที่อยู่ใกล้กันเพื่อลดจำนวนจุดที่จับคู่ได้ด้วยวิธีการกำหนดระยะห่างรอบจุดโดยการกำหนดเป็นรัศมี ในรูปที่ 5.20 แสดงตัวอย่างต่อเนื่องภายหลังการกรองด้วยการเลื่อนของจุดภาพแล้ว ทำการกรองด้วยการกำหนดระยะห่างรอบจุดโดยกำหนดระยะห่างที่ 200

จุดภาพผลที่ได้คือคงเหลือจุดภาพจำนวน 44 คู่และกระจายอยู่ในทั้ง 5 โซน เพื่อใช้ในการคำนวณเป็นจุดผ่านในการคำนวณด้วยวิธีบล็อกลำแสงต่อไป



รูปที่ 5.20 ผลจากการกรองด้วยระยะห่างรอบจุด

ผลการจับคู่ภาพที่ได้ถูกนำไปใช้เป็นจุดผ่านในการคำนวณปรับแก้แบบบล็อกลำแสงเพื่อคำนวณหาพิกัดของจุดวัดสอบต่อไป

5.7 ผลการหาค่าตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามา

ผลการคำนวณค่าพิกัดตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามาของจุดที่ใช้เป็นจุดวัดสอบโดยตามการทดสอบทั้ง 5 กรณีแสดงผลดังนี้

กรณีที่ 1 ผลการคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกที่ได้จากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่เมื่อใช้คำนวณจุดวัดสอบแล้วได้ผลดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

Point ID	Position			Standard deviation		
	E (m.)	N (m.)	Z (m.)	σ_E (m.)	σ_N (m.)	σ_Z (m.)
2	665861.510	1518844.171	-25.310	0.074	0.043	0.027
3	665861.221	1518842.737	-24.428	0.082	0.056	0.029
6	665862.339	1518835.679	-25.245	0.158	0.247	0.039
7	665862.255	1518835.524	-23.512	0.158	0.249	0.048
8	665861.165	1518835.787	-23.510	0.159	0.220	0.047
9	665861.264	1518835.913	-25.234	0.158	0.219	0.040
11	665870.783	1518840.174	-27.494	0.023	0.103	0.047
15	665884.814	1518840.931	-21.009	0.134	0.125	0.060
18	665878.577	1518841.398	-27.694	0.085	0.106	0.044
21	665901.311	1518823.908	-8.598	0.532	0.567	0.306
22	665901.643	1518826.792	-8.718	0.499	0.481	0.283
27	665902.379	1518864.087	-15.734	0.329	0.087	0.123
28	665902.106	1518863.171	-15.804	0.320	0.081	0.120
42	665859.415	1518865.504	-25.286	0.076	0.045	0.033
43	665859.845	1518866.878	-22.777	0.096	0.050	0.039
49	665863.423	1518870.410	-26.008	0.069	0.058	0.031
50	665868.323	1518873.805	-25.312	0.061	0.108	0.027
58	665875.432	1518872.404	-28.358	0.137	0.491	0.127
59	665875.607	1518873.735	-28.357	0.165	0.631	0.145
60	665860.294	1518849.361	-27.233	0.075	0.038	0.034

กรณีที่ 2 ผลการคำนวณที่ได้การคำนวณจากภาพพานอรามาที่ใช้การหมายจุดผ่านด้วยวิธีกำหนดเอง และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้ายแสดงในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่กำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้าย

Point ID	Position			Standard deviation		
	E (m.)	N (m.)	Z (m.)	σ_E (m.)	σ_E (m.)	σ_E (m.)
2	665861.650	1518844.178	-25.495	0.016	0.009	0.006
3	665861.397	1518842.773	-24.649	0.018	0.012	0.006
6	665862.624	1518835.953	-25.501	0.033	0.053	0.009
7	665862.643	1518835.995	-23.833	0.033	0.052	0.009
8	665861.530	1518836.151	-23.843	0.033	0.047	0.009
9	665861.551	1518836.143	-25.513	0.034	0.047	0.009
11	665870.941	1518839.738	-27.729	0.006	0.025	0.011
15	665884.814	1518841.009	-20.925	0.029	0.027	0.013
18	665878.791	1518841.398	-27.713	0.019	0.023	0.010
21	665901.155	1518824.024	-8.534	0.116	0.123	0.067
22	665901.468	1518826.901	-8.611	0.108	0.105	0.062
27	665902.002	1518864.157	-15.187	0.071	0.019	0.028
28	665901.741	1518863.246	-15.270	0.069	0.018	0.027
42	665859.319	1518865.407	-25.378	0.017	0.010	0.007
43	665859.658	1518866.767	-22.850	0.021	0.011	0.009
49	665863.296	1518870.384	-26.012	0.015	0.013	0.007
50	665868.143	1518873.940	-25.227	0.014	0.024	0.006
58	665875.072	1518871.431	-27.827	0.028	0.101	0.025
59	665875.202	1518872.570	-27.791	0.033	0.129	0.028
60	665860.400	1518849.332	-27.429	0.016	0.008	0.008

กรณีที่ 3 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อก
ลำแสงจากจุดผ่านที่กำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพแสดงผลในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อก
ลำแสงจากจุดผ่านที่กำหนดเองและมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ

Point ID	Position			Standard deviation		
	E (m.)	N (m.)	Z (m.)	σ_E (m.)	σ_E (m.)	σ_E (m.)
2	665861.637	1518844.180	-25.494	0.016	0.010	0.006
3	665861.386	1518842.773	-24.649	0.018	0.012	0.006
6	665862.620	1518835.945	-25.507	0.034	0.054	0.009
7	665862.640	1518835.988	-23.836	0.034	0.054	0.010
8	665861.527	1518836.145	-23.847	0.034	0.048	0.010
9	665861.46	1518836.136	-25.518	0.034	0.048	0.009
11	665870.946	1518839.736	-27.735	0.006	0.025	0.012
15	665884.797	1518841.051	-20.925	0.030	0.028	0.013
18	665878.779	1518841.444	-27.704	0.019	0.024	0.010
21	665901.164	1518824.061	-8.539	0.119	0.127	0.069
22	665901.474	1518826.938	-8.613	0.112	0.108	0.064
27	665901.981	1518864.199	-15.158	0.073	0.020	0.029
28	665901.720	1518863.286	-15.243	0.071	0.018	0.028
42	665859.310	1518865.402	-25.365	0.017	0.010	0.007
43	665859.644	1518866.759	-22.842	0.022	0.011	0.009
49	665863.282	1518870.370	-25.996	0.016	0.013	0.007
50	665868.113	1518873.921	-25.212	0.014	0.025	0.006
58	665875.037	1518871.445	-27.799	0.028	0.103	0.025
59	665875.167	1518872.586	-27.762	0.034	0.133	0.028
60	665860.392	1518849.344	-27.425	0.017	0.009	0.008

กรณีที่ 4 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้ายแสดงผลในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้าย

Point ID	Position			Standard deviation		
	E (m.)	N (m.)	Z (m.)	σ_E (m.)	σ_N (m.)	σ_Z (m.)
2	665861.746	1518844.153	-25.540	0.079	0.046	0.030
3	665861.528	1518842.790	-24.709	0.087	0.059	0.031
6	665862.937	1518836.409	-25.546	0.164	0.260	0.042
7	665862.960	1518836.461	-23.945	0.162	0.256	0.045
8	665861.823	1518836.510	-23.948	0.165	0.230	0.046
9	665861.838	1518836.493	-25.565	0.166	0.231	0.043
11	665870.995	1518839.186	-27.978	0.031	0.134	0.059
15	665884.839	1518841.088	-21.018	0.146	0.134	0.065
18	665878.824	1518841.490	-27.754	0.094	0.114	0.049
21	665901.069	1518824.339	-8.811	0.575	0.609	0.329
22	665901.399	1518826.165	-8.863	0.539	0.517	0.306
27	665901.929	1518864.219	-15.255	0.355	0.095	0.138
28	665901.308	1518863.308	-15.339	0.345	0.089	0.135
42	665859.411	1518865.411	-25.359	0.084	0.049	0.036
43	665859.773	1518866.773	-22.825	0.108	0.055	0.043
49	665863.381	1518870.381	-25.998	0.077	0.064	0.034
50	665868.950	1518873.950	-25.227	0.069	0.122	0.031
58	665874.824	1518870.714	-27.652	0.126	0.461	0.114
59	665874.920	1518871.681	-27.596	0.149	0.583	0.127
60	665860.286	1518849.246	-27.487	0.083	0.043	0.038

กรณีที่ 5 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ และมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพแสดงผลในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ผลการหาค่าตำแหน่งจุดวัดสอบคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากวิธีบล็อกลำแสงจากจุดผ่านที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ และมีจุดควบคุมภาพในทุกภาพ

Point ID	Position			Standard deviation		
	E (m.)	N (m.)	Z (m.)	σ_E (m.)	σ_N (m.)	σ_Z (m.)
2	665861.704	1518844.170	-25.504	0.076	0.043	0.028
3	665861.477	1518842.800	-24.669	0.083	0.056	0.029
6	665862.830	1518835.309	-25.504	0.157	0.248	0.040
7	665862.853	1518835.361	-23.888	0.155	0.245	0.043
8	665861.725	1518836.441	-23.893	0.158	0.219	0.044
9	665861.739	1518836.422	-25.522	0.158	0.221	0.041
11	665870.949	1518839.329	-27.890	0.028	0.124	0.055
15	665884.809	1518841.033	-20.968	0.139	0.128	0.062
18	665878.762	1518841.471	-27.714	0.089	0.109	0.046
21	665901.153	1518824.111	-8.628	0.550	0.585	0.316
22	665901.480	1518826.962	-8.690	0.516	0.496	0.294
27	665901.127	1518864.211	-15.136	0.340	0.091	0.133
28	665901.861	1518863.962	-15.223	0.331	0.085	0.130
42	665859.271	1518865.413	-25.367	0.079	0.047	0.035
43	665859.624	1518866.767	-22.849	0.101	0.052	0.041
49	665863.275	1518870.364	-26.000	0.073	0.060	0.032
50	665868.119	1518873.859	-25.224	0.065	0.114	0.029
58	665875.990	1518871.265	-27.756	0.128	0.466	0.114
59	665875.109	1518872.351	-27.712	0.152	0.594	0.128
60	665860.300	1518849.272	-27.458	0.079	0.040	0.036

5.8 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งของวัตถุ

การตรวจสอบค่าพิกัดตำแหน่งของวัตถุใช้ค่าพิกัดจุดวัดสอบที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่รังวัดในสนามด้วยกล้องสถานีรวมคำนวณผลออกมาในรูปค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยหรือ RMSE (Root Mean Square Error) ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตำแหน่งของวัตถุแบ่งตามกรณีทดสอบทั้ง 5 กรณี แสดงดังตารางที่ 5.15 สรุปได้ดังนี้

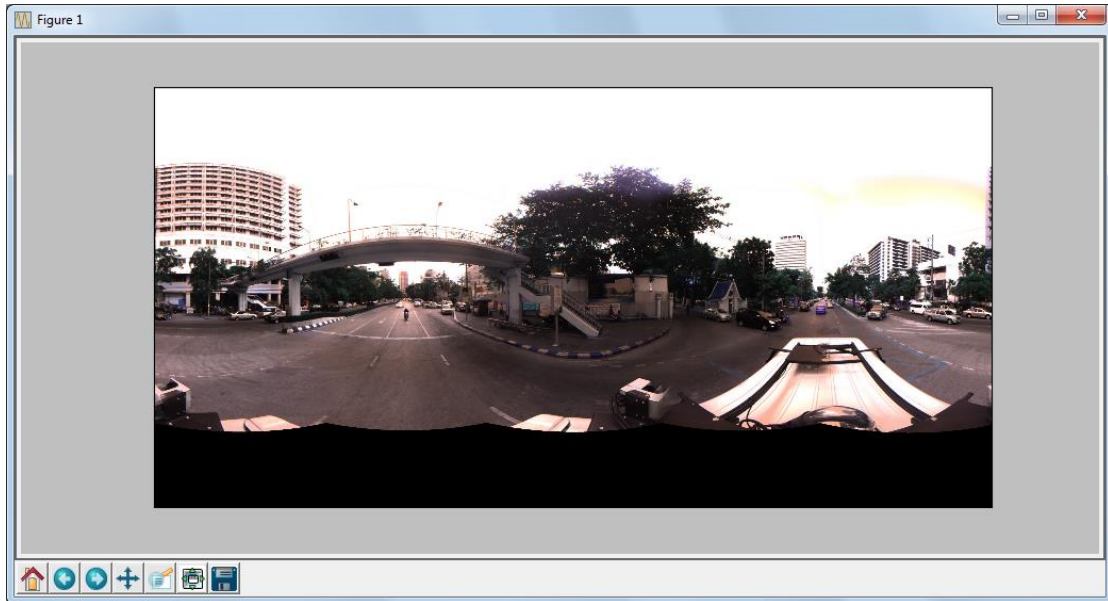
ค่า RMSE ของกรณีที่ 1 เท่ากับ ± 0.216 ม., ± 0.357 ม. และ ± 0.308 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ค่า RMSE ของกรณีที่ 2 เท่ากับ ± 0.079 ม., ± 0.099 ม. และ ± 0.039 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ค่า RMSE ของกรณีที่ 3 เท่ากับ ± 0.081 ม., ± 0.106 ม. และ ± 0.040 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ค่า RMSE ของกรณีที่ 4 เท่ากับ ± 0.214 ม., ± 0.409 ม. และ ± 0.130 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ และค่า RMSE ของกรณีที่ 5 เท่ากับ ± 0.128 ม., ± 0.224 ม. และ ± 0.070 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ

ตารางที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของจุดวัดสอบในแต่ละกรณีศึกษา

Point ID	กรณีที่ 1			กรณีที่ 2			กรณีที่ 3			กรณีที่ 4			กรณีที่ 5		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
2	-0.086	-0.017	0.208	0.053	-0.010	0.023	0.040	-0.008	0.023	0.150	-0.036	-0.023	0.108	-0.018	0.014
3	-0.180	-0.070	0.243	-0.003	-0.033	0.022	-0.015	-0.033	0.022	0.127	-0.016	-0.038	0.077	-0.006	0.002
6	-0.312	-0.257	0.315	-0.027	0.017	0.060	-0.031	0.009	0.054	0.286	0.474	0.015	0.179	0.373	0.056
7	-0.370	-0.409	0.332	0.019	0.062	0.011	0.015	0.056	0.008	0.335	0.528	-0.101	0.228	0.429	-0.043
8	-0.316	-0.332	0.351	0.050	0.032	0.018	0.046	0.026	0.014	0.342	0.392	-0.087	0.244	0.322	-0.032
9	-0.238	-0.204	0.340	0.048	0.026	0.061	0.044	0.019	0.056	0.336	0.376	0.009	0.237	0.305	0.052
11	-0.167	0.558	0.285	-0.008	0.122	0.050	-0.003	0.119	0.045	0.045	-0.431	-0.199	0.000	-0.287	-0.111
15	-0.049	-0.009	-0.109	-0.049	0.070	-0.025	-0.066	0.111	-0.025	-0.024	0.149	-0.118	-0.053	0.093	-0.068
18	-0.261	0.004	-0.001	-0.047	0.005	-0.020	-0.059	0.051	-0.011	-0.014	0.097	-0.061	-0.076	0.077	-0.021
21	0.066	0.185	-0.084	-0.090	0.301	-0.020	-0.081	0.338	-0.024	-0.176	0.616	-0.296	-0.092	0.388	-0.114
22	-0.014	0.095	-0.201	-0.188	0.203	-0.094	-0.183	0.240	-0.097	-0.257	0.467	-0.347	-0.176	0.264	-0.173
27	0.260	-0.124	-0.508	-0.116	-0.054	0.039	-0.137	-0.013	0.068	-0.190	0.007	-0.029	0.009	0.000	0.090
28	0.108	-0.123	-0.573	-0.257	-0.048	-0.039	-0.278	-0.008	-0.011	-0.328	0.014	-0.108	-0.137	0.000	0.009
42	0.117	0.049	0.088	0.020	-0.048	-0.004	0.012	-0.053	0.009	-0.048	-0.044	0.015	-0.027	-0.042	0.007
43	0.205	0.077	0.038	0.018	-0.033	-0.036	0.004	-0.041	-0.028	-0.057	-0.028	-0.010	-0.017	-0.033	-0.035
49	0.116	0.003	-0.021	-0.011	-0.024	-0.025	-0.026	-0.038	-0.009	-0.062	-0.026	-0.011	-0.033	-0.043	-0.014
50	0.168	-0.146	-0.121	-0.011	-0.011	-0.036	-0.042	-0.030	-0.021	-0.075	-0.001	-0.036	-0.036	-0.091	-0.033
58	0.326	0.895	-0.519	-0.033	-0.078	0.012	-0.069	-0.064	0.040	-0.282	-0.795	0.187	-0.116	-0.244	0.083
59	0.342	1.007	-0.527	-0.063	-0.158	0.039	-0.098	-0.143	0.068	-0.345	-1.047	0.234	-0.156	-0.378	0.118
60	-0.053	0.018	0.226	0.052	-0.011	0.030	0.044	0.001	0.034	-0.061	-0.097	-0.028	-0.047	-0.071	0.001
AVG	-0.017	0.060	-0.012	-0.032	0.016	0.003	-0.044	0.027	0.011	-0.015	0.030	-0.052	0.006	0.052	-0.011
RMSE	0.216	0.357	0.308	0.079	0.099	0.039	0.081	0.106	0.040	0.214	0.409	0.130	0.128	0.224	0.070

5.9 ผลการแสดงผลภาพ และตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามา

ผลการแสดงผลภาพด้วยภาษาไพธอนและโมดูล Matplotlib สามารถแสดงผลภาพพานอรามาตั้งรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 แสดงภาพพานอรามาที่ใช้โมดูล OpenCV และภาษาไพธอนเขียน

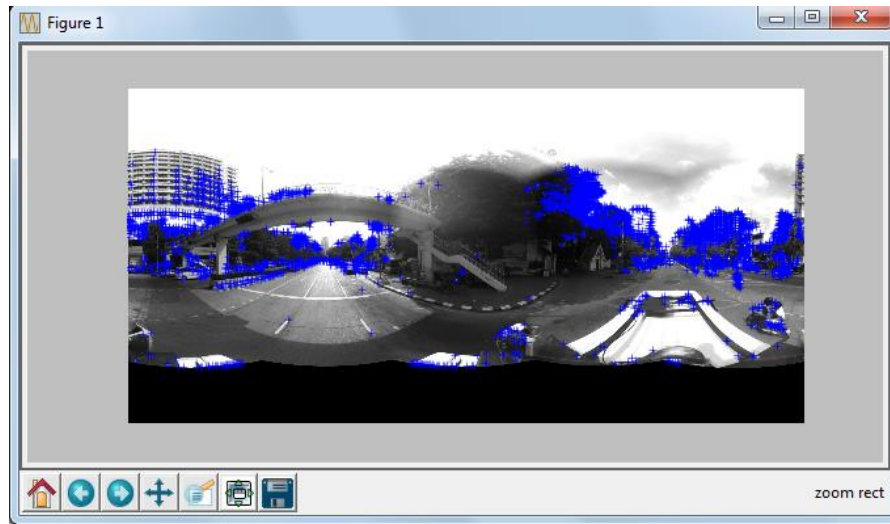


รูปที่ 5.21 การแสดงผลภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล Matplotlib

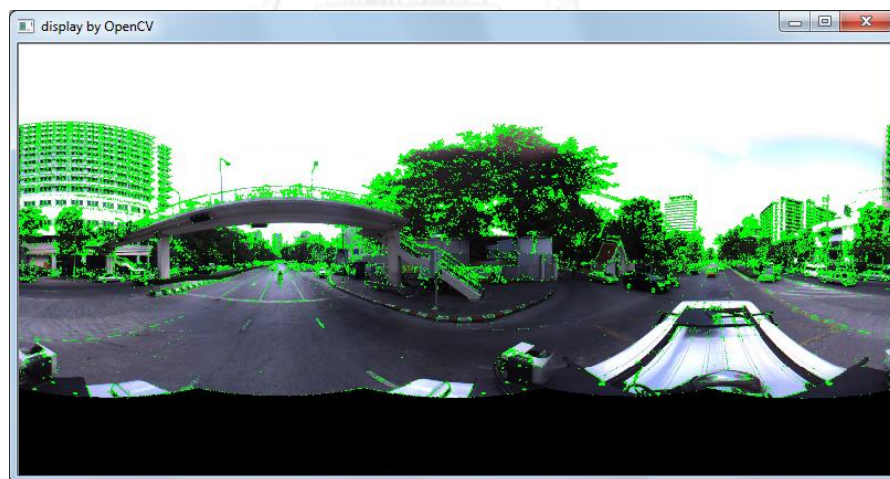


รูปที่ 5.22 การแสดงผลภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล OpenCV

แสดงตำแหน่งจุดที่สนใจบนภาพพานอรามา โดยใช้ค่าพิกัดบนภาพ สามารถแสดงภาพโดยใช้ภาษาไพธอน และโมดูล Matplotlib ดังแสดงในรูปที่ 5.23 และแสดงโดยใช้ภาษาไพธอน และโมดูล OpenCV ในรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.23 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล Matplotlib



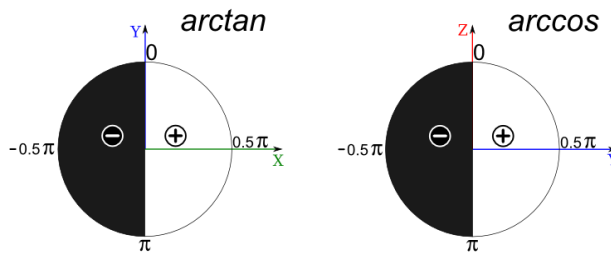
รูปที่ 5.24 ภาพแสดงตำแหน่งจุดที่สนใจในภาพพานอรามาด้วยภาษาไพธอนและโมดูล OpenCV เนื่องจาก มีการใช้งานฟังก์ชันในการค้นหาจุดที่สนใจด้วยฟังก์ชันในโมดูล OpenCV อยู่แล้ว ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้การแสดงผล ภาพพานอรามา และตำแหน่งของจุดในภาพด้วย ภาษาไพธอน และโมดูล OpenCV ในงานวิจัยนี้

บทที่ 6

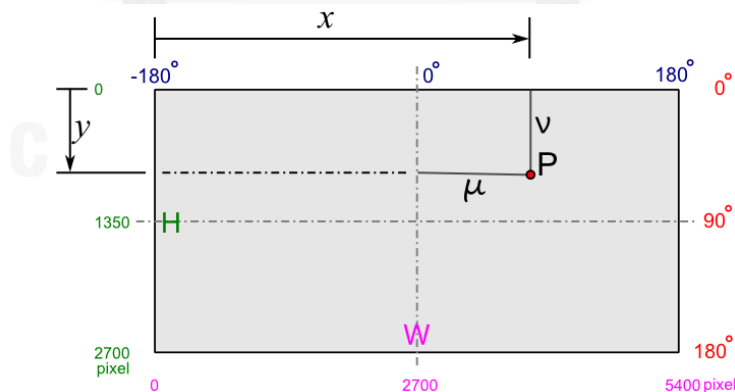
อภิปราย สรุปผล และข้อเสนอแนะ

6.1 อภิปรายผลการศึกษา

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในข้อ 2.6 (สมการ (2.29) และ(2.30))ค่ามุมราบที่ใช้ในการคำนวณมีค่า 0° ถึง 360° ทั้งนี้ในการหาค่ามุมราบใช้ค่าในแกน X และแกน Y ฟังก์ชันในการหาค่ามุมจึงใช้ฟังก์ชัน arctangent ซึ่งในพฤติกรรมของฟังก์ชัน arctangent ให้คำตอบในช่วง $-\pi$ ถึง 0° ถึง $+\pi$ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และแสดงทิศทางการวัดระยะบนภาพในรูปที่ 6.2 ดังนั้นในการวัดค่าจากภาพจึงกำหนดการวัดเป็น -180° ถึง 0° ถึง $+180^\circ$ จากนั้นทำการแปลงค่าให้เป็นเรเดียนในการคำนวณ ส่วนการหามุมตั้งนั้นโดยปกตินั้นการวัดทิศทางของคอมพิวเตอร์วัดจากบนลงล่างมุมตั้งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงวัดจากมุมเซนิทเริ่มต้นเป็น 0° วัดลงไปจนถึงมุมเนเดียมมีค่าเป็น $+180^\circ$ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการหาค่ามุมแบบนี้คือฟังก์ชัน arccosine ที่ให้คำตอบในช่วง $-\pi$ ถึง 0° ถึง $+\pi$ โดยอาศัยค่าในแกน Z เพียงค่าเดียวโดยใช้เฉพาะค่าในช่วง 0° ถึง $+\pi$



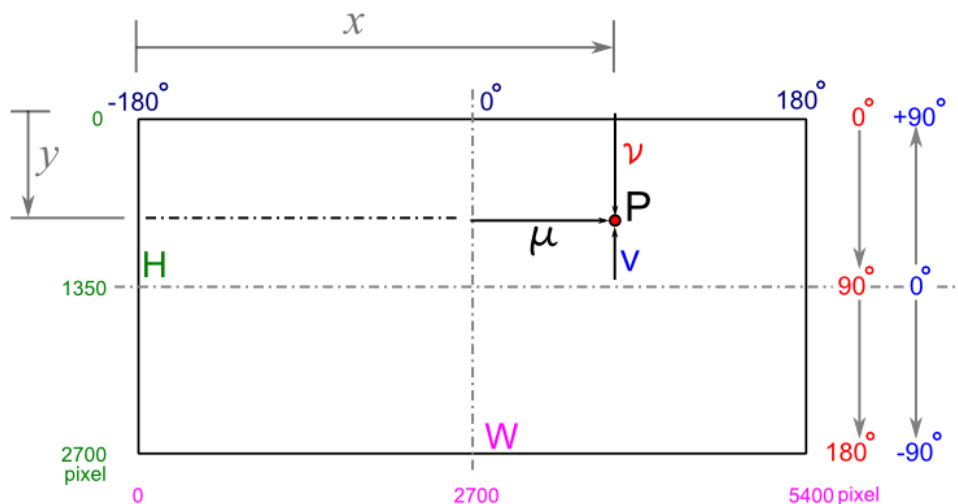
รูปที่ 6.1 พฤติกรรมของฟังก์ชัน arctangent และฟังก์ชัน arccosine



รูปที่ 6.2 ทิศทางการวัดทิศทางบนภาพพานอรามา

ข้อได้เปรียบของการใช้ ฟังก์ชัน arccosine เปรียบเทียบกับการใช้ฟังก์ชัน arcsine คือการลดขั้นตอนในการคำนวณลง เนื่องจากการใช้ฟังก์ชัน arcsine ในการหาค่ามุมสูงตามฟังก์ชันทาง

คณิตศาสตร์นั้นเริ่มจากระนาบแนวนอนที่กึ่งกลางภาพวัดขึ้นมีค่าเป็นบวก วัดลงมีค่าเป็นลบดังแสดง ทิศทางการวัดทั้งค่า μ , ν และ \mathbf{V} ในการวัดพิกัดของจุด P ในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ทิศทางการวัดค่ามุมตั้งบน(\mathbf{V}) และมุมสูง(ν)

ในทางปฏิบัติการวัดตำแหน่งของจุด P ทำการวัดจากมุมบนซ้ายของภาพโดยวัดระยะตามแนวนอนมาทางขวามือจนถึงจุด P มีค่าเท่ากับ x มีหน่วยเป็นจุดภาพเพื่อนำไปคำนวณค่า μ ได้จากสมการ (6.1) เป็นพิกัดในแนวนอนมีหน่วยเป็นองศา ส่วนพิกัดแนวตั้งของจุด P นั้นได้จากการวัดระยะจากมุมบนซ้ายของภาพลงมาในแนวตั้งจนถึงจุด P มีค่าเท่ากับ y มีหน่วยเป็นจุดภาพเพื่อนำไปคำนวณค่า ได้จากสมการ (6.2) เป็นพิกัดแนวตั้งมีหน่วยเป็นองศา หากแปลงไปเป็นมุมสูง \mathbf{V} ทำได้โดยการใส่ค่า y คำนวณตามสมการ (6.3) จะเห็นได้ว่าทั้งการหาค่าในสมการ (6.2) และ (6.3) เป็นการหาพิกัดแกนตั้งของจุด P แต่ในสมการ (6.2) มีจำนวนเทอมในสมการน้อยกว่าและมีค่าเป็น บวก ทั้งหมด

$$\mu = \frac{x}{15} - 180^\circ \quad (6.1)$$

$$\nu = \frac{y}{15} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{V} = 90^\circ - \frac{y}{15} \quad (6.3)$$

เมื่อใช้กระบวนการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการหาจุดที่สนใจในภาพ จากรูปที่ 5.9 รูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ซึ่งเป็นผลการหาจุดสนใจในภาพด้วยวิธี FAST SIFT และ SURF ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวิธี SURF มีการกระจายตัวของจุดสนใจในภาพค่อนข้างทั่วกว่าอีก สองวิธี แม้ว่าวิธี FAST จะให้ผลที่มีความกระจายคล้ายกัน แต่ด้วยกระบวนการ FAST เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับหาจุดสนใจเพียงอย่างเดียวไม่สามารถหาคุณลักษณะเด่นของจุดได้ และด้วยกระบวนการหาจุดสนใจของ

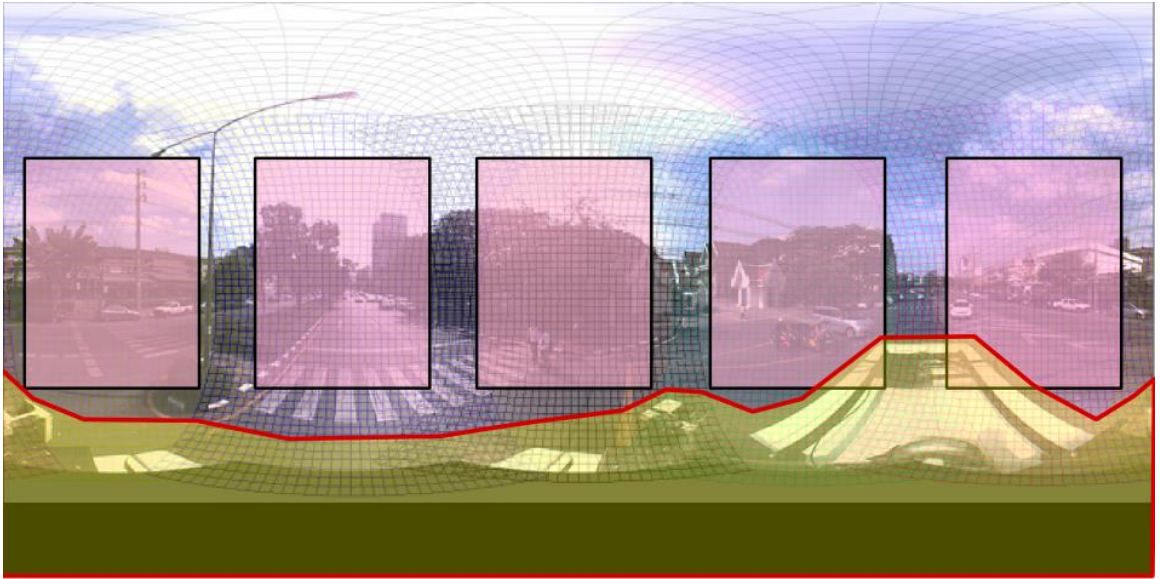
FAST โดยมากจะเป็นจุดบริเวณมุม ขอบ ของอาคารและสิ่งปลูกสร้างทำให้เมื่อใช้วิธีอื่นในการหาคุณลักษณะเด่นของจุดแล้วเกิดความคล้ายคลึงกันในหลายๆจุดทำให้การจับคู่ มีโอกาสในการจับคู่ผิดได้ เมื่อพิจารณาในด้านความเร็วดังตารางที่ 5.6 เห็นได้ว่ากระบวนการ SURF (เวลาเฉลี่ย 7.919 วินาที) ใช้เวลาน้อยกว่ากระบวนการ SIFT (เวลาเฉลี่ย 15.396 วินาที) แต่ใช้เวลามากกว่ากระบวนการ FAST (เวลาเฉลี่ย 0.057 วินาที) ด้วยข้อจำกัดของกระบวนการ FAST ทำให้กระบวนการ SURF ถูกเลือกใช้ในการค้นหาจุดสนใจและหาคุณลักษณะเด่นของจุดสนใจในภาพพานอรามาทรงกลมในการทดลองนี้

ผลการจับคู่ภาพด้วยวิธี FLANN ให้ผลดังรูปที่ 5.14 เป็นการจับคู่จุดทั้งภาพรวมถึงส่วนที่เป็นขอบภาพสีดำด้านล่างของภาพด้วย เมื่อพิจารณาภาพจากกล้อง Ladybug3 ที่ใช้งานในงานวิจัยนี้แต่ละภาพดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ตัวอย่างภาพพานอรามาจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

จะเห็นได้ว่ามีภาพของตัวยานพาหนะ และบริเวณจุดอับของกล้องที่เป็นสีดำสนิทด้านล่างภาพปรากฏอยู่ในภาพ และจะปรากฏเช่นนี้ในทุกๆ ภาพ เป็นเหตุให้การจับคู่ภาพจะทำการจับคู่บริเวณนี้ซึ่งเป็นการจับคู่ที่ไม่ถูกต้อง ต้องหาวิธีกำจัดออก และด้วยข้อจำกัดของภาพพานอรามาทรงกลมที่ได้จากกล้อง Ladybug3 ที่มีส่วนซ้อนทับทำให้มีโอกาสที่จะเกิดภาพเหลื่อม ทางผู้วิจัยได้พัฒนาการจำกัดพื้นที่การค้นหา และจับคู่ด้วยการใช้หน้ากากรอง



รูปที่ 6.5 การพิจารณาดำเนินงานสำหรับหน้าการกรองด้วยพื้นที่

จากรูปที่ 6.5 ภาพพานอรามาที่ซ้อนทับด้วยตาข่ายรูปปิดที่ใช้สำหรับสร้างเป็นภาพพอนอรามาจากกล้อง Ladybug3 กล้องที่ 6 อยู่ด้านบนส่วนใหญ่รับภาพเป็นท้องฟ้า และมีการยืดขยายของจุดรับภาพออกตามการฉายภาพจึงตัดกล้องที่ 6 ไปไม่นำมาพิจารณาใช้งาน สร้างเป็นสี่เหลี่ยมในแต่ละหน้ากล้อง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดภาพเหลื่อมในส่วนซ้อนทับ จึงลดขนาดด้านข้างลง 10% ในแต่ละหน้ากล้องเพื่อให้พื้นที่ส่วนซ้อนทับ และตั้งชื่อตามลำดับหน้ากล้องของกล้อง Ladybug3 ในส่วนของพื้นที่ในมุมอับด้านล่างภาพ และตัวยานพาหนะทำการกันพื้นที่ออกด้านล่างเมื่อซ้อนทับพื้นที่กับหน้าต่างจะได้หน้าการกรองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังในรูปที่ 6.6 พื้นที่สีขาวเป็นส่วนที่พิจารณาค้นหาจุดสนใจในภาพ และใช้จับคู่ภาพ ในงานวิจัยนี้ใช้คำเรียกพื้นที่สีขาวนี้ว่า โชน



รูปที่ 6.6 หน้าการกรองที่ใช้ในการกรองพื้นที่ค้นหา และจับคู่จุดภาพ

แม้ว่าจะทำการกรองด้วยหน้ากากรองในการค้นหาจุดสนใจแล้วก็ตามผลที่ได้ในการจับคู่ยังมีการจับคู่ที่ข้ามโซน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเป็นไปอย่างต่อเนื่องจุดในภาพมีการเคลื่อนที่เป็นระบบเส้นที่จับคู่จุดควรเป็นเส้นขนานกัน แต่จากรูปที่ 5.16 เห็นได้ว่ามีเส้นที่ไขว้ข้ามโซน และไม่เป็นเส้นขนาดเท่ากับเส้นส่วนใหญ่ เส้นที่จับคู่ไขว้ข้ามโซนนี้จะถือว่าเป็นการจับคู่ผิดดำเนินการกำจัดทิ้งด้วยการใช้การตรวจสอบตำแหน่งของโซนในหน้ากากรองจุดในโซนที่ 1 ของภาพที่ 1 ควรจับคู่อยู่ในโซนที่ 1 ของภาพที่ 2 หากจุดคูใดไม่อยู่ในเงื่อนไขนี้ให้ถือว่าเป็นคู่ที่จับคู่ผิด ทำการตัดทิ้งดังแสดงผลในรูปที่ 5.17 ผลที่ได้ไม่มีการจับคู่จุดข้ามโซน แต่ภายในโซนเองก็มีการจับคู่ที่ไม่ขนานกัน ผู้วิจัยพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของจุดในภาพจากจุดในภาพ 1 ไปยังตำแหน่งจุดกันในภาพที่ 2 พิจารณาไปที่ละคู่ภาพติดกันไป ทดสอบโดยการหมายตำแหน่งได้ผลสรุปดังรูปที่ 6.7(ก) เป็นการเคลื่อนที่ด้านหลัง รูปที่ 6.7(ข)เป็นการเคลื่อนที่ด้านข้าง และ รูปที่ 6.7(ค) เป็นการเคลื่อนที่ด้านหน้า สรุปเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ได้ในรูปที่ 5.19 และระยะเวลาการเคลื่อนที่ต่ำสุด และสูงสุดกำหนดไว้ในตารางที่ 5.9



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6.7 การเคลื่อนที่ของจุดภาพในแต่ละหน้ากล้อง

แม้ว่าจุดสนใจที่ค้นได้จะมีจำนวนมากหากแต่เมื่อนำมาเป็นจุดผ่าน ในการคำนวณทุกจุดผ่าน จะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าขึ้นจุดละ 3 ตัวซึ่งคู่จุดที่ได้เกิดขึ้นใน 2 ภาพแต่ละภาพสร้างได้ 2 สมการรวมเป็น 4 สมการสามารถหาคำตอบได้ จำนวนจุดที่น้อยที่สุดสำหรับการทดลองนี้ทางผู้วิจัยได้กำหนดให้แต่ละโซนควรมีจุดผ่านอย่างน้อย 1 จุดดังนั้นแต่ละภาพจึงมีจุดผ่านอย่างน้อยที่สุด 5 จุดในขั้นตอนเริ่มการคำนวณ จึงได้ทำการลดจำนวนจุดที่จับคู่ได้ลง ภายใต้สมมติฐานที่ว่ายังมีจุดที่จับคู่ผิดพลาดติดเข้ามาหลังจากการกรอง ดังนั้นแต่ละโซนควรมีจุดอย่างน้อย 5 จุด โดยการลดจำนวนจุดใช้วิธีกำหนดพื้นที่โดยใช้รัศมีรอบจุดที่สุ่มเลือก จากการทดลองใช้รัศมีหลายค่าพบว่า เมื่อใช้รัศมีขนาด 200 จุดภาพทำให้จุดลดลงเหลือ 40 ถึง 50 จุดโดยประมาณซึ่งเท่ากับมีจุดในแต่ละโซนประมาณโซนละ 10 จุดโดยประมาณ จึงใช้รัศมีเท่ากับ 200 จุดภาพในการลดจำนวนจุดในขั้นตอนสุดท้ายของการจับคู่จุดภาพ

ด้วยเหตุที่การกรองนี้เป็นแบบสุ่มดังนั้นจุดภาพที่ได้มีโอกาสที่จะเป็นคู่ที่จับคู่ผิดจึงเลือกให้แต่ละโชนมีคู่จุดที่เลือกมากกว่าหนึ่งคู่จุด หากคู่ใดเป็นจุดที่จับคู่ผิดจะทำการกำจัดออกจากระบบสมการในขั้นตอนการคำนวณต่อไป ในการกำจัดคู่จุดผิดจะพิจารณาจากผลการคำนวณในแต่ละรอบของการคำนวณบล็อกลำแสง โดยเมื่อคำนวณค่าพิกัดของจุดออกมาในรอบแรก จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเป็นค่าเริ่มต้นแล้วทำการคำนวณในรอบต่อไป จุดผ่านจุดไหนมีค่าที่ใหญ่ขึ้นจะถูกกำจัดออกจากสมการแล้วเริ่มคำนวณใหม่จนกระทั่งคำนวณผ่านตามเงื่อนไข

ผลของการคำนวณค่าตำแหน่งของวัตถุในภาพพานอรามาทรงกลมด้วยวิธีการบล็อกลำแสงตามผลการทดสอบในตารางที่ 5.15

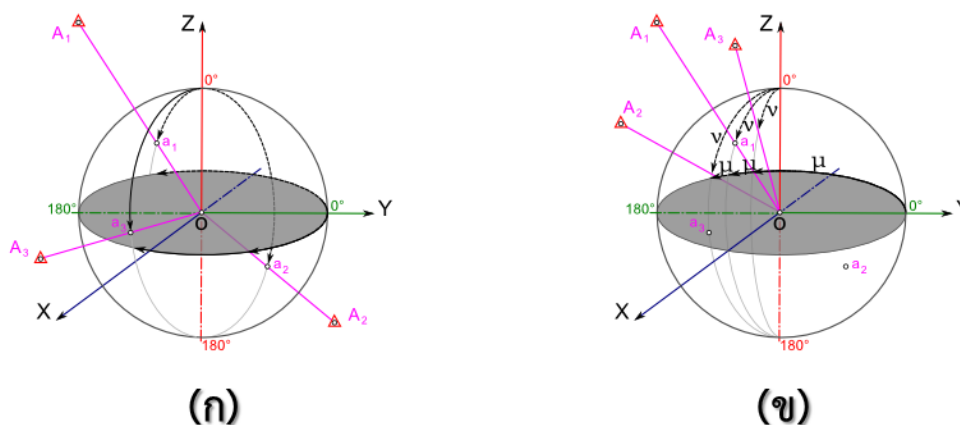
ตารางที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบค่าต่างของจุดวัดสอบในแต่ละกรณีศึกษา

Point ID	กรณีที่ 1			กรณีที่ 2			กรณีที่ 3			กรณีที่ 4			กรณีที่ 5		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
2	-0.086	-0.017	0.208	0.053	-0.010	0.023	0.040	-0.008	0.023	0.150	-0.036	-0.023	0.108	-0.018	0.014
3	-0.180	-0.070	0.243	-0.003	-0.033	0.022	-0.015	-0.033	0.022	0.127	-0.016	-0.038	0.077	-0.006	0.002
6	-0.312	-0.257	0.315	-0.027	0.017	0.060	-0.031	0.009	0.054	0.286	0.474	0.015	0.179	0.373	0.056
7	-0.370	-0.409	0.332	0.019	0.062	0.011	0.015	0.056	0.008	0.335	0.528	-0.101	0.228	0.429	-0.043
8	-0.316	-0.332	0.351	0.050	0.032	0.018	0.046	0.026	0.014	0.342	0.392	-0.087	0.244	0.322	-0.032
9	-0.238	-0.204	0.340	0.048	0.026	0.061	0.044	0.019	0.056	0.336	0.376	0.009	0.237	0.305	0.052
11	-0.167	0.558	0.285	-0.008	0.122	0.050	-0.003	0.119	0.045	0.045	-0.431	-0.199	0.000	-0.287	-0.111
15	-0.049	-0.009	-0.109	-0.049	0.070	-0.025	-0.066	0.111	-0.025	-0.024	0.149	-0.118	-0.053	0.093	-0.068
18	-0.261	0.004	-0.001	-0.047	0.005	-0.020	-0.059	0.051	-0.011	-0.014	0.097	-0.061	-0.076	0.077	-0.021
21	0.066	0.185	-0.084	-0.090	0.301	-0.020	-0.081	0.338	-0.024	-0.176	0.616	-0.296	-0.092	0.388	-0.114
22	-0.014	0.095	-0.201	-0.188	0.203	-0.094	-0.183	0.240	-0.097	-0.257	0.467	-0.347	-0.176	0.264	-0.173
27	0.260	-0.124	-0.508	-0.116	-0.054	0.039	-0.137	-0.013	0.068	-0.190	0.007	-0.029	0.009	0.000	0.090
28	0.108	-0.123	-0.573	-0.257	-0.048	-0.039	-0.278	-0.008	-0.011	-0.328	0.014	-0.108	-0.137	0.000	0.009
42	0.117	0.049	0.088	0.020	-0.048	-0.004	0.012	-0.053	0.009	-0.048	-0.044	0.015	-0.027	-0.042	0.007
43	0.205	0.077	0.038	0.018	-0.033	-0.036	0.004	-0.041	-0.028	-0.057	-0.028	-0.010	-0.017	-0.033	-0.035
49	0.116	0.003	-0.021	-0.011	-0.024	-0.025	-0.026	-0.038	-0.009	-0.062	-0.026	-0.011	-0.033	-0.043	-0.014
50	0.168	-0.146	-0.121	-0.011	-0.011	-0.036	-0.042	-0.030	-0.021	-0.075	-0.001	-0.036	-0.036	-0.091	-0.033
58	0.326	0.895	-0.519	-0.033	-0.078	0.012	-0.069	-0.064	0.040	-0.282	-0.795	0.187	-0.116	-0.244	0.083
59	0.342	1.007	-0.527	-0.063	-0.158	0.039	-0.098	-0.143	0.068	-0.345	-1.047	0.234	-0.156	-0.378	0.118
60	-0.053	0.018	0.226	0.052	-0.011	0.030	0.044	0.001	0.034	-0.061	-0.097	-0.028	-0.047	-0.071	0.001
AVG	-0.017	0.060	-0.012	-0.032	0.016	0.003	-0.044	0.027	0.011	-0.015	0.030	-0.052	0.006	0.052	-0.011
RMSE	0.216	0.357	0.308	0.079	0.099	0.039	0.081	0.106	0.040	0.214	0.409	0.130	0.128	0.224	0.070

กรณีที่ 1 ซึ่งเป็นการคำนวณด้วยค่าพารามิเตอร์การวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ผลที่ได้ในกรณีนี้ใช้เป็นตัวสำหรับอ้างอิงเทียบกับกรณีทดสอบอื่น ซึ่งผลการคำนวณได้ค่า RMSE ในแกน X, Y และ Z คือ 0.216 ม., 0.357 ม. และ 0.308 ม. ตามลำดับ เมื่อใช้จุดควบคุมภาพในภาพแรกและภาพสุดท้าย และจุดผ่านที่กำหนดเองในกรณีที่ 2 ค่า RMSE ในแกน X, Y และ Z มีค่าเท่ากับ 0.079 ม., 0.099 ม. และ 0.039 ม. ตามลำดับจะเห็นได้ว่าค่า RMSE ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 ซึ่งค่า RMSE ในกรณีที่ 2 ใกล้เคียงกับกรณีที่ 3 คือ 0.081 ม., 0.106 ม. และ

0.040 ม. ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ 4 ได้ค่า RMSE ในแกน X, Y และ Z เท่ากับ 0.214 ม., 0.409 ม. และ 0.130 ม. ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ 1 ในกรณีนี้ที่ 4 คือการใช้จุดผ่านจากการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และใช้จุดควบคุมภาพในภาพแรกและภาพสุดท้าย และเมื่อเพิ่มจุดควบคุมในทุกภาพในกรณีนี้ที่ 5 ค่า RMSE ลดลงเหลือ 0.128 ม., 0.224 ม. และ 0.070 ม.

ค่า RMSE ในกรณีนี้ที่ 2 แตกต่างจากกรณีนี้ที่ 3 ในแกน X, Y และ Z เท่ากับ 0.002 ม., 0.007 ม. และ 0.001 ม. ตามลำดับ ในกรณีนี้ที่ 2 มีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้าย จุดผ่านในภาพในการหมายจุดด้วยคน จำนวนจุดผ่านเท่ากับ กรณีที่ 3 แต่เพิ่มจุดควบคุมภาพในทุกภาพในกรณีนี้ที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของจุดผ่านที่ทำการหมายด้วยคนนั้น มีความแม่นยำ และไม่มีการหมายจุดผิดอย่างชัดเจน กอรปกับตำแหน่งของจุดควบคุมและจุดผ่านกระจายอยู่รอบภาพทำเรขาคณิตของระบบสมการที่ใช้ในการคำนวณแข็งแรง ในรูปที่ 6.8(ก) แสดงถึงตัวอย่างจุดที่ทำให้เรขาคณิตของระบบสมการที่แข็งแรง และรูปที่ 6.8(ข) แสดงถึงตัวอย่างตำแหน่งจุดที่ทำให้เรขาคณิตของระบบสมการไม่แข็งแรง



รูปที่ 6.8 ตัวอย่างตำแหน่งของจุดที่มีผลกับเรขาคณิตของระบบสมการ

ค่า RMSE ในกรณีนี้ที่ 4 ที่ใช้จุดควบคุมภาพ และจุดผ่านในภาพที่ได้จากกระบวนการจับคู่ภาพอัตโนมัติ ซึ่งในกระบวนการจับคู่แม้ว่าจะได้ทำการตัดจุดที่เป็นจุดจับคู่ผิดตามเงื่อนไขต่างๆ ไปแล้ว ก็ยังมีโอกาสที่จุดที่จับคู่ผิดหลุดเข้ามาในระบบสมการได้ แม้ในการปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุดในกระบวนการบล็อกลำแสงมีการตัดจุดที่มีค่าไม่ลู่อเข้าทิ้งไป แต่ก็ยังเป็นเพียงการหาคำตอบของระบบสมการ มิได้เป็นการปรับแก้ให้เป็นค่าที่ถูกต้อง เมื่อเพิ่มจุดควบคุมภาพเข้าในทุกภาพใน กรณีนี้ที่ 5 มีผลทำให้ค่า RMSE ลดลงครึ่งหนึ่งของค่า RMSE ในกรณีนี้ที่ 4

6.2 สรุปผลการศึกษา

จากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้กับภาพพานอรามาทรงกลม จนได้สมการ (2.28) และสมการ (2.29) เป็นแบบจำลองที่ได้ทดสอบแล้วว่า สามารถใช้กับภาพพานอรามาทรงกลมที่ผลิตจากกล้อง Ladybug3 ได้ โดยสามารถใช้เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์การวางตัวภายนอกของภาพพานอรามาทรงกลมได้ และสามารถหาค่าพิกัดตำแหน่งบนพื้นดินของจุดในภาพด้วยวิธีวัดสกัดจากภาพได้ เมื่อคำนวณค่าการวางตัวภายนอก และตำแหน่งบนพื้นดินของจุดในภาพพร้อมกันด้วยวิธีการบล็อกลำแสงสำหรับภาพพานอรามาทรงกลม ผลการคำนวณสามารถหาค่าการวางตัวภายนอก และตำแหน่งของจุดบนพื้นดินได้

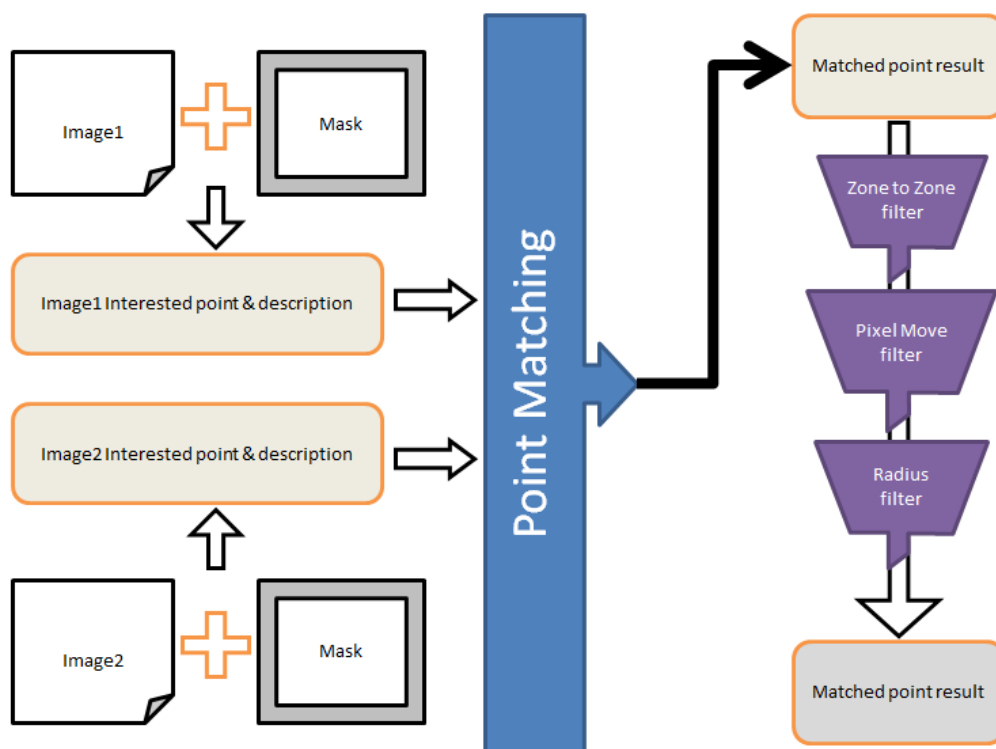
$$\mu = \tan^{-1} \frac{R_{11}(X_A - X_L) + R_{12}(Y_A - Y_L) + R_{13}(Z_A - Z_L)}{R_{21}(X_A - X_L) + R_{22}(Y_A - Y_L) + R_{23}(Z_A - Z_L)} \quad (2.28)$$

$$\nu = \cos^{-1} \frac{R_{31}(X_A - X_L) + R_{32}(Y_A - Y_L) + R_{33}(Z_A - Z_L)}{\sqrt{(X_A - X_L)^2 + (Y_A - Y_L)^2 + (Z_A - Z_L)^2}} \quad (2.29)$$

การจับคู่ด้วยวิธีค้นหาจุดสนใจในภาพด้วยกระบวนการ SURF ทำให้ได้จุดสนใจในภาพที่มีคุณลักษณะเฉพาะเพื่อใช้ในการจับคู่จุด และการจับคู่จุดด้วยกระบวนการ FLANN สามารถใช้จับคู่ภาพพานอรามาทรงกลมจากกล้อง Ladybug3 ได้ เนื่องจากการจับคู่นั้นยังคงมีคู่จุดภาพที่จับคู่ผิดอยู่ การพัฒนากระบวนการกรองคู่จุดเพื่อลดการจับคู่ผิด สามารถทำให้ลดจำนวนจุดจับคู่ผิดลงไปได้ดังแสดงตัวอย่างในหัวข้อ 5.3 (รูปที่ 5.15 รูปที่ 5.16 รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.19) ขั้นตอนสุดท้ายคือการลดจำนวนจุดลงเพื่อให้จำนวนตัวไม่ทราบค่า และสมการค่าสังเกตมีจำนวนไม่มากเกินไป จุดผ่านที่อยู่ใกล้กันมากไม่มีส่วนทำให้เรขาคณิตของแบบจำลองและระบบสมการแข็งแกร่งขึ้น การลดจำนวนจุดที่จับคู่ได้ลงทำให้จำนวนสมการน้อยลง และใช้เวลาในคำนวณน้อยลง สามารถสรุปกระบวนการจับคู่และการกรองในงานวิจัยนี้เป็นแผนภูมิได้ในรูปที่ 6.9

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณในกรณีต่างๆ โดยใช้ผลการคำนวณจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุดมีดังนี้ จากการคำนวณด้วยค่าการวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.216 ม., ± 0.357 ม. และ ± 0.308 ม.ตามลำดับ เมื่อใช้ค่าการวางตัวภายนอกจากการคำนวณโดยใช้จุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้ายโดยใช้จุดผ่านจากการกำหนดเองค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.079 ม., ± 0.099 ม. และ ± 0.039 ม.ตามลำดับ เมื่อเพิ่มจุดควบคุมภาพเป็นทุกภาพค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.081 ม., ± 0.106 ม. และ ± 0.040 ม.ตามลำดับ เมื่อใช้จุดผ่านจากวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้ายค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.214 ม., ± 0.409 ม. และ ± 0.130 ม.

ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มจุดควบคุมภาพในทุกภาพ และใช้จุดผ่านจากกระบวนการคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ค่า RMSE ในแกน X Y และ Z เท่ากับ ± 0.128 ม., ± 0.224 ม. และ ± 0.070 ม.ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 แผนภูมิแสดงกระบวนการจับคู่จุดภาพ

ผลการทดสอบจากกรณีที่ใช้การคำนวณพิกัดจุดวัดสอบ ด้วยค่าการวางตัวภายนอกด้วยวิธีบล็อกลำแสงโดยใช้จุดผ่านจากการจับคู่ด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ และมีจุดควบคุมภาพในภาพแรก และภาพสุดท้าย (กรณีที่ 4) ผลที่ได้มีค่า RMSE ใกล้เคียงกับการคำนวณจุดวัดสอบด้วยค่าพารามิเตอร์การวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ (กรณีที่ 1)

จึงสรุปได้ว่าสมการและวิธีการในการหาพิกัดตำแหน่งของจุดสนใจในภาพพานอรามาทรงกลมด้วยวิธีการบล็อกลำแสงด้วยการใช้จุดผ่านจากวิธีการจับคู่ภาพทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์สามารถใช้งานสำหรับกรณีที่ข้อมูลจาก IMU มีปัญหาไม่สามารถใช้งานได้หรือสัญญาณขาดหายโดยให้ผลอยู่ในเกณฑ์เดียวกับการใช้การคำนวณจากค่าการวางตัวภายนอกจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

การค้นหาค้นหาจุดสนใจในภาพเพื่อใช้เป็นจุดสำหรับจับคู่ภาพนั้น ยังมีวิธีอื่นๆ นอกเหนือจากวิธี FAST, SIFT และ SURF อีกตัวอย่างเช่น วิธี STAR (หรือ CenSurE), ORB(oriented BRIEF), MSER(Maximally stable extremal region extractor), GFTT(Good Features To Track), BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoints), FREAK (Fast Retina Keypoint) เป็นต้น แต่ละวิธีมีข้อเด่นข้อด้อยแตกต่างกัน การวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้ อาจให้ผลแตกต่างกันในการจับคู่ภาพและได้วิธีการที่เหมาะสมมากขึ้นสำหรับภาพพานอรามาทรงกลมในเขตพื้นที่เมือง

การแก้ไขการจับคู่ผิดในกระบวนการจับคู่ภาพนั้น มีการกำจัดคู่ผิดไปได้ระดับหนึ่ง ยังมีความเป็นไปได้ที่จุดที่จับคู่ผิดหลงเหลืออยู่ การลดจำนวนจุดในขั้นตอนสุดท้าย จุดแรกที่ทำกรเลือกใช้วิธีเลือกข้อมูลแรกที่คำนวณได้ จากนั้นดำเนินการลดจำนวนโดยจำกัดพื้นที่ วิธีการนี้หากจุดแรกเป็นจุดที่จับคู่ผิด การลดจำนวนจุดรอบๆ จุดที่เลือกจะทำให้จุดที่จับคู่ถูกแล้วถูกตัดทิ้ง และจุดที่ผิดจะเข้าไปในระบบสมการแทน การวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของการหาความเชื่อมั่นในการจับคู่ ว่าเป็นจุดที่จับคู่ถูกต้อง จะทำให้ลดการนำข้อมูลผิดเข้าไปในระบบสมการ ผลการปรับแก้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนลดลง

การจับคู่ภาพด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการวิจัยนี้ ด้วยกระบวนการจับคู่ยังทำได้ทีละคู่ภาพทางผู้วิจัยได้ทดสอบจับคู่มากกว่าสองภาพ แต่ผลที่ได้ไม่สามารถจับคู่ภาพในภาพที่ 3 หรือ 4 ได้ในปริมาณที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นจุดผ่าน หากมีวิธีการวิจัยเพิ่มเติมให้สามารถจับคู่ให้มากกว่า 2 ภาพจะสามารถทำให้ความถูกต้องของผลการคำนวณสูงขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการจับคู่ด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ที่งานวิจัยนี้ยังสามารถใช้งานได้เทียบเท่ากับการใช้ข้อมูลจากระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ กระบวนการนี้จึงสามารถใช้งานในกรณีที่มีข้อมูลจากระบบนำหนของระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ขาดหาย หรือใช้สำหรับระบบทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ต้นทุ่นต่ำได้ ในการวิจัยครั้งนี้ทดสอบเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวทางตรง สำหรับทางโค้งสิ่งที่จะต้องคำนึงในกระบวนการจับคู่ภาพคือในขั้นตอนของการกรองจุดที่จับคู่ได้ออกในส่วนของการเคลื่อนที่ของจุดในภาพ ซึ่งในทางโค้งจะแตกต่างจากทางตรง

ในการสร้างหน้ากากรองสำหรับใช้งาน ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางหน้ากล้องเริ่มต้นของกล้อง Ladybug3 ทิศทางการวางมีผลทำให้ภาพยานพาหนะที่ปรากฏในภาพเปลี่ยนตำแหน่งไป รวมถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของจุดในภาพด้วย จำเป็นต้องพิจารณาในการสร้างหน้ากากรอง

สมการสภาวะร่วมเส้นสำหรับภาพพานอรามาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พัฒนาขึ้นจากภาพพานอรามาทรงกลมทั่วไปดังนั้น นอกจากภาพพานอรามาทรงกลมที่ผลิตจากกล้อง Ladybug3 แล้วยังสามารถที่จะได้งานได้กับภาพพานอรามาทรงกลมที่ผลิตจากกล้องอื่นๆ ได้ด้วย ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นทดสอบเฉพาะกับภาพที่ได้จากกล้อง Ladybug3 จึงเป็นแนวทางให้ผู้สนใจนำไปประยุกต์ใช้กับภาพพานอรามาทรงกลมที่ผลิตจากแหล่งอื่นได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ (2554). การศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอรามา. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ และไพศาล สันติธรรมนนท์ (2554). "การปรับแก้ของบล็อกลำแสงสำหรับระบบ
การทำแผนที่แบบเคลื่อนที่." วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย **12(2)**: 56-66.
- ธนรัตน์ มิตรยอดวงศ์ และไพศาล สันติธรรมนนท์ (2554). "การศึกษาเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพพานอ
รามา." วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย **12(2)**: 15-
22.
- พงศ์ธร อ่อนสำลี (2554). การศึกษาเทคนิคการจับคู่ภาพอัตโนมัติระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมธีออส
กับภาพถ่ายออร์โธจากภาพถ่ายทางอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพศาล สันติธรรมนนท์ (2553). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิบูลย์ ดอนพรทั่น สิริภัทร เชี่ยวชาญวัฒนา และ คำรณ สุนด์ิ (2553). "การลดความซับซ้อนการคำนวณ
สำหรับการหาลักษณะเด่นของภาพแบบ SIFT." การประชุมวิชาการนานาชาติร่วมสาขาวิทยาการ
คอมพิวเตอร์และวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ครั้งที่ 7.
- กรมทางหลวง สำนักบำรุงผิวทาง. (2549). "การบริหารงานบำรุงทางแนวใหม่." [ออนไลน์]
http://maintenance.doh.go.th/new_maint.html.
- อรุณ บุรีรักษ์ (2553). การศึกษาการหาวิถีของยานพาหนะโดยใช้ระบบดาวเทียมนำหน. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาาระบบสารสนเทศปริภูมิทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาต่างประเทศ

- Arya, S., D. M. Mount, N. S. Netanyahu, R. Silverman and A. Y. Wu (1998). "An optimal
algorithm for approximate nearest neighbor searching fixed dimensions." Journal of
the ACM (JACM) **45(6)**: 891-932.
- Bay, H., T. Tuytelaars and L. Van Gool (2006). Surf: Speeded up robust features.
Computer Vision–ECCV 2006, Springer: 404-417.
- Bossler, J. D. and C. Toth (1996). "Feature positioning accuracy in mobile mapping:
Results obtained by the GPSVan™." International Archives of Photogrammetry and
Remote Sensing **31(B4)**: 139-142.

- Boulanger, P. and S. F. El-Hakim (1999). Mobile system for indoor 3-D mapping and creating virtual environments, Google Patents.
- Buaba, R., A. Homaifa and E. Kihn (2013). Fast Locality Sensitive Hashing Algorithm For Approximate Nearest Neighbor Search in High Dimensions. The Third International Workshop on Climate Informatics. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Center for Mapping, O. s. u. (2014). "GPSVan™ Project." Retrieved 02, 2014, from <http://www.cfm.ohio-state.edu/research/gpsvan.php>.
- Edward, R. and D. Tom (2006). "Machine learning for high-speed corner detection." European Conference on Computer Vision.
- El-Hakim, S. F., P. Boulanger, F. Blais, J.-A. Beraldin and G. Roth (1997). "A mobile system for indoors 3-d mapping and positioning." Proceedings of the Optical: 275-282.
- El-Sheimy, N. (1996). The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications, The University of Calgary.
- El-Sheimy, N. (2008). Land mobile mapping systems, Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: 2008 ISPRS congress Book-Li, Chen & Baltsavias(eds).
- El-Sheimy, N. and K. P. Schwarz (1993). Kinematic positioning in three dimensions using CCD technology. , Proceedings of the IEEE-IEE Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1993.
- Ellum, C. and N. El-Sheimy (2002). "Land-based mobile mapping systems." Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **68**(1): 13-28.
- Fangi, G. (2006). "Investigation On The Suitability Of The Spherical Panoramas By Realviz Stitcher For Metric Purposes." Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences **36**.
- Fangi, G. (2007). The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey.
- Fangi, G. (2013). "Photogrammetric Processing of Spherical Panoramas." The Photogrammetric Record **28**(143): 19.
- Fraser, C., I. Jazayeri and S. Cronk (2010). A feature-based matching strategy for automated 3D model reconstruction in multi-Image Close-Range Photogrammetry.
- geoVISAT. (2014). "Data processing." Retrieved 2/6/2014, 2014, from <http://www.vansteelandt.be/geovisat/menu032.html>.
- Graefe, G., W. Caspary, H. Heister, J. Klemm and M. Sever (2001). The road data acquisition system MoSES–determination and accuracy of trajectory data gained with the Applanix POS/LV. The Third International Mobile Mapping Symposium, Cairo, Egypt.

- Grejner-bzezlinska, D., C. Toth and Y. I. Yudan (2005). "On improving navigation accuracy of GPS/INS systems." Photogrammetric engineering and remote sensing **71**(4): 377-389.
- Guerrero, M. (2011). A Comparative Study of Three Image Matching Algorithms: Sift, Surf, and Fast Master of Science, Utah State University.
- Hans, P. M. (1977). Towards automatic visual obstacle avoidance.
- Huang, F., R. Klette and K. Scheibe (2008). Panoramic imaging: Sensor-Line Cameras and laser range finders. Hoboken, N.J.; Chichester, Wiley ; John Wiley [distributor].
- James, R. (2010). "panoguide: Types of panoramic images." from <http://www.panoguide.com/howto/panoramas/types.jsp>.
- Jazayeri, I. and C. S. Fraser (2010). "Interest operators for feature-based matching in close range photogrammetry." The Photogrammetric Record **25**(129): 24-41.
- Jiao, W., Y. Fang and G. He (2008). "An integrated feature based method for sub-pixel image matching." International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Part B **1**.
- Li, R. (1997). "Mobile mapping: An emerging technology for spatial data acquisition." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **63**(9): 1085-1092.
- Lowe, D. G. (2004). "Distinctive image features from scale-invariant keypoints." International journal of computer vision **60**(2): 91-110.
- Luhmann, T. (2011). Close range photogrammetry: Principles, techniques and applications. Dunbeath, Whittles Publishing.
- Luhmann, T. and W. Tecklenburg (2005). "High-resolution image rectification and mosaicing—a comparison between panorama camera and digital camera." International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36**.
- Marshall, D. (2006). "Nearest neighbour searching in high dimensional metric space." Department of Computer Sciences.
- Mikhail, E. M. and F. E. Ackermann (1982). Observations and least squares, University Press of America.
- Mikhail, E. M., J. S. Bethel and J. C. McGlone (2001). Introduction to modern photogrammetry, John Wiley & Sons Inc.
- Muja, M. and D. G. Lowe (2009). Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration.
- Novak, K. (1993). "Application of Digital Cameras and GPS for Aerial Photogrammetric Mapping." International Society of Photogrammetry and Remote Sensing **XXIX**: 5-9.

- Novak, K. and J. D. Bossler (1995). "Development and application of the highway mapping system of Ohio State University." The Photogrammetric Record **15**(85): 123-134.
- Oh, T.-W. and I.-P. Lee (2010). "Bundle Block Adjustment of Omni-directional Images by a Mobile Mapping System." Korean Journal of Remote Sensing **26**(5): 593-603.
- Point Grey Research, I. (2009). "Ladybug3 Technical Reference Manual." from http://www.ptgrey.com/support/downloads/downloads_admin/Dlds/Ladybug3%20Technical%20Reference.pdf.
- Point Grey Research, I. (2013). Overview of the Ladybug Image Stitching Process. Technical Application Note TAN2008010.
- Point Grey Research, I. (2014). Geometric Vision using Ladybug Cameras. Technical Application Note TAN2012009: 10.
- Reed, M. D., C. E. Landry and K. C. Werther (1996). The application of air and ground based laser mapping systems to transmission line corridor surveys, IEEE.
- Schneider, D. and H.-G. Maas (2003). "Geometric modelling and calibration of a high resolution panoramic camera." Optical 3-D Measurement Techniques VI: 122-129.
- Silpa-Anan, C. and R. Hartley (2008). Optimised KD-trees for fast image descriptor matching, IEEE.
- Sony Electronics, I. (2010). "Cyber-shot® Digital Camera HX5V/B." from <http://www.sonystyle.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=10551&storeId=10151&langId=-1&productId=8198552921666077169>.
- Zitova, B. and J. Flusser (2003). "Image registration methods: a survey." Image and vision computing **21**(11): 977-1000.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล นายภาณุ อุทัยศรี

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 27 เมษายน 2515

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา โรงเรียนโกวิทอรัญเชียงใหม่

ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนยุพราชวิทยาลัยเชียงใหม่

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ แผนกช่างก่อสร้าง

ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ
แผนกช่างก่อสร้าง

ระดับปริญญาตรี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ สาขาวิศวกรรม
โยธา

ระดับปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาขาระบบสารสนเทศปริภูมิทาง
วิศวกรรม

ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2537 - 2538 วิศวกรควบคุมการเจาะสำรวจชั้นดิน บริษัทสพายส์
จำกัด จังหวัดเชียงใหม่

พ.ศ.2538-ปัจจุบัน อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พื้นที่ภาคพายัพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY