



การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล

Digital Photogrammetry

ปรับปรุงเพิ่มเติม บทที่ 9 การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ



รองศาสตราจารย์ ดร. ไพบูล สันติธรรมนนท์

Associate Professor Dr.-Ing. Phisan Santitamnont

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มิถุนายน 2564



สารบัญ

1	บทนำ.....	1-1
1.1	คำจำกัดความ	1-1
1.1.1	นิยามของการรังวัดด้วยภาพตาม ISPRS	1-1
1.1.2	นิยามของการรังวัดด้วยภาพตาม ASPRS.....	1-1
1.2	นิยามของการรังวัดด้วยภาพตามการประยุกต์ใช้	1-1
1.2.1	การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (Air-borne Photogrammetry / Aerial Photogrammetry).....	1-1
1.2.2	การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetry).....	1-1
1.2.3	การรังวัดด้วยภาพด้วย softcopy (Softcopy Photogrammetry).....	1-1
1.2.4	การรังวัดด้วยภาพพร้อมจีพีเอส (GPS Photogrammetry).....	1-1
1.2.5	การรังวัดภาพพื้นดิน (Terrestrial Photogrammetry)	1-1
1.2.6	การรังวัดด้วยภาพระยะใกล้ (Close-range Photogrammetry).....	1-1
1.2.7	การรังวัดด้วยภาพสำหรับงานสถาปัตยกรรม (Architectural Photogrammetry)	1-1
1.2.8	การรังวัดด้วยภาพมาโคร (Macro Photogrammetry).....	1-1
1.3	วิัฒนาการของการรังวัดด้วยภาพ	1-1
1.4	ระบบงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัล.....	1-1
1.4.1	ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศอัตโนมัติเต็มรูปแบบ	1-1
1.4.2	ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศครอบคลุมงานบางส่วน	1-1

1.4.3	ซอฟต์แวร์สำหรับการสำรวจระยะไกลที่มีฟังก์ชันของการสำรวจรังวัดด้วยภาพ.....	1-1
1.4.4	ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดระยะใกล้ด้วยภาพถ่ายดิจิทัล	1-1
1.4.5	ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดแบบจำลองสามมิติของเมือง	1-1
1.5	ผลิตผลที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพ.....	1-1
1.6	การทำแผนที่ด้วยการรังวัดด้วยภาพ	1-1
1.7	วิชาชีพและ องค์กรวิชาชีพ.....	1-1
1.7.1	การเรียนการสอน.....	1-1
1.7.2	องค์กรวิชาชีประดับประเทศ	1-1
1.7.3	องค์กรวิชาชีประดับนานาชาติ.....	1-1
1.8	คำตามท้ายบท	1-1
2	เรขาคณิตเบื้องต้น	2-1
2.1	เรขาคณิตของล้องถ่ายภาพ	2-1
2.1.1	ประเภทกล้องถ่ายภาพทางอากาศ	2-1
2.1.2	อุปกรณ์ประกอบกล้องถ่ายภาพ	2-1
2.2	การบินถ่ายภาพ.....	2-1
2.3	ผลผลิตจากการบันทึกภาพ	2-1
2.3.1	ชนิดของภาพตามวัสดุที่บันทึกภาพ	2-1
2.3.2	ชนิดของภาพตามโโนนสีที่บันทึกได้	2-1
2.3.3	มาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศ	2-1
2.4	การแปลงค่าพิกัดในสองมิติ.....	2-1
2.4.1	ความสัมพันธ์เบื้องต้น.....	2-1
2.4.2	การแปลงค่าพิกัดชนิดเอลเมิร์ต	2-1
2.4.3	การแปลงค่าพิกัดชนิดแอฟไฟฟ์	2-1
2.5	การแปลงค่าพิกัดในสามมิติ	2-1
2.5.1	ระบบพิกัดทำมุ่งรอบแกน x	2-1
2.5.2	ระบบพิกัดทำมุ่งรอบแกน y	2-1
2.5.3	ระบบพิกัดทำมุ่งรอบแกน z	2-1
2.5.4	ผลรวมของการทำมุ่งทั้งสามแกนพร้อมกัน	2-1
2.5.5	ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กำเนิด	2-1
2.5.6	ความสัมพันธ์ในการมีมาตราส่วน	2-1
2.6	การแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ดพารามิเตอร์	2-1
2.6.1	การแก้ปัญหาการแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ดพารามิเตอร์	2-1
2.7	เรขาคณิตภาพถ่ายดิจิทัล.....	2-1
2.7.1	ตัวอย่างการคำนวณ	2-1
2.8	คำตามท้ายบท	2-1
3	การรังวัดภาพถ่ายเดี่ยว	3-1

3.1 การวัดพิกัดบนภาพถ่าย	3-1
3.1.1 จุดดัชนี.....	3-1
3.1.2 ระบบพิกัดภาพถ่าย	3-1
3.1.3 เครื่องมือสำหรับการวัดพิกัดภาพถ่าย	3-1
3.1.4 การหาความสัมพันธ์การจัดวางภาพภายนอก	3-1
3.1.5 ผลการจัดภาพภายนอกในทางปฏิบัติ	3-1
3.2 สมการสภาวะร่วมเส้น	3-1
3.2.1 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของจุดภาพและวัตถุ.....	3-1
3.2.2 ความสัมพันธ์ของการแปลงพิกัดวัตถุไปสู่พิกัดบนภาพถ่าย.....	3-1
3.2.3 ความสัมพันธ์ของการแปลงพิกัดภาพถ่ายไปสู่พิกัดวัตถุ.....	3-1
3.3 การวัดย้อนสำหรับภาพถ่ายเดี่ยว.....	3-1
3.3.1 การคำนวนปรับแก้	3-1
3.4 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ.....	3-1
3.4.1 ตัวอย่างการคำนวน	3-1
3.5 คำถามท้ายบท	3-1
 4 การรังวัดบนภาพคู่สามมิติ.....	4-1
4.1 ภาพคู่สามมิติสำหรับภาพถ่ายทางอากาศ	4-1
4.2 เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติเชิงทศนิยม	4-1
4.2.1 แวนดูสามมิติชนิดพกพา (Pocket Stereoscope)	4-1
4.2.2 กล้องดูสามมิติ (Mirror Stereoscope)	4-1
4.3 เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติชนิดดิจิทัล	4-1
4.3.1 แวนออกลิฟ (Anaglyph Glasses)	4-1
4.3.2 แวนชัทเทล (Shuttle-Glasses)	4-1
4.3.3 จอภาพโพลาไรซ์ (Polarized Screen)	4-1
4.3.4 จอภาพโพลาไรซ์ (Polarized Screen)	4-1
การคำนวนพิกัดวัตถุจากคู่ภาพสามมิติ	4-1
4.3.1 วิธีการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด	4-1
4.4 หลักการของเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์	4-1
4.5 หลักการของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล (DIGITAL STEREO PLOTTER)	4-1
4.6 อัลกอริธึมของเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์	4-1
4.6.1 เมื่อเริ่มต้น	4-1
4.6.2 สิ่งที่ต้องคำนวนหา	4-1
4.6.3 ขั้นตอนการทำงาน Solution:	4-1
4.7 อัลกอริธึมของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล	4-1
4.8 การเปรียบเทียบเครื่องเขียนแผนที่	4-1
4.9 ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาพคู่สามมิติ	4-1
4.9.1 การวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องจากการวัดในอุดมคติ	4-1

4.9.2	การวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องจากระบบงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ	4-1
4.9.3	ความละเอียดถูกต้องของวัดพิกัดภาพเพื่อใช้ในการคำนวนพิกัดวัตถุ.....	4-1
4.9.4	การนำผลการวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องไปใช้ออกแบบระบบงาน	4-1
4.10	คำถามท้ายบท.....	4-1
5	ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ	5-1
5.1	จุดควบคุมภาพถ่าย.....	5-1
5.2	ชนิดของจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ	5-1
5.2.5	จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point).....	5-1
5.2.6	จุดควบคุมภาพถ่ายชนิดระดับ (Levelling Control Point).....	5-1
5.2.7	จุดผ่าน (Pass Point).....	5-1
5.2.8	จุดโยงยึด (Tie Point).....	5-1
5.3	ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่าย.....	5-1
5.4	วิธีการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอก.....	5-1
5.5	เทคนิคการคำนวนข่ายสามเหลี่ยมแบบลำแสงเป็นล็อค.....	5-1
5.5.5	การพิจารณาคู่ภาพที่อยู่ติดกัน.....	5-1
5.5.6	การพิจารณาบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ.....	5-1
5.5.7	รูปแบบของโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ.....	5-1
5.6	การแก้ปัญหาข่ายสามเหลี่ยม	5-1
5.7	ตัวอย่างการสร้างระบบสมการ	5-1
5.7.5	การแก้ปัญหาด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด	5-1
5.7.6	เวกเตอร์ของค่าสังเกต	5-1
5.7.7	เวกเตอร์ของตัวไม่ทราบค่า	5-1
5.7.8	สมการค่าสังเกต	5-1
5.7.9	แมทริกซ์แบบจำลอง	5-1
5.7.10	ผลคำตอบ	5-1
5.8	การกำหนดความละเอียดถูกต้องของจุดควบคุมภาคพื้นดิน	5-1
5.9	การจัดวางจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดิน	5-1
5.9.5	บล็อกปกติ (Typical Block).....	5-1
5.9.6	บล็อกความถูกต้องสูง (High-Accuracy Block)	5-1
5.9.7	บล็อกมีແຄบคຸມ (Block with Control Strips)	5-1
5.9.8	บล็อกجيพีเอส (GPS Block)	5-1
5.10	ขั้นตอนการวัดสำหรับงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ	5-1
5.10.1	การวัดจุดผ่าน (Pass Points).....	5-1
5.10.2	การวัดจุดโยงยึด (Tie Point).....	5-1
5.10.3	การวัดจุดบังคับภาคพื้นดินชนิดระดับ (Levelling GCP)	5-1
5.10.4	การวัดจุดบังคับภาพถ่าย (Ground Control Point)	5-1
5.11	ข้อควรระวังและข้อสังเกต	5-1

5.11.1 การเลือกจุดบังคับภาพ.....	5-1
5.11.2 ระบบความสูงของค่าระดับ	5-1
5.12 การวัดสอบตนเอง (SELF-CALIBRATION)	5-1
5.13 การคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีแบบจำลองอิสระ	5-1
5.13.1 การเปรียบเทียบวิธีปรับแก้ที่ข่ายสามเหลี่ยม	5-1
5.14 วิัฒนาการของงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ	5-1
5.15 คำถามท้ายบท.....	5-1
 6 แบบจำลองระดับ	6-1
6.1 บทนำ.....	6-1
6.2 เทคนิคลดีของการรังวัดค่าระดับ.....	6-1
6.2.1 การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ	6-1
6.2.2 การรังวัดด้วยลีเดาร์	6-1
6.3 เกณฑ์ความละเอียดถูกต้องของจุดค่าระดับ.....	6-1
6.4 ความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับจากภาพดิจิทัล.....	6-1
6.5 ระยะห่างของจุดระดับ.....	6-1
6.6 รูปแบบการจัดเก็บแบบจำลองระดับ	6-1
6.6.1 แบบจำลองระดับแบบแอสกี (ASCII).....	6-1
6.6.2 แบบจำลองระดับแบบจุดสุ่ม	6-1
6.6.3 แบบจำลองระดับแบบแรสเตอร์หรือกริด	6-1
6.6.4 แบบจำลองระดับแบบข่ายสามเหลี่ยมไม่สมำเสมอ	6-1
6.6.5 แบบจำลองระดับแบบเวกเตอร์	6-1
6.7 การประมวลผลแบบจำลอง	6-1
6.7.1 การหาความลาดชันและทิศทางความลาดชันจากแบบจำลองแรสเตอร์	6-1
6.7.2 การประมาณค่าระดับด้วยวิธี IDW	6-1
6.7.3 การวิเคราะห์ TIN	6-1
6.8 การควบคุมคุณภาพ	6-1
6.8.1 การประเมินคุณภาพ (Quality Assessment).....	6-1
6.9 การแปลงรูปแบบแบบจำลองระดับ	6-1
6.9.1 แบบจำลองระดับชนิดข่ายสามเหลี่ยมรูปร่างไม่สมำเสมอ	6-1
6.9.2 แบบจำลองระดับชนิดเส้นชี้ความสูง.....	6-1
6.9.3 แบบจำลองระดับชนิดแรสเตอร์	6-1
6.10 การแบ่งข้อมูลแบบจำลองระดับเป็นรูปแบบที่	6-1
6.11 รูปแบบการจัดเก็บแบบจำลองระดับ	6-1
6.12 แบบจำลองระดับพร้อมใช้	6-1
6.12.1 แบบจำลองระดับ GLOBE และ GTOPO30	6-1
6.12.2 แบบจำลองระดับ SRTM.....	6-1
6.12.3 แบบจำลองระดับจากโครงการแผนที่ฯ ของกระทรวงเกษตร	6-1

6.13	คำถามท้ายบท.....	6-1
7	การประมวลผลภาพ.....	7-1
7.1	กระบวนการดิจิเตล์ (DIGITIZATION)	7-1
7.1.1	การคุณไตรช์ (Quantization) และการสัมเก็บ (Resampling).....	7-1
7.1.2	การแสดงภาพ (Picture Representation).....	7-1
7.1.3	ความละเอียดของจุดภาพทางเรขาคณิต.....	7-1
7.1.4	ความละเอียดของจุดภาพทางเรดิโอมิตรี (Radiometric Resolution)	7-1
7.2	ชนิดของภาพดิจิทัล.....	7-1
7.2.1	ภาพสองระดับสี (Bi-level Image).....	7-1
7.2.2	ภาพระดับสีเทา (Grey-level Image)	7-1
7.2.3	ภาพสีจริง (True-Color Image).....	7-1
7.2.4	ภาพสีด้วยชื่อ (Index-Color Image).....	7-1
7.3	แหล่งที่มาของภาพดิจิทัล.....	7-1
7.3.1	ภาพถ่ายทางอากาศ.....	7-1
7.3.2	ภาพถ่ายดิจิทัลจากการสำรวจระยะไกล	7-1
7.3.3	ภาพดิจิทัลที่ได้จากการถ่ายภาพดิจิทัล	7-1
7.3.4	ภาพดิจิทัลที่ได้จากการสแกน	7-1
7.4	สแกนเนอร์.....	7-1
7.4.1	สแกนเนอร์สำหรับงานสีทึบมืด	7-1
7.4.2	สแกนเนอร์สำหรับงานแพนท์และคอมพิวเตอร์ซึ่งเปลี่ยนแบบ	7-1
7.4.3	สแกนเนอร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพ	7-1
7.5	การสแกนภาพถ่ายทางอากาศ	7-1
7.5.1	ขนาดของภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนแล้ว.....	7-1
7.5.2	การใช้งานภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นดิจิทัล	7-1
7.6	ฮีสโตแกรม	7-1
7.7	การจัดการฮีสโตแกรม	7-1
7.7.1	Look-Up Table	7-1
7.7.2	การใช้กราฟ	7-1
7.7.3	การใช้ฟังก์ชันการแปลง (Transformation Function)	7-1
7.8	การทำภาพให้เป็นภาพสีกลับ.....	7-1
7.9	การทำภาพให้เป็นสอง.....	7-1
7.10	การปรับความคมชัดและความสว่างของภาพ	7-1
7.11	การปรับภาพด้วยวิธีดึงยืด	7-1
7.12	การบีบอัดภาพ	7-1
7.13	การอ้างอิงค่าพิกัดโลก.....	7-1
7.12.1	การกำหนดค่าพิกัดจุดอ้างอิงหนึ่งจุดและความละเอียดจุดภาพ	7-1
7.12.2	การกำหนดค่าพิกัดจุดอ้างอิงสองจุดและขนาดของภาพ	7-1

7.12.3	การใช้การแปลงค่าพิกัดชนิดแอฟไฟน์.....	7-1
7.13	คำตามท้ายบท.....	7-1
8	แผนที่ภาพออร์โท.....	8-1
8.1	ภาพดัดแก้ออร์โท.....	8-1
8.1.1	ภาพออร์โทแท้จริง (True Orthophoto).....	8-1
8.1.2	ความคลาดเคลื่อนของภาพถ่ายเอียง.....	8-1
8.1.3	การผลิตภาพดัดแก้ออร์โทจากภาพถ่ายทางอากาศ.....	8-1
8.2	สถานีงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัล.....	8-1
8.3	การผลิตแผนที่ภาพถ่ายออร์โทในต่างประเทศ.....	8-1
8.3.1	กรณีศึกษาของ Cartographic Institute of Catalunya, Spain.....	8-1
8.4	มาตรฐานความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่.....	8-1
8.4.1	ความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่จากการภาพถ่ายทางอากาศ.....	8-1
8.4.2	การประเมินความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่จากการภาพถ่ายทางอากาศ.....	8-1
8.4.3	ความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่จากการภาพถ่ายทางอากาศ.....	8-1
8.5	ข้อคิดคำนึงในการตัดแก้ภาพถ่ายทางอากาศ.....	8-1
8.5.1	pragmatics การบดบังและความละเอียดถูกต้อง.....	8-1
8.5.2	การเลือกส่วนของภาพที่มีความผิดเพี้ยนน้อย.....	8-1
8.6	อัลกอริธึมในการผลิตภาพถ่ายดัดแก้ออร์โท.....	8-1
8.6.1	การคำนวณเชิงบทภาพออร์โทเบื้องต้น.....	8-1
8.6.2	การกำหนดความละเอียดของภาพถ่ายออร์โท.....	8-1
8.6.3	การย้อนรอยรังสี	8-1
8.6.4	การหาค่าพิกัดภาพดิจิทัล	8-1
8.6.5	การหาค่าความสว่างจุดภาพหรือสีของจุดภาพ	8-1
8.6.6	การให้กำเนิดจุดภาพที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนแล้ว	8-1
8.6.7	การวนซ้ำ.....	8-1
8.7	การโม่เศกภาพ.....	8-1
8.7.1	การโม่เศกทางเรขาคณิต.....	8-1
8.7.2	การโม่เศกทางรังสีหรือโทโนสี	8-1
8.7.3	การสร้างภาพใหม่ที่เป็นภาพโม่เศกแล้ว	8-1
8.8	การจัดเก็บ	8-1
8.8.1	ขนาดของแผนที่ภาพออร์โท	8-1
8.9	การประยุกต์ใช้การบีบอัดข้อมูล.....	8-1
8.10	การประยุกต์ใช้งานแผนที่ภาพดัดแก้ออร์โท	8-1
8.10.1	การคัดลอกลายเส้นบนภาพถ่ายดัดแก้ออร์โท	8-1
8.11	แผนที่ภาพสีออร์โทโดยกระตรวจทางอากาศและสหกรณ์	8-1
8.12	คำตามท้ายบท.....	8-1
9.	การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (AIRBORNE LASER SCANNING)	1

9.1	องค์ประกอบระบบเลเซอร์สแกนเนอร์.....	1
9.2	การบินสำรวจโปรไฟล์ด้วยเลเซอร์ (AIRBORNE LASER PROFILE).....	1
9.3	การทำหน้าที่ของเลเซอร์	1
9.4	ความสามารถการสะท้อนกลับของวัสดุ	1
9.5	การสะท้อนกลับของเลเซอร์ (LASER RETURNS).....	1
9.6	ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์	1
9.7	ผลผลิตเลเซอร์สแกนเนอร์	1
9.7.1	การแสดงผลในสามมิติ (3D visualization).....	1
9.7.2	มาตรฐานการจัดเก็บข้อมูลไลดาร์.....	1
9.8	การประมวลผลข้อมูลเลเซอร์สแกนเนอร์.....	1
9.8.1	การประมวลผลทางเรขาคณิต (lidar geometric processing)	1
9.8.2	การจำแนกจุดไลดาร์ (lidar point classification)	1
9.8.3	ซอฟต์แวร์ประมวลผลไลดาร์ (lidar software processing).....	1
9.8.4	ระดับการประมวลผล (lidar processing level).....	1
9.9	ระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศ	1
9.9.1	Optech	1
9.9.2	Leica Geosystems.....	1
9.9.3	Riegl	1
9.9.4	IGI	1
9.9.5	Trimble/TopoSys	1
9.9.6	Optech SHOALS	1
9.10	การประยุกต์ใช้ไลดาร์ในประเทศไทย.....	1
9.10.1	โครงการประยุกต์ใช้ไลดาร์สำหรับงานวิศวกรรม.....	1
9.10.2	ระบบพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่เขตเมืองเชียงใหม่ (2550)	1
9.10.3	โครงการสำรวจข้อมูลระดับความสูงด้วยระบบไลดาร์	1
9.10.4	การประยุกต์ใช้ไลดาร์ของกรมชลประทาน.....	1
9.10.5	การประยุกต์ใช้ไลดาร์หลังเหตุการอุทกภัยครั้งใหญ่ ปลายปีพศ. 2554	1
9.11	มาตรฐานการดำเนินการสำรวจด้วยไลดาร์	1
9.12	การเบรี่ยงเทียบกับเทคโนโลยีอื่นๆ	1
9.13	คำถ้ามห้ายบท.....	1

1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการเกริ่นนำ เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงภาพรวมของการรังวัดด้วยภาพ คำจำกัดความของ การรังวัดด้วยภาพจากกลุ่มนักวิชาชีพที่เกี่ยวข้องโดยตรง ประเภทของการรังวัดด้วยภาพตามลักษณะน ประวัติ ความเป็นมา วิวัฒนาการของการรังวัดด้วยภาพจากอดีตไปจนถึงปัจจุบัน ระบบงานรังวัดด้วยภาพโดยเนพาร์ รังวัดด้วยภาพดิจิทัล ผลผลิตของการรังวัดด้วยภาพ การศึกษา วิชาชีพและหน่วยงานที่ใช้การรังวัดด้วยภาพ

1.1 คำจำกัดความ

การรังวัดด้วยภาพ (Photogrammetry) เป็นการศาสตร์และเทคโนโลยีหนึ่งสำหรับการสำรวจรังวัดเพื่อทำ แผนที่และสร้างข้อมูลภูมิสารสนเทศ การรังวัดด้วยภาพจะใช้ภาพเป็นสื่อกลางในการรังวัด ภาพที่ใช้เป็นสื่อกลาง ในการบันทึกสิ่งปักคุณและสิ่งที่ปรากฏทางกายภาพบนพื้นผิวภูมิประเทศ สิ่งที่ปักคุณและปรากฏบนภูมิ ประเทศเป็นไปตามลักษณะของการใช้ที่ดิน อาณาบริเวณ อาคารสถานที่ หรือวัตถุที่สนใจ ภาพของสิ่งเหล่านั้นจะ ไปปรากฏในลักษณะจำลองแบบตามหลักการขยายของแสงด้วยวิธีทางกลไก เชิงทัศน์ หรือเชิงคอมพิวเตอร์ ทำให้ สามารถที่จำลองสถานการณ์เมื่อเวลาที่บันทึกภาพได้

การรังวัดด้วยภาพเป็นทั้งศาสตร์และศิลป์เนื่องจากกระบวนการมีความซับซ้อน เครื่องมือเป็นกลไกและ อุปกรณ์เชิงทัศน์ที่ต้องใช้ทั้งความเข้าใจ การฝึกฝนและความชำนาญในการทำงาน ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นทั้งพิกัดของ ตำแหน่งของวัตถุ ขนาด และรูปร่างตามมิติพร้อมกันได้ทันที

การรังวัดด้วยภาพสามารถทำได้โดยผู้ที่รังวัดไม่จำเป็นต้องเข้าสัมผัสร่วดถูก สามารถใช้การสังเกตและ บันทึกจากระยะไกล การรังวัดสามารถครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้เครื่องมือและ อุปกรณ์ประกอบการทำงานเป็นจำนวนมาก กระบวนการทุกขั้นตอนมีความละเอียดอ่อน ต้องอาศัยความชำนาญ และฝึกฝน

1.1.1 นิยามของการรังวัดด้วยภาพตาม ISPRS

International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) เป็นสมาคมวิชาชีพนานาชาติ สำหรับการรังวัดด้วยภาพและสำรวจระยะไกล ได้นิยามความหมายของการรังวัดด้วยภาพไว้ว่า การรังวัดด้วยภาพ และการสำรวจระยะไกล เมื่อศิลปะ วิทยาการ และเทคโนโลยีในการที่จะ ได้ข้อมูลข่าวสารที่ซื่อสัตย์ ได้จากการรังวัดบนภาพ (imaging) ของวัตถุที่บันทึกได้โดยไม่ต้องสัมผัสร่วดถูกนั้น หรืออาจเป็นการรังวัดบนภาพที่ได้จาก กระบวนการตรวจสอบขั้น (sensor system) โดยและสิ่งแวดล้อม หรือวัตถุทางกายภาพต่างๆ และมีการประมวลผลด้วย การบันทึก การวัด การวิเคราะห์ และการแสดงผล

ตามนี้

Photogrammetry and Remote Sensing is the art, science, and technology of obtaining reliable information from non-contact imaging and other sensor systems about the Earth and its environment, and other physical objects and processes through recording, measuring, analyzing and representation (ISPRS).

1.1.2 นิยามของการรังวัดด้วยภาพตาม ASPRS

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) เป็นสมาคมวิชาชีพของชาว อเมริกันสำหรับการรังวัดด้วยภาพและสำรวจระยะไกล ได้นิยามความหมายของการรังวัดด้วยภาพไว้ว่า การรังวัด

ด้วยภาพเป็นศิลป/ วิทยาการและเทคโนโลยีในการที่ทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลข่าวสารที่มีความน่าเชื่อถือเกี่ยวกับภาพของวัตถุและสิ่งแวดล้อมโดยผ่านกระบวนการบันทึก การวัด และการแปลภาพ และรูปแบบ ของผลงาน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พร้อมกันและปรากฏการณ์อื่นๆ

ในเนื้อความด้านบนของ ASPRS กล่าวไว้ดังนี้

Photogrammetry is the art, science, and technology of obtaining reliable information about physical objects and the environment, through processes of recording, measuring, and interpreting images and patterns of electromagnetic radiant energy and other phenomena (ASPRS).

1.2 นิยามของการรังวัดด้วยภาพตามการประยุกต์ใช้

นอกจากความหมายของการรังวัดด้วยภาพ (Photogrammetry) ดังที่กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น ยังมีการนำการรังวัดด้วยภาพไปประยุกต์เฉพาะทางต่างๆ หรือมีการปรับปรุงกระบวนการทำงานโดยนำเทคโนโลยีอื่นๆมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงสมัยใหม่ เช่น การประมวลผลภาพดิจิทัล (digital image processing) การรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส (Global Positioning System : GPS) ทำให้เกิดเป็นศาสตร์ในการรังวัดด้วยภาพแขนงย่อยอีกไปตามขอบเขตการใช้งาน ดังนั้นนิยามการรังวัดโดยใช้ภาพเป็นสื่อกลางสามารถแบ่งเป็นประเภทตามลักษณะการประยุกต์ใช้งานและการผนวกร่วมเทคโนโลยีอื่นๆดังนี้

1.2.1 การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (Air-borne Photogrammetry / Aerial Photogrammetry)

การรังวัดทำแผนที่จากภาพถ่ายที่บันทึกจากกล้องที่ติดตั้งบนอากาศยานที่เรียกว่า ภาพถ่ายทางอากาศ เป็นกรณีที่พบบ่อยที่สุดและเป็นวิธีการหลักในการทำแผนที่ในพื้นที่กว้างวิ媳หึ่ง การบันทึกภาพถ่ายทางอากาศ ทำได้โดยการใช้กล้องถ่ายภาพที่มีพื้นที่รับภาพขนาดใหญ่ (large-format) ไปจนถึงกล้องที่มีพื้นที่รับภาพขนาดปานกลางไปจนถึงเล็ก (medium to small-format) ก็ได้ กล้องที่ออกแบบเฉพาะกิจจะมีพื้นที่รับภาพกว้างและยาว ในช่วง 6 ถึง 12 นิ้ว หรือคิดเป็น 15 ถึง 30 เซนติเมตร สำหรับการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศทั่วไปนิยมใช้กล้องถ่ายภาพขนาดพื้นที่รับภาพกว้างและยาว 9 นิ้วหรือ $\frac{3}{4}$ ฟุต หรือโดยประมาณเทียบเท่า 230 มิลลิเมตร

การบันทึกภาพถ่ายทางอากาศเพื่อทำแผนที่มักจะบันทึกภาพถ่ายดิจิทัลหรือเก็บดิจิทัลโดยทั่วไปจะแทนดิจิทัลของภาพจะเปลี่ยนเป็นแบบดิจิทัลไม่เกิน 3° ทั้งนี้เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมและคุณภาพภาพสม่ำเสมออย่างเป็นระบบในพื้นที่ ดังนั้นเครื่องบินหรืออากาศยานที่ใช้จะต้องมีเสถียรภาพสูง สามารถประคองลำตัวได้แน่นเมื่อบินในระดับค่อนข้างต่ำและความเร็วไม่สูงนัก เครื่องบินที่ใช้มักจะเป็นชนิดปีกยึด (fixed wing) และมีเครื่องยนต์สองเครื่องยนต์ติดตั้งบนปีกสมดุลกัน การถ่ายภาพทางอากาศและรังวัดทำแผนที่ถือได้ว่าเป็นวิธีหลักที่มีความสะดวกรวดเร็วที่สุดที่จะทำแผนที่ระดับภูมิภาค ระดับประเทศ ระดับโครงการ ไปจนถึงการสำรวจเป็นพื้นที่เฉพาะ หรือการสำรวจตามแนวทาง สำหรับการทำแผนที่มาตรฐาน 1:50,000 ไปจนถึง 1:1,000

ในตัวอย่างต่อไปนี้แสดงภาพถ่ายทางอากาศสีมาตรฐาน 1:25,000 จากโครงการแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่ดำเนินการระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง 2549 ซึ่งถือได้ว่าเป็นโครงการฯการรังวัดด้วยภาพที่ใหญ่และสำคัญที่สุดของประวัติศาสตร์การรังวัดด้วยภาพของประเทศไทย ในโครงการแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์มีการบันทึกภาพถ่ายทางอากาศครอบคลุมทั่วประเทศกว่า 70,000 ภาพในห้างเวลาที่ต่อเนื่องกัน แล้วนำมาผลิตแผนที่ภาพคอร์ติฟร้อมแบบจำลองระดับความละเอียดสูง



รูปภาพ 1-1 ภาพถ่ายทางอากาศสีมาตรฐาน 1:25,000 จากโครงการแผนที่ ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

1.2.2 การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetry)

การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetry) หรือ การสำรวจด้วยภาพถ่ายเชิงเลข เป็นการรังวัดด้วยภาพที่นำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) มาใช้ในกระบวนการรังวัดและประมวล กระบวนการทำงานจะใช้การคำนวณเชิงวิเคราะห์ โดยอาศัยการคำนวณเชิงเลข เป็นหลัก การนำคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์มาช่วยในการรังวัดสามารถลดความผิดพลาด ความเหลื่อมล้ำของมนุษย์ ในการทำงานได้ แต่ก็ต้องใช้ความรู้ความเข้าใจการใช้คอมพิวเตอร์ตลอดจนอัลกอริธึมแทน

ปัจจุบันในส่วนของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ กล้องถ่ายภาพทางอากาศนิดเป็นดิจิทัลยังไม่แพร่หลาย การรังวัดด้วยภาพดิจิทัลจึงเริ่มด้วยการเปลี่ยนภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่บนฟิล์มเนกานีฟหรือ โคอาพอชีติฟให้เป็นภาพถ่ายเลขหรือภาพถ่ายดิจิทัลเสียก่อน สำหรับกล้องถ่ายภาพทางอากาศพื้นดินซึ่งปัจจุบันมีผู้ใช้กล้องสมัครเล่นที่สามารถใช้ในการรังวัดด้วยภาพได้ ด้วยประสิทธิภาพของกล้องดิจิทัลที่สามารถบันทึกภาพได้ด้วยความละเอียดสูง มีซอฟต์แวร์ที่มีขีดความสามารถในการประมวลผลอย่างรวดเร็วและซับซ้อน จึงมีการประยุกต์ใช้การรังวัดด้วยภาพดิจิทัลมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน

1.2.3 การรังวัดด้วยภาพด้วย softcopy (Softcopy Photogrammetry)

Softcopy หมายถึงเครื่องมือที่อยู่ในรูปซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ซึ่งหมายความตรงข้ามกับ “hard-copy” ซึ่งเป็นวัสดุที่มีตัวตนที่นำมาประกอบให้เป็นเครื่องมือรังวัดสำหรับการรังวัดด้วยภาพ การรังวัดบนภาพด้วย softcopy เป็นคำนิยามทางเทคนิคที่นิยมกล่าวถึงบ่อยในช่วงปลายศตวรรษที่ 80 ไปจนถึงช่วงต้นศตวรรษที่ 90 ซึ่งเป็นช่วงต่อระหว่างยุคของการประมวลผลด้วยเครื่องมือที่เป็นเชิงวิเคราะห์กับการถ่ายไปสู่เครื่องมือที่เป็นดิจิทัล

การรังวัดบนภาพด้วย softcopy เป็นการรังวัดด้วยภาพโดยหลักการพื้นฐานเดียวกันกับการรังวัดบนภาพเชิงวิเคราะห์ ที่นำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์มาช่วย เป็นการรังวัดบนภาพโดยการใช้เครื่องมือที่ประกอบขึ้นด้วยซอฟต์แวร์และคอมพิวเตอร์ทั้งสิ้น โดยที่จุดเริ่มต้นคือต้องมีภาพถ่ายในรูปดิจิทัลเสียก่อน

1.2.4 การรังวัดด้วยภาพพร้อมจีพีเอส (GPS Photogrammetry)

การรังวัดด้วยภาพพร้อมจีพีเอสหมายถึงการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่ทำเป็น “บล็อก” โดยที่ในขณะที่บินถ่ายภาพมีการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสชนิดสองความถี่ช่วยในการหาตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพขณะที่บินบันทึกภาพด้วย การรับสัญญาณจีพีเอสจะรับไปพร้อมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอีกเครื่องหนึ่งที่สถานีฐาน การประมวลผลร่วมกันของข้อมูลสัญญาณทั้งสองทำให้ได้ค่าพิกัดของตำแหน่งบันทึกภาพจาก การรับสัญญาณดาวเทียม การรับสัญญาณดาวเทียมบันทึกเครื่องบินและเครื่องรับที่สถานีฐานแล้วนำไปคำนวณ จำเป็นการคำนวนภายหลัง (Post-processing) ทำให้ผลการคำนวนค่าพิกัดประสิทธิภาพและมีความละเอียดถูกต้องมากขึ้น ค่าพิกัดที่ได้โดยตรงจากจีพีเอสแล้วนำไปสัมพันธ์กับพิกัดของศูนย์กลางของกล้องจะทำให้จำนวนชุดบังคับภาพถ่ายลดลงอย่างมากในขณะที่ให้ความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ของบล็อกสูง เช่นเดิม



รูปภาพ 1-2 เครื่องบินสำหรับการถ่ายภาพทางอากาศและเสื้ออากาศรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

นอกจากนี้ การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศพร้อมจีพีเอสยังมีการใช้อุปกรณ์ Inertial Motion Unit (IMU) ที่ประกอบด้วยเครื่องวัดอัตราการหมุนรอบแกนสามมิติ (rotation rate) และอุปกรณ์ตรวจจับอัตราเร่งในทั้งสามแกน (3-D Acceleration) พร้อมกัน การใช้งานจะมีการนำผลการรับสัญญาณจีพีเอสพร้อมการตรวจจับอัตราเร่งมาประมวลผลพร้อมกัน การผสมผสานจีพีเอสและไออีเม็ยจะทำให้ตรวจจับตำแหน่งของระบบด้วยความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งทั้งสามมิติในระดับต่ำกว่า 5 เมตร ดิจิเมตร และให้ความละเอียดถูกต้องทางมุมหมุนทั้งสามแกนต่ำกว่า 10 พลิปดา การที่ได้ตำแหน่งและมุมหมุนของกล้องถ่ายภาพโดยเครื่องมือดังกล่าวบนเครื่องบินในขณะบันทึกภาพทำให้กระบวนการทำแผนที่จากภาพเร็วขึ้นมาก กระบวนการหาตำแหน่งและมุมหมุนของกล้องถ่ายภาพโดยตรงนี้เรียกว่า Direct Geo-referencing (Cramer 2000) หรือ Direct Geo-positioning (Sanchez 2004)

1.2.5 การรังวัดภาพพื้นดิน (Terrestrial Photogrammetry)

การรังวัดภาพพื้นดิน (Terrestrial Photogrammetry) เป็นการประยุกต์การรังวัดด้วยภาพที่มีการใช้เครื่องมือและค่าเนินการรังวัดบนภาคพื้นดิน การรังวัดใช้กล้องที่มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายในสนามได้สะดวก การรังวัดภาพพื้นดินนิยมใช้กับการทำแผนที่ภูมิประเทศที่ขอบเขตไม่กว้างขวางนัก แต่ภูมิประเทศซับซ้อน เช่นการทำแผนที่ของเหมืองเปิด การทำแผนที่ของภูมิประเทศที่เป็นเนินเขาและหุบเขา อุปสรรคสำคัญคือการบันทึกภาพขณะที่กล้องอยู่ใกล้พื้นดินและมองไปตามแนวราบจะทำได้ได้ภาพของภูมิประเทศหรือวัตถุที่มาตรฐานของวัตถุที่ปรากฏแตกต่างกันมาก อันเนื่องมาจาก การที่วัตถุที่ตั้งอยู่ใกล้กล้องปรากฏเดียวกัน

ปัจจุบันเนื่องจากความยุ่งยากในเทคโนโลยีการบันทึกภาพได้แก่ กล้องถ่ายภาพที่มีความถูกต้องสูงมีราคาแพงและใช้งานยาก นอกเหนือนี้เทคโนโลยีการรังวัดด้วยกล้องโทพอลอสเตชัน (Total Station) ที่มีความสามารถในการวัดระยะทางไปยังวัตถุใดๆ ได้โดยไม่ต้องเข้าถึง การรังวัดค่าพิกัดของจุดบนพื้นผิวที่อยู่ไกลออกไปในที่สูง โดยอาศัยหลักการของเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดไร้ปีระหัสท่อน (Reflectorless EDM) สามารถทำได้สะดวกด้วยกล้องโทพอลอสเตชัน

1.2.6 การรังวัดด้วยภาพระยะใกล้ (Close-range Photogrammetry)

การสำรวจระยะใกล้ (Close-range Photogrammetry) เป็นการรังวัดด้วยภาพที่ระยะระหว่างกล้องถ่ายรูปอยู่ห่างจากวัตถุที่จะรังวัดไม่มากนัก โดยทั่วไปจะจำกัดในระยะ 1 ถึง 100 เมตร จะมีการใช้กล้องถ่ายภาพพิเศษเพื่อการนี้โดยเฉพาะ ดังตัวอย่างในภาพ



รูปภาพ 1-3 กล้องถ่ายภาพระยะไกลสัมภาระ g) Zeiss UMK 喆) WILD P31

ปัจจุบันด้วยวิวัฒนาการของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่นิยมใช้งานอยู่ในชีวิตประจำวันหรือการถ่ายภาพเป็นงานอดิเรกที่มีศักยภาพพอที่จะนำมาใช้งานในการรังวัดด้วยภาพได้ โดยจะต้องมีกระบวนการรังวัดสอบ (calibrate) เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะทางเรขาคณิตของกล้องดิจิทัลเหล่านี้เสียก่อน การรังวัดด้วยภาพระยะไกลสามารถประยุกต์ใช้กับงานบันทึกภาพและจำลองแบบ โบราณสถาน โบราณวัตถุ งานด้านการตรวจสอบทางอุตสาหกรรม ทางด้านการแพทย์ เพื่อใช้หาขนาดและรูปร่างของวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือต้องการประยุกต์เวลาในการบันทึก



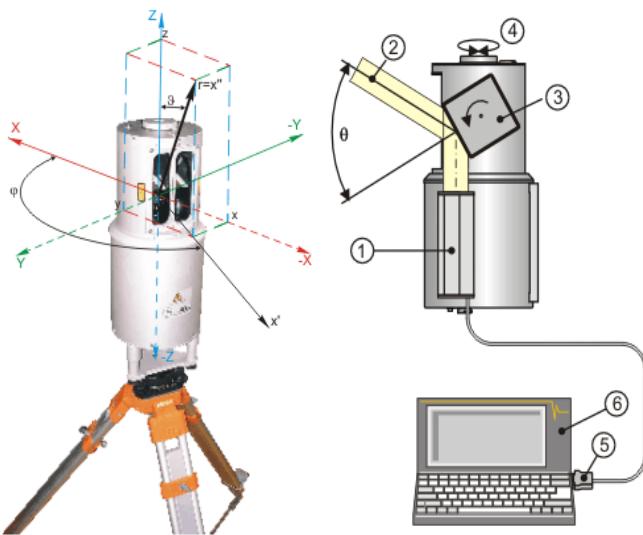
รูปภาพ 1-4 การรังวัดระยะไกลสัมภาระดิจิทัลเพื่อบันทึกรูปเหมือนเพื่อช่วยในการออกแบบก่อสร้าง (ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ 2543)

การรังวัดด้วยภาพถ่ายดิจิทัลเป็นการสำรวจวัดโดยมีภาพเป็นสื่อกลางในการรังวัด แต่ภาพที่ใช้จะต้องเป็นข้อมูลภาพดิจิทัลที่คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจได้ กระบวนการทำงานยังคงพื้นฐานจากการรังวัดด้วยภาพดังเดิม แต่อาศัยคอมพิวเตอร์ในการคำนวณเป็นส่วนใหญ่ ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นในรูปดิจิทัลทึ้งตัวเลขค่าพิกัดแบบจำลองสามมิติ แบบจำลองสามมิติพร้อมลวดลาย (textured three-dimension model)

การรังวัดด้วยภาพถ่ายดิจิทัลโดยใช้กล้องที่มีขยายอยู่ในท้องตลาดจัดเป็นวิธีที่ประยุกต์และให้แบบจำลองสามมิติพร้อมพื้นผิวที่สวยงามได้ แต่ว่าเมื่อวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างที่จะจำลองแบบมีความซับซ้อน ก็จะส่งผลให้การบันทึกภาพและการรังวัดควบคุมสนับสนุน การรังวัดบนคู่ภาพสามมิติมีเป็นภาระงานมาก การกำหนดพื้นผิวและ

อีนๆ ยุ่งยากมาก ดังนั้นในระยะหลังจึงมีการนำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Laser Scanner) มาใช้

ในภาพต่อไปนี้ แสดงเครื่องรังวัดด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดินติดตั้งบนขาตั้งกล้องสำรวจ ระบบประกอบด้วย เครื่องกำนันเดลเซอร์ ในภาพหมายเลข ① เครื่องกำนันเดลเซอร์ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังทบวัตถุเพื่อวัด ระยะทางอย่างต่อเนื่อง ปรีซึม ③ เป็นแบบสามเหลี่ยมให้ความในแนวตั้ง ② โรเตอร์ ④ ส่วนบนที่ทำหน้าที่ หมุนไปโดยรอบให้การภาวนานวนเป็นพื้นที่กว้าง และส่วนการเชื่อมต่อ ⑤ กับคอมพิวเตอร์ ⑥ สำหรับ ควบคุมเครื่องมือและจัดเก็บข้อมูล



รูปภาพ 1-5 เครื่องรังวัดด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Laser Scanner) จากบริษัท Riegle ออสเตรีย (<http://www.riegle.com>)

ระบบรังวัดด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถวัดคุณและระยะทางที่ตกรอบเป้าหรือพื้นผิววัตถุ แล้วนำผล การรังวัดไปคำนวณพิกัดในสามมิติได้ละเอียดถูกต้องหลายมิลลิเมตร ไปจนถึงเดซิเมตร ค่าพิกัดที่บันทึกได้นั้น หมื่นล้านรายละเอียดจุดนี้เรียกว่า “Point Cloud” จะถูกจัดเก็บลงในคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปประมวลสร้างแบบจำลอง สามมิติในภายหลัง สำหรับนั่งระบบมีการติดตั้งกล้องดิจิทัลร่วมกับระบบเพื่อบันทึกภาพพื้นผิวที่สามารถ นำไปใช้ลงบนแบบจำลองสามมิติในภายหลังได้

1.2.7 การรังวัดด้วยภาพสำหรับงานสถาปัตยกรรม (Architectural Photogrammetry)

การรังวัดด้วยภาพสำหรับงานสถาปัตยกรรมเป็นการรังวัดโดยใช้ภาพเป็นสื่อและการรังวัดบน ภาคพื้นดินที่เน้นการประยุกต์ใช้เฉพาะงานด้านสถาปัตยกรรม ได้แก่การรังวัดเพื่อหาขนาด รูปร่าง ของอาคาร สถานที่ ตึก หรือสิ่งปลูกสร้าง เพื่อใช้บันทึกความสวยงามของงานสถาปัตยกรรม

การรังวัดด้วยภาพสำหรับงานสถาปัตยกรรมเป็นการประยุกต์ใช้การรังวัดระยะไกลแบบหนึ่งที่เน้นใช้ เฉพาะสำหรับงานสถาปัตยกรรมของสิ่งปลูกสร้าง เช่น อาคาร ตึก ปราสาท โบราณสถาน เป็นต้น

1.2.8 การรังวัดด้วยภาพมาโคร (Macro Photogrammetry)

การรังวัดด้วยภาพมาโคร (Macro Photogrammetry) เป็นการรังวัดประยุกต์ใช้กับวัตถุเล็ก มักใช้ในงานทางวิทยาศาสตร์การแพทย์และอุตสาหกรรม ในทางการแพทย์มีการใช้ภาพคู่สามมิติที่ได้จากการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Jacobsen 1990) เพื่อตรวจสอบการผูกร่องของกระดูกหรือการวัดเพื่อการตรวจสอบชิ้นงานอุตสาหกรรม

1.3 วิวัฒนาการของการรังวัดด้วยภาพ

พื้นฐานของการรังวัดด้วยภาพอาจเริ่มตั้งแต่การที่มนุษย์รู้จักหลัก原理การประถมของภาพ ซึ่งเดิมมักจะใช้ประโยชน์ในทางศิลปะและการคาดภาพมากกว่าที่จะใช้ในการรังวัด และจากนั้นเป็นวิวัฒนาการบันทึกภาพตามลำดับเวลาดังนี้ (รวมรวมและเรียงจาก Photogrammetrie โดย Finsterwalder 1976)

ค.ศ. 1480 Leo da Vinci ศึกษา原理การณ์ของการถ่ายผ่านศูนย์

ค.ศ. 1471-1528 Albrecht Dürer กิตประดิษฐ์เครื่องช่วยเขียนภาพการถ่ายผ่านศูนย์



รูปภาพ 1-6 ภาพ "Goddess and Craftsman" A Perspective Drawing Machine โดย Albrecht Dürer

ค.ศ. 1650 Gerard Desargues และ Blaise ได้พัฒนาองค์ความรู้ด้าน เรขาคณิตของการถ่ายผ่านศูนย์

ค.ศ. 1835 Daguerre ชาวฝรั่งเศสค้นพบเทคโนโลยีการบันทึกภาพจากกล้องรูปเข้ม (camera obscura) ด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งเป็นพื้นฐานของการถ่ายรูปด้วยฟิล์มในปัจจุบัน

ค.ศ. 1851 A.Laussat ชาวฝรั่งเศส เป็นผู้คิดค้นการรังวัดด้วยภาพเป็นครั้งแรกซึ่งเขาเรียกศาสตร์นี้ว่า "Iconométrie" ซึ่งภาษาหลังเขานำไปเรียกว่า "Métrophotographie" (icon=รูป, metro=การวัด)

ค.ศ. 1858 G.F. Tournachon หรือมีอีกชื่อว่า Nadar ทำการถ่ายภาพถ่ายทางอากาศเป็นครั้งแรก



รูปภาพ 1-7 ภาพวาดแสดงการถ่ายภาพทางอากาศครั้งแรกที่กรุงปารีสปี ค.ศ.1858

ค.ศ. 1860 James Wallace Black ทำการถ่ายภาพทางอากาศ ณ เมืองบอสตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังในภาพ



รูปภาพ 1-8 ภาพถ่ายทางอากาศของ James Wallace Black ปี ก.ศ.1860

ค.ศ. 1858 Maydenbauer ชาวเยอรมันพยาบาลที่จะถ่ายภาพคู่สามมิติสิ่งปลูกสร้างเพื่อทำการรังวัดสถาปัตยกรรม

ค.ศ. 1899 Sebastian Finsterwalder นักคณิตศาสตร์ชาวเยอรมัน ได้พิมพ์หนังความต่างๆเกี่ยวกับการวัดด้วยภาพได้แก่

- photogrammetric resection
- photogrammetric intersection
- analytical for two-ray intersection
- minimum sum square of vectors relating redundant conjugate rays
- practical examples of single photo resection

ค.ศ. 1901 Carl Pulfrich ได้พัฒนา stereocomparator ในนามของ ZEISS

ค.ศ. 1930 Earl Church., ศาสตราจารย์จาก Syracuse University ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เปิดสอนวิชา Analytical Photogrammetry

ค.ศ. 1932 Otto von Gruber ทำการสร้างอนุพันธ์จากสมการการฉายผ่านสูญญากาศ (perspective equations)

ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง การทำแผนที่โดยเฉพาะการทำแผนที่จากการตรวจสอบทางอากาศเป็นเรื่องสำคัญมากสำหรับการทำสำรวจ เทคโนโลยีจึงถูกคิดค้นและพัฒนาอย่างรวดเร็ว นับว่าเป็นปัจจัยที่ทำให้การสำรวจวัดด้วยภาพมีความสำคัญในการทำแผนที่อย่างมาก

ค.ศ. 1951 Helmut Schmidt ศึกษาการแก้ปัญหาทางแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการรังวัดด้วยภาพจากหลายสถานีถ่ายภาพ เพื่อนำมาใช้เป็นหลักการประยุกต์ใช้งานทางการรังวัดด้วยภาพ

ค.ศ. 1960 เครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ได้ถือกำเนิดขึ้น โดย Fairchild, Bendix , OMI สาธารณรัฐอเมริกา โดยการทำงานของ U.V. Helava

จากนั้นวิัฒนาการของการรังวัดด้วยภาพก็เพิ่มขึ้นตามลำดับ หลังจากการนำคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer : PC) เข้าสู่ตลาดโดย IBM ทำให้การพัฒนาคอมพิวเตอร์ก้าวไปอย่างรวดเร็ว การสำรวจด้วย

ภาพถ่ายเชิงวิเคราะห์ได้รับผลประโยชน์จากวิพัฒนาการนี้ด้วย ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญของการพัฒนาการสำรวจด้วยภาพดิจิทัล โดยมีวิพัฒนาการที่สำคัญดังนี้ (เรียนรู้จาก <http://www.askism.com> → History)

ค.ศ. 1988 Helava & Associates สาขิตการทำงานของ N-stage Comparator ที่ใช้ในการวัดเพื่อทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

ค.ศ. 1988 Kern ผู้ผลิตเครื่องมือสำรวจรังวัดและระบบรังวัดจากภาพถ่าย ได้นำเสนอผลิตภัณฑ์เครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์และมีการใช้ภาพสามมิติในระบบ โดยใช้ซอฟต์แวร์สร้างแบบจำลองสามมิติ

ค.ศ. 1990 Zeiss และ Intergraph นำผลิตภัณฑ์ PS-1 Scanner เป็นสแกนเนอร์สำหรับภาพถ่ายทางอากาศ ตัวแรกของโลกและภาพหลังที่ได้นำมาออกจำหน่าย

ค.ศ. 1990 ในเวลาเดียวกัน Vexcel Corp สาธารณรัฐอเมริกาได้สาขิตสแกนเนอร์ ที่ออกแบบให้สแกนภาพถ่ายทางอากาศในแนวตั้ง ซึ่งต่อมาได้ทำขายในชื่อ Vexcel VX

ค.ศ. 1991 Helava & Associates สาขิต ต้นแบบ Stereo-workstation ที่ต่อมาเจ้าหนายในนาม SOCET SET System พร้อมกันนี้ Galileo, I2S และ ISM แนะนำระบบผลิตภาพถ่ายของอวัยวะมนุษย์โดยนิคิติทัล

ค.ศ. 1990 เริ่มมีการนำเครื่องกำหนดตำแหน่งโลก GPS มาใช้ในการกำหนดเครื่องบินถ่ายภาพ โดยเมื่อต้นถูกนำมาใช้ในการปฏิบัติการบันทึกภาพ และเริ่มมีแนวคิดนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งของจุดเป้าถ่าย (exposure station coordinate) ของกล้องขณะที่บันทึกภาพ ในเวลาใกล้เคียงกันก็พบข้อจำกัดของการใช้ไฟล์อีสเพียงอย่างเดียว จึงมีการนำระบบกำหนดตำแหน่ง Inertial Measurement Unit (IMU) มาชดเชยและสมมูลฐานให้ระบบมีความละเอียดถูกต้องและมีความน่าเชื่อมากขึ้น

ในช่วงต้น ทศวรรษที่ 90 มีการศึกษาวิจัยการวัดความสูงภูมิประเทศาเพื่อสร้างแบบจำลองระดับด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยอาศัย Synthetic Aperture Radar (SAR) เทคนิคที่ใช้ก็อ Interferometric SAR (InSAR) ผลการวิจัยพัฒนาพบว่า ทำให้ได้แบบจำลองภูมิประเทศาที่สมบูรณ์ขึ้นเนื่องจากความสามารถของ雷达ในการทะลุทะลวงเมฆและบรรยายกาศที่เป็นอุปสรรคต่อการบันทึกภาพ แต่อย่างไรก็ตามการสร้างแบบจำลองระดับจาก雷达ที่มีข้อจำกัดที่ความละเอียดของระยะห่างของจุดระดับ (Spacing) และความละเอียดถูกต้องของค่าระดับที่วัดได้ยังไม่สามารถเพิ่มกันการรังวัดด้วยภาพได้

ค.ศ. 1992 Intergraph เปิดตัว Image Station ซึ่งเป็น Stereo Workstation พร้อมกับ Leica เปิดตัวสแกนเนอร์ต้นแบบ DSW

ในช่วงกลาง ทศวรรษที่ 90 มีการวิจัยและพัฒนาระบบการรังวัดแบบจำลองระดับจากอากาศยานโดยใช้เครื่องวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ การวัดระยะทางใช้เทคโนโลยี Light Detection and Ranging (Lidar) อากาศยานที่ใช้ต้องมีระบบกำหนดพิกัดและการวางแผนตัว (Position and Orientation System) ของเซนเซอร์ที่มีความละเอียดถูกต้องสูง ระบบกำหนดพิกัดและการวางแผนตัวประกอบด้วยระบบ GPS และ IMU ทำงานร่วมกันอย่างใกล้ชิดและนำผลการวัดทั้งสองระบบมาจำลองแบบและคิดคำนวนพร้อมกันเพื่อให้ความละเอียดถูกต้องสูงสุดและชดเชยจุดด้วยของกันและกัน การพัฒนา GPS/IMU ใช้เวลาอีกหลายปีจนกระทั่งได้รับการยอมรับจากการทำแผนที่และการสำรวจรังวัดด้วยภาพว่า คุณภาพและความละเอียดถูกต้องของพิกัดและการวางแผนตัวมีความน่าเชื่อถือพอเพียงที่

จะใช้ประกอบเช่นเชอร์ต่างๆ ที่ติดตั้งหึ้งในอากาศยานตลอด ยานพาหนะ แม่กระพั้งบุคคล การยอมรับ GPS/IMU เกิดขึ้นอย่างกว้างขวางในช่วงเปลี่ยนแปลงข้ามสู่ศตวรรษ 2000

ค.ศ. 1996 ในการประชุมใหญ่วิชาการทางด้านการรังวัดด้วยภาพของ International Society for Remote Sensing and Photogrammetry ที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า ISPRS Congress ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย ได้ใช้คำหัญประจำงานประชุมวิชาการในครั้งนั้นว่า “Digital Photogrammetry Ready for Take Off” คำหัญในครั้งนี้อาจมองได้ว่าเป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่แสดงให้เห็นว่าการรังวัดด้วยภาพดิจิทัลสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแผนที่ได้รึเมื่อขึ้นแล้ว

ค.ศ. 1999 หลังจากที่รัฐบาลสหราชอาณาจักรได้ออกกฎหมายอนุญาตให้เอกชนสามารถดำเนินการสร้างดาวเทียมเพื่อบันทึกภาพดาวเทียมรายละเอียดสูง (high-resolution satellite imagery) และดำเนินการขายภาพเชิงพาณิชย์ไปทั่วโลกได้ บริษัท Space Imaging ได้ส่งดาวเทียม IKONOS-2 ขึ้นสู่อวกาศ พร้อมกับการเริ่มดำเนินการธุรกิจภาพดาวเทียมรายละเอียดสูง ความละเอียดจุดภาพ 1 เมตร เป็นรายแรก ภาพดาวเทียมรายละเอียดสูงสามารถใช้ผลิตแบบจำลองระดับและแผนที่ภาพออร์โทมาตราส่วนใหญ่ได้ นับว่าเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับการผลิตแผนที่มาตรฐานให้กับภารกิจสำรวจฐานข้อมูลภูมิสารสนเทศ ด้วยระบบการบันทึกข้อมูลจากดาวเทียมที่โครงการค้างฟ้า ขอบเขตการบันทึกข้อมูล ไร้พรมแดน การให้บริการข้อมูลภาพภูมิประเทคโนโลยีในรูปแบบดิจิทัลที่สะดวกในการจัดเก็บและให้บริการ

ค.ศ. 2000 บริษัท Z/I Imaging และ LH System สหราชอาณาจักร ผู้ผลิตกล้องถ่ายภาพทางอากาศนิดใช้ฟิล์มดึงเดินที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้งานมากที่สุด สองบริษัทได้นำผลิตภัณฑ์กล้องถ่ายภาพทางอากาศดิจิทัล Digital Modular Camera (DMC) และ Airborne Digital Sensor 40 (ADS-40) (Ziemann 2004) ออกสู่ตลาดเป็นครั้งแรก กล้องถ่ายภาพทางอากาศดิจิทัลสามารถบันทึกภาพภูมิประเทคโนโลยีอิฐในรูปดิจิทัลได้โดยตรง ทำให้กระบวนการประมาณผลภาพถ่ายทางอากาศที่ปัจจุบัน ที่ต้องบันทึกภาพด้วยฟิล์มและล้างอัดภาพเสียก่อน แล้วนำผลการบันทึกในรูปฟิล์มมาสแกนด้วยสแกนเนอร์ กระบวนการที่ซุ่งยาก ซับซ้อน ใช้เวลา ล้าวเปลืองวัสดุ ดังกล่าวจึงไม่มีความจำเป็นต่อไปอีก การผลิตประมาณผลภาพถ่ายแผนที่ในระบบดิจิทัลมีความสมบูรณ์เป็นดิจิทัลทั้งกระบวนการจึงเกิดขึ้น

ในห้วงเวลาเดียวกันระบบกำหนดตำแหน่งและการวางแผนตัวความละเอียดถูกต้องสูง GPS/IMU ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมา ระบบได้รับการพัฒนาให้มีความสมบูรณ์และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ผลการรับสัญญาณดาวเทียม GPS และการบันทึกสัญญาณจาก IMU จะถูกนำไปประมาณผลสัญญาณร่วมกันในภายหลัง ที่เรียกว่า Post Processing ผลการประมาณผลทำให้ได้ค่าพิกัด (position) และค่าการวางแผน (orientation) ที่ได้มีความละเอียดถูกต้องสูงมากและมีความน่าเชื่อ ในช่วงเวลาที่เริ่มนิยมกิจกรรมและงานวิจัยที่จะนำค่าพิกัดและค่าการวางแผนมาใช้กับภาพถ่ายทางอากาศโดยตรงแทนกระบวนการ “ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ” ที่ยุ่งยากและใช้เวลาในการทำงาน การนำตำแหน่งและการวางแผนมาใช้กับภาพถ่ายทางอากาศเรียกว่า “Direct Georeferencing” ซึ่งจะทำให้ภาพที่บันทึกด้วยกล้องจากอากาศยานสามารถนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อการรังวัดค่าพิกัด

ตลอดจนนำไปใช้ผลิตภาพดัดแก้ออร์โทได้ทันที ทำให้กระบวนการประมวลผลการรังวัดด้วยภาพลดเวลาลงอย่างมากและหลีกเลี่ยงการจัดทำ “ข้ามสามเหลี่ยมทางอากาศ” ได้

การพัฒนาระบบรังวัดแบบจำลองระดับโดยการรังวัดตรงจากอากาศยาน โดยใช้เครื่องวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ที่เรียกว่า ไลดาร์ (Light Detection and Ranging: :Lidar) ที่ได้รับการพัฒนาจนได้รับการยอมรับมาใช้ในการรังวัดและสร้างแบบจำลองระดับความละเอียดถูกต้องสูง ค่าระดับที่รังวัดได้จากไลดาร์มีความละเอียดถูกต้องสูงในช่วง 10 ถึง 30 เมตร ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดถูกต้องของ การรังวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ของปัจจุบัน กับตำแหน่งของอากาศยานที่สามารถตรวจจับด้วยความละเอียดถูกต้องสูงที่เป็นผลจากพัฒนาการของระบบ GPS/IMU ด้วย แบบจำลองระดับจากไลดาร์มีจุดเด่นที่มากๆ เมื่อเทียบกับจุดเด่นที่เดิมจะได้จากการรังวัดด้วยภาพ และสามารถสร้างแบบจำลองได้ดีกว่างานรังวัดด้วยภาพ เช่น ในเมืองที่อากาศสูงมีการบันทึกบันทึกในพื้นที่ป่าไม้และมีพืชพรรณปักคลุม เลเซอร์รู้ความถี่สูงจากไลดาร์ซึ่งมีโอกาสที่จะหลุดลวงช่องว่างลงไปสัมผัสพื้นผิวภูมิประเทศและสะท้อนกลับมาข้างบนเชอร์

ค.ศ. 2000 องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ NASA ได้ดำเนินการโครงการรังวัดแบบจำลองระดับหัวใจใหม่ในครั้งเดียวด้วยระยะเวลา 11 วันในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2000 การสำรวจจากกระสวยอวกาศ (Space Shuttle) ด้วยวิธี Interferometric SAR ดำเนินการโครงการชื่อ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ผลการสำรวจจัดเก็บข้อมูลกว่าปริมาณมหาศาลและการประมวลผลกว่าสามปี ทำให้ได้แบบจำลองระดับของโลกใหม่ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากเครื่องมือและวิธีการเดียวกัน แบบจำลองระดับ SRTM มีความละเอียดถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ 5-15 เมตร และมีจุดเด่นที่ต้องทุก 30 เมตร ทั่วโลก แม้ว่าความละเอียดถูกต้องและระยะห่างของจุดเด่นยังไม่อาจเทียบเท่ากับผลงานที่รังวัดจากภาพถ่ายทางอากาศได้ แต่ข้อมูลแบบจำลองระดับที่ได้นับว่ามีคุณค่าและมีประโยชน์มากสำหรับการสำรวจรังวัดด้วยภาพ เช่น การวางแผนการผลิตแผนที่ การผลิตแผนที่ภาพออร์โทอย่างประยุกต์และรวดเร็ว เป็นต้น

ค.ศ. 2002-2003 บริษัทวิจัยพัฒนาด้านเครื่องมือกำหนดตำแหน่งและการวางตัว (Position and Orientation system) ตลอดจนบริษัทวิจัยพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการประมวลผลภาพ (Image Processing) ได้หันมาสนใจผลิตกล้องดิจิทัลสำหรับการบันทึกภาพถ่ายทางอากาศเพื่อทำแผนที่ พร้อมกันนี้วิวัฒนาและการตลาดตลอดจนการผลิตเซ็นเซอร์รับภาพประเภท Charged-Couple Device (CCD) มีความก้าวหน้าไปพร้อมการเดินทางของตลาดกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง พัฒนาการโดยเฉลี่ยวัสดุการพัฒนาเซ็นเซอร์ CCD ให้มีขนาดพื้นที่รับภาพขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่กลไกทางการตลาดทำให้ราคาถูกลง บริษัทเหล่านี้ได้มีการนำเซ็นเซอร์ใหม่ๆ ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์กล้องบันทึกภาพถ่ายทางอากาศดิจิทัลในระดับราคาที่ต่ำลงสู่ตลาด กล้องดิจิทัลเหล่านี้ได้แก่ Vexcel Ultracam-D (Ziemann 2004), Emerge/Applanix DSS, IGI-DigiCAM (Grimm 2005) เป็นต้น อย่างไรก็ตามกล้องที่ออกแบบสนองความต้องการของตลาดในช่วงนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกล้องดิจิทัลที่มีความละเอียดจุดภาพ 10-24 ล้านจุดภาพ ขนาดพื้นที่รับภาพที่บันทึกได้ในแต่ละเฟรมมีขนาดปานกลางหรือที่เรียกว่า medium-format ไปจนถึง small-format

ปีจุบัน ก.ศ. 2006 การรังวัดด้วยภาพจากอากาศยานแล้วขึ้นมีการประยุกต์ใช้กับภาพที่บันทึกจากอากาศด้วยดาวเทียม การประมวลการรังวัดด้วยภาพเป็นระบบเดียวกับระบบประมวลผลภาพดาวเทียม ผลผลิตข้อมูลการรังวัดในสามมิติ โดยเฉพาะแผนที่ภาพออร์โทถูกผลิตออกมาก่อนอย่างต่อเนื่องและใช้งานอย่างแพร่หลาย ประวัติศาสตร์สำคัญครั้งหนึ่งที่เริ่มขึ้นในกลางปี ก.ศ. 2005 เป็นต้นมา คือการให้บริการเรียกใช้แผนที่ฟรี Google Earth และ Google Maps ที่เป็นการใช้งานแผนที่ภาพออร์โทจาก การประมวลผลภาพ ผู้ใช้สามารถเรียกใช้ภูมิสารสนเทศที่มีแผนที่ภาพออร์โทในระดับความละเอียดต่างๆ ละเอียดลึกซึ้งไปจนถึงเห็นหลักบ้านของคนเอง ได้อย่างง่ายดายครอบคลุมพื้นที่เกือบทั่วโลกผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต จึงมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทั่วทุกมุมโลก การประยุกต์ใช้เป็นการเรียกใช้ผ่าน 2D / 3D GeoBrowser หรือนำข้อมูลนั้นเข้าระบบ ได้ง่ายดายด้วยแนวคิดของ “push-pin application” ที่มุ่งให้ผู้ใช้ในทุกระดับทั่วโลกที่เข้าถึงอินเตอร์เน็ต ได้ใช้งานภูมิสารสนเทศผ่านเครือข่าย ผู้ใช้สามารถมีส่วนร่วมเพิ่มเติมข้อมูลได้เองผ่านโปรแกรมประยุกต์บนบรรดาซอฟต์แวร์มาตรฐาน โดยการ “ปักหมุด” เพื่อแสดงตำแหน่งที่น่าสนใจและเชื่อมโยงไปยังข้อมูลเพิ่มเติมด้วยกลไกการเผยแพร่ข้อมูลในอินเตอร์เน็ตทั่วไป

การพัฒนาการประยุกต์ใช้ระหว่างระบบภูมิสารสนเทศและ on-line mapping ตลอดจนการเชื่อมโยงสารสนเทศระหว่างแม่ข่ายแผนที่และแม่ข่ายอินเตอร์เน็ตสามารถทำได้อย่างแบบยลจดของเรียกการประยุกต์ใช้สารสนเทศเหล่านี้ว่า “Mash-up Mapp Application” ตัวอย่างของระบบ Mash-up ที่ให้บริการนอกเหนือจาก Google Map และ Google Earth ยังมี NASA WorldWind , Microsoft Virtual , Yahoo Map และ MapQuest ในห้วงเวลาเดียวกับการเรียกใช้ข้อมูลแผนที่ภาพซึ่งมีการประยุกต์ใช้ตามมาตรฐานสากล ของกลุ่มอุตสาหกรรมผู้ผลิตซอฟต์แวร์ภูมิสารสนเทศและหน่วยงานเกี่ยวข้อง ที่เรียกว่า Open Geospatial Consortium (OGC) Web Service (OWS) เพื่อให้เกิดมาตรฐานในการแลกเปลี่ยนและทำให้เกิดเป็นเอกภาพสากลในการใช้งาน อีกด้วย มาตรฐานหลายชนิดจาก OGC ยังได้รับการยอมรับจากหน่วยงานมาตรฐานนานาชาติ (International Standard Organization (ISO) อีกด้วย

1.4 ระบบงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัล

ปัจจุบันมีระบบรังวัดด้วยภาพถ่ายได้ก้าวเข้าสู่การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (digital photogrammetry) เครื่องมือที่เป็นแกนสำคัญของการประมวลผลคือ คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์สำหรับการนี้โดยเฉพาะ ด้วย วิวัฒนาการทางการตลาดและเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) ที่นับวันจะมีราคาถูกลง และมีขีดความสามารถของหน่วยประมวลผลกลางที่เร็วขึ้นและมีหลายหน่วย(core) หน่วยความจำที่มากขึ้นในระดับจิบะไบต์ หน่วยการจัดเก็บที่ใหญ่ขึ้นสูงดับเทrebbitต่อหน่วย ความเร็วของเครื่องข่ายที่เร็วระดับจิกะบิทต่อวินาที ความสามารถที่เพิ่มขึ้นของคอมพิวเตอร์และเครือ เป็นปัจจัยสนับสนุนการรังวัดด้วยภาพดิจิทัลก้าวหน้า และเพิ่มทักษะมากยิ่งขึ้น

ระบบประมวลผลภาพสำหรับการรังวัดด้วยภาพที่อยู่ในรูปแบบของซอฟต์แวร์ทำให้บางครั้งเรียกว่า ระบบงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัลว่า Softcopy Photogrammetry ระบบงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัล มีผู้ผลิตรายใหญ่ ในตลาดโลกอยู่จำนวนหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีมหาวิทยาลัยในยุโรป ออสเตรเลีย สหราชอาณาจักร มีงานวิจัยและสร้างระบบรังวัดด้วยภาพชนิด Softcopy ไว้ใช้เอง

ซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลภาพที่มีเทคนิคสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการรังวัดด้วยภาพ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 4 กลุ่ม ตามขีดความสามารถ ขอบข่ายการทำงาน ดังนี้

1.4.1 ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศอัตโนมัติเต็มรูปแบบ

ในเชิงพาณิชย์มีบริษัทผู้ผลิตระบบรังวัดด้วยภาพดิจิทัลเป็นจำนวนมากหนึ่งที่พัฒนาซอฟต์แวร์หรือ ชุดプログラムเพื่อมอบความสามารถในการรังวัดบนภาพถ่ายทางอากาศโดยเฉพาะ ซอฟต์แวร์มีขอบข่ายสามารถทำงาน ตอบสนองต่อความต้องการในกระบวนการรังวัดด้วยภาพครอบคลุมทั้งหมด ซึ่งกระบวนการที่สำคัญได้แก่ การจัดวางภาพภายใน การรังวัดพิกัดภาพ การรังวัดและงานคำนวนข่ายสามเหลี่ยม การรังวัดแบบจำลองระดับสูง พร้อมเครื่องมือตรวจสอบข้อผิดพลาดและแก้ไข การผลิตภาพถ่ายด้วยตัวแก้ขอร์โน การไม้เสคภาพถ่ายทางอากาศที่ มีค่าพิกัดภาคพื้นดินให้เป็นเพื่อนในรูปต่อเนื่องเพื่อตัดออกเป็นร่างແນที่ดิจิทัล ในระบบที่มีขีดความสามารถสูง จะสามารถวัดพิกัดภาพได้อย่างอัตโนมัติทั้งบนภาพไมโน และภาพคู่สามมิติ แต่อย่างไรก็ตามต้องอาศัยสายตา ผู้ปฏิบัติงานในการตรวจสอบผลลัพธ์และแก้ไขข้อผิดพลาดบางส่วนที่ยังปรากฏหรืออยู่บนแบบจำลองสามมิติที่ได้จากการรังวัดอัตโนมัติ ผู้ผลิตชุดซอฟต์แวร์เหล่านี้ที่สำคัญได้แก่

- Z/I Imaging (<http://www.ziimaging.com>)
- Leica/Helava (<http://www.lhzsystem.com>) หรือปัจจุบันเปลี่ยนการวางแผนด้วย Socet Set โดยบริษัท BAE System
- Virtuozo (<http://www.supresoft.com>)
- Inpho, Stuttgart (<http://www.inpho.de>)
- Internaitonal Systemap หรือ ISM (<http://www.ismcorp.com>)
- ERDAS Imagine (<http://www.erdas.com>) รุ่นตั้งแต่ 8.5 ขึ้นไป เมื่อผนวกใช้งานร่วมกับ StereoAnalyst และ OrthoBasePro สำหรับรุ่นตั้งแต่ 8.7

- Leica Geosystems Inc. Leica Photogrammetry Suite (LPS 1.0) ต่อมาก็ปั้นชื่อการเรียกผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ด้านสำรวจจะระยะไกล Erdas Imagine จึงเรียกว่ารุ่นต่อมามาเป็น 9.0 และ 9.1 ตามลำดับ
 - PCI Geomatics ตั้งแต่รุ่น 8.0 ขึ้นไป, <http://www.pcigeomatics.com>
 - DAT/EM (<http://www.datem.com>)
 - E-FOTO Project, ชุดซอฟต์แวร์เบ็ดรวมทั้งสำหรับการศึกษาวิจัยด้านการสำรวจวัดด้วยภาพ โดย Department of Cartographic Engineering, Military Institute of Engineering, Brazil

1.4.2 ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศครอบคลุมงานบางส่วน

นอกจากนั้นยังมีชุดซอฟต์แวร์ softcopy ที่อยู่ในระดับราคาปานกลางอีก จำไม่มีฟังก์ชันเข่นการวัดจุดเพื่อการทำข่ายสามเหลี่ยมอัตโนมัติ และการวัดจุดระดับแบบอัตโนมัติ บางชุดซอฟต์แวร์ทำหน้าที่คำนวนข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพียงอย่างเดียว บางชุดซอฟต์แวร์เน้นใช้ผลิตภัณฑ์อย่างคอร์โบทอย่างเดียว ผู้ผลิตเหล่านี้ได้แก่

- ERDAS Imagine (<http://gi.leica-geosystems.com>) รุ่นที่ใช้งานบน Unix Workstation เมื่อผนวกไฟล์งานร่วมกับ OrthoMax
 - ERDAS Imagine (<http://gi.leica-geosystems.com>) รุ่นตั้งแต่ 8.4 ลงมา เมื่อผนวกไฟล์งานร่วมกับ OrthoBase และ StereoAnalyst บน Window Platform
 - PCI Geomatics จนถึงรุ่น 7 ลงมา, <http://www.pcigeomatics.com>
 - DVP Station, by DVP-GS Canada, <http://www.dvp.ca>
 - Racurs, Russia, <http://www.racurs.ru>
 - Desktop Mapping System (USA) , <http://www.rwel.com>
 - Desktop Digital Photogrammetry System by 3D-Mapper Pty, Australia (<http://www.3dmapper.com>)

นอกจากนี้ในตลาดยังมีซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่คำนวณปริมาณแก้งานข่ายสามเหลี่ยมโดยเฉพาะ ที่แพร่หลาย ได้แก่ PACE-M, PAT-M, PAT-B, Visual Giant, Albany, Orima, Kblock

1.4.3 ซอฟต์แวร์สำหรับการสำรวจระยะไกลที่มีพิงก์ชันของการสำรวจจริงวัดด้วยภาพ

ขอฟ์แวร์ประมวลผลภาพสำหรับงานสำรวจจะยกที่มักเป็นข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ขอฟ์แวร์กลุ่มนี้ที่มีฟังก์ชันหลายอย่างที่สามารถใช้งานร่วมกับงานรังวัดด้วยภาพได้ ผู้ผลิตขอฟ์แวร์จึงได้พัฒนาฟังก์ชันเพิ่มเติมในการจัดการภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายสำหรับงานรังวัด ให้ขอฟ์แวร์มีความสามารถในการจัดวางภาพภัยในได้ สามารถคำนวณพารามิเตอร์การจัดวางภาพภัยนอกโดยอาศัยการกำหนดพิกัดภาพถ่ายคู่กับพิกัดภาพพื้นดิน เมื่อมีข้อมูลความสูงของภูมิประเทศในรูปแบบของแบบจำลองระดับกีสามารถให้กำเนิดภาพดัดแก้ออร์ทोได้ ภาพถ่ายออร์ท็อกซ์สามารถนำมาโมเสคเข้าด้วยกัน เนื่องจากขอฟ์แวร์สำหรับการสำรวจจะมีโมดูลที่มีฟังก์ชันนี้เป็นพื้นฐานอยู่แล้ว ขอฟ์แวร์สำหรับการสำรวจจะยกที่มักเป็นข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

- ENVI by Research Systems, Inc. (RSI), <http://www.rsinc.com>

- ER Mapper by Earth Resource Mapping Inc., <http://www.ermapper.com>
- Geographic Resources Analysis Support System or GRASS (ดาวโหลดได้ <http://grass.itc.it>)

1.4.4 ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดระยะใกล้ด้วยภาพถ่ายดิจิทัล

ซอฟต์แวร์นี้ออกแบบไว้เพื่อการรังวัดระยะใกล้ สำหรับการประยุกต์ใช้งานในการรังวัดด้วยภาพดิจิทัลที่ได้จากการถ่ายภาพดิจิทัลในตลาดทั่วไป การวัดจุดๆ ไม่มีการวัดโดยการซ้ายการมองเห็นด้วยสามมิติ แต่จะอาศัยการตัดกันของรังสีจำนวนมาก เนื่องจากกระบวนการถ่ายภาพทำได้สะดวก และรังวัดได้ง่าย

ซอฟต์แวร์เหล่านี้จะมีcacาระดับบุคคลทั่วไปซึ่งหาได้กล่าวคือในระดับหลายร้อยหรือพันถึงพันเรียบสหรัฐ เช่น

- Photomodeler (<http://www.photomodeler.com>)
- 3D Builder (<http://3dconstruction.com>)
- ShapeQuest (<http://www.shapecapture.com>)
- Canoma (<http://www.canmoma.com>)
- Vexcel FotoG (<http://www.vexcel.com>)

เป็นต้น ซอฟต์แวร์เหล่านี้ถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆ ที่แตกต่างจากนิยามเดิมในทางการรังวัดด้วยภาพ หลายประการ ส่วนหนึ่งได้แก่การสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อสนับสนุน ภาพยนตร์ การบันทึก การโฆษณา และสันทนาการ การทำงานมักจะใช้ซอฟต์แวร์และกล้องถ่ายดิจิทัลในห้องตลาดทั่วไปบันทึกภาพ และสร้างแบบจำลองสามมิติผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำเข้าซอฟต์แวร์ที่อยู่เบื้องหลัง ซอฟต์แวร์สร้างภาพสามมิติ ต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีชุดซอฟต์แวร์สำหรับการศึกษา ที่เป็นซอฟต์แวร์ให้เปล่า ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดได้เอง จากอินเตอร์เน็ต ได้แก่ ARPENTURE (Architectural Photogrammetry Network Tool for Education and Research) ซึ่งเป็น Web-based Application พัฒนาขึ้นด้วยภาษา Java สามารถทำงานร่วมกับ Photomodeler ได้ ARPENTURE แรกเริ่มพัฒนาโดยทีมนักวิจัยสองทีมจาก GAMSU-CNRS และ ENSAIS ประเทศฝรั่งเศส

1.4.5 ซอฟต์แวร์สำหรับงานรังวัดแบบจำลองสามมิติของเมือง

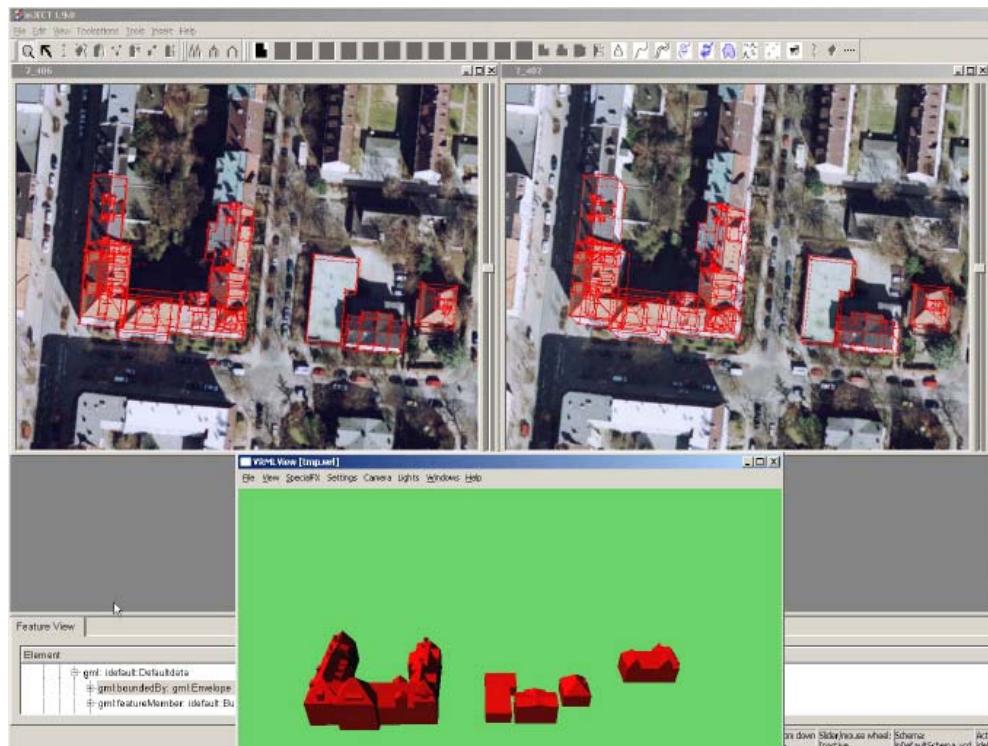
ปัจจุบันความต้องการแบบจำลองสามมิติของที่มีความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งสูง มีรายละเอียดในระดับรายอาคารและตึก มีโครงสร้างการจัดเก็บเป็นแบบจำลองสามมิติ สามารถนำไปใช้ในการวางแผนด้านการจัดการการใช้ที่ดินและอาคาร ความปลอดภัยในเมือง (urban safety) โดยเฉพาะการวางแผนโครงข่ายการสื่อสารโทรคมนาคม การรังวัดพิกัดชนิดสามมิติของรูปอาคาร ตึก บ้าน จากภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนใหญ่ เป็นทางเลือกที่เหมาะสมมากในปัจจุบัน

ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยและนำเสนอไปสู่การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการรังวัดที่เน้นให้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองสามมิติของเมืองโดยเฉพาะและมีความเป็นอัตโนมัติ โดยมีต้องอาศัยการมองเห็นสามมิติบนภาพคู่ สามมิติและใช้สายตาในการวัดจุดพิกัดสามมิติประกอบการใช้มือ

การรังวัดโดยอาศัยซอฟต์แวร์สำหรับรังวัดแบบจำลองสามมิติของเมือง ทำได้ทั้งชนิดกึ่งอัตโนมัติ โดยการอาศัยต้นแบบ (template) ของตึกและบ้านที่จัดเตรียมไว้ก่อน ผู้รังวัดนำ "ต้นแบบ" ไปวางบนภาพถ่ายทางอากาศที่มีภาพของอาคารหรือบ้านที่มีรูปร่างใกล้เคียงกัน ผู้รังวัดอาจการปรับเปลี่ยนการวางแผนตัวและพารามิเตอร์

ต่างๆของต้นแบบ (template) เพื่อให้ต้นแบบไปปรากฏบนภาพคู่สามมิติได้ถูกต้องระดับหนึ่ง หลังจากนั้น ซอฟต์แวร์จะทำการจัดวางต้นแบบให้ถูกต้องพร้อมกับไปจับคู่ภาพบนภาพคู่สามมิติ

ในการรังวัดฐานอาคารเพื่อการสร้างแบบจำลองสามมิติของเมือง เมื่อสภาวะแวดล้อมชำนาญ เช่น รูปของอาคารค่อนข้างคงเส้นคงวา ขอบอาคารปรากฏบนภาพชัดเจนในเชิงการประมวลผลภาพ ซอฟต์แวร์สามารถที่จะวัดกลุ่มของแบบจำลองสามมิติของเมืองได้โดยอัตโนมัติ ในกรณีนี้ก็จะทำให้การรังวัดมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ดังปรากฏในตัวอย่าง ในขณะปฏิบัติการกับซอฟต์แวร์เพื่อการนี้ดังภาพ



รูปภาพ 1-9 ตัวอย่างสร้างแบบจำลองของเมือง InJECT GmbH (www.inpho.de)

ตัวอย่างของชุดซอฟต์แวร์สำหรับการรังวัดแบบจำลองของเมือง เหล่านี้ได้แก่

- Cyber-City Modeler โดย CC-Modeler AG, Switzerland (<http://www.cybercity.tv>)
- InJECT โดย Inpho GmbH, Germany (<http://www.inpho.de>)

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองสามมิติของเมืองสูงมากขึ้น จึงทำให้เกิดความต้องการผลิตแบบจำลองสามมิติของเมืองอย่างรวดเร็ว ตลอดจนช่องทางในการนำไปใช้งานที่สะดวกและการประยุกต์ใช้ในวงกว้าง การเรียกใช้ที่มีความสะดวกสามารถเรียกใช้ผ่าน 3D GeoBrowser เช่น Google Earth หรือ Microsoft Virtual Earth 3D ที่ผู้ใช้เรียกดูได้ทันทีผ่านเครื่องข่ายอินเตอร์เน็ตด้วยเว็บбраузermannathanทั่วไป



รูปภาพ 1-10 ตัวอย่างแบบจำลองของเมืองจากระบบ Microsoft Virtual 3D

แบบจำลองสามมิติของเมืองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบันเทิงสันหน้ากาก การท่องเที่ยว การบริหารจัดการเมือง เป็นต้น ในความต้องการลักษณะนี้ค่อนข้างไม่เน้นความละเอียดถูกต้องแต่ต้องการความสวยงามสมจริงและมีแบบจำลองมากพอเพียง อันเนื่องมาจากความต้องการจะนำเสนอให้ความวิธีการสร้างแบบจำลองสามารถทำได้รวดเร็วและง่ายขึ้น การสร้างแบบจำลองไม่ได้สร้างจากการรังวัดบนภาพ ตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองสามมิติของเมืองได้แก่ Adobe Atmosphere, Canoma, Google Sketchup, Microsoft Virtual Earth 3D เป็นต้น ทั้งนี้รวมถึงซอฟต์แวร์สร้างแบบจำลองสามมิติที่นำไปเช่น 3D Max, 3D Studio ที่ใช้ปกติใน 3D แอนนิเมชั่นอยู่แล้ว นอกจากนั้นแบบจำลองสามมิติอาจสร้างขึ้นต่อเนื่องจากซอฟต์แวร์ช่วยเขียนแบบ AutoCAD, Microstation และซอฟต์แวร์ภูมิสารสนเทศทั่วไป

1.5 ผลิตผลที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพ

ผลิตผลที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพโดยหลักแล้วก็คือค่าพิกัดของวัตถุที่ต้องการ เมื่อมีการแปลภาพข้อมูลประกอบอื่นๆ พร้อมกับงานทำแผนที่ให้สมบูรณ์ในสนาม (Field Completion) ไฟจาร์บันแน่ที่ก็จะสามารถระบุชนิด ประเภท และชื่อวัตถุลงกำกับไปกับข้อมูลที่รังวัดได้ ความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการ และโดยเฉพาะมาตราส่วนของภาพที่ใช้เป็นสำคัญ

ปัจจุบันเนื่องจากกระบวนการเป็นดิจิทัล ทำให้ข้อมูลภาพที่บันทึกอยู่บนภาพสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเมื่อก่อน โดยเฉพาะการผลิตภาพถ่ายของร่อง ซึ่งเต็มถูกจำกัดด้วยกระบวนการที่ยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนและต้องทำในสภาพแวดล้อมห้องมีด

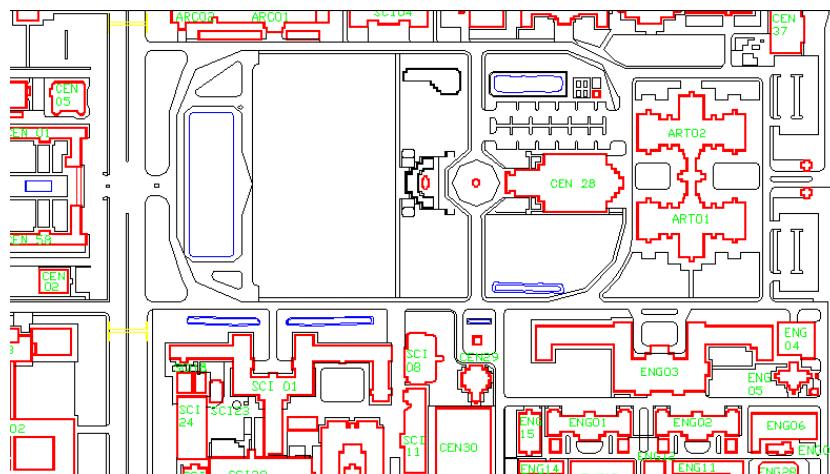
ผลิตผลเหล่านี้ได้แก่:-

- ค่าพิกัดของวัตถุในสามมิติ (X,Y,Z) ในรูปแบบต่างๆ ทั้งในรูปแบบ ASCII และใบนำรี
- ค่าพิกัดของวัตถุพร้อมความสัมพันธ์ระหว่างจุดสำหรับขนาด ตำแหน่ง และรูปร่างของวัตถุ

```
TAB BLDG
xxx.xxx yyy.yyy zzz.zzz
```

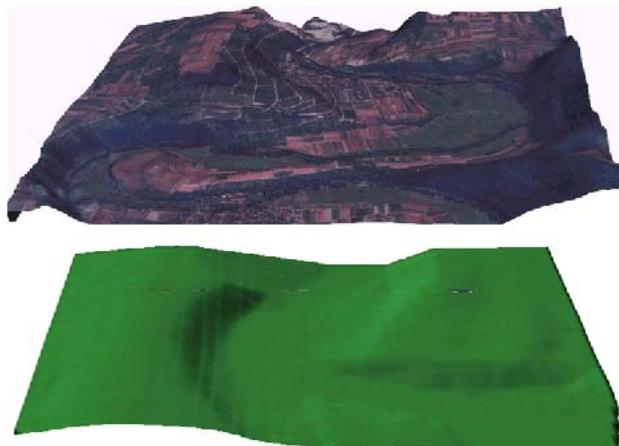
รูปภาพ 1-11 ตัวอย่าง รูปแบบของค่าพิกัดที่ได้

- แผนที่ลายเส้น ที่เป็นการแสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างจุดสำหรับขนาด ตำแหน่ง และรูปร่างของวัตถุ



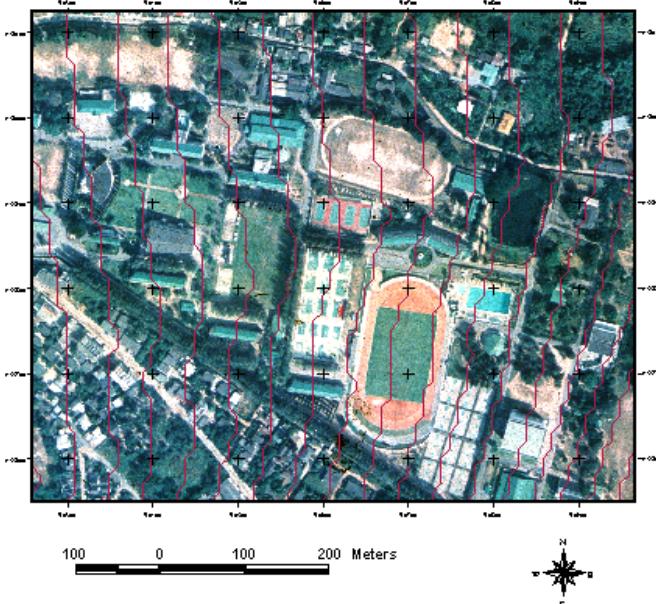
รูปภาพ 1-12 ตัวอย่างของแผนที่ลายเส้น บริเวณอุปารองกรณ์มหาวิทยาลัย (คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

- แบบจำลองระดับ คือการจัดเก็บ ประมวลผลและนำเสนอ ค่าระดับของจุดที่เป็นความสูงภูมิประเทศ แบบจำลองระดับสามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆได้ โดยเฉพาะในยุคของการสำรวจรังวัดด้วยภาพดิจิทัลสามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ แบบจำลองสามมิติเสมือนจริง



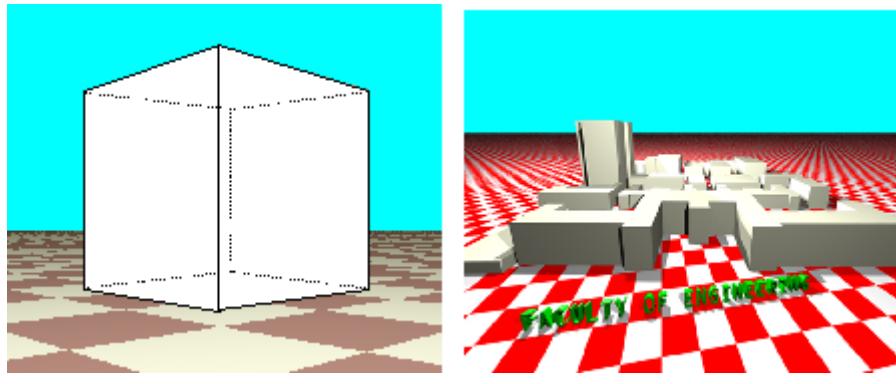
รูปภาพ 1-13 แบบจำลองระดับและในรูปแบบสามมิติ บน) ข้อนกับด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (ล่าง) และแสดงตัวอย่างพื้นที่เชิงภูมิประเทศและเจา

- แผนที่ภาพ คือแผนที่ที่ผลิตได้จากการถ่ายทางอากาศ โดยนำภาพถ่ายทางอากาศมาทำการแก้ความผิดเพี้ยนเนื่องจากเรขาคณิตของการถ่ายภาพ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นภาพที่มีมาตรฐานและมีความถูกต้อง สามารถวัดพิกัด ขนาด และอุป_r่างของวัตถุได้ เช่นเดียวกับแผนที่ลายเส้น แผนที่ภาพสามารถผลิตได้รวดเร็วกว่าแผนที่ลายเส้นและมีปริมาณข้อมูลบนแผนที่มากกว่าโดยที่ยังไม่มีการแปลงความหมาย แต่อย่างไรก็ตามแผนที่ภาพต้องใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ทันสมัย



รูปภาพ 1-14 แผนที่ภาพบริเวณโรงเรียนอัสสัมชัญคริสต์ราช จังหวัดชลบุรี

- แบบจำลองสามมิติ คือการนำผลการรังวัดค่าพิกัดในสามมิติ ในที่นี่ได้จากการรังวัดบนภาพ ในระหว่างการรังวัดมีการคำนึงถึงการเขื่อมต่อระหว่างจุด เพื่อให้สามารถจัดเก็บฐานข้อมูลด้วย ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อการฝึกการบิน การวางแผนเมือง การวางแผนเพื่อติดตั้งเครื่อข่ายวิทยุสื่อสารและสถานีเครื่อข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น การจำลองแบบลิงปลูกสร้างในเมืองปัจจุบันนิยมเรียกว่าแบบจำลองเมือง (City Modeling)

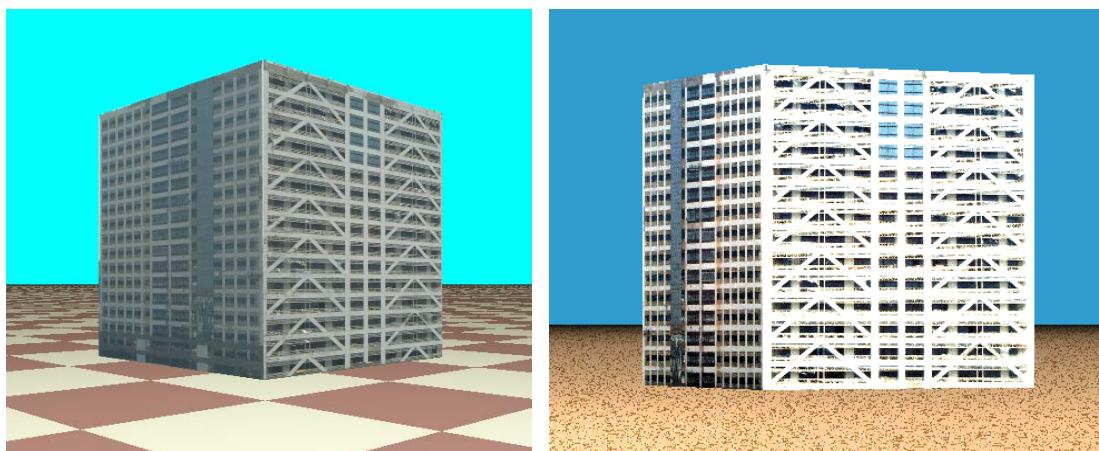


(ก) แบบจำลองสามมิติ

(ข) แบบจำลองสามมิติพร้อมแสงเงา

รูปภาพ 1-15 ภาพแบบจำลองสามมิติ

- แบบจำลองเสมือนจริง ในภาพเป็นตัวอย่างของแบบจำลองสามมิติ เป็นแบบจำลองของวัตถุที่ได้จากการรังวัดขนาดใหญ่ร่างด้วยภาพถ่ายทางอากาศ คล้ายกับแบบจำลองสามมิติ แต่มีการนำลวดลาย (texture) มาประกอบเข้าแบบจำลองทำให้แบบจำลองดูสมจริงยิ่งขึ้น

รูปภาพ 1-16 ภาพแบบจำลองเสมือนจริงของอาคาร ทำการสร้างภาพด้วยซอฟต์แวร์ PovRay (www.povray.org)

1.6 การทำแผนที่ด้วยการรังวัดด้วยภาพ

การใช้งานการรังวัดด้วยภาพเพื่อทำแผนที่มีการเข้ามายากมายและหลากหลายแนวทาง หน่วยราชการใช้ภาพถ่ายทางอากาศทั้งทางตรงและทางอ้อม หน่วยราชการที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดด้วยภาพและมีส่วนงานที่ปฏิบัติงานประจำเกี่ยวกับงานรังวัดด้วยภาพได้แก่ สถาบันการศึกษาด้านภูมิสารสนเทศ กรมแผนที่ทหาร กรมชลประทาน กรมพัฒนาที่ดิน กรมโยธาธิการและผังเมือง สำนักงานปฏิรูปที่ดินเพื่อการเกษตรกรรม การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีบริษัทเอกชนจำนวนมากที่มีศักยภาพในการประมวลผลการรังวัดด้วยภาพ สามารถผลิตข้อมูลจากการรังวัดด้วยภาพเป็นสายการผลิตขนาดใหญ่

ในที่นี้จะได้กล่าวถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยตรง ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงหน่วยงานในประเทศไทยที่มีบทบาทในการศึกษา วิจัยพัฒนา ฝึกอบรมเผยแพร่ให้ความรู้ด้านการวางแผนด้วยภาพ

กรมแผนที่ทหารเป็นส่วนราชการที่มีอำนาจหน้าที่ในการบันทึกภาพโดยการบินถ่ายรูปทางอากาศ กรมแผนที่ทหารบุคลากร ระเบียบวิธีการทำงานและมีคุณธรรมที่ใช้ในการบินบันทึกถ่ายทางอากาศ ตลอดจนการประมวลผลให้เป็นข้อมูลแผนที่อย่างครบถ้วน การบินถ่ายภาพทางอากาศเพื่อการสนับสนุนภารกิจทางราชการ ทหารและรวมไปถึงส่วนราชการพลเรือนและเอกชน เพื่อการทำแผนที่ใช้ในการพัฒนาประเทศ นอกจากนี้ภารกิจหลักของกรมแผนที่ทหารประการหนึ่งคือการผลิตแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 และ 1:250,000 เพื่อสนับสนุนภารกิจทางทหารและพลเรือน

หน่วยราชการได้มีความประสังค์จะทำการสำรวจเพื่อหาข้อมูลทางแผนที่หรือเพื่อการทำแผนที่ แต่ไม่สามารถดำเนินการเองได้ ให้ติดต่อขอให้กรมแผนที่ทหารหรือกรมอุทกศาสตร์แล้วแต่กรณี เป็นผู้ดำเนินการก่อน ทั้งนี้กรมแผนที่ทหารหรือกรมอุทกศาสตร์ต้องแจ้งคำตอบให้หน่วยราชการทราบภายในสิบห้าวันนับจากวันที่ได้รับแจ้งจากหน่วยราชการนั้น ในกรณีที่กรมแผนที่ทหารหรือกรมอุทกศาสตร์ไม่สามารถให้การสนับสนุนได้ หน่วยราชการแห่งนั้นจะจ้างเอกชนเป็นผู้ดำเนินการโดยปฏิบัติตาม “ระเบียบสำนักนายกรัฐมนตรีว่าด้วยการรักษาความปลอดภัยในการจ้างเอกชนทำการสำรวจและทำแผนที่ พ.ศ. ๒๕๔๔” (สำนักนายกรัฐมนตรี 2544)

กรณีที่กรมแผนที่ไม่สามารถให้บริการได้ด้วยเหตุผลใด ส่วนราชการจะเป็นต้องมีการดำเนินการจ้างเอกชนเพื่อบันทึกฐานที่ดินปัจจุบันของภาค เพื่อทำข้อมูลแผนที่ ให้น่วยราชการผู้ว่าจังหารายงานเสนอต่อกำนัลแผนที่ ทหารหรือกรมอุทกศาสตร์แล้วแต่กรณี เพื่อดำเนินการขออนุญาตต่อกระทรวงกลาโหม โดยผู้ว่าจังต้องแจ้งความมุ่งหมาย ขอบเขตของงานและพื้นที่ที่จะทำการสำรวจ พร้อมทั้งส่งบัญชีแสดงชนิด แบบ หมายเลข จำนวน เครื่องมือ อากาศยาน และยานพาหนะที่ติดตั้งเครื่องมือสำรวจนั้น ตลอดจนรูปถ่ายเครื่องมือ อากาศยานและ พาหนะดังกล่าว รวมทั้งแจ้งข้อเอกสาร ผู้รับจ้างและประวัติผู้ปฏิบัติงานต่อกระทรวงกลาโหมเพื่อการตรวจสอบ ด้านความ | ลูกค้า | ภารกิจ | ความน่าเชื่อถือ | ประเทศไทย

1.7 วิชาชีพและ องค์กรวิชาชีพ

การเรียนการสอน วิชาชีพ และองค์กรวิชาชีพมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด สถาบันอุดมศึกษา สถาบัน วิชาชีพทำหน้าที่ผลิตบุคลากร

1.7.1 การเรียนการสอน

การเรียนการสอนวิชาการรังวัดด้วยภาพอย่างเป็นระบบมีทั้งในระดับมหาวิทยาลัย และวิทยาลัยวิชาชีพ ในระดับมหาวิทยาลัยและสถาบันอุดมศึกษาได้แก่ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาหรือภาควิชาภูมิศาสตร์สังกัดสถาบันอุดมศึกษาและมหาวิทยาลัยต่างๆ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล โรงเรียนแผนที่แห่งกรมแผนที่ทหาร

1.7.2 องค์กรวิชาชีพระดับประเทศ

องค์กรวิชาชีพในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดด้วยภาพถ่ายและสาขาวิชาชีพที่เกี่ยวข้องได้แก่

1.7.2.1 สมาคมการสำรวจและการแผนที่แห่งประเทศไทย

สมาคมการสำรวจและการแผนที่ (Surveying and Mapping Society) ได้ถือกำเนิดอย่างเป็นทางการเมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยก่อตั้งมาจากชุมชนวิศวกรรมสำรวจ สมาคมการสำรวจและการแผนที่ต้องการส่งเสริมประสานความร่วมมือให้มีการพัฒนาด้านบุคลากร ด้านเทคโนโลยีและวิชาการสมัยใหม่ มีการกำหนดครุภัณฑ์ แนวทางปฏิบัติ ความรับผิดชอบต่อวิชาชีพ เพื่อให้มีการพัฒนาวิชาการด้านการสำรวจและข้อมูลแผนที่ ที่มีประสิทธิผล ถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ได้อย่างมั่นใจ เพื่อการพัฒนาประเทศไทยเจริญก้าวหน้า

ดังที่กล่าวไว้ในวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ส่งเสริม เผยแพร่ และสนับสนุนความสำคัญของวิชาการและวิชาชีพ ด้านการสำรวจและการแผนที่
2. เป็นสื่อกลางในการติดต่อ แลกเปลี่ยนความคิดเห็น ความรู้อุตสาหกรรม การวิจัย ผลงาน ข้อสังเกตและประสบการณ์ระหว่างสมาชิก
3. ร่วมมือกับชุมชน สมาคม องค์การ หรือสถาบันอื่นใดทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการส่งเสริมการศึกษา การประกอบอาชีพ และดำเนินกิจกรรมทางด้านการสำรวจ และแผนที่ เพื่อให้บรรลุผลสำเร็จอันเป็นประโยชน์แก่วงการ โดยรวมทั้งทางตรงและทางอ้อม
4. ยกระดับสถานภาพทางสังคมของสมาชิก
5. ส่งเสริมความสามัคคีระหว่างสมาชิก
6. สงเคราะห์สมาชิกในด้านสวัสดิการต่างๆ

1.7.2.2 สมาคมภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย

สมาคมภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย (Geographical Association of Thailand) ถือกำเนิดเพื่อเป็นศูนย์กลางเชื่อมโยงนักวิชาชีพภูมิศาสตร์รวมไปจนถึงครุศาสตร์วิชาภูมิศาสตร์ วัตถุประสงค์ของสมาคมภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทยได้แก่

1. เผยแพร่ความรู้ในวิชาการด้านภูมิศาสตร์อย่างกว้างขวางแก่ประชาชนชาวไทย

2. ส่งเสริมการศึกษา การค้นคว้า และการวิจัยในวิชาภูมิศาสตร์ทุกสาขา
 3. ส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความรู้วิชาภูมิศาสตร์ทั่วภัยในและระหว่างประเทศ
 4. ส่งเสริมวิชาชีพทางภูมิศาสตร์ทุกสาขา

สมาคมภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทยใช้ “วารสารภูมิศาสตร์ (Geographical Journal)” เป็นสื่อถือกลางในการติดต่อระหว่างสมาชิกและเผยแพร่ผลงานวิชาการ โดยกำหนดออกปีละ 3 ฉบับ สมาคมภูมิศาสตร์ประเทศไทยจัดให้มีการประชุมวิชาการประจำปี โดยมีชื่อว่า การประชุมวิชาการประจำปีของสมาคมภูมิศาสตร์

1.7.2.3 สมาคมสำรวจน้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์

สมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Remote Sensing And GIS Association of Thailand : RESGA) เป็นสมาคมวิชาชีพของกลุ่มนักวิชาชีพทางด้านการสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์ในแง่ของการวิจัยพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งาน ในด้านการใช้ที่ดิน การเกษตร สิ่งแวดล้อม แผนที่ ทรัพยากรแหล่งน้ำ ทรัพยากรป่าไม้ ทรัพยากรการท่องเที่ยว ผังเมือง การวิเคราะห์พื้นที่เชิงระบบและโมเดลเชิงพื้นที่ เพื่อการพัฒนา

สมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์มีการใช้สื่อ “วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์” เป็นวารสารกลางเพื่อเผยแพร่วิจัย ทั้งการวิจัยพื้นฐานและการประยุกต์ตลอดจนบทความทางวิชาการความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอวกาศ และศาสตร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง

1.7.3 องค์กรวิชาชีพระดับนานาชาติ

องค์กรวิชาชีพในระดับนานาชาติที่สำคัญและมีบทบาทในการส่งเสริมพัฒนาเทคโนโลยีสำรวจวัดด้วยภาพถ่ายที่มีอิทธิพลหรือส่งผลทั่วโลกได้แก่

1.7.3.1 The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)

The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) เป็นองค์กรวิชาชีพที่เกี่ยวเนื่องกับการรังวัดด้วยภาพ การสำรวจและGIS และวิทยาการสารสนเทศปริภูมิ (spatial information science) สมาคมก่อตั้งในปีค.ศ. 1910 โดยมีชื่อครั้งแรกว่า the International Society for Photogrammetry (ISP) เท่านั้น โดยมีประธานสมาคมท่านแรกคือ Eduard Dolezal ชาวออสเตรีย ภายหลังจากนั้น 70 ปีเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางวิชาการ ในปี ค.ศ. 1980 สมาคมจึงได้เปลี่ยนชื่อใหม่เป็น The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) ดังที่ปรากฏในทุกวันนี้

ISPRS เป็นหน่วยงานที่ไม่สังกัดรัฐบาลที่อุทิศตนเพื่อการพัฒนาการของความร่วมมือระหว่างประเทศ เพื่อความก้าวหน้าของการรังวัดด้วยภาพและการสำรวจระยะใกล้ตลอดจนการประยุกต์ใช้งาน สมาคมปฏิบัติงานโดยไม่มีการแบ่งแยกผู้พันธุ์ ศาสนา ชาติ หรือลักษณะการเมือง ภาษาที่ใช้เป็นทางการคือภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส และ เยอรมัน

ความสนใจทางวิทยาการได้แก่ การจังหวัดด้วยภาพ การสำรวจระยะไกล ระบบสารสนเทศปริภูมิ (Spatial Information System) และ วิทยาการที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ซึ่งรวมถึง ภูมิศาสตร์ ย่อเดชี การสำรวจ วิทยาการของกลุ่มชาติ โลก และวิศวกรรม และการไฟฟ้ากำลังและดิลดามสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นยังรวมถึงการ

ประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการผลิตดูดสาหกรรม งานสถาปัตยกรรม และการอนุรักษ์อนุสรณ์สถาน การประยุกต์ใช้ในการแพทย์และอื่นๆ

กิจกรรมหลักของสมาคม ได้แก่

1. กระบวนการให้มีการรวมตัวกันของสมาคมการวังวัดด้วยภาพและสำรวจระยะไกลระดับประเทศและภูมิภาค
2. วิเริ่มและประสานงานการวิจัยในการวังวัดด้วยภาพและสำรวจระยะไกล
3. จัดให้มีการประชุมวิชาการ (Symposia and Congresses) อย่างสม่ำเสมอ
4. ทำให้มีการหมุนเวียนการวิเคราะห์วิพากษ์วิชากรณีที่เป็นผลมาจากการวิจัยโดยอาศัยสื่อสิ่งพิมพ์ the International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS) (ปัจจุบันสามารถดูหน้าเว็บไซต์ความเหล่านี้ได้จากอินเตอร์เน็ต)
5. สงเสริมให้มีการตีพิมพ์และแลกเปลี่ยนบทความวิชาการและวารสารที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจด้วยภาพและการสำรวจระยะไกล
6. สนับสนุนให้มีความร่วมมือและประสานงานกับหน่วยงานวิทยาการอื่นในระดับนานาชาติที่เกี่ยวข้อง

การจัดการและบริหารของ ISPRS ดำเนินการภายใต้ the ISPRS Council โดยจะประกอบด้วยสมาชิกที่ได้รับเลือกจากทั่วโลก ในการส่งเสริมพัฒนาความรู้ ความก้าวหน้า ISPRS ได้จัดโครงสร้างคณะกรรมการประกอบด้วย Technical Commission หลักอยู่ 7 กลุ่มดังนี้

Commission I	Sensors, Platform and Imagery
Commission II	System for Data Processing, Analysis and Representation
Commission III	Theory and Algorithms
Commission IV	Mapping and Geographic Information Systems
Commission V	Close Range Techniques and Machine Vision
Commission VI	Education and Communications
Commission VII	Resources and Environment

โดยแต่ละ Commission ประกอบด้วยคณะกรรมการ (Working Group) ย่อยต่างๆ ที่มีสมาชิกในสาขา วิทยาการเดียวกันเป็นสมาชิกร่วมแลกเปลี่ยนความคิดเห็น พบປะเพื่อเสนอผลงานวิชาการเป็นระยะๆ ในรูปแบบของการประชุม(meeting), การประชุมปฏิบัติการ (workshop) การแสดงผลงาน (symposium) ก่อการประชุม วิชาการนานาชาติ (International Congress) ทุก 4 ปี

ทุกๆ 4 ปี ISPRS จะจัดให้มีการประชุมวิชาการนานาชาติ International Congress ที่เป็นเวทีสำหรับ การเสนอผลงานวิชาการ โดยช่วงที่ผ่านมาได้ดำเนินการจัด ณ. โตเกียว (1988), อาชิงตัน (1992), เวียนนา (1996), อัมสเตอร์ดัม (2000) และจะจัดเป็นครั้งที่ 20 หรือ the ISPRS XXth Congress ที่อสตัลบูลในปี คศ. 2004

ผลการนำเสนอทความในการประชุมวิชาการในระหว่างๆจะเผยแพร่ในรูปแบบของเอกสารประชุม วิชาการ International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS) ซึ่งสามารถใช้เป็น

เอกสารข้างต้นในการศึกษา วิจัยและพัฒนา ตลอดจนการติดตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการรังวัดด้วยภาพถ่ายเป็นอย่างดี

1.7.3.2 The European Spatial Data Research (EuroSDR) หรือ The European Organization for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE)

The European Spatial Data Research (EuroSDR) เป็นองค์กรความร่วมมืองานวิจัยสำหรับหน่วยงานทำแผนที่ สถาบันการศึกษา ภาคเอกชน และกลุ่มต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานทางปริภูมิของยุโรป (European spatial data infrastructure) สมาชิกได้แก่ประเทศในสหภาพยุโรป (Council of European) ที่ประกอบด้วย 18 ประเทศ EuroSDR เป็นองค์กรที่ปรับบทบาทและเปลี่ยนชื่อมาจากการบริหาร The Organisation Européen d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales / European Organization for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE) ซึ่งแต่เดิมให้ความสนใจจำกัดเฉพาะการสำรวจด้วยภาพ

The Organisation Européen d'Etudes Photogrammétriques Expérimentales / European Organization for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE) แต่เดิมเป็นองค์กรความร่วมมือในยุโรป ก่อตั้งในปี ค.ศ. 1953 ที่กรุงปารีส ตามมติของ the Council of the Organization for European Economic Cooperation ประกอบด้วยสมาชิก 16 ชาติในยุโรป ซึ่งเดิมมุ่งเน้นที่การวิจัยเพื่อพัฒนาระบบงานทางด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายโดยตรง ในปี ค.ศ. 2004 ได้มีการจัดตั้งองค์กรใหม่และเปลี่ยนชื่อเป็น European Spatial Data Research ได้มีการทำหนدوขอนขายที่ก้าวข้างหน้ากว่าเดิมมาก ดังปรากฏใน OEEPE Mission Statement updated 07-09-1999 (OEEPE) ดังนี้

“เพื่อพัฒนาและปรับปรุงวิธีการ ระบบ และมาตรฐานในการบันทึกข้อมูล ประมวลผล การผลิต การบำรุงรักษา และการประกอบ สารสนเทศปริภูมิหลักและเพื่อส่งเสริมให้ใช้ข้อมูลเหล่านั้น โดยมีการเน้นการพัฒนาวิธีทางอากาศและอวกาศในการบันทึกข้อมูล วิธีการดึงข้อมูลจากแหล่งเหล่านั้น ตลอดจนการผนวกข้อมูลเหล่านี้กับสารสนเทศจากแหล่งอื่นๆ”

ซึ่งตรงกับเนื้อความเดิมจาก OEEPE Mission Statement ดังนี้

“The aim of the OEEPE is to develop and improve methods, systems and standards for the acquisition, processing, production, maintenance and dissemination of core geospatial information and to promote applications of all such data. Special emphasis is put on the further development of airborne and spaceborne methods for data acquisition, on methods for information extraction from these sources and on the integration of this information with information from other sources.”

1.7.3.3 The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) เป็นองค์กรวิชาชีพในประเทศไทย ก่อตั้งในปี ค.ศ. 1934 ประกอบด้วยสมาชิกนักวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกว่า 7,000 คนทั่วโลก โดยมีคำว่า “The Imaging & Geospatial Information Society” ภารกิจของสมาคมกล่าวไว้ใน Mission of the Society ดังนี้ “เพื่อสร้างความรู้ที่ก้าวหน้าและเพื่อปรับปรุงความเข้าใจศาสตร์ของการทำแผนที่และเพื่อ

ส่งเสริมการประยุกต์ใช้งานการรังวัดด้วยภาพถ่าย การสำรวจจะนะไกล ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และ เทคโนโลยีสนับสนุนchein” (ASPRS)

วารสาร Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing ซึ่งรู้จักในนามย่อๆว่า PE&RS เป็น วารสารหลักของสมาคมที่เกี่ยวข้องกับภาพ (image) และศาสตร์และเทคโนโลยีของสารสนเทศปริภูมิ (geospatial information science and technology)

1.7.3.4 The Asian Association of Remote Sensing (AARS)

The Asian Association of Remote Sensing (AARS) ก่อตั้งในปี ค.ศ. 1979 ในระหว่างการจัด ประชุมวิชาการ Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) ครั้งที่ 2 ณ. กรุงปักกิ่งประเทศสาธารณรัฐ ประชาชนจีน หลังจากที่การประชุม ACRS ครั้งที่หนึ่งที่ประเทศไทย เพื่อเป็นเครือข่ายข้อมูลข่าวสารของวิชาชีพ ส่งเสริมประสานงานด้านการวิจัยและพัฒนา ซึ่งทำให้ก่อตั้ง Asian Remote Sensing Research Information Network (ARSRIN) ภารกิจหลักของ ARSRIN เพื่อทำหน้าที่ก่อตั้งและตรวจสอบ (peer review) วารสาร the Asian Journal of Geoinformatics. วารสาร Asian Journal of Geoinformatic ออกเป็นฉบับแรก เมื่อเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2000 โดยมีขอบข่ายครอบคลุม การสำรวจจะนะไกล การรังวัดด้วยภาพ งานสารสนเทศ ภูมิศาสตร์ (GIS) และ การรังวัดพิกัดโลก (GPS)

นอกจากนั้น AARS ยังจัดการประชุมวิชาการประจำปีทุกปีที่มีชื่อเรียกว่า Asian Conference on Remote Sensing เพื่อเป็นเวทีในการแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารด้าน วิชาการ การประยุกต์ใช้ ด้านเทคโนโลยี ทั้งนี้เพื่อการส่งเสริมการนำเทคโนโลยีอุตสาหกรรมด้านการสำรวจและพัฒนาเทคโนโลยี ไปใช้ในทางปฏิบัติ

ในวาระที่การประชุมวิชาการ ACRS จะมาบรรจบครบรอบ 25 ปีหรือครั้งที่ 25 นี้ในปี พ.ศ. 2547 หรือ ค.ศ. 2004 นี้ ประเทศไทยเป็นเจ้าภาพดำเนินการประชุมวิชาการ ACRS ครั้งที่ 25 โดยมีหน่วยงานในการ ประสานงานและดำเนินการหลักคือสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมด้านสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

1.8 คำถ้ามห้วยบท

1. การใช้งานจีพีเอสในงานสำรวจรังวัดด้วยภาพสำหรับภาพถ่ายทางอากาศจีพีเอส (GPS Photogrammetry) มีความแตกต่างกับการใช้งานจีพีเอสเพื่อการสำรวจรังวัดที่ดินหรืองานวิศวกรรมต่างๆอย่างไร ?
2. ชุดซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลภาพถ่ายดิจิทัลที่มีความสมบูรณ์เต็มรูปแบบ มีฟังก์ชันใดที่สำคัญที่มีความโดดเด่นแตกต่างไปจากชุดซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลภาพถ่ายดิจิทัลที่มีฟังก์ชันจำกัดและมักจะมีราคาประหดจำกัดมาก
3. จงให้ความเห็นว่า ผลของการผลิตแผนที่จากการรังวัดด้วยภาพดิจิทัล ที่ทำให้ได้แผนที่ภาพอย่างรวดเร็วและนำไปใช้งานในหลากหลายรูปแบบเนื่องจากความที่เป็นภาพดิจิทัล ทำให้เกิดใช้งานในรูปแบบใดบ้างในปัจจุบัน
4. จงกล่าวถึงบทบาทของแผนที่จากการสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพดาวเทียมว่าทำให้ข้อมูลปรากฏครอบคลุมทั่วโลกได้อย่างรวดเร็วได้อย่างไร แผนที่ภาพดังกล่าวปรากฏให้ใช้ในระบบภูมิสารสนเทศผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตที่เรียกดูด้วย 3D GeoBrowser เช่น Google Earth , Google Maps และ Microsoft Virtual Earth 3D

2 เรขาคณิตเบื้องต้น

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเรขาคณิตเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องและจำเป็นสำหรับการสำรวจวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ เเรขาคณิตที่จะได้กล่าวถึงได้แก่คุณลักษณะของกล้องถ่ายภาพทางอากาศ เเรขาคณิตของการบินถ่ายภาพทางอากาศ หลักการแปลงพิกัดในสองมิติและสามมิติ เเรขาคณิตของภาพถ่ายดิจิทัล เพื่อใช้เป็นหลักการพื้นฐานในการประมวลผลรังวัดบนภาพ

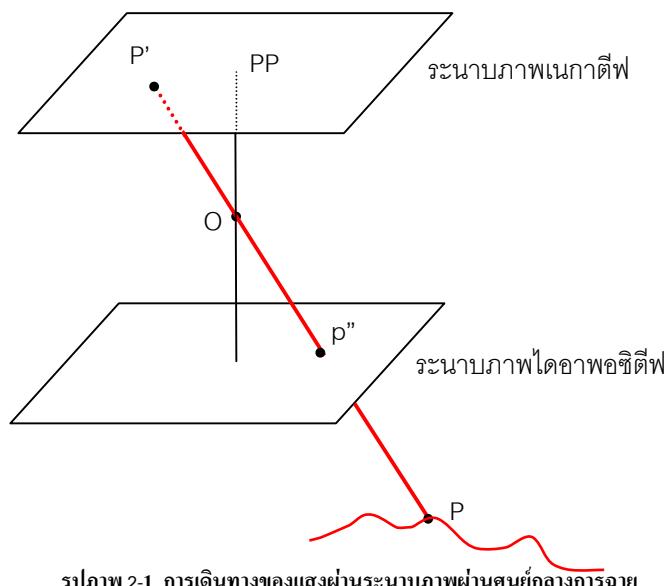
2.1 เเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพ



เรขาคณิตพื้นฐานสำหรับงานถ่ายภาพคือการฉายผ่านเมื่อคำแสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนเข้าหากล้องรับภาพนั้น เพื่อความง่ายในเบื้องต้นจะสมมุติให้แสงเดินทางเป็นเส้นตรงในอุดมคติ รังสีจากจุดใดๆ ของวัตถุ P สะท้อนเป็นเส้นตรงผ่านจุดรวมแสง (Nodal point) ซึ่งในเบื้องต้นนี้ก็คือจุดเปิดถ่ายภาพ (Exposure Station) ซึ่งต่อไปจะใช้เป็นตัวแทนตำแหน่งของภาพขณะที่กำลังบันทึก ณ เวลาหนึ่ง

เมื่อคำแสงตกกระทบระหว่างภาพ (Focal Plane) ตัวฟิล์มที่ไวแสงก็จะบันทึกภาพ ถ้ากล้องอยู่ในอุดมคติแล้วจุดที่ฉายตั้งจากจุดรวมแสงไปตั้งฉากกับระหว่างภาพเรียกว่าจุดมุขย์สำคัญ (Principle Point : PP) ดังภาพ

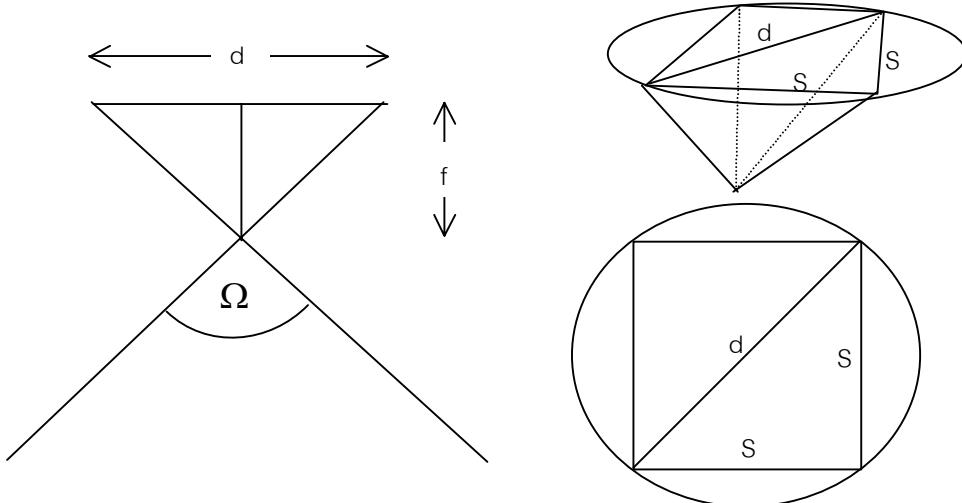
ในการบันทึกภาพทั่วไปจะประมาณราบเนกานติฟ ในทางปฏิบัติสำหรับงานรังวัดด้วยภาพถ่ายนิยมที่จะรังวัดและแปลงภาพบนราบภาพโดยภาพซิทีฟซึ่งเป็นราบของภาพพอดีฟที่มีความสว่างของภาพสอดคล้องกับภูมิประเทศ ทำให้การรังวัดและแปลงภาพทำได้สะดวกไม่สับสน การเดินทางของแสงที่เป็นแบบจำลองในบันทึกอาศัยการฉายผ่าน ดังปรากฎในภาพต่อไปนี้



รูปภาพ 2-1 การเดินทางของแสงผ่านราบภาพผ่านศูนย์กลางการฉาย

2.1.1 ประเภทกล้องถ่ายภาพทางอากาศ

กล้องถ่ายภาพทางอากาศมาตรฐานจะเป็นกล้องที่มีพื้นที่จับรับภาพใหญ่ขนาด $9 \text{ นิ้ว} \times 9 \text{ นิ้ว}$ หรือประมาณ $230 \text{ มิลลิเมตร} \times 230 \text{ มิลลิเมตร}$ เมื่อกำหนดให้ขนาดของภาพคงที่ เช่นนี้จะทำให้ค่ามุมของการมองเห็น (Field of View : FOV) ของกล้อง แบร์เปลี่ยนไปตามความยาวโฟกัสของกล้อง ดูจากตารางด้านล่าง



รูปภาพ 2-2 เรขาคณิตของความกว้างภาพถ่าย ความยาวโฟกัส และ มุมของการมองเห็น (FOV)

จากภาพขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับขนาดภาพ S ได้ดังนี้

$$d = \sqrt{S^2 + S^2} \quad \text{สมการ 2-1}$$

เมื่อ S คือขนาดของกรอบภาพถ่าย และ d คือเส้นทแยงมุมหรือขนาดของภาพส่วนที่กว้างที่สุด

มุมของการมองเห็น Field of View (FOV) หรือ Ω คำนวณได้จาก

$$FOV = \Omega = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d}{2 \cdot f} \right) \quad \text{สมการ 2-2}$$

โดยมากกล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ได้มาตรฐานจะมีความยาวโฟกัสต่างๆ และความกว้างของมุมของการมองเห็น (Field of View : FOV) โดยทั่วไปจะได้

ความกว้างของมุมของการมองเห็น (Field of View : FOV)	ชื่อที่ใช้เรียก
$\Omega < 75^\circ$	Normal Angle
$75^\circ \leq \Omega < 100^\circ$	Wide Angle
$\Omega \geq 100^\circ$	Super-Wide Angle

ตาราง 2-1 ชื่อที่ใช้เรียกชนิดของเลนส์ตามความกว้างของมุมการมองเห็น (FOV)

เมื่อนำมาใช้เรียกประเภทกล้องถ่ายภาพทางอากาศที่มีเลนส์ที่ความยาวโฟกัสต่างๆ ความกว้างของมุมของการมองเห็นจะสามารถคำนวณได้จากสูตรข้างต้น โดยใช้สมการ 2-2 นอกจากนี้สำหรับกล้องถ่ายภาพทางอากาศยังมีชื่อเรียกเฉพาะเพิ่มขึ้นอีกคือ Intermediate Angle และ Narrow Angle (Albert 1989) ดังนี้

ชนิดกล้อง	Super-wide Angle	Wide Angle	Intermediate Angle	Normal Angle	Narrow Angle
ความยาวโฟกัส f (มม.)	85	153	210	305	610
FOV (Ω)	124.8°	93.5°	75.5°	56.1°	29°

ตาราง 2-2 แสดงความสัมพันธ์ชนิดของกล้อง ความยาวโฟกัส และความกว้างมุมการมองเห็น (FOV)

2.1.2 คุปกรณ์ประกอบกล้องถ่ายภาพ

เป็นเวลานับร้อยปีการถ่ายภาพเพื่อการสำรวจวัดจะทำการบันทึกภาพลงบนฟิล์มเนกานาฟเสียก่อน จากนั้นจึงนำมาอัดล้างเพื่อทำสำเนาบนฟิล์มอื่นๆ ที่เหมาะสมแก่การใช้งาน เช่น ฟิล์มไดอาพอชีฟ กระดาษอัดภาพบอร์เมต กล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ใช้กันแพร่หลายจะรองรับฟิล์มน้ำหนักว่าง $9\frac{1}{2}$ นิ้ว ยาวตั้งแต่ 125 ฟุต ไปจนถึง 700 ฟุต (Kodak 1998) ซึ่งสามารถบันทึกภาพได้ตั้งแต่ 150 ไปจนถึง 880 ภาพตามลำดับ ฟิล์มจะบรรจุอยู่ในฟิล์มคาสเซ็ต (Film Cassettes) วางอยู่ส่วนบนสุดของกล้องถ่ายภาพ ส่วนชุดเลนส์ (Lens Cone) ที่มีความยาวไฟกัสด่างๆ สามารถอุดเปลี่ยนได้ตามความต้องการ

ตัวอย่างของกล้องที่ใช้ในการรังวัดที่พบบ่อยและเป็นมาตรฐานในอุตสาหกรรมทำแผนที่ในประเทศไทยได้แก่ กล้องถ่ายภาพจากบริษัทผู้ผลิต Z/I Imaging Inc. และ LH System LLC กล้องถ่ายภาพทางอากาศดังกล่าวมีลักษณะดังรูป



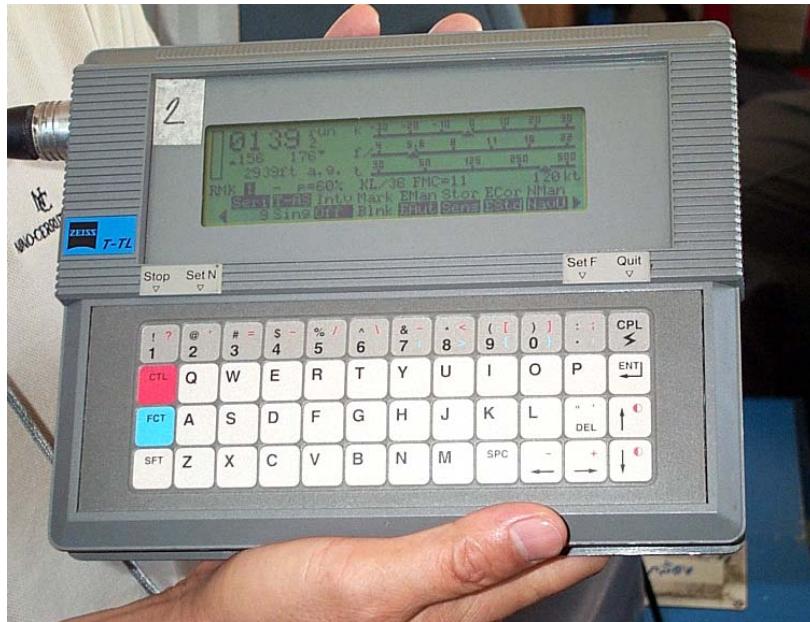
a) Z/I Imaging RMK TOP Aerial Survey System by Z/I Imaging Inc.

b) RC 30 Aerial Film Camera by Leica Geosystems Inc.

รูปภาพ 2-3 ตัวอย่างกล้องถ่ายภาพทางอากาศ

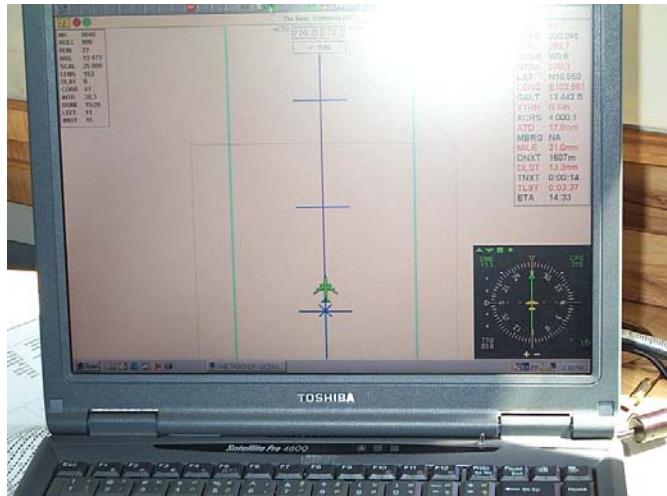
กล้องถ่ายภาพทางอากาศเป็นคุปกรณ์กลไกความละเอียดสูง ควบคุมด้วยไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ กล้องถ่ายภาพทางอากาศประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ แคสเซ็ตสำหรับสำหรับใส่ฟิล์ม ระบบกรอบภาพที่มีช่องแสง เป็นรูปร่างของจุดชนวนที่มีการขยายแสงให้ปรากฏบนขอบภาพถ่ายทางอากาศในขณะกำลังบันทึกภาพ และส่วนของเลนส์ประกอบ (Lens Cone)

กล้องถ่ายภาพทางอากาศรุ่นล่าสุดมีการใช้คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กในการควบคุมการทำงานของกล้อง โดยเฉพาะการลับชัตเตอร์เพื่อบันทึกภาพ ทำให้กระบวนการวางแผนการบิน การลับชัตเตอร์ให้ครอบคลุมพื้นที่ และให้ส่วนซ้อนของภาพเป็นไปตามที่วางแผนได้ง่ายและแม่นยำขึ้นกว่าการใช้ความสามารถของ “ตั้นหนนถ่ายภาพ”



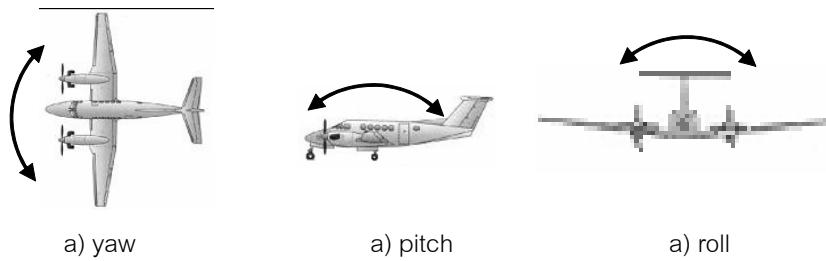
รูปภาพ 2-4 คอมพิวเตอร์ควบคุมกล้องถ่ายภาพทางอากาศ สำหรับกล้อง RMK TOP

การนำเทคโนโลยีgps(GPS) มาใช้ในการนำร่องอากาศยาน ค่าพิกัดที่ได้จากการจีพีเอสที่นำไปใช้ร่วมกับ คอมพิวเตอร์ควบคุมกล้องถ่ายภาพทางอากาศยาน จะทำให้การบันทึกภาพมีความแม่นยำถูกต้องมากขึ้น เมื่อ เปรียบเทียบกับระบบก่อนหน้านี้ที่อาศัยการเล็งผ่านกล้องเลင์พินที่ เพื่อดูพื้นครอบคลุมประกอบการวางแผนบน แผนที่ภูมิประเทศแล้วลั่นชัตเตอร์ด้วยมือ ในภาพต่อไปนี้แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุม การทำงานของกล้องถ่ายภาพทางอากาศโดยเฉพาะ และคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊คทั่วไปที่ใช้ร่วมกับระบบช่วยนำหน้า ปีกอีสสำหรับการถ่ายภาพทางอากาศ การใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ร่วมกับคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊คทำให้การ ออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อใช้งานแผนการบิน การควบคุมการบินให้เข้าแนวบินเพื่อบันทึกภาพ การลั่นชัตเตอร์ เพื่อให้ได้ภาพครอบคลุมพื้นที่และส่วนซ้อนมีความยืดหยุ่นยิ่งขึ้นไปอีกเมื่อใช้โน๊ตบุ๊คและซอฟต์แวร์เพื่อการ ดังกล่าว



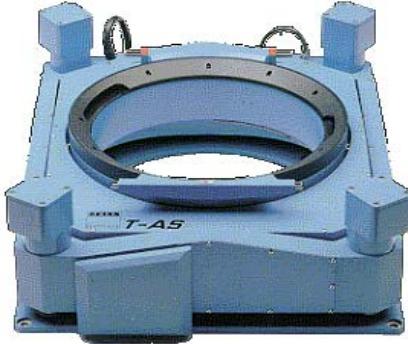
รูปภาพ 2-5 คอมพิวเตอร์ควบคุมกล้องถ่ายภาพทางอากาศ สำหรับกล้อง RMK TOP

ในการบินถ่ายภาพในอุดมคติแล้วควรจะบันทึกภาพให้อยู่ในแนวเดิงเสมอ เพื่อให้ส่วนข้างด้านหน้าด้านข้างเป็นไปตามที่วางแผนไว้ เพื่อให้ภาพถ่ายครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องมีการรักษาเรขาคณิตของภาพถ่ายดิจิ้ง ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพโดยเฉพาะพื้นที่ที่ครอบคลุมจะเป็นไปตามที่ต้องการ อุปกรณ์ดังกล่าวประดับ Gyro ที่มีความสามารถในการรับรู้แนวเดิง ดังนั้นอุปกรณ์ดังกล่าวจะให้กล้องชี้ลงไปสู่พื้นผิวโลกในแนวเดิงตลอดเวลาในขณะที่เครื่องบินพุ่งทะยานไปข้างหน้า ใน การบันทึกภาพถ่ายทางอากาศยังมีความต้องการในการควบคุมความเอียงของเครื่องบินตามแนวลำตัว (pitch) และขวางลำตัว (roll) ให้มีค่าไม่เกิน $\pm 5^\circ$ อีกด้วย นอกจากนี้อุปกรณ์การควบคุมการวางแผนด้วยเส้นทิศทางของลำตัวเครื่องบินเทียบกับแนวบิน ในบางครั้งโดยเฉพาะเมื่อมีลมพัดแรงเข้าปะทะลำตัวเครื่องบิน ทำให้นักบินจะต้องบินโดยใช้ด้านข้างลำตัวเครื่อง ประหลาดเล็กน้อยเพื่อรักษาทิศทางของแนวบินไว้ให้ได้ตามที่ต้องการ มุมดังกล่าวระหว่างแนวบินและทิศทางลำตัวเครื่องเรียกว่า yaw อุปกรณ์นี้จะทำการปรับทิศทางให้กล้องขนาดกับแนวบินเสมอตราบใดมุมเอียง yaw มีค่าไม่เกิน $\pm 30^\circ$



รูปภาพ 2-6 แสดงการบรรยายมุมเอียงของเครื่องบินในแนวต่างๆ

อุปกรณ์ที่ช่วยรักษาความเสี่ยงและทิศทางของเครื่องบินหรืออาจเรียกว่าการควบคุมการจัดวางตัวของกล้องถ่ายภาพ ทำให้บันทึกถ่ายทางอากาศให้ได้ภาพถ่ายดิจิทัลหรือเก็บดิจิทัล อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า gyro-stabilizer และมีลักษณะดังในภาพ



a) ZEISS T-AS



b) WILD PAV 30

รูปภาพ 2-7 อุปกรณ์ช่วยให้กล้องถ่ายภาพทางอากาศมีความเสถียรและรักษาแนวดิจิทัล (gyro-stabilizer)

มุม Yaw ที่กล้องต้องเอียงออกจากลำตัวเครื่องบินเพื่อรักษาทิศทางให้อยู่ในแนวบิน มักจะจำกัดให้มีให้ไม่ใหญ่เกินไป ทั้งนี้เพื่อภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกได้มีการครอบคลุมพื้นที่ที่สมบูรณ์และจะส่งผลให้การสร้างแบบจำลองสามมิติมีความสมบูรณ์ มุมที่กล้องต้องเอียงออกจากลำตัวเครื่องบินดังกล่าวเรียกว่า Crab Angle และมักจะกำหนดให้ไม่เกิน $3-5^\circ$

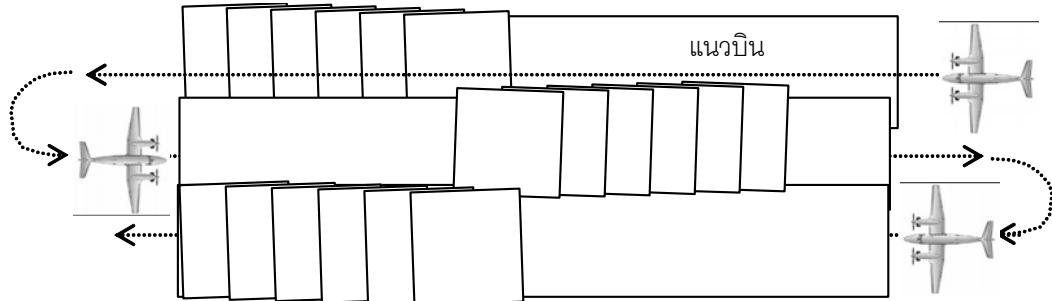
2.2 การบินถ่ายภาพ

เนื่องจากในพื้นที่ที่ต้องการทำแผนที่หรือข้อมูลแผนที่ที่ต้องการการรังวัดตำแหน่ง ขนาด ลูปว่าง ของวัตถุ ด้วยวิธีการรังวัดด้วยภาพ ขอบเขตของแผนที่อาจไม่สามารถบันทึกให้เห็นปรากฏได้บนภาพเพียงภาพเดียว เนื่องจากข้อจำกัดขนาดของภาพถ่ายทางอากาศ นอกเหนือความต้องการในกรอบประมาณโดยเฉพาะการรังวัดพิกัด วัตถุนั้นต้องวัดจากภาพคู่สามมิติ ซึ่งเป็นการวัดจุดๆเดียวกับบนภูมิประเทศ และจุดนั้นต้องปรากฏบนภาพทั้งสองพร้อมกันจึงจะสามารถคำนวนค่าพิกัดในสามมิติได้ ดังนั้นจะต้องทำการบินถ่ายภาพทางอากาศให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งโครงการ การบินถ่ายภาพจะกระทำอย่างเป็นแนวเป็นอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินการประมาณผลภาพถ่ายทางอากาศต่อมา และให้ภาพที่ปรากฏมีความชัดเจนสม่ำเสมอ กันทุกภาพ เราชอกนิยมของภาพวัตถุที่ปรากฏสามารถคาดคะเนความละเอียดถูกต้องได้ ภาพถ่ายทางอากาศสำหรับการรังวัด ทำแผนที่จึงมีลักษณะที่ภาพมีการซ้อนกันทั้งในแนวบิน (flight-line) และระหว่างแนวบิน



รูปภาพ 2-8 ตัวอย่างของเครื่องบินชนิดใบพัดสองเครื่องยนต์ติดตั้งกล้องถ่ายภาพทางอากาศ

เมื่อได้ทำการวางแผนการบินถ่ายภาพทางอากาศแล้ว โดยทั่วไปจะเริ่มดำเนินการบินบันทึกภาพโดยการเลือกแนวบินริมสุดด้านใดด้านหนึ่งแล้วทำการบินบันทึกภาพในแนวบินนั้น ก่อนที่จะเริ่มเข้าแนวบินจริง จะต้องมีการฝึกอบรมทางให้พอที่เครื่องบินจะปรับตัวให้มีความเสถียรอยู่ในแนวเดิม หรือต้องมีการเบนหัวเพื่อแก้ทิศทางลงที่เข้าประตูเพื่อรักษาแนวบินให้เป็นตามที่วางแผน การบันทึกภาพในแต่ละแนวบินมักจะบันทึกภาพเพื่อให้เกินขอบเขตที่จะบันทึกภาพเล็กน้อย เช่น 2 ถึง 3 ลูปก่อนถึงแนวบินในพื้นที่และในส่วนต่อของแนวบินก่อนออกจากพื้นที่ในแนวบินนั้น



รูปภาพ 2-9 ส่วนซ้อนด้านหน้าในแนวบินและส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวบิน

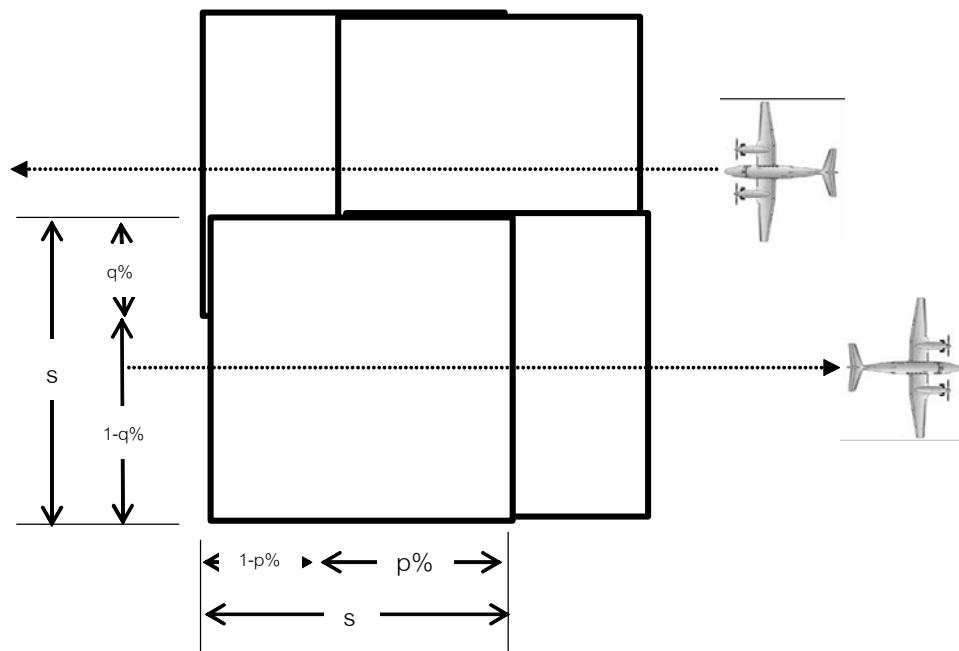
เมื่อได้ทำการบันทึกภาพลึ้นสุดหนึ่งแนวบินเครื่องบินก็จะกลับลำ พร้อมเข้าสู่แนวบินที่ติดกันและเริ่มทำการบันทึกภาพโดยมีส่วนซ้อนด้านข้างกับแนวบินก่อนหน้านี้บางส่วน เพื่อให้ครอบคลุมภูมิประเทศและเพื่อเรขาคณิตของการทำงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation) ให้ได้ผลดี การบินถ่ายภาพเป็นแนวบินหลายแนวบินซึ่งนั้นเรียกว่า “บล็อก” ของการบินถ่ายภาพทางอากาศ



รูปภาพ 2-10 บล็อกของการถ่ายทางอากาศเมื่อนำมาเรียงต่อกัน

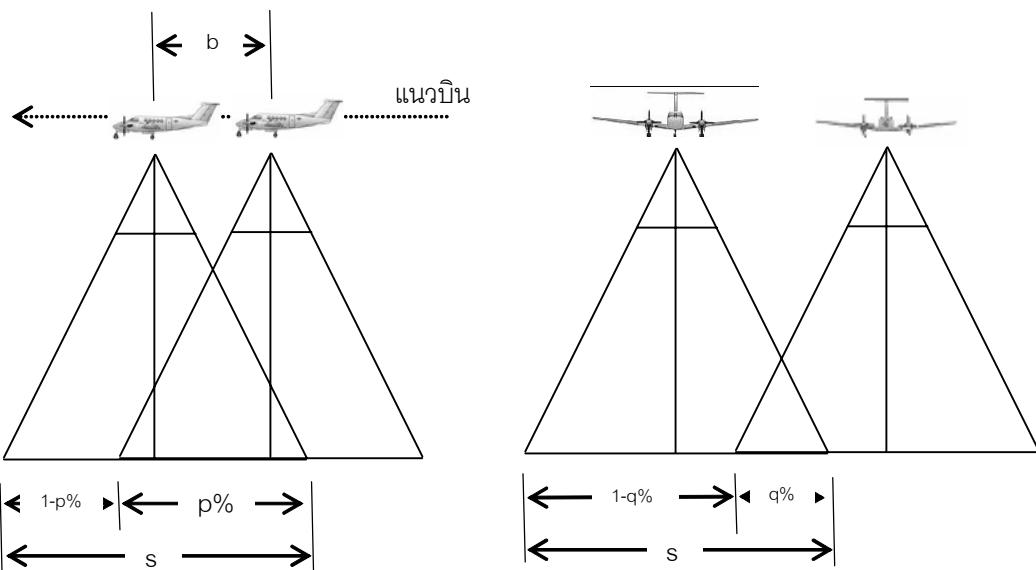
หากมองจากด้านบนเหนือภูมิประเทศจะเห็นลักษณะของบล็อกดังภาพในการบินถ่ายภาพบล็อกปกติจะบันทึกภาพซ้อนกันด้านหน้าที่นานกับแนวบินคิดเป็นระยะทาง $p = 60\%$ ของระยะทางความกว้างของภาพบนพื้นดิน S และส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวบินเป็นระยะทาง $q = 20\%$ ถึง 30%

เมื่อพิจารณาส่วนซ้อนโดยการขยายภาพจะเห็นการทับซ้อนของภาพในแนวบินและส่วนซ้อนของภาพในระหว่างแนวบินดังภาพ



รูปภาพ 2-11 ส่วนซ้อนด้านหน้าและส่วนซ้อนด้านข้าง

หากมองจากด้านข้างโดยมองขวางกับแนวบินและมองเข้าหาแนวบิน จะเห็นว่าตำแหน่งจุดบันทึกภาพทั้งสองจะห่างกันเป็นระยะทาง b ที่เรียกว่าระยะฐานบิน (base line) ดังภาพ



จากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อมองขวางกับแนวบิน จะเห็นระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่ายสองจุดที่อยู่ในแนวบินเดียวกัน ระยะนี้เรียกว่าระยะฐานบิน (b) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับส่วนซ้อน ระยะฐาน b สามารถคำนวณได้จาก

$$b = (1 - p\%) \cdot S$$

สมการ 2-3

ดังนั้นเมื่อบินถ่ายภาพที่มาตราส่วน 1:m หากให้ขนาดของภาพถ่ายทางอากาศเป็น s และ ขอบเขตของภาพที่ปรากฏบนพื้นดินเป็น S จะสามารถหาระยะทางส่วนซ้อนจากส่วนซ้อนในแนวบิน p และส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน q บนพื้นดินเป็นระยะทาง P และ Q ได้ดังนี้

$$S = s \cdot m$$

$$P = p \cdot S$$

สมการ 2-4

$$Q = q \cdot S$$

โดย p คือระยะทางส่วนซ้อนด้านหน้าที่อาจจะเป็น 60% และ q คือระยะทางส่วนซ้อนด้านข้างมักจะใช้ 20-30%

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ภาพถ่ายมีมาตราส่วน 1:15,000 บินถ่ายด้วยภาพถ่ายขนาดมาตรฐาน 23 ซม \times 23 ซม เมื่อ ส่วนซ้อนด้านหน้าเป็น p = 60 % และส่วนซ้อนด้านข้างเป็น q = 30 % จงหาระยะบนพื้นดินทางซ้อนด้านหน้า และด้านข้าง

วิธีทำ

จะได้ว่า ขนาดของภาพถ่ายทางอากาศเป็น $s = 0.23$ เมตร

เลขมาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศเป็น $m = 15,000$

\therefore ระยะทางการครอบคลุมของภาพบนพื้นดิน $S = s \cdot m = 0.23 \cdot 15,000 = 3,450$ เมตร

ระยะทางบนพื้นดินของส่วนซ้อนด้านหน้า $P = p \cdot S = 0.60 \cdot 3,450 = 2,070$ เมตร ตอบ

ระยะทางบนพื้นดินของส่วนซ้อนด้านข้าง $Q = q \cdot S = 0.30 \cdot 3,450 = 1,035$ เมตร ตอบ

2.3 ผลผลิตจากการบันทึกภาพ

เมื่อทำการบันท่ายภาพทางอากาศโดยใช้กล้องถ่ายภาพทางอากาศมาแล้ว ภาพที่บันทึกได้จะถูกนำมาเป็นสำเนาบนวัสดุต่างๆเพื่อการใช้งานในรูปแบบต่างๆได้หลายรูปแบบ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.3.1 ชนิดของภาพตามวัสดุที่บันทึกภาพ

เมื่อทำการบันทึกภาพโดยใช้เฉพาะภาพถ่ายทางอากาศ ฟิล์มที่บรรจุอยู่ในกล้องถ่ายภาพจะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการล้างอัด ฟิล์มที่ใช้ในกล้องถ่ายภาพจะเป็นวัสดุไวนิลและเคลือบอยู่บนวัสดุฟิล์มที่มีความคงทนและเหนียว และยึดหยดตัวน้อย เมื่อทำการล้างอัดแล้วสารไวนิลจะเปลี่ยนสภาพมีความคงที่บันทึกภาพไว้ได้ ภาพที่บันทึกได้จะปรากฏเป็นภาพเนกานาทีฟ จึงนิยมเรียกว่า ฟิล์มนากานาทีฟ ภาพเนกานาทีฟมักจะเก็บรักษาไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและเก็บไว้เป็นม้วนในกล่องปิดมิดชิด ทั้งนี้เพื่อความประหนัยที่จะเก็บ ความคงทน ป้องกันแสง ป้องกันฝุ่น ป้องกันรอยขีดข่วน และเพื่อความง่ายต่อการนำมาใช้งาน เนื่องจากการบันทึกภาพบนฟิล์มนากานาทีฟจะปรากฏเป็นภาพที่มีความมีดส่วนที่ขาดหายไป ไม่สามารถนำมาใช้งานโดยตรง



รูปภาพ 2-13 ลักษณะการเก็บฟิล์มนากานาทีฟ

เมื่อต้องการนำมาใช้งานก็จะมีการนำฟิล์มนากานาทีฟมาอัดสำเนา (contact print) โดยวัสดุที่ใช้จะเป็นฟิล์มชนิดไดอาพอชิตีฟ ผลการอัดสำเนาบนภาพฟิล์มไดอาพอชิตีฟทำให้ได้ภาพถ่ายทางอากาศในรูปแบบของภาพไดอาพอชิตีฟ ที่ฟิล์มนีโนนีสอดคล้องกับภาพของการสะท้อนแสงบนภูมิประเทศ กล่าวคือทำให้ภาพของภูมิประเทศปรากฏในลักษณะที่ผู้ใช้งานสามารถแปลภาพได้ง่าย ภาพถ่ายทางอากาศชนิดไดอาพอชิตีฟ มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับฟิล์มนากานาทีฟ คือมีความเสถียรยึดหยดตัวน้อย ทำให้สามารถใช้รังวัดบน

ภาพถ่ายได้ลักษณะเดียวกันต้องในระดับไมโครอน พิล์มไดอาพอชีติฟ จึงเป็นผลลัพธ์หลักที่นำไปใช้ในการประมวลผลภาพต่อ เช่น การใช้วัสดุบนเครื่องร่างແนที่สามมิติ การใช้สแกนเพื่อเปลี่ยนเป็นรูปดิจิทัล

ในกรณีที่ต้องการใช้งานภาพถ่ายทางอากาศที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง ในการแปลภาพตลอดจนการวางแผนทั่วไป ภาพจากพิล์มเนกากตีพ็อกจะสามารถใช้เป็นต้นฉบับอัดลงบน กระดาษบอร์ไมด์ หรือกระดาษขัดภาพถ่าย ซึ่งมีราคาถูก เป็นวัสดุที่普遍ที่มีภาพภูมิประเทศปรากฏ ภาพบนกระดาษบอร์ไมด์สามารถใช้ดำเนินการเปลี่ยนสีได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามไม่เหมาะสมสำหรับการวางแผนภาพที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง ภาพถ่ายทางอากาศบนกระดาษบอร์ไมด์จะมีการยืดหดตัวได้มาก โดยเฉพาะสาเหตุจากความชื้นและอุณหภูมิ ภาพถ่ายทางอากาศบนกระดาษบอร์ไมด์มีราคาถูกใช้งานได้คล่องตัว ดังนั้นกระดาษบอร์ไมด์จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานทั่วไป การวางแผนภาพเบื้องต้น การแปลภาพด้วยสายตา การใช้งานในการจำแนกในสนาม

ปัจจุบันการวางแผนด้วยภาพเข้าสู่ยุคดิจิทัล ดังนั้นภาพถ่ายทางอากาศในรูปแบบดิจิทัลสามารถเปลี่ยนเป็นรูปแบบดิจิทัลได้โดยการใช้สแกนเนอร์หรือเครื่องกราดภาพ โดยทั่วไปหากต้องการผลิตแผนที่ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงและได้ความละเอียดถูกต้องที่เป็นมาตรฐานจะต้องสแกนจากภาพที่พิมพ์บนพิล์มไดอาพอชีติฟ หากต้องการประยุกต์ไม่ต้องการความคมชัดและไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงนัก อาจสามารถสแกนจากภาพบนกระดาษบอร์ไมด์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน

2.3.2 ชนิดของภาพตามโภนสีที่บันทึกได้

พิล์มนeganakatiพิที่บอร์จูยูในกล้องถ่ายภาพมีหลายชนิดแบ่งตามชนิดของสารไวแสงที่เคลือบอยู่บนแผ่นพิล์ม สารไวแสงมีการตอบสนองต่อความเข้มของแสง ช่วงความยาวคลื่นของแสงในย่านต่างๆ เช่น ย่านแสงสีแดง ยานแสงสีเขียว ย่านแสงสีน้ำเงิน ตลอดจนยานคลื่นความถี่ที่ตามนูนชูรูปได้เรียกว่าช่วงคลื่น แพนโครามาติก (panchromatic) นอกจากนี้ยังมีพิล์มที่มีความไวต่อแสงย่านช่วงคลื่นอินฟราเรดอีกด้วย ในการใช้งานสามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ งบประมาณ โดยทั่วไปพิล์มบันทึกภาพถ่ายทางอากาศสามารถแบ่งได้เป็นสามกลุ่มคือ

- พิล์มสี (color film) สำหรับการบันทึกภาพสีธรรมชาติ
- พิล์มขาว-ดำ (black and white film) สำหรับการบันทึกภาพโภนสีขาวไปปิงถึงดำ ซึ่งเป็นการบันทึกความเข้มของแสงในทุกช่วงความยาวคลื่นที่ตามนูนชูรูปของเห็นได้ที่เรียกว่า แพนโครามาติก (panchromatic)
- พิล์มอินฟราเรด (infrared film) สำหรับการบันทึกภาพในช่วงคลื่นแสงย่านอินฟราเรด มีประโยชน์ในการตรวจสืบพืนที่ป่าไม้ พืชพรรณ ผลการบันทึกจะได้ภาพของพืชพรรณเด่นชัด เนื่องจากช่วงคลื่นของแสงอาทิตย์ที่ถูกปลดปล่อยหรือสะท้อนกลับมาจากพืชพรรณจะมีความเข้มของแสงในย่านอินฟราเรดสูงมาก
- พิล์มสำเนา (duplicating film) เป็นพิล์มที่ออกแบบไว้สำหรับการสำเนาพิล์มนeganakatiพิใน การสำเนาพิล์มจากเนกากตีพิด้วยการสำเนาแบบสัมผัสดรง (contact print) นี้จะทำได้กับพิล์มเดิมที่เป็นเนกากตีพิโภนสีกลับเป็นตรงกันข้าม นั่นคือได้ภาพไดอาพอชีติฟ

2.3.3 มาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศ

ในการบันทึกภาพถ่ายทางอากาศจะมีการเลือกชนิดความยาวโฟกัสของเลนส์ เพื่อให้การครอบคลุมของภาพแต่ละภาพบนภูมิประเทศและมุ่งเน้นของการบันทึกภาพโดยเฉพาะที่ขอบภาพแตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้ภาพของภูมิประเทศที่ปรากฏสามารถนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ต่างๆได้ เช่นการบันทึกเพื่อให้เห็นสิ่งปลูกสร้างที่มีการบดบังกันน้อย หรือการบันทึกเพื่อให้การรังวัดมีความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่งสูง ปรากฏการณ์สามารถที่จะวิเคราะห์ได้จากเรขาคณิตของภาพคู่สามมิติซึ่งจะได้กล่าวในบทต่อไป

โดยทั่วไปการบันทึกภาพที่มาตราส่วนได้จำดำเนินงสิ่งวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยเฉพาะการมองเห็น การแปลภาพเห็นรายละเอียดที่ต้องการ ความละเอียดถูกต้องที่ได้ ในประเทศไทย ภาพถ่ายทางอากาศที่มีการบันทึกและพบบ่อยมีอยู่หลายมาตราส่วนด้วยกัน โดยการบันทึกภาพในแต่ละมาตราส่วนมีวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังปรากฏในตารางต่อไปนี้

มาตราส่วน	วัตถุประสงค์
1:6,000	เป็นภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนใหญ่ สามารถบันทึกให้เห็นรายละเอียดของสิ่งปลูกสร้าง และสาธารณูปโภคที่ชัดเจน เช่น สามารถมองเห็นสีน้ำเงินบนถนน ขอบอาคาร ลายละเอียดของภูมิประเทศ การรังวัดและผลิตแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนใหญ่จะให้ความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งสูง จึงเหมาะสมสำหรับงานจัดการที่ดิน งานวิศวกรรมต่างๆ ภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:6,000 สามารถใช้ผลิตแผนที่มาตราส่วน 1:1,000 ได้
1:15,000- 1:20,000	เพื่อให้เห็นภาพรวมของเมือง เห็นอาคารสิ่งปลูกสร้าง สำหรับการจัดการผังเมือง สามารถใช้ผลิตแผนที่มาตราส่วน 1:4,000 ภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:15,000 นิยมจะนำไปใช้สร้างข้อมูลภายในภาพผังเมือง
1:25,000	เป็นมาตราส่วนระหว่างมาตราส่วนเล็กและมาตราส่วนใหญ่ มาตราส่วนนี้สามารถบันทึกภาพรวมของภูมิประเทศทั้งทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งปลูกสร้าง และมีศักยภาพสามารถใช้ผลิตเป็นแผนที่มาตราส่วนค่อนข้างใหญ่ได้ ภาพถ่ายทางอากาศสีมาตราส่วน 1:25,000 ที่ถูกบันทึกภาพส่วนใหญ่ในระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง 2546 ที่ดำเนินโดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ใน “โครงการแผนที่เพื่อการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและการบริหารทรัพย์สิน” มีการบินบันทึกภาพทั่วประเทศอย่างเป็นระบบ ภาพที่บันทึกได้กว่า 70,000 ภาพ ถูกนำไปผลิตเป็นแผนที่ภาพօร์โทความละเอียด จุดภาพสูงเพื่อใช้ในการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศและศักยภาพในการผลิต เป็นแผนที่มาตราส่วนใหญ่ ภาพถ่ายทางอากาศสีมาตราส่วน 1:25,000 ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในการบริหารจัดการ การวางแผน การรังวัดทำแผนที่ การสร้างข้อมูลพื้นฐานภูมิศาสตร์
1:50,000	เป็นภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนเล็ก สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างແຕ່ให้รายละเอียดได้น้อย ภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนเล็กสามารถประยุกต์ใช้เพื่อให้เห็นภาพรวมกว้างๆ ของภูมิประเทศ ใช้ในการวางแผนเบื้องต้นได้ดี ภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:50,000 ถูกบันทึกขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วนเล็กเป็นหลัก ได้แก่ การผลิตแผนที่มาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร

ตาราง 1 แสดงมาตราส่วนภาพถ่ายทางอากาศและการประยุกต์ใช้

2.4 การแปลงค่าพิกัดในสองมิติ

การแปลงค่าพิกัดในสองมิติเป็นหลักการพื้นฐานที่ช่วยในการวัดพิกัดภาพถ่าย การแปลงค่าพิกัดในสองมิติสามารถใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดสองระบบ ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสองเมื่อกำหนดขึ้นแล้วเมื่อทราบค่าพิกัดของจุดใดๆ จำนวนหนึ่ง ที่มีค่าพิกัดในทั้งสองระบบ ในขั้นตอนนี้เรารู้ว่า “การหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด”

เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสอง ค่าพิกัดในระบบใดระบบหนึ่งก็สามารถแปลงเป็นค่าพิกัดในระบบใหม่ ซึ่งเราเรียกว่า “การแปลงค่าพิกัด (Coordinate Transformation)”

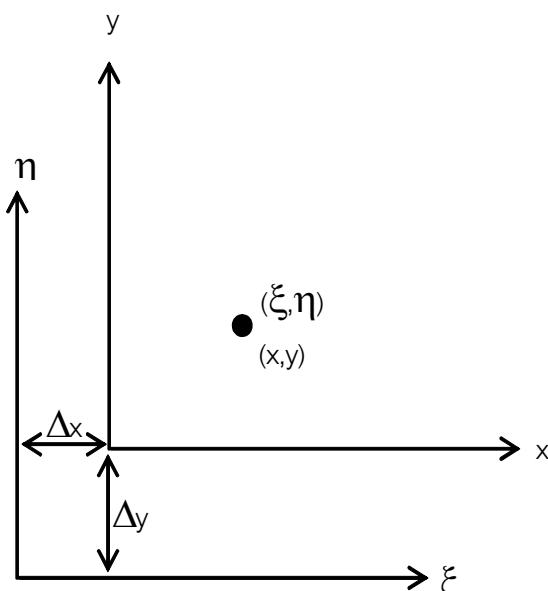
2.4.1 ความสัมพันธ์เบื้องต้น

ความสัมพันธ์เบื้องต้นที่เป็นพื้นฐานของการหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดในระบบสองระบบ คือ จุดหนึ่งเมื่อพิจารณาในระบบพิกัด $x-y$ จะมีค่าพิกัดเป็น (x,y) แต่เมื่อพิจารณาในระบบพิกัด $\xi-\eta$ จะมีค่าพิกัดเป็น (ξ,η)

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสองสามารถนิยามได้ด้วยความสัมพันธ์ต่างๆ ประกอบกันคือ การย้ายแกน (Translation) การย่อขยายมาตราส่วน (Scaling) การทำมุนต์ (Rotation) ดังนี้

2.4.1.1 การย้ายแกน (Translation)

การย้ายแกน (Translation) คือการที่แกนทั้งสองระบบพิกัดขยับไปทางเดียวกันแต่มีจุดกำเนิดต่างกันเป็นระยะๆ จุดทางแกน x และ y เป็น Δx และ Δy ตามลำดับ ดังรูป



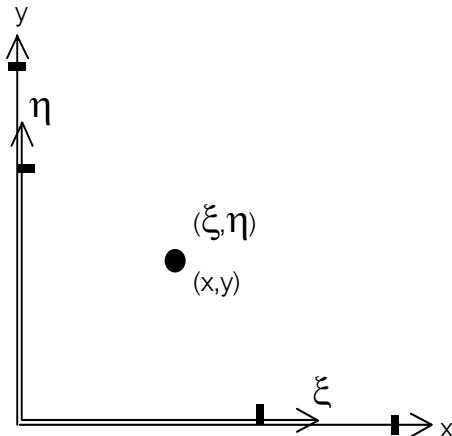
รูปภาพ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด การย้ายแกน (Translation)

การย้ายแกน (Translation) เมื่อการย้ายแกนตามมีค่าการย้ายจัดตามแนวแกน x และ y เป็น Δx และ Δy ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\begin{aligned}\xi &= x + \Delta x \\ \eta &= y + \Delta y\end{aligned}\quad \text{สมการ 2-5}$$

2.4.1.2 การมีมาตรฐาน (Scaling)

เมื่อมาตราส่วนบนทั้งสองแกนไม่เท่ากัน แต่มีศูนย์กำเนิดเดียวกัน ทำให้ค่าพิกัดของจุดใดๆ ที่กำลังพิจารณา มีค่าพิกัดไม่เท่ากัน ดังภาพในรูป



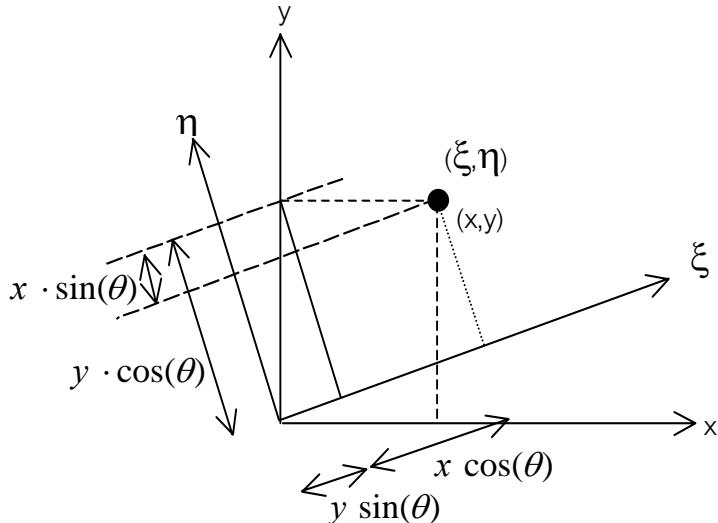
รูปภาพ 2-15 ความสำพันธ์ระหว่างระบบพิกัด การย่อขยายมาตราส่วน (Scaling)

การย่อขยายมาตราส่วนเมื่อมีเปลี่ยนเลขมาตราส่วนตามแกน x และ y เป็น S_x และ S_y ตามลำดับจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\begin{aligned}\xi &= S_x \cdot x \\ \eta &= S_y \cdot y\end{aligned}\quad \text{สมการ 2-6}$$

2.4.1.3 การทำมุกกัน (Rotation)

เมื่อระบบพิกัดทำมุกกันเป็น θ จะสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ได้ดังรูป



รูปภาพ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดของการทำมุกกัน (Rotation)

เมื่อพิจารณาจากรูป หากมุมที่ระบบพิกัดทั้งสองเป็น θ จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\begin{aligned}\xi &= x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta) \\ \eta &= -x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta)\end{aligned} \quad \text{สมการ 2-7}$$

ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดเหล่านี้สามารถนิยามได้ เมื่อทำการรวมความสัมพันธ์ต่างๆ เข้าด้วยกันในหลายลักษณะก็จะมีรูปแบบเดียวกัน คือ $\xi = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)$ และ $\eta = -x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta)$

2.4.2 การแปลงค่าพิกัดชนิดเฮลเมิร์ต

การแปลงค่าพิกัดชนิดเฮลเมิร์ต (Helmert Transformation) เป็นการแปลงค่าพิกัดที่มีความอิสระของความสัมพันธ์เป็นสี่อย่างคือการเคลื่อนย้ายแกนในสองทิศทาง การทำมุกระหว่างแกนเป็น θ และมาตราส่วนหนึ่งมาตราส่วนสามหารับในทั้งสองแกนเป็น S ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned}\xi &= S \cdot x \cdot \cos(\theta) + S \cdot y \cdot \sin(\theta) + \Delta x \\ \eta &= -S \cdot x \cdot \sin(\theta) + S \cdot y \cdot \cos(\theta) + \Delta y\end{aligned} \quad \text{สมการ 2-8}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์สามารถเขียนให้อยู่รูปสมการที่ดูง่ายขึ้น โดยการใช้สัมประสิทธิ์ a, b, c และ d แทนเทอมต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}a &= S \cdot \cos(\theta) ; \quad b = S \cdot \sin(\theta) ; \\ c &= \Delta x ; \quad d = \Delta y\end{aligned} \quad \text{สมการ 2-9}$$

จะได้สมการอีกรูปแบบหนึ่งเป็น

$$\begin{aligned}\xi &= a \cdot x + b \cdot y + c \\ \eta &= -b \cdot x + a \cdot y + d\end{aligned} \quad \text{สมการ 2-10}$$

การแปลงพิกัดแบบเอลเมิร์ตเป็นการแปลงค่าพิกัดแบบคงรูป กล่าวคือลักษณะของรูปยังคงไม่เปลี่ยนแปลง การแปลงพิกัดแบบเอลเมิร์ตยังมีชื่อเรียกอื่นๆ อีกได้แก่ Similarity transformation, Euclidian Transformation, Two-dimension Conformal Transformation

2.4.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์การแปลงพิกัดเอลเมอร์ต

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดสองระบบหากำหนดให้เป็นความสัมพันธ์ชนิดเอลเมิร์ตและต้องการหาสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์นี้ จะต้องมีค่าพิกัดของจุดจำนวนหนึ่งที่มีค่าพิกัดในสองระบบ โดยอาจพิจารณาให้ค่าพิกัดในระบบหนึ่งเป็นค่าคงที่ และค่าพิกัดอีกในระบบหนึ่งเป็นค่าสังเกตดังนั้นสามารถพิจารณาได้ว่าปัญหานี้

- มีตัวไม่ทราบค่า 4 ตัวคือ a, b, c, d
 - ต้องการค่าสังเกตอย่างน้อย 4 ค่า โดยที่ 1 จุดให้ค่าสังเกตได้ 2 ค่า ดังนั้นต้องมีจุดดังกล่าวอย่างน้อย 2 จุด โดยมีค่าเป็น $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2, \dots$
 - ส่วนค่าพิกัดของจุดนั้นๆ ในระบบพิกัด $x-y$ ให้เป็นค่าคงที่ในระบบสมการ $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots$
- สมการค่าสังเกตสำหรับแต่ละจุดคือ

$$\begin{aligned}\xi_i + v_i &= a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \\ \eta_i + v_{i+1} &= -b \cdot x_i + a \cdot y_i + d \\ \xi_{i+1} + v_{i+2} &= a \cdot x_{i+1} + b \cdot y_{i+1} + c \\ \eta_{i+1} + v_{i+3} &= -b \cdot x_{i+1} + a \cdot y_{i+1} + d \\ &\dots\end{aligned} \quad \text{สมการ 2-11}$$

จากหลักการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีลีสแควร์ (Least Squares Adjustment Computation) เราสามารถหาค่าตอบได้หากมีจำนวนจุดพิกัดที่ทราบค่าพิกัดในระบบทั้งสองมากกว่าสองจุด

2.4.3 การแปลงค่าพิกัดชนิดแอฟไฟน์

การแปลงค่าพิกัดชนิดแอฟไฟน์ (Affine Transformation) เป็นการแปลงค่าพิกัดที่มีความอิสระของความสัมพันธ์เป็นhookอย่างคือการเคลื่อนย้ายแกนในสองทิศทาง การทำมุมระหว่างแกนเป็น Θ และมาตราส่วนสองมาตราส่วนสำหรับในทั้งสองแกนเป็น S_x และ S_y การบิดเบี้ยวของระบบพิกัด (Angular Affinity : ε) สามารถมีได้เล็กน้อย ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned}\xi &= S_x \cdot x \cdot \cos(\theta) + S_y \cdot y \cdot \sin(\theta) + \Delta x \\ \eta &= -S_x \cdot x \cdot \sin(\theta + \varepsilon) + S_y \cdot y \cdot \cos(\theta + \varepsilon) + \Delta y\end{aligned} \quad \text{สมการ 2-12}$$

โดยที่สามารถเขียนให้คู่ในรูปสมการที่ดูง่ายขึ้น ด้วยการใช้สัมประสิทธิ์ a, b, c และ d แทนแทนต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} a &= S_x \cdot \cos(\theta) ; b = S_y \cdot \sin(\theta) ; c = \Delta x ; \\ d &= -S_x \cdot \sin(\theta + \varepsilon) ; e = S_y \cdot \cos(\theta + \varepsilon) ; f = \Delta y \end{aligned} \quad \text{สมการ 2-13}$$

จะได้สมการแอฟไฟน์อีกรูปแบบหนึ่งเป็น

$$\begin{aligned} \xi &= a \cdot x + b \cdot y + c \\ \eta &= d \cdot x + e \cdot y + f \end{aligned} \quad \text{สมการ 2-14}$$

2.4.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ชนิดแอฟไฟน์

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดสองระบบหากำหนดให้เป็นความสัมพันธ์เป็นชนิดแอฟไฟน์ และต้องการหาสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์นี้ จะต้องมีค่าพิกัดของจุดจำนวนหนึ่งที่มีค่าพิกัดในสองระบบ โดยอาจพิจารณาให้ค่าพิกัดในระบบหนึ่งเป็นค่าคงที่ และค่าพิกัดอิกในระบบหนึ่งเป็นค่าสังเกตดังนั้นจะสามารถพิจารณาได้ว่าปัญหานี้

- มีตัวไม่ทราบค่า 6 ตัวคือ a, b, c, d, e, f
- ต้องการค่าสังเกตอย่างน้อย 6 ค่า โดยที่ 1 จุดให้ค่าสังเกตได้ 2 ค่า ดังนั้นต้องมีจุดดังกล่าวอย่างน้อย 3 จุด โดยมีค่าเป็น $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2, \xi_3, \eta_3, \dots$
- ส่วนค่าพิกัดของจุดนั้นๆ ในระบบพิกัด $x-y$ ให้เป็นค่าคงที่ในระบบสมการ $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, \dots$

สมการค่าสังเกตสำหรับแต่ละจุดคือ

$$\begin{aligned} \xi_i + v_i &= a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \\ \eta_i + v_{i+1} &= d \cdot x_i + e \cdot y_i + f \\ \xi_{i+1} + v_{i+2} &= a \cdot x_{i+1} + b \cdot y_{i+1} + c \\ \eta_{i+1} + v_{i+3} &= d \cdot x_{i+1} + e \cdot y_{i+1} + f \\ \xi_{i+2} + v_{i+4} &= a \cdot x_{i+2} + b \cdot y_{i+2} + c \\ \eta_{i+2} + v_{i+5} &= d \cdot x_{i+2} + e \cdot y_{i+2} + f \\ &\dots \end{aligned} \quad \text{สมการ 2-15}$$

ซึ่งหากมีจุดพิกัดในทั้งสองระบบที่ทราบค่าพิกัดมากกว่า 3 จุด เราสามารถหาคำตอบได้โดยอาศัยหลักการของการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Adjustment Computation)

2.5 การแปลงค่าพิกัดในสามมิติ

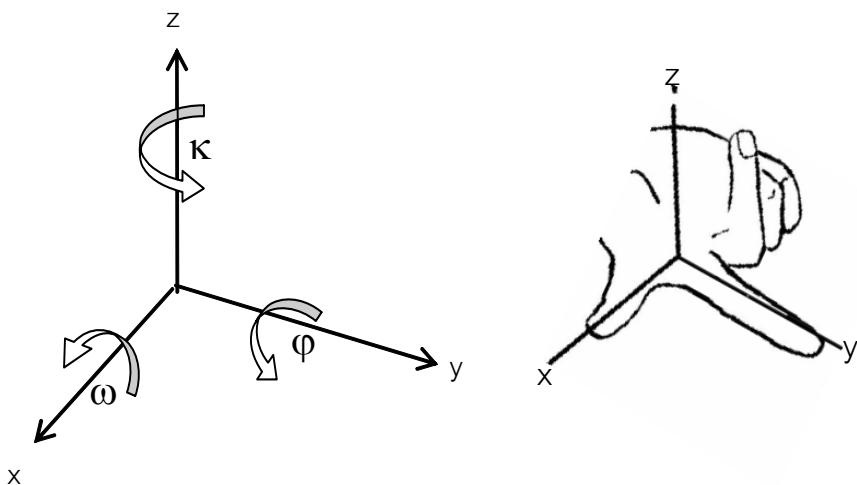
การแปลงค่าพิกัดในสามมิติจะคล้ายคลึงกับการแปลงภาพในสองมิติ

กล่าวคือเป็นการหา

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดจากสองระบบ ซึ่งมีพื้นฐานเริ่มจากระบบพิกัดจากในสามมิติ

ระบบพิกัดจากในสามมิติที่ใช้เป็นระบบมือขวา กล่าวคือเมื่อใช้มือขวาถือไปข้างหน้าจะเป็นที่นิ้วโป้ง เหยียดชี้ตรงไปข้างหน้าทิศทางแรกคือทิศทางแกน x เมื่อยื่นนิ้วชี้ออกไปจะเป็นทิศทางของแกน y จากนั้นให้ทำการพับนิ้วกลางให้ตั้งจากกับนิ้วชี้ ในครั้งนี้จะได้ทิศทางของแกน z

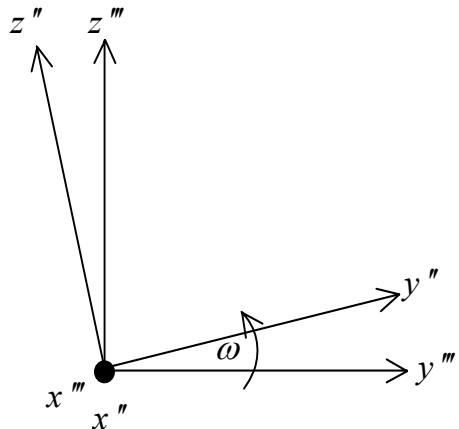
การทำมุกันระหว่างสองระบบพิกัดจะนิยามได้จากการหมุนของแกนพิกัดจากในแต่ละแกน โดยการอาศัยหลักการของมือขวาเข่นกัน เมื่อต้องการพิจารณาทิศทางการหมุนรอบแกน x จะใช้นิ้วมือทั้งสี่ที่ไม่ใช่นิ้วโป้ง ของมือขวาโบกล้อมไปรอบแกน x ขณะที่นิ้วโป้งซี้ไปในทิศทางที่ขานกับแกน x นิ้วทั้งสี่ที่ได้กำแกน x และมีข้อตกลงของซีอและทิศทางการหมุนรอบแกน x,y,z ว่าเป็น ω,φ, κ ดังภาพ



รูปภาพ 2-17 ระบบพิกัดจากสามมิติระบบมือขวา (right-hand coordinate system)

2.5.1 ระบบพิกัดทำมุกรอบแกน X

เมื่อระบบพิกัดจากสองระบบทำมุกันด้วยมุกรอบแกน x เป็นมุก ω จะปรากฏดังรูป



รูปภาพ 2-18 ระบบพิกัดจากสามมิติทำมุกันเป็นมุก ω

ค่าพิกัดของจุดใดๆจะเปลี่ยนไปเป็นพารามิเตอร์ y และ z ดัง จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของแมทริกซ์ได้ดังนี้

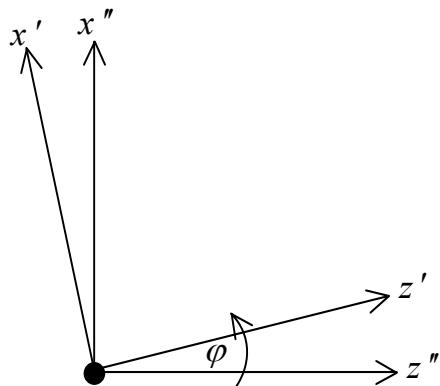
$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-16}$$

โดยที่แมทริกซ์ขนาด 3×3 ดังกล่าวเรียกว่า แมทริกซ์การหมุนรอบแกน x ซึ่งเป็นพังก์ชันของมุม Θ ดังนั้น

$$R(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-17}$$

2.5.2 ระบบพิกัดทำมุนรอบแกน y

เมื่อระบบพิกัดซากสองระบบทำมุนกันด้วยมุนรอบแกน y เป็นมุม Φ ดังรูป



รูปภาพ 2-19 ระบบพิกัดจากสามมิติทำมุนกันเป็นมุม Φ

ค่าพิกัดของจุดใดๆจะเปลี่ยนไปเป็นพารามิเตอร์ y และ z ดัง จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} z' \\ y' \\ x' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z'' \\ y'' \\ x'' \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-18}$$

ทำการจัดเรียงสมการใหม่โดยให้ลำดับเป็น x, y และ z ตามลำดับอย่างปกติ

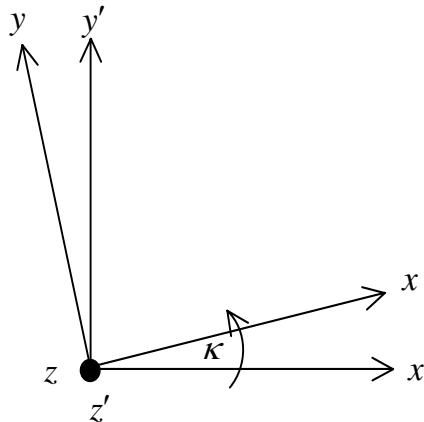
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-19}$$

โดยที่แมทริกซ์ขนาด 3×3 ดังกล่าวเรียกว่า แมทริกซ์การหมุนรอบแกน y ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุม φ ดังนี้

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-20}$$

2.5.3 ระบบพิกัดทำมุนรอบแกน \mathbf{z}

เมื่อระบบพิกัดซากสองระบบทำมุนกันด้วยมุนรอบแกน z เป็นมุม κ ดังรูป



รูปภาพ 2-20 ระบบพิกัดคลาสสามมิติเมื่อทำมุนเป็นมุม κ

ค่าพิกัดของจุดใดๆ จะเปลี่ยนไปเฉพาะอยู่เดียว x และ y ดัง จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-21}$$

โดยที่แมทริกซ์ขนาด 3×3 ดังกล่าวเรียกว่า แมทริกซ์การหมุนรอบแกน z ซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุม κ ดังนี้

$$R(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-22}$$

2.5.4 ผลรวมของการทำมุนทั้งสามแกนพร้อมกัน

เมื่อนำความสัมพันธ์ของการทำมุนของระบบแกนทั้งสามมารวมกัน โดยการทำมุนกันเป็นไปตามลำดับ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R(\kappa) \cdot R(\varphi) \cdot R(\omega) \begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-23}$$

นิพจน์ $R(\kappa) \cdot R(\varphi) \cdot R(\omega)$ สามารถเขียนรวมเป็นแม่ทริกซ์ขนาด 3×3 ได้ดังนี้

$$R(\kappa) \cdot R(\varphi) \cdot R(\omega) = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\kappa)\cos(\varphi) & \sin(\kappa)*\cos(\omega) + \cos(\kappa)\sin(\varphi)\sin(\omega) & \sin(\kappa)\sin(\omega) - \cos(\kappa)\sin(\varphi)\cos(\omega) \\ -\sin(\kappa)\cos(\varphi) & \cos(\kappa)*\cos(\omega) - \sin(\kappa)\sin(\varphi)\sin(\omega) & \cos(\kappa)\sin(\omega) + \sin(\kappa)\sin(\varphi)\cos(\omega) \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi)\sin(\omega) & \cos(\varphi)\cos(\omega) \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-24}$$

นิพจน์ $R(\kappa) \cdot R(\varphi) \cdot R(\omega)$ อาจเขียนในรูปแบบที่สั้นลงเป็น $R(\omega, \varphi, \kappa)$ ดังนั้นความสัมพันธ์ช่องต้นเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งเป็น

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-25}$$

แม่ทริกซ์ $R(\omega, \varphi, \kappa)$ สามารถหาอินเวอร์สได้ ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์กับกันได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = R^{-1}(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-26}$$

แม่ทริกซ์ของ การหมุน $R(\omega, \varphi, \kappa)$ เป็นอโตโนมัสแม่ทริกซ์ (orthogonal matrix) นั่นคือ

$$R^T = R^{-1} \quad \text{สมการ 2-27}$$

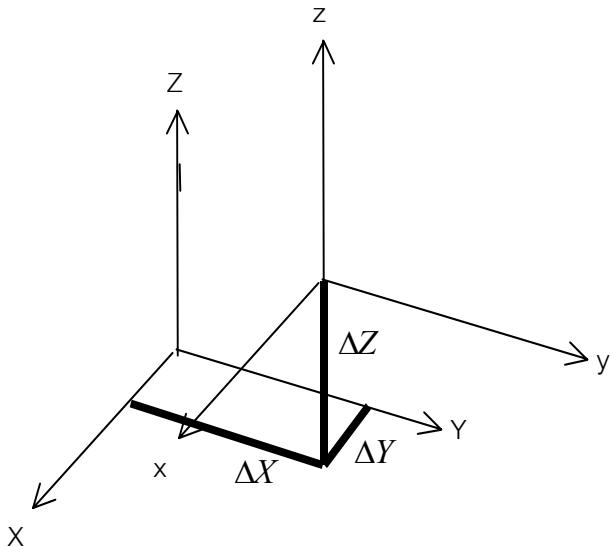
ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์กับกันได้ ในอีกรูปแบบหนึ่งดังนี้

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = R^T(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-28}$$

ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดในสามมิตินี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดบนภาพถ่ายที่อยู่ในตำแหน่งในอากาศและมีความเชียงในทิศทางต่างๆ กับระบบพิกัดภาพพื้นดิน ความสัมพันธ์นี้คือสมการสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Equation) ซึ่งจะได้กล่าวในลำดับถัดไป

2.5.5 ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กำเนิด

ความสัมพันธ์ในการย้ายศูนย์กำเนิด ใช้ในการหาความสัมพันธ์ในระหว่างระบบพิกัดในสามมิติ สามารถหาได้อย่างง่ายดังในภาพ



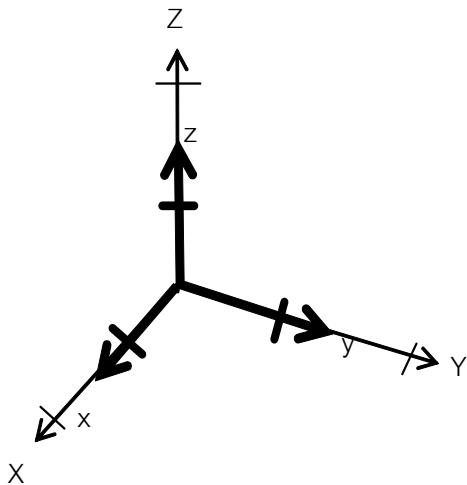
รูปภาพ 2-21 ความสัมพันธ์ของการเลื่อนแกนระบบพิกัดจากสามมิติ

เมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-29}$$

2.5.6 ความสัมพันธ์ในการมีมาตรฐาน

ความสัมพันธ์ในการมีมาตรฐาน โดยทั่วไปจะให้เป็นมาตรฐานเดียวทั้งระบบ
ความสัมพันธ์ในระหว่างระบบพิกัดในสามมิติ สามารถแสดงให้เห็นโดยง่ายดังในภาพ



รูปภาพ 2-22 ความสัมพันธ์ของการถืออ่อนแกนระบบพิกัดจากสามมิติ

ปัจจุบันในการประยุกต์ใช้ความต่างระหว่างมาตราส่วนของระบบพิกัดทั้งสองมีน้อยมาก เช่น อัตราส่วนของมาตราส่วนใกล้เคียง 1 ประกอบกับหน่วยประมาณผลคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการคำนวณละเอียดถึงระดับเลขนัยสำคัญที่ระดับหนึ่งเท่านั้น เช่น เมื่อใช้ชันดูข้อมูลเป็น “double precision” เลขนัยสำคัญที่จัดเก็บและประมาณผลได้มีประมาณ 14 หลักเท่านั้น หากสเกลมีของทั้งสองระบบมีขนาดเล็กมาก โดยที่ความแตกต่างอยู่ที่เลขหลักที่ใกล้กับเลขนัยสำคัญหลักท้าย ดังนั้นเพื่อเสถียรภาพในเรื่องของการคำนวณ นิยมให้มาตราส่วนอยู่ในรูปของ Scale Factor m โดยที่ $m \rightarrow 0$ เมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (1+m) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-30}$$

2.6 การแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ดพารามิเตอร์

เมื่อรวมความสัมพันธ์ในการแปลงระบบพิกัดในสามมิติ ที่ประกอบด้วยความอิสระในเคลื่อนย้ายศูนย์กำเนิดในทั้งสามแกน การทำมุกนรอบแกนทั้งสามมุมรอบแกนหมุน การมีมาตราส่วน นั้นคือจะมีพารามิเตอร์ 7 พารามิเตอร์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+m) \cdot R(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 2-31}$$

การแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ดพารามิเตอร์นี้เรียกว่า การแปลงค่าพิกัดในสามมิติแบบเยลเมิร์ต

2.6.1 การแก้ปัญหาการแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ตพารามิเตอร์

เมื่อต้องการหาค่าความสัมพันธ์ระบบพิกัดในสามมิติซึ่งจะเห็นว่าเป็นปัญหาที่มีตัวไม่ทราบค่าอยู่ 7 ตัว ดังนั้นหากมีค่าพิกัดในสองระบบอย่างน้อยสามจุด แต่ละจุดจะสร้างสมการได้ 3 สมการ โดยที่ให้ค่าพิกัดระบบไดรบบที่นี่เป็นค่าคงที่ ให้ค่าพิกัดในสามมิติอีกในระบบหนึ่งเป็นค่าสังเกต ดังในตาราง

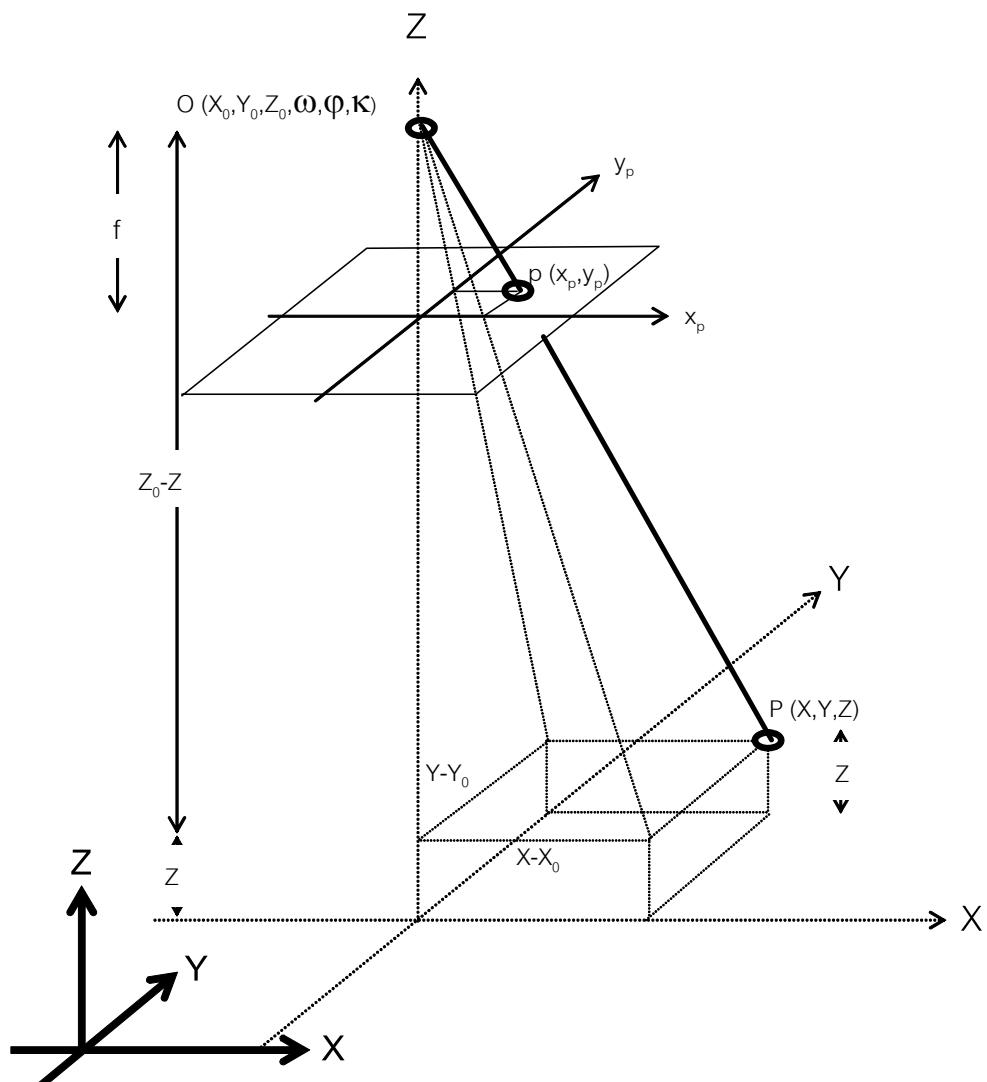
ค่าพิกัดสามมิติระบบที่ 1 ค่าสังเกต	ค่าพิกัดสามมิติระบบที่ 2 ค่าคงที่
(X_1, Y_1, Z_1)	(x_1, y_1, z_1)
(X_2, Y_2, Z_2)	(x_2, y_2, z_2)
(X_3, Y_3, Z_3)	(x_3, y_3, z_3)
....

จากข้างต้นเราสามารถสร้างสมการค่าสังเกตได้ 9 สมการ ซึ่งเกินจำนวนตัวไม่ทราบค่าอยู่สอง ดังนั้นก็จะสามารถแก้ปัญหาและได้พารามิเตอร์ทั้งเจ็ดได้แก่ การเลื่อน 3 พารามิเตอร์ การหมุน 3 พารามิเตอร์ และมាតราส่วน 1 พารามิเตอร์ การพิจารณาแก้ปัญหาทำได้โดยการปรับแก้ด้วยวิธีลีสท์สแควร์

2.7 เรขาคณิตภาพถ่ายดิจิทัล

เพื่อให้เข้าใจเรขาคณิตของการถ่ายภาพถ่ายในการรังวัดค่าพิกัดวัตถุ ในที่นี่เพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้ในเบื้องต้น ด้วยการกำหนดให้เรขาคณิตของภาพถ่ายเดียวมีคุณลักษณะพิเศษที่ให้การจัดวางภาพ (Orientation) อยู่ในอุดมคติ

ภาพถ่ายเดียวที่จัดวางภาพอยู่ตามอุดมคติคือภาพถ่ายที่ถูกบันทึกขณะที่แกนของกล้องถ่ายภาพตั้งฉากกับพื้นดิน แนวของกล้องในทิศทางที่ลากผ่านแกนพิกัดภาพถ่ายแกน x ขนานกับแกน X ของระบบพิกัดภาพพื้นดิน และเท่าเดียวกันแกนพิกัดภาพถ่ายแกน y ขนานกับแกน Y ของระบบพิกัดภาพพื้นดิน ค่าพารามิเตอร์ของ การวางภาพเป็นศูนย์ นั่นคือไม่มีความเอียงของกล้องเลย ซึ่งแสดงได้ดังรูป



รูปภาพ 2-23 ความสัมพันธ์ของพิกัดบนภาพถ่ายทางอากาศและพิกัดของวัตถุในสำหรับภาพถ่ายทางอากาศอยู่ในแนวตั้ง

เมื่อพิจารณาระนาบ X - Z จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดวัตถุและพิกัดบนภาพถ่ายดังนี้

$$\frac{X - X_0}{Z - Z_0} = \frac{x_p}{-f} \quad \text{สมการ 2-32}$$

เมื่อพิจารณาระนาบ Y - Z จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดวัตถุและพิกัดบนภาพถ่ายดังนี้

$$\frac{Y - Y_0}{Z - Z_0} = \frac{y_p}{-f} \quad \text{สมการ 2-33}$$

2.7.1 ตัวอย่างการคำนวณ

ภาพถ่ายทางอากาศภาพหนึ่งได้จากบันทึกด้วยกล้องที่มีความยาวโฟกัส $f=153.126$ มม. ค่าการจัดวางภายนอก (Exterior Orientation) เป็น (4000.000 ม., 2100.000 ม., 2000.000 ม., 0.000000°, 0.000000°, 0.000000°) จงหาค่าพิกัดของจุดหนึ่งที่มีพิกัดบนภาพเป็น $(x_p, y_p) = (45.975 \text{ มม.}, 23.754 \text{ มม.})$ ถ้าทราบความสูงของจุดนี้บนพื้นดินเป็น 250 เมตร

วิธีทำ

เนื่องจากภาพถ่ายถูกบันทึกในลักษณะที่เป็นภาพถ่ายดิจิทัลในครุฑมคดิ

และ $X_0 = 4000.000 \text{ ม. } Y_0 = 2100.000 \text{ ม. } \text{ และ } Z_0 = 2000.000 \text{ ม.}$

ตั้งนั้นพิจารณาระนาบ X-Z จะได้ความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \frac{X - X_0}{Z - Z_0} &= \frac{x_p}{-f} \\ \frac{X - 4000}{250 - 2000} &= \frac{(45.975/1000)}{(-153.126/1000)} \\ X &= 4525.5 \text{ m} \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาระนาบ Y-Z จะได้ความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \frac{Y - Y_0}{Z - Z_0} &= \frac{y_p}{-f} \\ \frac{Y - 2100}{250 - 2000} &= \frac{(23.754/1000)}{(-153.126/1000)} \\ Y &= 2371.5 \text{ m} \end{aligned}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพิกัดจุดดังกล่าว (X, Y, Z) เป็น (4525.4, 2371.5, 250.0) เมตร

ตอบ

2.8 คำถ้ามห้ามทักษะ

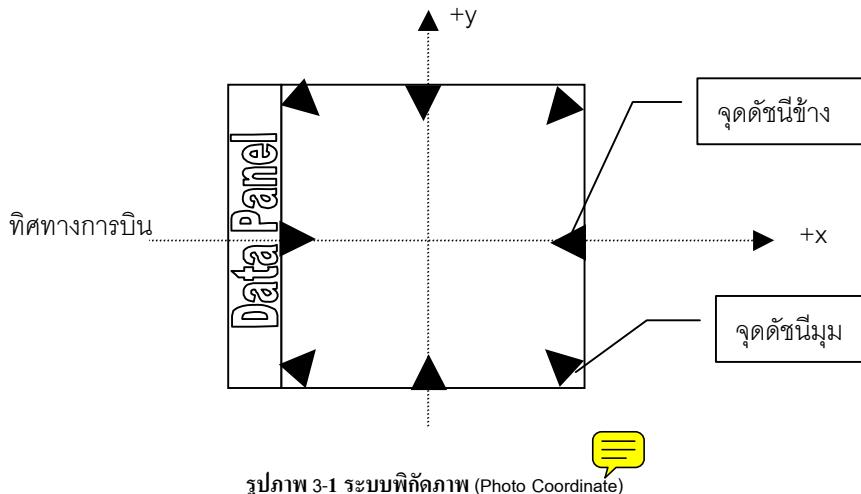
- 1) จงเปรียบเทียบผลการถ่ายภาพทางอากาศที่บินถ่ายด้วยภาพถ่ายขนาดมาตรฐาน 9 นิ้ว x 9 นิ้ว ด้วยกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ Normal Angle และ Wide Angle ที่มาตราส่วน 1:6,000, 1:15,000 และ 1:50,000 จงคำนวณหา พื้นที่ครอบคลุมของภาพถ่ายทางอากาศหนึ่งภาพ ระยะฐานของจุดเปิดถ่ายภาพ ความสูงของการบินถ่ายภาพ ของภาพถ่ายทางอากาศทุกมาตราส่วนตามลำดับ
- 2) ภาพถ่ายทางอากาศภาพหนึ่งได้จากการถ่ายด้วยกล้องที่มีความยาวโฟกัส $f=153.105$ มม. ค่าการจัดวางภาพภายในออกเป็น (4000.000 ม., 2100.000 ม., 2000.000 ม., 0.000000°, 0.000000°, 0.000000°) จงหาค่าพิกัดของจุดหนึ่งที่มีพิกัดบนภาพเป็น $(x_p, y_p) = (-45.975 \text{ มม.}, -23.754 \text{ มม.})$ ถ้าทราบความสูงของจุดนี้บนพื้นดินเป็น 250 เมตร
- 3) ภาพถ่ายทางอากาศภาพหนึ่งได้จากการถ่ายด้วยกล้องที่มีความยาวโฟกัส $f=305.005$ มม. ค่าการจัดวางตัวภาพภายในออก เป็น (4000.000 ม., 2100.000 ม., 1200.000 ม., 0.000000°, 0.000000°, 90.000000°) จงหาค่าพิกัดของจุดหนึ่งที่มีพิกัดบนภาพเป็น $(x_p, y_p) = (57.478 \text{ มม.}, 93.453 \text{ มม.})$ ถ้าทราบความสูงของจุดนี้บนพื้นดินเป็น 160 เมตร
- 4) จงแสดงการวิเคราะห์หาสมាមិកของแมทริกซ์ของการหมุน $R(\omega, \varphi, \kappa)$
- 5) จงพิสูจน์ว่าแมทริกซ์ของการหมุน $R(\omega, \varphi, \kappa)$ เป็น orthogonal แมทริกซ์ กล่าวคือ $R^T = R^{-1}$

3 การรังวัดภาพถ่ายเดี่ยว

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการเรขาคณิตของภาพถ่ายเดี่ยว เเรขาคณิตของภาพถ่ายเดี่ยวสำหรับภาพถ่ายทางอากาศเป็นไปตามหลักการฉายผ่านศูนย์เนื่องจากระบบการบันทึกภาพเป็นระบบกล้องที่มีรีนานับรับภาพที่เกิดจากเลนส์ที่มีศูนย์กลางรวมแสงสะท้อนจากวัตถุหรือพื้นผิวภูมิประเทศหลายบันทวนนาบฟิล์มบันทึกภาพ เเรขาคณิตภาพถ่ายเดี่ยวเป็นพื้นฐานสำคัญในการรังวัดบนภาพ การศึกษาเรขาคณิตพื้นฐานนี้ได้แก่ การวิเคราะห์เพื่อการวัดพิกัดภาพถ่าย การวิเคราะห์เรขาคณิตเพื่อแก้ปัญหาการรังวัดย้อน (Resection) การคำนวณสนับสนุนการวิเคราะห์ปัญหาการรังวัดย้อน ความสัมพันธ์เบื้องต้นระหว่างพิกัดภาพและพิกัดวัตถุภาคพื้นดินสำหรับภาพถ่ายเดี่ยวในกรณีที่ภาพถ่ายเป็น “ภาพถ่ายดิจิ๊ก”

3.1 การวัดพิกัดบนภาพถ่าย

พิกัดบนภาพเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะนำไปสู่การคำนวณต่างๆ โดยเฉพาะพิกัดวัตถุเพื่อการนำไปเป็นข้อมูลแผนที่ ระบบพิกัดบนภาพถ่ายจะเป็นระบบพิกัดจากโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดมุขสำคัญ (Principle Point) จุดมุขสำคัญคือจุดกึ่งกลางบนภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการกำหนดตำแหน่งของจุดศูนย์กลางระบบเลนส์ของกล้องถ่ายภาพทางอากาศให้ม้าตั้งจากบนระนาบภาพถ่ายทางอากาศ แกน x ซึ่งเป็นแกนแรกของระบบพิกัดโดยประมาณจะขนานกับแนวบิน เนื่องจากกล้องถ่ายภาพทางอากาศจะติดตั้งให้แนวแกน x ขนานกับลำตัวของเครื่องบิน

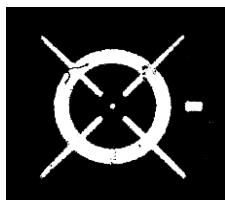


รูปภาพ 3-1 ระบบพิกัดภาพ (Photo Coordinate)

เนื่องจากระบบพิกัดภาพถ่ายเป็นนิยามที่ไม่สามารถทำเครื่องหมายแกนของระบบพิกัดภาพลงไว้โดยตรงบนภาพได้ จึงได้มีนิยามระบบพิกัดภาพโดยการทำเครื่องหมายอ้างอิงไว้ที่ขอบภาพ จุดอ้างอิงนี้เรียกว่า จุดด้านนี (Fiducial Mark)

3.1.1 จุดด้านนี

จุดด้านนีเป็นเครื่องหมายที่อยู่ติดกับกรอบของกล้องถ่ายภาพ โดยมีตำแหน่งที่แน่นอนสัมพันธ์กับชุดเลนส์ ความสัมพันธ์นี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับเรขาคณิตของการฉายผ่านศูนย์ จุดด้านนีมีลักษณะดังรูป ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและรุ่นของกล้องที่ใช้ ดังตัวอย่างในภาพ



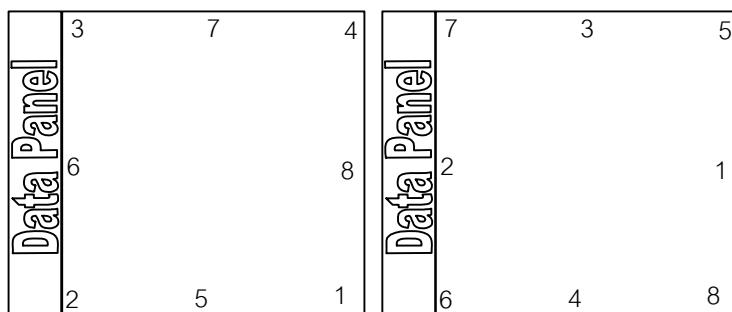
ก) ของกล้อง WILD RC-20



ข) ของกล้อง Zeiss RMK TOP

รูปภาพ 3-2 สักยละเอียดจุดตัวน้ำ

จุดตัวน้ำจะมีจำนวนและตำแหน่งส่วนขึ้นอยู่กับกรอบกล้องที่ใช้เพราจะจุดตัวน้ำก็คือร่องรอยการฉายภาพของจุดตัวน้ำที่ปรากฏบน ขอบกล้องในระหว่างบันทึกภาพนั้นเอง



ก) ของกล้อง WILD RC-30 (Leica)

ข) ของกล้อง Zeiss RMK TOP

รูปภาพ 3-4 แสดงตำแหน่งของจุดตัวน้ำหมายเลข 1-8

ที่ขอบภาพถ่ายทางอากาศด้านหนึ่งที่ค่อนข้างกว้าง จะเป็นพื้นที่สำหรับบันทึกข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับภาพที่อาจเรียกว่า Data Panel พื้นที่นี้จะเป็นที่บันทึกข้อมูลที่สำคัญ เช่น ชื่อโครงการ มาตราส่วนภาพ วันและเวลาที่บันทึกภาพ ค่าพิกัดของศูนย์กลางโดยประมาณ หมายเลขอภาพ เครื่องหมายแนวบิน ลักษณะต่างๆ ที่เกิดจากการใช้ตัวเลือกต่างๆ ในการใช้งานกล้อง เช่น Forward Motion Compensation (FMC) ที่ปรากฏที่มุมขวาในภาพต่อไปนี้



รูปภาพ 3-3 แสดงพื้นที่ขอบภาพที่ปรากฏข้อมูลรายละเอียดของภาพถ่ายทางอากาศ

จากภาพข้างต้นแสดงข้อมูลเกี่ยวกับภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการของกรุงเทพมหานคร โดยใช้ตัวย่อป้ายที่มุ่งข้ายบนภาพเป็น “BMA.” ภาพที่บันทึกเป็นภาพบริเวณกรุงเทพมหานคร เมื่อเดือน 9 ปี พ.ศ. 2538 เป็นภาพมาตราส่วนเฉลี่ย 1:6,000 ด้วยกล้องที่มีความยาวโฟกัสเป็น 305.518 มิลลิเมตร ภาพนี้บันทึกเมื่อ

วันที่ 10 เดือนมีนาคม ค.ศ. 1995 เวลา 12 นาฬิกา 5 นาที 58 วินาที ภาพครอบคลุมพื้นที่ที่มีจุดกลางภาพอยู่ที่ พิกัดเหนือหรือแลตติจูด 13 องศา 44.4 ลิปดา และพิกัดตะวันออกหรือลองกิจูดเป็น 100 องศา 31.9 ลิปดา

ความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุดดังนี้และจุดมุขย์สำคัญ และจุดศูนย์กลางของจุดดังนี้ สามารถหาได้จากการบวนการตรวจสอบกล้องที่เรียกว่า การวัดสอบ (Calibration) ผลการวัดสอบกล้องจะปรากฏเป็นหลักฐานในเอกสาร “ใบรับรองค่าวัดสอบ” (Calibration Certificate) ประจำกล้องนั้นๆ ซึ่งบริษัทผู้ผลิตจะให้มาระบบ กกล้อง ซึ่งจะต้องได้รับการวัดสอบอีกเป็นระยะเพื่อจะเหล่านี้ความถูกต้องสูงมากในระดับไมโครเมตร และการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน

ใบรับรองค่าวัดสอบของกล้องถ่ายภาพทางอากาศได้จากบริษัทผู้ผลิตเมื่อส่งมอบกล้อง หรือ ได้จากการ วัดสอบจากหน่วยงานที่มีห้องปฏิบัติการในการวัดสอบกล้องถ่ายภาพทางอากาศโดยเฉพาะ ซึ่งจะมีอยู่ใน ประเทศไทยอยู่แล้วและเรียกใหม่ การวัดสอบเป็นเรื่องจำเป็น เพราะค่าที่ได้จะมีผลต่อการคำนวณพิกัดวัตถุที่ต้องการ โดยทั่วไปกล้องถ่ายภาพทางอากาศจะต้องทำการตรวจสอบ บำรุงรักษา และวัดสอบทุกช่วง 1-2 ปี หรือ ก่อนและหลังการใช้งานในโครงการแผนที่ขนาดใหญ่

ในใบรับรองวัดสอบจะมีค่าความยาวไฟกัส ค่าพิกัดของจุดดังนี้ เพียงกับระบบพิกัดภาพ ที่มีความ ละเอียดถูกต้องในระดับไมโครอน ดังตัวอย่างในภาพนี้

USGS Report No. OSL/2670

United States Department of the Interior

U.S. GEOLOGICAL SURVEY
Reston, Virginia 20192

REPORT OF CALIBRATION July 27, 2000
of Aerial Mapping Camera

Camera type: Wild RC30*	Camera serial no.: 5097
Lens type: Wild Universal Aviogon A4-F	Lens serial no.: 13130
Nominal focal length: 153 mm	Maximum aperture: f/4
	Test aperture: f/4

Submitted by: Tuck Engineering, Inc.
Big Stone Gap, Virginia

Reference: Tuck Engineering, Inc., purchase order
No. 3004, dated July 25, 2000.

These measurements were made on Kodak Micro-flat glass plates, 0.25 inch thick, with spectroscopic emulsion type 157-01 Panchromatic, developed in D-19 at 68° F for 3 minutes with continuous agitation. These photographic plates were exposed on a multicollimator camera calibrator using a white light source rated at approximately 5200K.

I. Calibrated Focal Length: 152.847 mm

II. Lens Distortion

VII. Principal Points and Fiducial Coordinates

Positions of all points are referenced to the principal point of autocollimation (PPA) as origin. The diagram indicates the orientation of the reference points when the camera is viewed from the back, or a contact positive with the emulsion up. The data strip is to the left.

	X coordinate	Y coordinate
Indicated principal point, corner fiducials	0.000 mm	-0.001 mm
Indicated principal point, midside fiducials	0.000	-0.003
Principal point of autocollimation (PPA)	0.0	0.0
Calibrated principal point (pt. of sym.) x_p, y_p	0.003	-0.001

Fiducial Marks

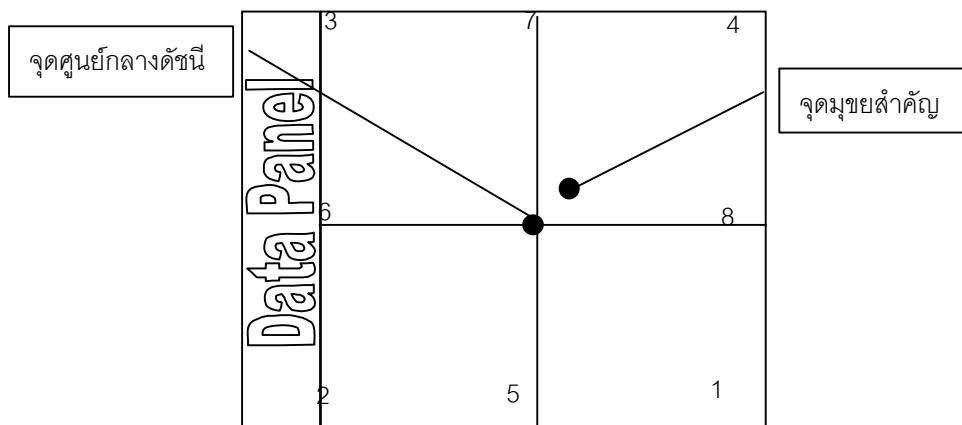
	X coordinate	Y coordinate
1	-105.999 mm	-106.003 mm
2	105.997	105.999
3	-105.995	105.996
4	106.001	-106.003
5	-110.003	-0.004
6	110.001	-0.002
7	0.000	110.000
8	-0.001	-110.004

VIII. Distances Between Fiducial Marks

รูปภาพ 3-5 แสดงส่วนหนึ่งของตัวอย่าง เอกสารผลการวัดสอบของกล้องถ่ายภาพทางอากาศ

3.1.2 ระบบพิกัดภาพถ่าย

ระบบพิกัดภาพถ่ายจะมีศูนย์กลางอยู่ในตำแหน่งจุดที่นัยตั้งจากจากจุดรวมแสงไปตั้งจากกับระนาบภาพที่เรียกว่าจุดมุขย์สำคัญ และควรจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับจุดศูนย์กลางของกลุ่มดัชนีที่เรียกว่า Fiducial Center และในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการประกอบกล้อง การเลื่อนขยายของชิ้นส่วนของกล้อง และแม้ว่าผู้ผลิตจะพยายามทำให้จุดมุขย์สำคัญอยู่ในตำแหน่งตามทฤษฎีก็ตาม จึงมีนิยามจุดมุขย์สำคัญให้อ้างอิงมาจากจุดศูนย์กลางดัชนี

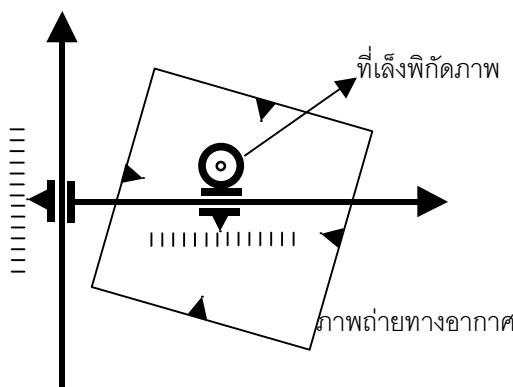


รูปภาพ 3-6 แสดงตำแหน่งของจุดดัชนี

ความสัมพันธ์ของจุดศูนย์กลางดัชนีและจุดมุขย์สำคัญนี้สามารถดูได้จากในรับรองการวัดสอบประจำกล้องนั้น

3.1.3 เครื่องมือสำหรับการวัดพิกัดภาพถ่าย

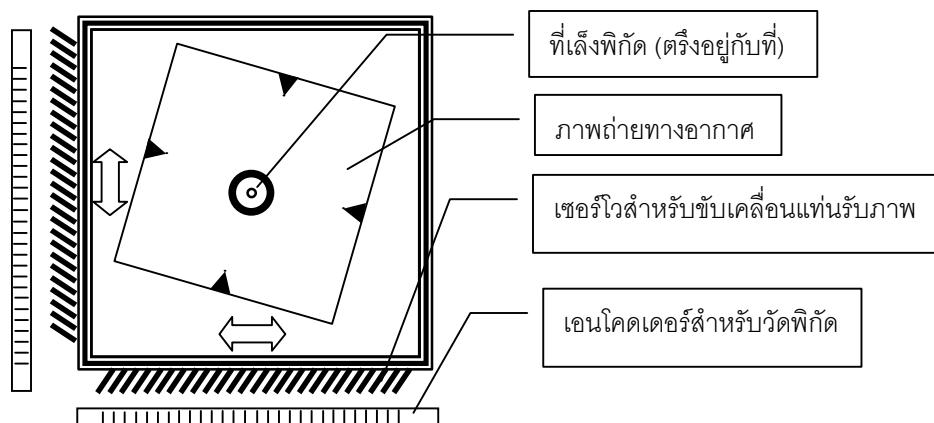
โดยหลักการแล้วเครื่องมือวัดพิกัดภาพถ่ายประกอบขึ้นจากระบบราบที่มีอุปกรณ์สำหรับวัดระยะด้วยความละเอียดถูกต้องสูงในระดับไมโครเมตร อุปกรณ์สำหรับวัดระยะจะมีสองชุดเพื่อวัดระยะตามแกน x และแกน y แกนของอุปกรณ์สำหรับวัดระยะต้องตั้งฉากกัน ส่วนที่ใช้ในการวัดพิกัดเพื่อขยายขีดความสามารถของภาระของหินของมนุษย์จะเป็นอุปกรณ์เชิงทศนิยได้แก่แวงขยายกำลังสูง และมีจุดกลางเป็นเครื่องหมายของภาระ ซึ่งอาจเรียกว่า ที่เล็งพิกัดภาพ แวงขยายกำลังสูงนี้จะต่อติดกับแกนที่ยื่นมาจากอุปกรณ์สำหรับวัดระยะทั้งสอง การเคลื่อนที่ของที่เล็งพิกัดภาพเกิดจากการใช้กลไก อุปกรณ์ทั้งหมดสำหรับวัดพิกัดภาพถ่ายนี้เรียกว่า คอมพาราเตอร์ (Comparator) มีลักษณะดังรูป



รูปภาพ 3-7 หลักการทำงานของคอมพาราเตอร์

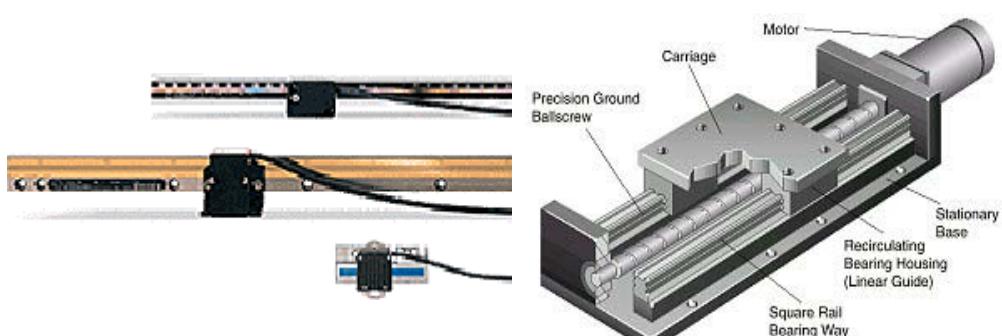
สำหรับเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ (Analytical Stereoplotter) จะมีความสามารถในการวัดพิกัดภาพถ่ายได้ด้วย ซึ่งการวัดพิกัดภาพถ่ายบนเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์เป็นหน้าที่พื้นฐานอันหนึ่งในเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ เครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์จะมี “แท่นรับภาพ (Photo Stage)” ในลักษณะดังภาพข้างล่างนี้สองแท่น สำหรับภาพคู่ภาพสามมิติ “ภาพซ้ายและภาพขวา” แท่นรับภาพมักเป็นเก้าอี้สกุนภาพดีมาก มีความติดเพี้ยนต่ำทำหน้าที่จับยึดภาพถ่ายทางอากาศในลักษณะฟิล์มใส แท่นรับภาพติดกับเซอร์โว (servo) ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนแท่นรับภาพไปมาโดยคำสั่งจากเครื่องคอมพิวเตอร์ การเคลื่อนที่ของแท่นรับภาพจะถูกวัดระยะทางโดยเอนโคดเดอร์ (Encoder) ซึ่งต่อ กับคอมพิวเตอร์ ดังภาพ

เอนโคดเดอร์เป็นอุปกรณ์ความละเอียดสูงและเที่ยงตรงมาก สามารถวัดระยะทางได้ละเอียดถูกต้องถึงระดับไมโครเมตร ทั้งเอนโคดเดอร์และเซอร์โวจะทำงานร่วมกัน ส่วนที่เล็งพิกัดจะตั้งอยู่กับที่ เนื่องจากที่เล็งค่าพิกัดจะเป็นอุปกรณ์เชิงทัศน์โดยเฉพาะ บริษัทแลนด์ สำหรับทำให้ล้ำแสงหักเหจากบริเวณภาพที่กำลังวัดพิกัดให้มีรากฐานแก่สายตาผู้ปฏิบัติงาน



รูปภาพ 3-8 แท่นรับภาพและหลักการวัดพิกัดของเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์

ตัวอย่างของเอนโคดเดอร์และเซอร์โวประกอบดังในภาพข้างล่าง



a) Encoder จาก Haidenhain

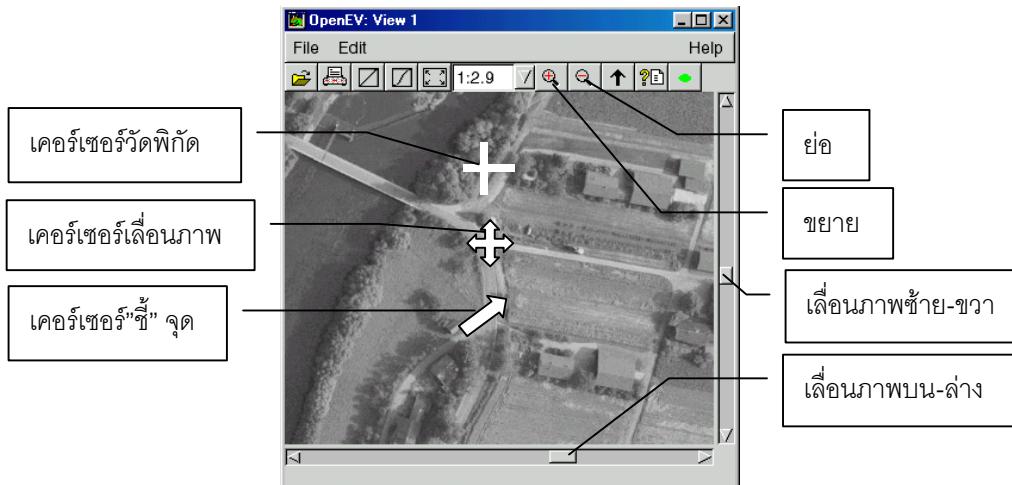
<http://www.haidenhain.com>

b) Servo (Actuator) จาก Parker Automation

<http://www.parker.com>)

รูปภาพ 3-9 แสดงอุปกรณ์หลักในการสร้างแท่นวางภาพ

ส่วนการวัดค่าพิกัดภาพบนระบบสำรวจด้วยภาพดิจิทัลหรือบน Digital Photogrammetric Workstation นั้น หลักการวัดค่าพิกัดก็คล้ายคลึงกันเพียงแต่ว่า ขณะนี้ภาพเป็นภาพดิจิทัลถูกขยายขึ้นบนจอภาพ ภาพดิจิทัลได้จากการสแกนภาพถ่ายให้เป็นภาพที่คอมพิวเตอร์สามารถนำไปใช้ประมวลผลได้ ด้วยซอฟแวร์ในส่วนของ Graphical User Interface จะสามารถให้ผู้ใช้เลื่อนภาพไปมาได้ ขยายเข้าขยายออกได้ ส่วนที่เลือกพิกัดนั้นสามารถใช้เครื่องเมาส์ในการวัดໄไปบนภาพและทำการเก็บบันทึกลงบนคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไปได้



รูปภาพ 3-10 ซอฟแวร์ OpenEV สำหรับการวัดพิกัดภาพ

การวัดพิกัดบนภาพด้วยคอมพิวเตอร์ แทนรับภาพบนเครื่องเขียนແນที่เชิงวิเคราะห์และบน digital photogrammetric workstation ในเบื้องต้นจะเป็นพิกัดเครื่อง (machine coordinate) ซึ่งหากว่าในตอนเริ่มต้นได้ทำการวัดพิกัดเครื่องของจุดต้นนี้อย่างพอเพียง และมีค่าของจุดต้นนี้เหล่านี้ในระบบพิกัดภาพถ่ายที่ถูกต้องจากไปรับรองการวัดสอบ ด้วยวิธีการพิจารณาหาค่าความสัมพันธ์ของการแปลงค่าพิกัดในสองมิติ จะทำให้สามารถเปลี่ยนค่าพิกัดเครื่องที่วัดได้จากจุดใดๆให้เป็นพิกัดภาพถ่าย หรือกลับกันได้ โดยใช้พารามิเตอร์ในการแปลงค่าพิกัดดังกล่าว

3.1.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเครื่องวัดและพิกัดภาพถ่าย

การหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเครื่องวัดและพิกัดภาพสามารถทำได้โดยการวัดพิกัดของจุดดัชนีแล้วเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่แท้จริงซึ่งได้มาจากการวัดสอบ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระบบพิกัดเครื่องมือวัดพิกัดกับพิกัดภาพมักจะใช้ความสัมพันธ์เป็นชนิดแอกฟ์เฟนซึ่งมีความอิสระและพารามิเตอร์หกตัว โดยให้เป็นตัวไม่ทราบค่าคือ a, b, c, d, e, f จากการที่จุดดัชนี 1 จุดให้ค่าสังเกตได้ 2 ค่าคือ ξ_i, η_i ดังนั้นต้องมีจุดดังกล่าวอย่างน้อย 3 จุด โดยมีค่าเป็น $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2, \xi_3, \eta_3, \dots$ ดังนั้นจะต้องมีค่าพิกัดของจุดอย่างน้อย 3 จุดที่มีค่าพิกัดในสองระบบ โดยพิจารณาให้ค่าพิกัดจากใบรับรองการวัดสอบให้เป็นค่าคงที่ในระบบสมการ โดยให้มีค่าเป็น x_i, y_i เนื่องจากมีความลักษณะคลุกต้องสูง และค่าพิกัดที่วัดได้จากเครื่องเป็นค่าสังเกต ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเครื่องวัดหรือจุดภาพและพิกัดภาพถ่ายนี้叫做เรียกว่า พารามิเตอร์การจัดวางภาพใน (Interior Orientation) ดังนั้นจะสามารถพิจารณาได้ว่าปัญหานี้

จุดดัชนี	ค่าพิกัดดัชนีจากเครื่องวัดพิกัด	ค่าพิกัดภาพจากใบรับรองการวัดสอบ
1	ξ_1, η_1	x_1, y_1
2	ξ_2, η_2	x_2, y_2
3	ξ_3, η_3	x_3, y_3
...

ตาราง 3-1 ค่าพิกัดของจุดดัชนีสำหรับการหาความสัมพันธ์

ดังนั้นจะสามารถตั้งสมการค่าสังเกตสำหรับแต่ละจุดดัชนีได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \xi_i + v_i &= a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \\ \eta_i + v_{i+1} &= d \cdot x_i + e \cdot y_i + f \\ \xi_{i+1} + v_{i+2} &= a \cdot x_{i+1} + b \cdot y_{i+1} + c \\ \eta_{i+1} + v_{i+3} &= d \cdot x_{i+1} + e \cdot y_{i+1} + f \\ \xi_{i+2} + v_{i+4} &= a \cdot x_{i+2} + b \cdot y_{i+2} + c \\ \eta_{i+2} + v_{i+5} &= d \cdot x_{i+2} + e \cdot y_{i+2} + f \\ &\dots \end{aligned} \quad \text{สมการ 3-1}$$

ซึ่งสามารถหาค่าตอบได้โดยอาศัยหลักการของกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square)

เมื่อได้ค่าความสัมพันธ์ของการแปลงค่าพิกัดในสองมิติ ในเบื้องต้นนี้จะทำให้สามารถเปลี่ยนค่าพิกัดภาพถ่าย (photo coordinate) x_i, y_i ได้จากจุดใดๆให้เป็น พิกัดเครื่องวัด (machine coordinate) ξ_i, η_i โดยใช้พารามิเตอร์ a, b, c, d, e, f ดังนี้

$$\begin{aligned} \xi_i &= a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \\ \eta_i &= d \cdot x_i + e \cdot y_i + f \end{aligned} \quad \text{สมการ 3-2}$$

เมื่อต้องการแปลงค่าพิกัดเครื่องวัด (machine coordinate) ξ_i, η_i ให้ค่าพิกัดภาพถ่าย (photo coordinate) x_i, y_i จะสามารถใช้สมการ

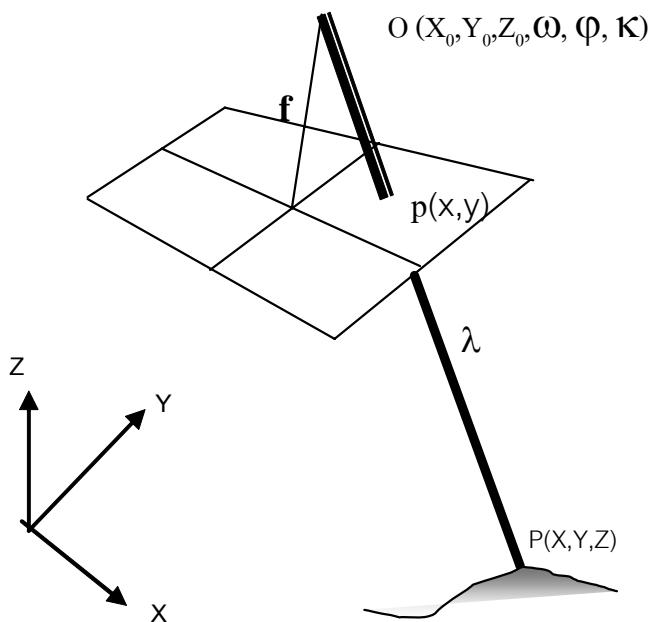
$$\begin{aligned}x_i &= a' \cdot \xi_i + b' \cdot \eta_i + c' \\y_i &= d' \cdot \xi_i + e' \cdot \eta_i + f'\end{aligned}\quad \text{สมการ 3-3}$$

สัมประสิทธิ์ a', b', c', d', e', f' สามารถคำนวณจากสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e, f โดยการวิเคราะห์สมการของ การแปลงค่าพิกัดชนิดแอปไฟน์ได้ โดยการแก้สมการสองชั้นอย่างง่ายเพื่อให้สมการกลับ ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}a' &= \frac{e}{a \cdot e - b \cdot d}; & b' &= \frac{-b}{a \cdot e - b \cdot d}; & c' &= \frac{-(c \cdot e - b \cdot f)}{a \cdot e - b \cdot d} \\d' &= \frac{-d}{a \cdot e - b \cdot d}; & e' &= \frac{a}{a \cdot e - b \cdot d}; & f' &= \frac{(c \cdot d - a \cdot f)}{a \cdot e - b \cdot d}\end{aligned}\quad \text{สมการ 3-4}$$

3.2 สมการสภาวะร่วมเส้น

สมการสภาวะร่วมเส้น (Co-linearity Equation) คือสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดรวมแสงของภาพ จุดพิกัดภาพถ่ายของจุดใด $p(x,y)$ และจุดบนภาคพื้นดิน $P(X,Y,Z)$ กล่าวคือเมื่อลำแสงตอกกระหบวัตถุ สะท้อนขึ้นมาผ่านเลนส์ตอกกระหบไปบนระบบรับแสงที่ระยะไฟกัสซึ่งอาจเรียกว่าเป็นระบบเนกานีฟ ภาพก็จะถูกบันทึกไว้บนแผ่นฟิล์ม แต่เพื่อให่ง่ายต่อความเข้าใจและวิเคราะห์จึงใช้ระบบของไดอะพอชิตีฟแทน ในภาพแสดงระบบไดอะพอชิตีฟที่สมมาตรอยู่คู่คละด้านกับระบบเนกานีฟเมื่อพิจารณาจุดรวมแสงจุด O ดังนั้นอาจพิจารณาได้ว่าลำแสงเดินทางทะลุผ่านระบบพอกซิตีฟไปสู่จุดรวมแสง สำหรับจุดรวมแสงจุด O นั้นก็คือจุดเปิดถ่ายภาพ (exposure station) ที่มีค่าพิกัดขณะบันทึกภาพเป็น $O(X_0, Y_0, Z_0)$ และมีการจัดวางภาพ (orientation) ทำมุมโดยความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดสามมิติของภาคพื้นดิน และระบบพิกัดภาพถ่าย เป็นมุม (ω, ϕ, κ) ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายและความเอียงของภาพเทียบกับระบบพิกัดภาพพื้นดินนี้เรียกว่ารวมกันว่าค่าพารามิเตอร์ของการจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation) ของกล้องถ่ายภาพทางอากาศ



รูปภาพ 3-11 ความสัมพันธ์ระหว่างลำแสง วัตถุ พิกัดภาพ และภาพถ่าย

3.2.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เวกเตอร์ของจุดภาพและวัตถุ

ถ้าให้เวกเตอร์ \overrightarrow{OP} คือเวกเตอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างจุด $P(X,Y,Z)$ บนภาคพื้นดินกับจุดเปิดถ่ายภาพ O (X_0,Y_0,Z_0) และ เวกเตอร์ \overrightarrow{Op} คือเวกเตอร์ที่เชื่อมต่อระหว่างจุด $p(x,y)$ หรือรอยประกายของจุด $P(X,Y,Z)$ กับจุดเปิดถ่ายภาพ O (X_0,Y_0,Z_0) จะได้ความสัมพันธ์

$$\overrightarrow{OP} = \lambda \cdot R \cdot \overrightarrow{Op} \quad \text{สมการ 3-5}$$

เวกเตอร์ \overrightarrow{OP} เกี่ยนได้เป็น

$$\overrightarrow{OP} = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 3-6}$$

ส่วนเวกเตอร์ \overrightarrow{Op} ได้จากการพิจารณา λ ที่เป็นมาตราส่วนสำหรับ จุด $P(X,Y,Z)$ เพื่อให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ของจุดบนภาพและวัตถุ \overrightarrow{Op} สามารถนิยามได้จาก

$$\overrightarrow{Op} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 3-7}$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพไปสู่พิกัดวัตถุดังนี้

$$\begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 3-8}$$

หากต้องการสร้างความสัมพันธ์จากวัตถุไปสู่ภาพ จะได้ความสัมพันธ์

$$\overrightarrow{Op} = \frac{1}{\lambda} \cdot R^{-1} \cdot \overrightarrow{OP} \quad \text{สมการ 3-9}$$

ดังนั้นจะได้ว่า \overrightarrow{OP} เป็นเวกเตอร์ที่อยู่บนระบบพิกัดสามมิติโดยมีระบบแกนเป็นของระบบพิกัดวัตถุ ดังนั้นต้องแปลงพิกัดในสามมิติให้เป็นเวกเตอร์ที่อยู่บนภาพถ่ายโดยอาศัยแมทริกซ์การหมุน พิกัดของภาพถ่ายทางอากาศที่ปกติอยู่ในรูปแบบที่ไม่แน่นกับระบบพิกัดวัตถุ เช่นในกรณีของภาพถ่ายทางอากาศ ระบบพิกัดวัตถุมักจะเป็นระบบพิกัดภาพพื้นดิน ระบบพิกัดของวัตถุสามารถแปลงให้เข้าไปสู่ระบบพิกัด ถ้าพิจารณาจากแมทริกซ์ของการหมุนก่อนหน้านี้ กำหนดให้แมทริกซ์ A ที่เป็นฟังก์ชันกลับของแมทริกซ์การหมุน $R(\omega, \varphi, \kappa)$

$$A = R^{-1}$$

สมการ 3-10

จะได้ความสัมพันธ์

$$\overrightarrow{Op} = \frac{1}{\lambda} \cdot A \cdot \overrightarrow{OP}$$

สมการ 3-11

จากการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ ทำให้ได้แมทริกซ์ A ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) \cos(\varphi) & -\sin(\kappa) \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ \sin(\kappa) * \cos(\omega) + \cos(\kappa) \sin(\varphi) \sin(\omega) & \cos(\kappa) * \cos(\omega) - \sin(\kappa) \sin(\varphi) \sin(\omega) & -\cos(\varphi) \sin(\omega) \\ \sin(\kappa) \sin(\omega) - \cos(\kappa) \sin(\varphi) \cos(\omega) & \cos(\kappa) \sin(\omega) + \sin(\kappa) \sin(\varphi) \cos(\omega) & \cos(\varphi) \cos(\omega) \end{bmatrix}$$

สมการ 3-12

แมทริกซ์การหมุนสำหรับแกนทั้งสามเป็นแมทริกซ์ขนาด 3×3 เพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้ต่อไป
กำหนดให้ตัวแปรต่อไปนี้ แทนสมาชิกแมทริกซ์ A ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

สมการ 3-13

ซึ่งแต่ละเทอมสามารถเทียบกับสมาชิกของแมทริกซ์ A ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ a_{1,2} &= -\cos(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\ a_{1,3} &= \sin(\varphi) \\ a_{2,1} &= \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ a_{2,2} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) - \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\ a_{2,3} &= -\sin(\omega) \cdot \cos(\varphi) \\ a_{3,1} &= \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ a_{3,2} &= \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\ a_{3,3} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) \end{aligned}$$

สมการ 3-14

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดวัตถุและพิกัดภาพดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$

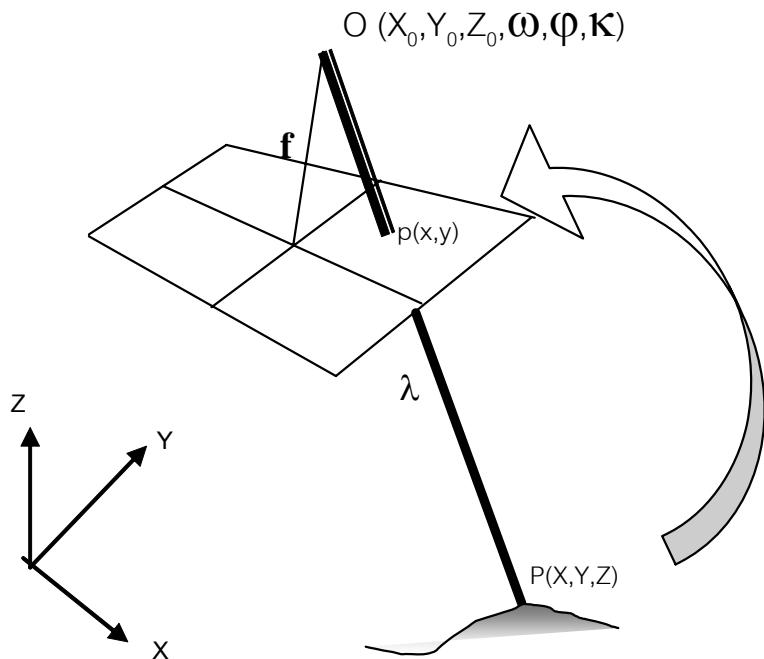
สมการ 3-15

จำแสดงที่แสดงการเชื่อมต่อระหว่างจุดที่กำลังสนใจ จุดที่ปรากฏบนภาพ และจุดเปิดถ่ายในขณะที่
บันทึกภาพ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่เรียกว่า สภาพร่วมเส้น Colinearity Equation ซึ่งสามารถเขียน

แยกได้เป็นสองกรณี ได้แก่ ความสัมพันธ์ของพิกัดวัตถุไปสู่พิกัดบนภาพถ่าย และในทางกลับกันความสัมพันธ์ของพิกัดภาพถ่ายไปสู่พิกัดวัตถุ ดังในแต่ละกรณีต่อไปนี้

3.2.2 ความสัมพันธ์ของการแปลงพิกัดวัตถุไปสู่พิกัดบนภาพถ่าย

เมื่อต้องการคำนวณค่าพิกัดวัตถุ $P(X, Y, Z)$ ไปสู่พิกัดภาพ $p(x, y)$ โดยทราบค่าการจัดวางภาพภายนอก $O (X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, K)$ ดังในภาพข้างล่างนี้ สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้



รูปภาพ 3-12 ความสัมพันธ์ระหว่างสามาแองและวัตถุ เมื่อแปลงพิกัดวัตถุไปสู่พิกัดภาพถ่าย

จากภาพความสัมพันธ์จากพิกัดวัตถุไปสู่พิกัดภาพถ่ายจะได้ว่า

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{vmatrix} \quad \text{สมการ 3-16}$$

แทนค่า z ด้วย f ที่มีเครื่องหมายเป็นลบ และทำการคูณแม่ทริกซ์ จากนั้นพิจารณาที่ลํะสมการจะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$x = \frac{1}{\lambda} [a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)] \quad \text{สมการ 3-17}$$

$$y = \frac{1}{\lambda} [a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)] \quad \text{สมการ 3-18}$$

$$-f = \frac{1}{\lambda} [a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)] \quad \text{สมการ 3-19}$$

จะเห็นได้ว่าสามารถจัด $(1/\lambda)$ โดยการนำสมการสุดท้ายไปหารสมการก่อนหน้านี้ทั้งสองสมการ จะให้ผลลัพธ์เป็นพิกัดภาพดังนี้

$$x = -f \frac{[a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)]}{[a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)]} \quad \text{สมการ 3-20}$$

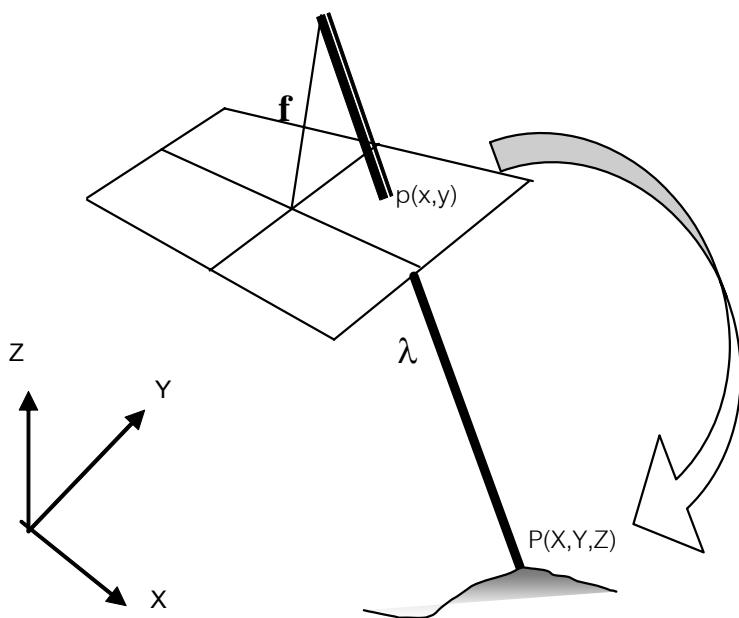
$$y = -f \frac{[a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)]}{[a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)]} \quad \text{สมการ 3-21}$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่าพิกัดวัตถุ $P(X, Y, Z)$ พร้อมความยาวไฟก์สกล่อง f และค่าการจัดวางภาพจากอก $(X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, K)$ จะสามารถหาค่าพิกัดของจุดที่ไปปรากฏบนภาพถ่ายได้บนภาพถ่ายที่มีค่าพิกัดเป็น $p(x, y)$ ได้

3.2.3 ความสัมพันธ์ของการแปลงพิกัดภาพถ่ายไปสู่พิกัดวัตถุ

เมื่อต้องการคำนวณค่าพิกัดวัตถุจากพิกัดภาพถ่าย ดังในภาพข้างล่างนี้ สามารถหาความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$O (X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, K)$$



รูปภาพ 3-13 ความสัมพันธ์ระหว่างสามาแสeng และวัตถุ เมื่อแปลงพิกัดภาพไปสู่พิกัดวัตถุ

จากภาพความสัมพันธ์จากพิกัดภาพไปสู่พิกัดวัตถุจะหาได้จากการขยายข้างสมการข้างต้น

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \lambda A^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} \quad \text{สมการ 3-22}$$

เนื่องจาก A^{-1} สามารถคำนวณได้จาก A ที่เป็นแมทริกซ์ชนิดอโถกนัด กล่าวคือใช้การหาร分行 เป็นส่วนประกอบหรือ $A^{-1} = A^T$ ดังนั้นจึงสามารถระบุรายอกราบเป็นแมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} \quad \text{สมการ 3-23}$$

ทำการคูณแมทริกซ์แล้วสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$X - X_0 = \lambda [a_{11} x + a_{21} y + a_{31} (-f)] \quad \text{สมการ 3-24}$$

$$Y - Y_0 = \lambda [a_{12} x + a_{22} y + a_{32} (-f)] \quad \text{สมการ 3-25}$$

$$Z - Z_0 = \lambda [a_{13} x + a_{23} y + a_{33} (-f)] \quad \text{สมการ 3-26}$$

จะเห็นได้ว่าสามารถจัด λ โดยการนำสมการสุดท้ายไปหารสมการก่อนหน้านี้ทั้งสองสมการ จะให้ผลลัพธ์เป็นสัดส่วนของพิกัดวัตถุดังนี้

$$\frac{(X - X_0)}{(Z - Z_0)} = \frac{[a_{11} x + a_{21} y + a_{31} (-f)]}{[a_{13} x + a_{23} y + a_{33} (-f)]} \quad \text{สมการ 3-27}$$

$$\frac{(Y - Y_0)}{(Z - Z_0)} = \frac{[a_{12} x + a_{22} y + a_{32} (-f)]}{[a_{13} x + a_{23} y + a_{33} (-f)]} \quad \text{สมการ 3-28}$$

ทำการยกข้างให้เหลือเฉพาะ X และ Y จะได้

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{[a_{11} x + a_{21} y + a_{31} (-f)]}{[a_{13} x + a_{23} y + a_{33} (-f)]} \quad \text{สมการ 3-29}$$

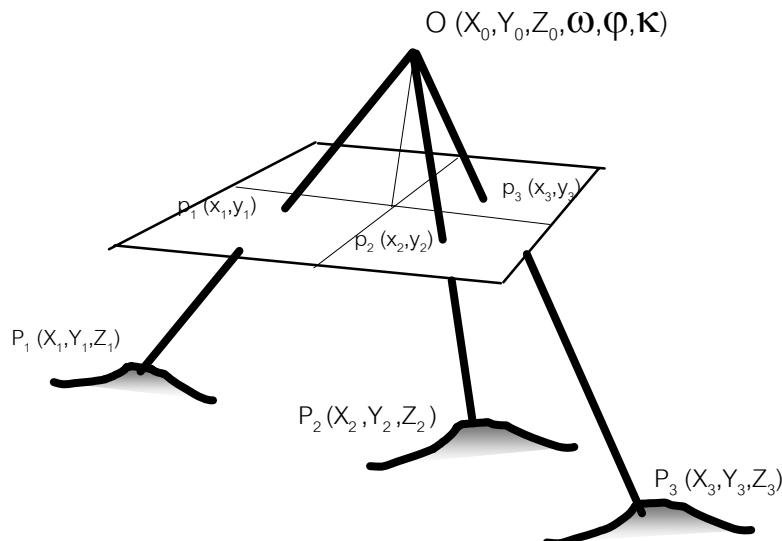
$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{[a_{12} x + a_{22} y + a_{32} (-f)]}{[a_{13} x + a_{23} y + a_{33} (-f)]} \quad \text{สมการ 3-30}$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีค่าพิกัดภาพถ่าย $p(x,y)$ พร้อมความยาวโฟกัสคงลักษณะ f และค่าการจัดวางภาพภายในอก $(X_0, Y_0, Z_0, \Theta, \Phi, K)$ จะสามารถหาค่าพิกัดของจุดเดียวบนนี้ที่เป็นต้นกำเนิดของลำแสงที่เรียกว่าเป็นพิกัดวัตถุ $P(X, Y, Z)$ ไม่ได้ทันที เนื่องจากเพียงทราบความสูงของวัตถุหรือค่า Z อยู่

ดังนั้นสมการสภาวะร่วมเส้นเป็นสมการที่สามารถคำนวณໄไปได้เพียงทิศทางเดียวคือจากพิกัดวัตถุมาสู่ภาพ แต่เมื่อต้องการคำนวณพิกัดภาพไปสู่วัตถุ จะต้องทราบพิกัดวัตถุด้านความสูงหรือค่า Z เสียก่อน

3.3 การวัดย้อนสำหรับภาพถ่ายเดี่ยว

การวัดย้อนสำหรับภาพถ่ายเดี่ยว (Single Photo Resection) เป็นวิธีการใช้หาค่าจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation) ของภาพถ่ายที่ลักษณะโดยอาศัยหลักการของการวัดพิกัดภาพถ่ายของจุดที่ปรากฏบนเด่นชัดบันทึกที่เรียกว่า จุดบังคับภาพถ่าย (Photo Control Point) จุดบังคับภาพถ่ายนี้จำเป็นต้องมีอย่างน้อย 3 จุดเพื่อให้พอเพียงต่อการแก้ปัญหาของระบบสมการ หากว่าจุดบังคับภาพถ่ายทั้งสามมีค่าพิกัดซึ่งได้จากการสำรวจภาคพื้นดินหรือ aerial triangulation ประกอบเข้ากับความสัมพันธ์จากสมการสภาวะร่วมเส้น (Colinearity Equation)



รูปภาพ 3-14 การวัดย้อนสำหรับภาพถ่ายเดี่ยว

สำหรับแต่ละรังสีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดวัตถุ พิกัดภาพถ่าย และ จุดรวมแสง ซึ่งประกอบไปด้วยค่าพิกัดภาพถ่ายและค่าพิกัดวัตถุจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ในรูปของสมการร่วมเส้น ได้ 2 สมการ การคำนวณหาค่าจัดวางภาพภายนอก ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$) ของกล้องมีจำนวนตัวไม่ทราบค่า 6 ตัว และจะสามารถแก้สมการได้เมื่อมีจำนวนสมการพอเพียง ค่าพิกัดวัตถุโดยทั่วไปจะถูกวัดมาด้วยความละเอียดถูกต้องสูง และจะให้เป็นค่าคงที่ในสมการ หากว่ามีการวัดอย่างน้อย 3 จุด นั่นคือการที่มีค่าพิกัดภาพและพิกัดวัตถุดังนี้

จุด	ค่าพิกัดภาพถ่าย	ค่าพิกัดวัตถุ
1	x_1, y_1	X_1, Y_1, Z_1
2	x_2, y_2	X_2, Y_2, Z_2
3	x_3, y_3	X_3, Y_3, Z_3
...

ตาราง 3-2 ค่าพิกัดของจุดบังคับสำหรับการหาความสัมพันธ์

ดังนั้นจะสามารถตั้งสมการค่าสั่งเกตสำหรับแต่ละจุดได้ดังนี้คือ

$$x_i + v_i = -f \frac{a_{1,1}(X_i - X_0) + a_{1,2}(Y_i - Y_0) + a_{1,3}(Z_i - Z_0)}{a_{3,1}(X_i - X_0) + a_{3,2}(Y_i - Y_0) + a_{3,3}(Z_i - Z_0)} \quad \text{สมการ 3-31}$$

$$y_i + v_i = -f \frac{a_{2,1}(X_i - X_0) + a_{2,2}(Y_i - Y_0) + a_{2,3}(Z_i - Z_0)}{a_{3,1}(X_i - X_0) + a_{3,2}(Y_i - Y_0) + a_{3,3}(Z_i - Z_0)} \quad \text{สมการ 3-32}$$

โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3 หรือมากกว่า ส่วนสัมประสิทธิ์ $a_{1,1}$ ถึง $a_{3,3}$ มีค่าตั้งที่

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= \cos(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ a_{1,2} &= -\cos(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\ a_{1,3} &= \sin(\varphi) \\ a_{2,1} &= \cos(\omega) \cdot \sin(\kappa) + \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ a_{2,2} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\kappa) - \sin(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\ a_{2,3} &= -\sin(\omega) \cdot \cos(\varphi) \\ a_{3,1} &= \sin(\omega) \cdot \sin(\kappa) - \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\kappa) \\ a_{3,2} &= \sin(\omega) \cdot \cos(\kappa) + \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\kappa) \\ a_{3,3} &= \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) \end{aligned} \quad \text{สมการ 3-33}$$

3.3.1 การคำนวณปรับแก้

โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะสามารถแก้ปัญหาการวัดย้อนของภาพถ่ายเดี่ยว ดังในตัวอย่างที่มีการวัดไปยังจุด 4 จุดได้ดังนี้

3.3.1.1 กำหนดให้

ค่าพิกัดจุด \mathbf{P}_i สมมุติในกรอบนี้มีจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ทราบค่าพิกัดทั้งสิ้น 4 จุดและให้ค่าพิกัดเป็น $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ โดย $1 \leq i \leq 4$

ค่าพิกัดภาพ $p_i(x_i, y_i)$ โดย $1 \leq i \leq 4$ ค่าพิกัดที่รู้ด้วยที่ได้ให้เป็นค่าสั่งเกต สำหรับการวัดไปยังจุดควบคุมภาคพื้นดินแต่ละจุดตามลำดับ

3.3.1.2 วิธีการคำนวณปรับแก้

จะได้เวกเตอร์ของค่าสั่งเกตที่มีจำนวนค่าสั่งเกต $n = 8$ ดังนี้

$$\mathbf{L} = [x_1 \quad y_1 \quad x_2 \quad y_2 \quad x_3 \quad y_3 \quad x_4 \quad y_4]^T \quad \text{สมการ 3-34}$$

ค่าประมาณเริ่มต้น (Approximated Values) ของค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation Parameter) ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \Phi, \kappa)$ เป็นตัวไม่ทราบค่า (unknowns) จำนวน 6 ค่า หรือ $u=6$

$$\mathbf{X}^0 = [X_0^0 \quad Y_0^0 \quad Z_0^0 \quad \omega^0 \quad \varphi^0 \quad \kappa^0] \quad \text{สมการ 3-35}$$

หากต้องรู้ค่าประมาณของค่าสังเกตเป็นดังนี้

$$L^0 = \begin{bmatrix} x_1(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_1, Y_1, Z_1) \\ y_1(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_1, Y_1, Z_1) \\ x_2(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_2, Y_2, Z_2) \\ y_2(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_2, Y_2, Z_2) \\ x_3(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_3, Y_3, Z_3) \\ y_3(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_3, Y_3, Z_3) \\ x_4(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_4, Y_4, Z_4) \\ y_4(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \omega^0, \phi^0, \kappa^0, X_4, Y_4, Z_4) \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 3-36}$$

แมทริกซ์แบบจำลอง (model matrix)

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial x1}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x1}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x1}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x1}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial x1}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial x1}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial y1}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y1}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y1}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y1}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial y1}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial y1}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial x2}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x2}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x2}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x2}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial x2}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial x2}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial y2}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y2}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y2}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y2}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial y2}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial y2}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial x3}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x3}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x3}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x3}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial x3}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial x3}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial y3}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y3}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y3}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y3}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial y3}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial y3}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial x4}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x4}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x4}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial x4}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial x4}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial x4}{\partial \kappa}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial y4}{\partial X_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y4}{\partial Y_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y4}{\partial Z_0}\right)^0 & \left(\frac{\partial y4}{\partial \omega}\right)^0 & \left(\frac{\partial y4}{\partial \phi}\right)^0 & \left(\frac{\partial y4}{\partial \kappa}\right)^0 \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 3-37}$$

สำหรับแมทริกซ์แบบจำลอง model matrix A เพื่อความง่าย อาจใช้การหาอนุพันธ์เชิงเลข (numerical differential) สำหรับแต่ละสมาชิกของแมทริกซ์ A ได้ดังนี้

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} \approx \frac{dF(x)}{dx} \approx \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} \quad \text{สมการ 3-38}$$

การปรับหาค่าต่อของระบบสมการให้แก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares)

$$\begin{aligned}
 l &= L - L^0 \\
 N &= A^t A \\
 n &= A^t l \\
 x &= N^{-1} n \\
 X^1 &= X^0 + x
 \end{aligned}
 \tag{สมการ 3-39}$$

จากนั้นคำนวนหาตัวไม่ทราบค่า (Unknown) โดยการวนซ้ำ จนกว่าทั้ง

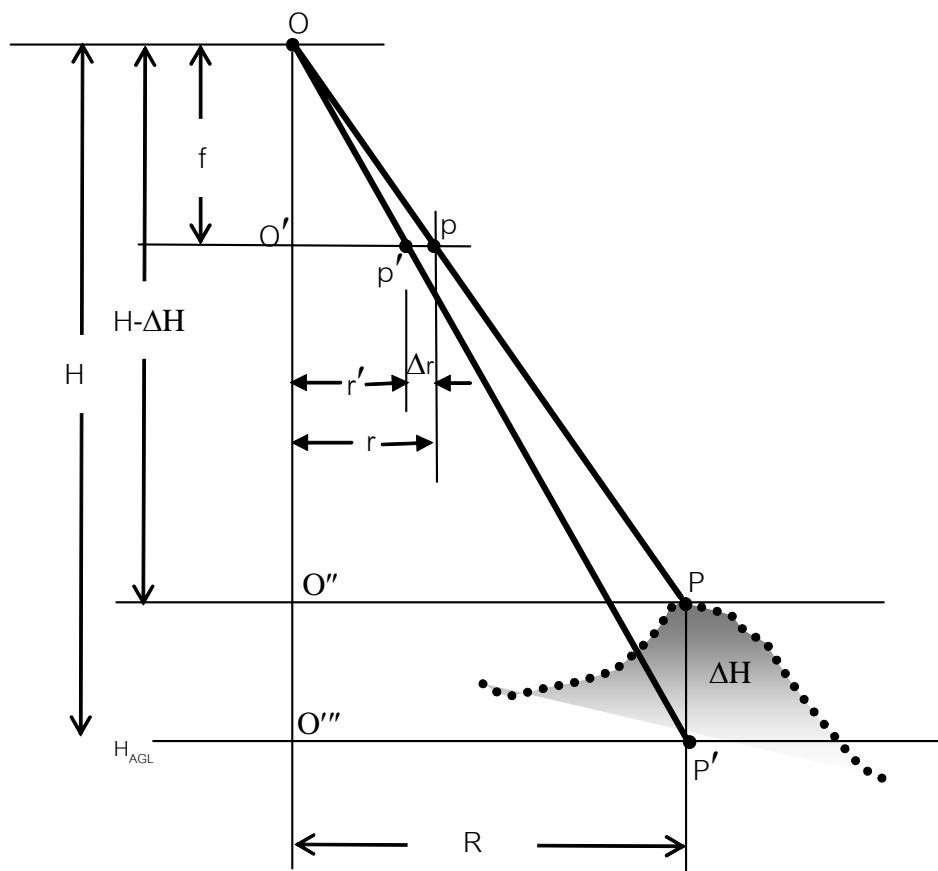
$$\left| X^{i+1} - X^i \right| \leq \varepsilon
 \tag{สมการ 3-40}$$

ก็จะได้คำตอบคือค่าการจัดวางภาพภายนอก $X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi$ และ K ของภาพที่กำลังพิจารณา

3.4 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศ

ภาพถ่ายทางอากาศจะถูกกำหนดให้บันทึกครอบคลุมภูมิประเทศด้วยมาตราส่วนที่เรียกว่า หรือเป็นมาตราส่วนเฉลี่ย (Nominal Scale) การที่ทราบมาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศทำให้ผู้ใช้สามารถใช้งานรังวัดบนภาพเบื้องต้นอย่างง่ายได้และใช้ในการกำหนดระดับความละเอียดถูกต้องในการทำแผนที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามมาตราส่วนบนภาพถ่ายทางอากาศมีความไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากปัจจัยสำคัญคือความสูงต่างของภูมิประเทศ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนบนภาพถ่ายทางอากาศเนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศ (Relief Displacement)

ความคลาดเคลื่อนบนภาพถ่ายทางอากาศเนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศเนื่องมาจากความสูงต่างๆของจุดวัดถูกเดียบกับความสูงเฉลี่ยของภูมิประเทศ (Average Ground Level : AGL) ในบริเวณที่บันทึกภาพเพื่อทำแผนที่ ในเบื้องต้นปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นโดยที่ด้วยภาพของภาพตัดด้านข้างของภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นภาพทางทางอากาศดึงในอุดมคติ ดังภาพ



รูปภาพ 3-15 ความคลาดเคลื่อนของจุดภาพ Δr เนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศ

ตำแหน่งจุดวัดถูกเดียบกับความสูงต่างของจุด P ปรากฏอยู่บนภาพถ่ายที่จุด p แต่หากว่าจุดวัดถูกควรจะปรากฏที่จุด p' บนภาพถ่ายทางอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากผลการฉายจุด P ลงบนระนาบที่มีระดับเท่ากับความสูงภูมิประเทศเฉลี่ย จุด

ในภาพคือ P' ความสูงต่างจากความสูงภูมิประเทศเดิมคือ ΔH ผลของความสูงต่าง ΔH ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากจุดบนระนาบภาพถ่าย ที่ปรากฏที่จุด P ซึ่งคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ควรเป็นคือจุด P

จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นบนระนาบภาพคือ Δr ยังคงมีผลเปลี่ยนตามมาตราส่วนภาพถ่าย S และความพยายามไฟก์สกอลล์ง ตลอดจนตำแหน่งของจุด P ที่ปรากฏสัมพัทธ์กับจุดศูนย์กลางภาพ หรือระยะห่างของจุด P จากจุดศูนย์กลางภาพเป็นระยะทาง r บนระนาบภาพ

จากภาพจะสามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนของจุดภาพได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

พิจารณาสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta OPO'$ เทียบกับ $\Delta OPO''$ จะได้ว่า

$$\frac{r}{f} = \frac{R}{H - \Delta H} \quad \text{สมการ 3-41}$$

$$r = f \cdot \frac{R}{H - \Delta H} \quad \text{สมการ 3-42}$$

โดยที่ R คือระยะห่างของจุด P จากแนวตั้งของศูนย์กลางภาพ O บนระนาบบนภูมิประเทศ

แล้วพิจารณาสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta OP'O'''$ เทียบกับ $\Delta OP'O''$ จะได้ว่า

$$\frac{r'}{f} = \frac{R}{H} \quad \text{สมการ 3-43}$$

$$r' = f \cdot \frac{R}{H} \quad \text{สมการ 3-44}$$

Δr คือความคลาดเคลื่อนที่ต้องการทราบ และคำนวณได้จากผลต่าง r และ r' ที่ได้จากการข้างต้น

$$\Delta r = r - r' = f \cdot \frac{R}{H - \Delta H} - f \cdot \frac{R}{H} \quad \text{สมการ 3-45}$$

$$\Delta r = f \cdot R \cdot \left(\frac{1}{H - \Delta H} - \frac{1}{H} \right) \quad \text{สมการ 3-46}$$

หาก R สมพันธ์กับระยะทาง r บนภาพถ่าย จะหาความสัมพันธ์ R ได้จากมาตราส่วนภาพถ่าย ที่อยู่ใน

รูปสัดส่วนของ $\frac{H}{f}$ ดังนั้นจะได้ระยะ R เป็น

$$R = \frac{H}{f} \cdot r \quad \text{สมการ 3-47}$$

แทนค่ากลับเข้าไปในสมการก่อนหน้านี้จะได้ความคลาดเคลื่อน Δr เป็น

$$\Delta r = f \cdot \left(\frac{H}{f} \cdot r \right) \cdot \left(\frac{1}{H - \Delta H} - \frac{1}{H} \right) \quad \text{สมการ 3-48}$$

$$\Delta r = H \cdot r \cdot \left(\frac{1}{H - \Delta H} - \frac{1}{H} \right) \quad \text{สมการ 3-49}$$

จดรูปสมการเสียใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน

$$\Delta r = \frac{r \cdot \Delta H}{(H - \Delta H)} \quad \text{สมการ 3-50}$$

3.4.1 ตัวอย่างการคำนวณ

ภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:25,000 ขนาดมาตรฐาน 230 มิลลิเมตร.x 230 มิลลิเมตร. บันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพทางอากาศความยาวโฟกัส 153 มิลลิเมตร หากปรากฏตีกีฬาสูงที่ยอดตีกีฬามีความสูงจากความสูงเฉลี่ย 100 เมตร หรืออาจเป็นความสูงของจุดบนที่สูงสูงจากพื้นดิน 100 เมตร เช่นกัน ยอดตีกีฬอุดหนูที่สูงดังกล่าวปรากฏที่ขอบภาพเป็นระยะทางห่างจากจุดศูนย์กลาง 11.5 เซนติเมตร ความคลาดเคลื่อนของจุดภาพคิดได้จาก

ความสูงบินเหนือภูมิประเทศโดยเฉลี่ยคิดเป็น $H = S \cdot f$

$$H = 25,000 \times 0.153 \text{ เมตร}$$

$$= 3,825 \text{ เมตร}$$

ความคลาดเคลื่อนของจุดดังกล่าวคิดเป็น

$$\Delta r = \frac{r \cdot \Delta H}{(H - \Delta H)}$$

$$\Delta r = \frac{0.115 \cdot 100}{(3,825 - 100)} = 3.087 \text{ มิลลิเมตร}$$

หากมีการวัดตำแหน่งของยอดตีกีฬอุดหนูด้วยตั้งกล้องล่าบันภาพถ่ายทางอากาศที่มาตราส่วน 1:25,000

จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการกำหนดตำแหน่งเป็นระยะทาง 3.087 มิลลิเมตรที่ระนาบท่องภาพถ่ายทางอากาศ หรือหากคิดเป็นระยะทางบนพื้นผิวโลกคิดเป็นระยะเท่ากับ $3.087 \times 25,000 = 77.2$ เมตร โดยที่ทิศทางความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในแนวรัศมีออกจากศูนย์กลางภาพ

3.5 คำถกมห้ายบท

- 1) จงพิสูจน์ว่าสมบูรณ์ที่สำหรับสมการลักษณะของความสัมพันธ์ของการแปลงค่าพิกัดชนิดแอกฟไฟน์มี
สมบูรณ์ที่เป็น

$$\begin{array}{lll} a' = \frac{e}{a \cdot e - b \cdot d}; & b' = \frac{-b}{a \cdot e - b \cdot d} & c' = \frac{-(c \cdot e - b \cdot f)}{a \cdot e - b \cdot d} \\ d' = \frac{-d}{a \cdot e - b \cdot d}; & e' = \frac{a}{a \cdot e - b \cdot d}; & f' = \frac{c \cdot d - a \cdot f}{a \cdot e - b \cdot d} \end{array}$$

- 2) ที่ก่อล่าวว่า สำหรับสมการสภากะร่วมเส้นที่แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างจุดเปิดบันทึกภาพถ่ายทางอากาศของกล้อง จุดภาพได้บนระนาบภาพถ่ายทางอากาศ จุดนั้นบนภูมิประเทศ มีความสัมพันธ์อยู่บนเส้นตรงเดียว แต่เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่สามารถคำนวณข้อยกลับไปมาในทางคณิตศาสตร์ได้ และสามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวในทางกายภาพได้อย่างไร ?
 - 3) ภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐาน 1:6,000 ขนาดมาตราฐาน 230 มิลลิเมตร.x 230 มิลลิเมตร บันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพทางอากาศความยาวโฟกัส 153 มิลลิเมตร หากปรากฏว่าตึกสูงที่ยอดตึกมีความสูงจากความสูงพื้นผิวภูมิประเทศอ้างอิงโดยเฉลี่ย 100 เมตร จะคำนวณหาความเป็นไปได้ที่ความคลาดเคลื่อนของยอดอาคารเบรียบเทียบกับตำแหน่งที่อาจเกิดขึ้นสูงสุด จงอธิบายตำแหน่งดังกล่าวและวัดภาพประกอบ

4 การรังวัดบนภาพคู่สามมิติ

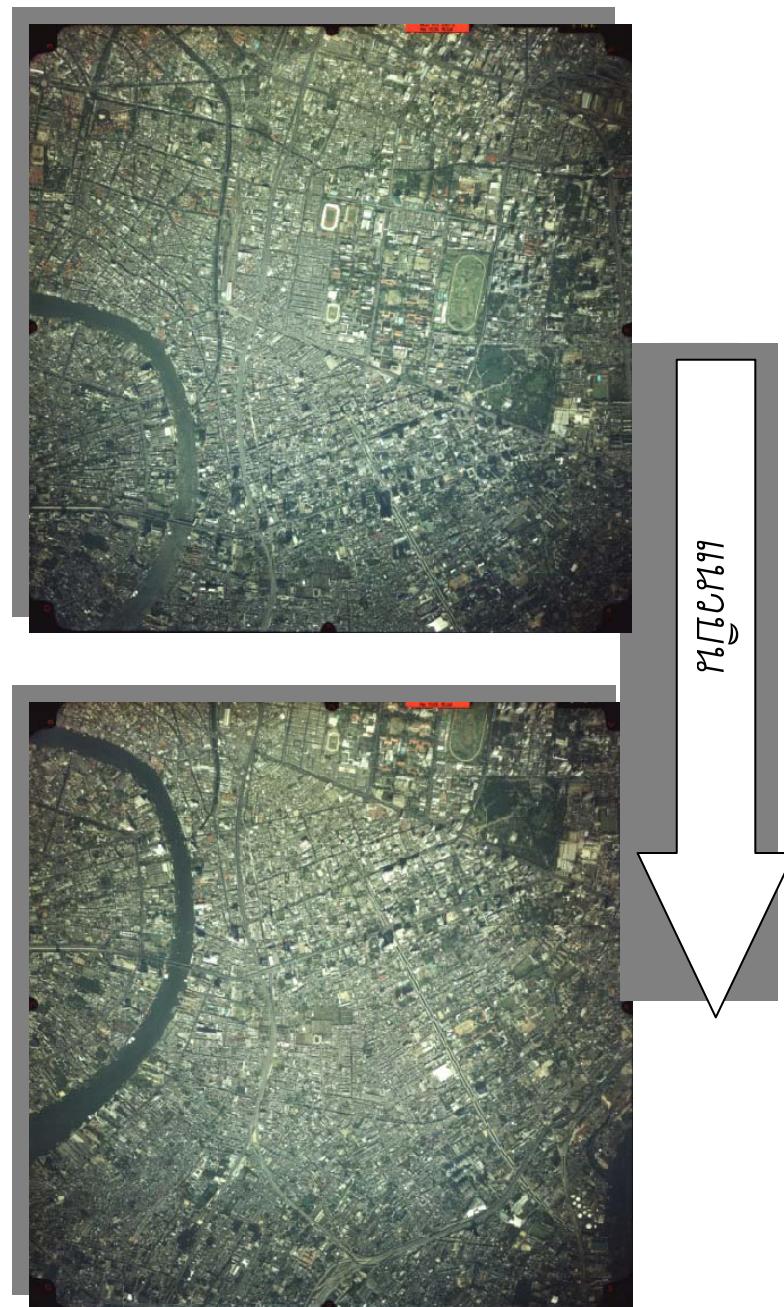
การมองเห็นสามมิติทำให้มองเห็นความลึก การมองเห็นสามมิติในงานสำรวจรังวัดด้วยภาพนับว่าเป็นความสามารถพิเศษข้อหนึ่งของการสำรวจรังวัดเมื่อเปรียบเทียบกับการสำรวจรังวัดด้วยวิธีอื่น การมองเห็นสามมิติเป็นวิธีที่ขยายขีดความสามารถของการวัดด้วยภาพจากจะเป็นการบันทึกสภาพทางกายภาพของพื้นที่หรือวัตถุเพื่อนำมาประมวลผลภาพภายหลังแล้ว การประมวลผลนี้ยังสามารถให้ผู้รังวัดสามารถมองเห็นแบบจำลองในสามมิติและสามารถวัดพิกัดในแบบจำลองสามมิติด้วย

การมองเห็นสามมิติเป็นการรับรูปด้วยความลึก ขนาดสัมพัทธ์ของวัตถุ การมองเห็นสามมิติจากตามนูญช์เกิดจากการปรากญาภาพเดียวในสองตาและรังสีจากวัตถุเดียวกันนั้นทำมุมตัดกันที่เรียกว่า มุมพาราแลกซ์ (parallax angle) การที่มองเห็นวัตถุอยู่ใกล้คือการที่มุมพาราแลกซ์เล็ก ในขณะที่การมองเห็นไกลมุมพาราแลกซ์จะใหญ่

เมื่อภาพในช่วงชาติถูกบันทึกมาเพื่อให้มองเห็นสามมิติได้ ก็ต้องมีเงื่อนไขของการมองเห็นสามมิติ คือ ส่วนของภาพนั้นต้องเป็นวัตถุหรือบริเวณเดียวกัน ขณะที่บันทึกภาพมุมพาราแลกซ์ต้องไม่ใหญ่หรือเล็กเกินไป ภาพสองภาพที่สามารถนำมามองเห็นเป็นสามมิติได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ช่วยหรือด้วยตาเปล่า เรียกว่า ภาพคู่สามมิติ (stereoscopic photo-pair)

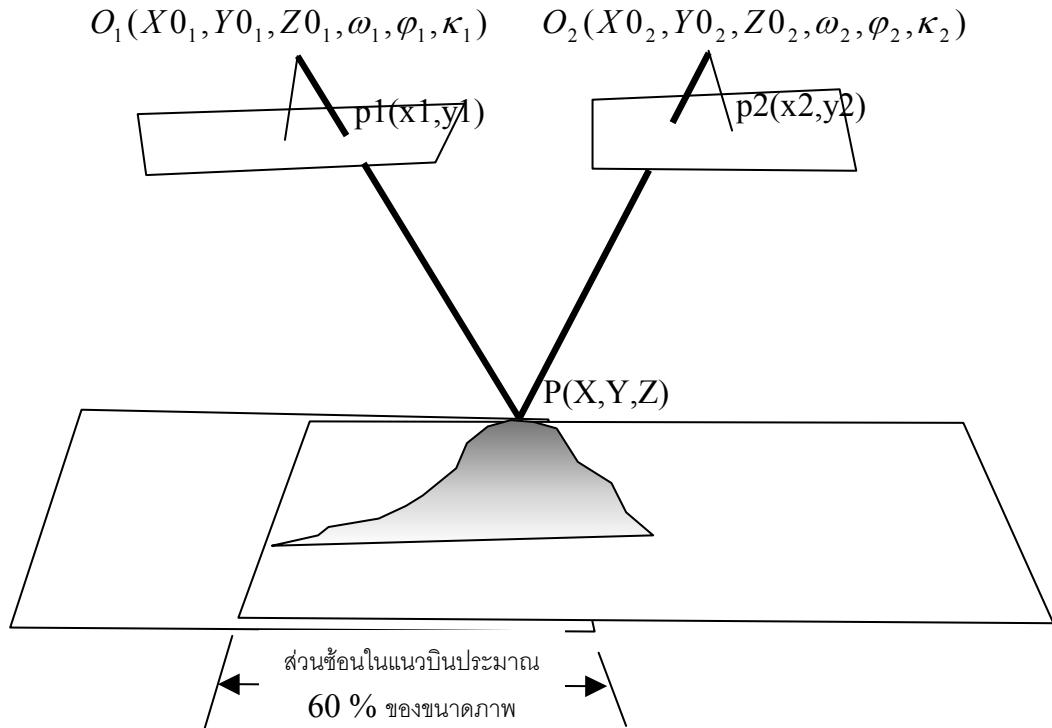
4.1 ภาพคู่สามมิติสำหรับภาพถ่ายทางอากาศ

การมองเห็นสามมิติสำหรับงานสำรวจวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศสามารถทำได้เมื่อนำภาพคู่สามมิติที่เกิดจากการบินบันทึกภาพในแนวบินเดียว ภาพที่บันทึกต่อเนื่องกันจะมีภาพของภูมิประเทศประกอบอยู่บนภาพที่มีส่วนซ้อนกัน



รูปภาพ 4-1 ตัวอย่างภาพคู่สามมิติ ในภาพเป็นภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:25,000

ภาพของบริเวณภูมิประเทศเดียวกันที่ปรากฏบนส่วนซึ่งมีมุมเลื่อนของกางเขน (parallax angle) ที่เหมาะสมแก่การมองเห็นสามมิติได้ ภาพคู่สามมิติสำหรับภาพถ่ายทางอากาศที่จะใช้ในการวัดพิกัดวัตถุบนภูมิประเทศเกิดจากการบินถ่ายภาพเป็นแนวอย่างเป็นระบบดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปภาพ 4-2 ภาพคู่สามมิติกับการมองเห็นสามมิติและการรังวัดพิกัดวัตถุบนภูมิประเทศจำลอง

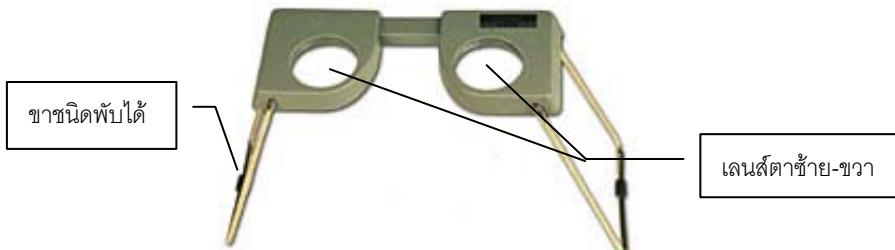
4.2 เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติเชิงทัศน์

เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติในเชิงทัศน์หมายถึงอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเลนส์ ปรีซึ่ม และกระจก หรือวัสดุ ไปร่วงแสงที่ทำหน้าที่หักเหแสง ขยายแสง ประกอบกันเข้าทำให้ภาพคู่สามมิตินั้นปรากฏแก่สายตาอย่างพอดีและทำให้มองเห็นสามมิติได้ เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติเชิงทัศน์สามารถช่วยในการแปลภาพและเข้าใจถึงสิ่งต่างๆที่บันทึกมาประกอบกับประสบการณ์ได้ โดยเฉพาะการแปลภาพ (Photo Interpretation) เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติเหล่านี้ได้แก่ แวนดูสามมิติชนิดกระเปื้า

4.2.1 แวนดูสามมิติชนิดพกพา (Pocket Stereoscope)

แวนดูสามมิติชนิดพกพา (Pocket Stereoscope) ชิ้นสามารถพกพานำไปใช้ในสนามได้สะดวก แต่หากว่าต้องมีการพับหรืองอญูป โดยเฉพาะภาพถ่ายทางอากาศที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากส่วนของภาพจากภาพคู่สามมิติที่จะกำเนิดมาจากตุ่นหรือพื้นที่เดียวกันจะต้องปราบอยู่ใต้เลนส์ตา และมีกำลังขยายต่ำ

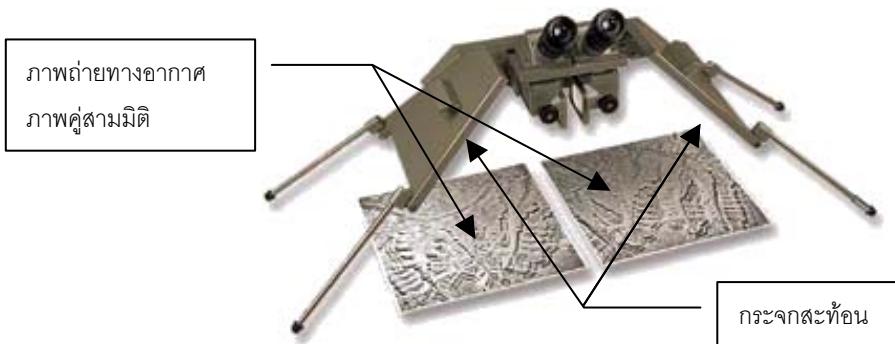
แวนดูสามมิติชนิดกระเปื้า มีลักษณะดังรูป



รูปภาพ 4-3 แวนดูสามมิติชนิดกระเปื้า

4.2.2 กล้องดูสามมิติ (Mirror Stereoscope)

เมื่อต้องการมองเห็นสามมิติที่สะดวกสบาย สามารถทำงานแปลภาพถ่ายทางอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ มักจะใช้ กล้องดูสามมิติ (Mirror Stereoscope) ชิ้นประกอบด้วยกระจกสะท้อนแสง ปรีซึ่มและเลนส์ตากำลังขยายสูง การมีกระจกสะท้อนแสงทั้งสองข้างที่ขาตั้ง ทำให้สามารถนำภาพถ่ายทางอากาศขนาดมาตรฐาน 9 นิ้ว ทั้งคู่มาจัดวางให้เครื่องดูสามมิติได้ นอกจากรูป Mirror Stereoscope จะมีขาที่กันหัวมากกว่าภาพถ่ายทางอากาศสองรูป ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลื่อนเครื่องมองสามมิติไปทั่วบนส่วนข้อนบนภาพคู่สามมิติได้



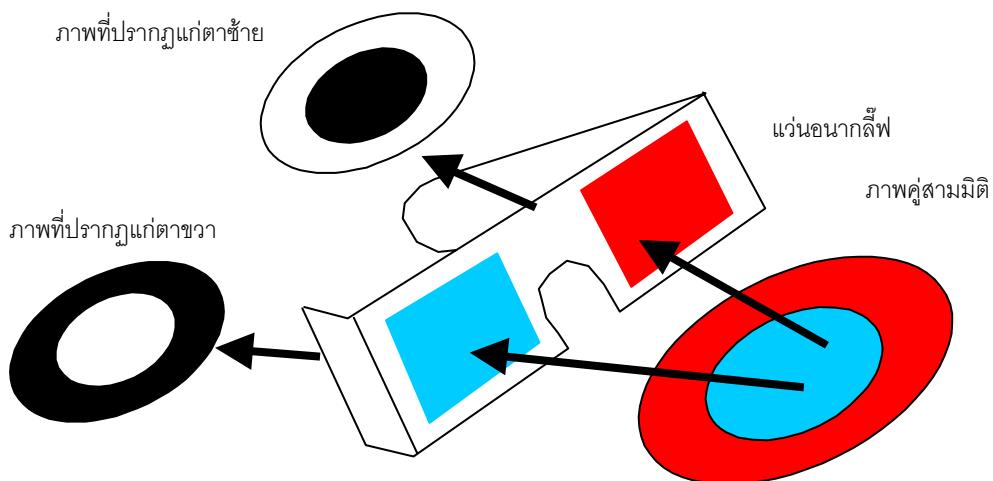
รูปภาพ 4-4 Mirror Stereoscope โดย Wild Herrbrugg

4.3 เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติชนิดดิจิทัล

เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติดิจิทัลคืออุปกรณ์หรือเครื่องช่วยในการมองเห็นภาพเป็นสามมิติจากการฉายภาพบนหน้าจอ โดยการมองเห็นสามมิติยังคงไว้ในหลักการเดิมคือภาพคู่สามมิติจะต้องมีเงื่อนไขที่เอื้อการมองเห็นสามมิติได้ เพียงแต่ว่าได้รับการเปลี่ยนสถานะให้เป็นดิจิทัลแล้ว พร้อมที่จะแสดงผลหน้าจอ เมื่อภาพแสดงผลที่หน้าจอได้ ถ้ามีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทำให้ภาพ "ซ้าย" ปรากฏในสายตาซ้าย และภาพ "ขวา" ปรากฏต่อสายตาขวาได้ ก็จะทำให้ประสบสัมผัสของการมองเห็นรับรู้ภาพเป็นสามมิติได้ อุปกรณ์เหล่านี้มีหลักการทำงานได้แก่

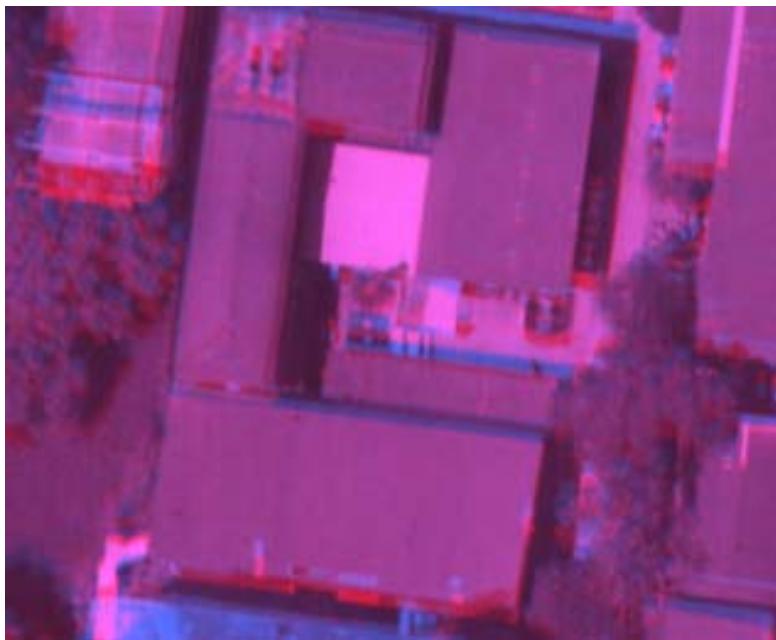
4.3.1 วิธีอนาคต (Anaglyph Glasses)

เป็นวิธีการนำภาพคู่สามมิติมาขัดกันด้วยสีที่เป็นสีคู่คอมพ्लีเมนทารี (complementary) กัน สีที่เป็นคู่คอมพ์ลีเมนทารีกันคือสีสองสีที่ สามตามองเห็นผ่านกรอบแสงสีหนึ่งแล้วสีสีเดียวกันนั้นจะไม่สามารถทะลุผ่านมาปรากฏให้เห็นได้ ในขณะที่อีกสีหนึ่งที่เป็นสีคู่คอมพ์ลีเมนทารีกันจะสามารถผ่านมาปรากฏให้เห็นเป็นสีเข้ม หรือดำ ตัวอย่างของสีที่เป็นคู่คอมพ์ลีเมนทารีกันได้แก่ สีเขียวกับสีแดง สีแดงกับสีน้ำเงิน เป็นต้น



รูปภาพ 4-5 หลักการของภาพอนาคต

สำหรับภาพคู่สามมิติเมื่อต้องการให้มองเห็นเป็นสามมิติได้ก็จะทำการวดหักขอกันด้วยสีที่เป็นคู่คอมพ์ลีเมนทารีกัน โดยภาพคู่สามมิติซ้ายให้เป็นสีหนึ่ง โดยภาพคู่สามมิติขวาให้เป็นสีหนึ่ง เมื่อมองดูภาพทั้งสองจะถูกวัดหักขอกันโดยให้เหลือมองกันดังตัวอย่างในภาพ

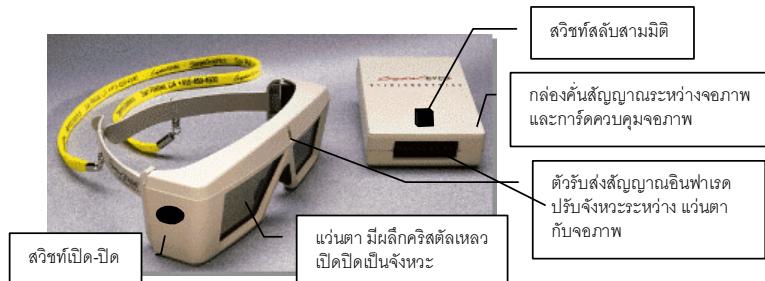


รูปภาพ 4-6 ภาพอนาคตีฟ์บีบอัดภาพวิชาชีวกรรมสำรวจนิพนธ์

4.3.2 การใช้แวนชัทเทิล (Shuttle-Glasses)

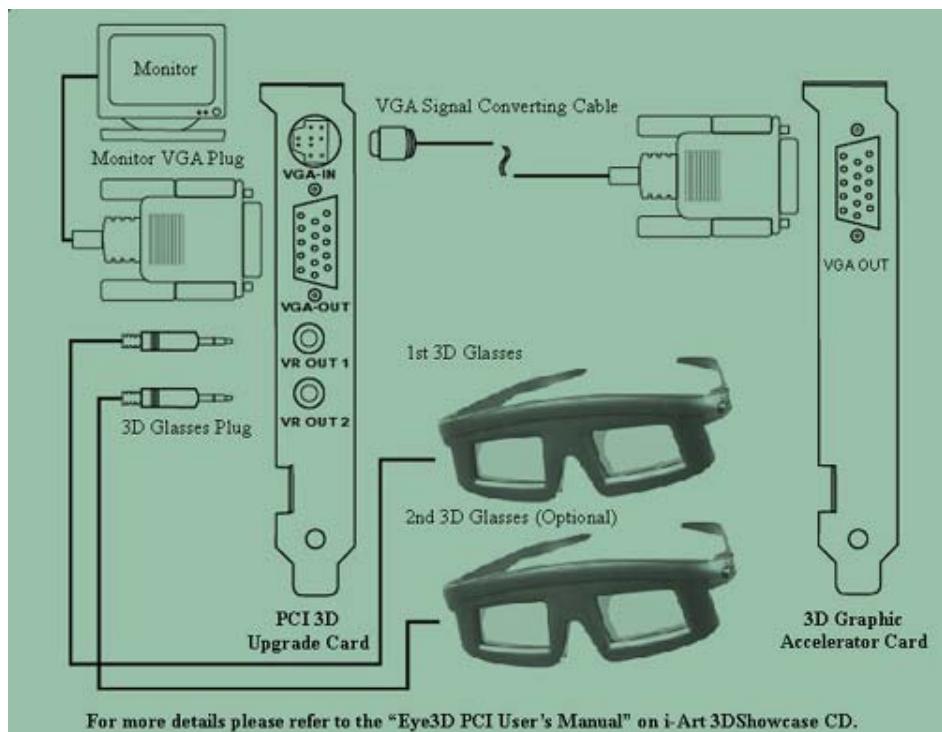
แวนชัทเทิล (Shuttle-Glasses) เป็นแวนที่ช่วยให้มองเห็นสามมิติ โดยที่แวนประกอบด้วยกระจกสองชั้น ที่เป็น Liquid Crystal Display (LCD) ถูกควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์เข้าจังหวะ (Synchronizing) โดยการทำให้กระจกทั้งสองชั้นเปลี่ยนสีไปเรื่อยๆ ตามจังหวะที่จะสอดคล้องกัน ในขณะที่จอภาพจะถูกควบคุมด้วยอิเล็กทรอนิกส์ เช่นกัน ทำให้ภาพแสดงผลภาพช้าๆ หรือภาพขาวสลับกันด้วยเทคนิคต่างๆ เทคนิคการแสดงผลบนจอภาพที่พบบ่อยมีอยู่ 3 วิธี ก่อร่องคือ การสลับเส้น (Line-Interlacing) การสลับเฟรม (Alternate Frame) การแบ่งจอ (Split-Screen) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน

เครื่องช่วยในการมองเห็นสามมิติ CrystalEyes ของ Stereographics Corporation, San Rafael, CA, USA (<http://www.stereographics.com>) ซึ่งประกอบด้วยแวนชัทเทิล และกล่องคันสัญญาณภาพ กล่องคันสัญญาณภาพมีปลั๊กพิเศษที่ต่อเข้ากับกราฟฟิกการ์ดได้และมีป้ายอีกด้านหนึ่งให้เปลี่ยนจากสามารถต่อเข้ามาภายในห้องได้ ปลั๊กพิเศษดังกล่าวจะต่อเข้ากับกล่องคันสัญญาณ กล่องคันสัญญาณสามารถส่งสัญญาณผ่านทางแสงอินฟราเรดไปยังแวนชัทเทิล แวนชัทเทิลเมื่อได้รับคำสั่งจะทำการเปิด-ปิด ทำให้ตาชั้ยและตาขวามองเห็นสลับกัน ในจังหวะที่สอดคล้องกันกล่องคันสัญญาณภาพจะบังคับการแสดงภาพให้สามารถมองเห็นสามมิติได้ ซึ่งเทคนิคจะได้ผลลัพธ์ในลำดับต่อไป



รูปภาพ 4-7 แว่นชักเทิด CrystalEyes โดย Stereographics Corp,USA

ในลักษณะเดียวกันกับข้างต้น แว่นชักเทิด Eye3D ผลิตโดย I-Art Corporation, Taiwan (<http://www.iart3d.com>) ประกอบด้วยแว่นชักเทิด อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมภาพอยู่ในรูปแบบของการ์ดมาตรฐาน PCI ใช้ใน PC ท้าไปซึ่งอาจมีความไม่สะดวกนักสำหรับการติดตั้ง เพราะต้องเปิดเครื่อง PC ในภาพข้างล่างนี้เป็นแผนภูมิการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อทำให้แว่นชักเทิดทำงานร่วมกับกราฟฟิคการ์ดทัวร์ไปได้

รูปภาพ 4-8 ตัวอย่างของการเชื่อมต่อแว่นชักเทิดชนิด Eye3D (<http://www.iart3d.com>)

ในภาพ PCI3D Upgrad Card คือการ์ดที่มากับแว่นชักเทิด (3D Glasses) โดยที่จะต่อคันกลางระหว่าง กราฟฟิคการ์ดปกติ (ในที่นี้คือ 3D Graphic Acceleerator Card) สัญญาณจากกราฟฟิคการ์ดจะต่อออกโดยใช้ VGA Signal Converting Cable เข้าที่ VGA-In ของ PCI3D Upgrad Card สัญญาณภาพจะผ่านการ์ดนี้แล้วถูกควบคุมไว้ได้ หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกต่อไปเรื่อยๆ จนถึงจอแสดงผลปกติ (Monitor VGA Plug และ Monitor) ในขณะที่แว่นชักเทิด (3D Glasses) จะต่อออกจาก VR-OUT-1 เพื่อรับกระแสไฟเลี้ยงและสัญญาณการ "เปิด-ปิด" LCD ของตาซ้ายและตาขวา

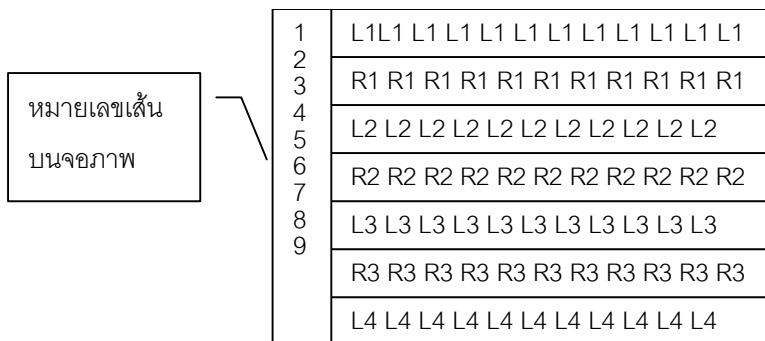
สำหรับหลักของการมองเห็นสามมิตินั้น เมื่อได้ทำการต่อคุปกร์ดังกล่าวแล้ว เทคนิคการทำงานจะมีหลักการทำงานดังนี้

4.3.2.1 การสลับเส้น(Line-Interlacing)

การสลับเส้น(Line-Interlacing) เป็นการนำภาพคู่สามมิติมาแสดงผลบนหน้าจอ โดยให้เส้นภาพบนจอแสดงผลสลับกันเป็นภาพจากภาพคู่ข้างๆกับภาพคู่ขว่า ดังในภาพข้างล่างนี้ โดยให้ L1 แทนเส้นบนภาพแรกเส้นที่ 1 R1 คือແນວทางของภาพคู่ขวามาปรากฏบนที่ແນວที่ 2 สลักกันไป เช่นนี้เรียกว่าดังภาพ เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานແටที่เป็นเลขคู่จะแสดงผลสลับกันท้าวห้องกับการบังคับให้แวน LCD ของตาข่ายและขวาก “เปิด-ปิด” สลับกัน ทำให้รับรู้ถึงภาพสามมิติ

ข้อดีของวิธีนี้คือจภาพไม่ต้องมีความสามารถในการแสดงผลความถี่สูงมากนัก เนื่องจากที่อยู่ข้างๆภาพถูกตั้งไว้ประจำที่ การเขียนโปรแกรมทำได้ง่ายเมื่อนอกบัญชีไป การแสดงผลบนจอเป็นปกติแม้ว่าจะมีเดลกงไปบ้าง

ข้อเสียของวิธีนี้คือการสลับແຕກเกิดขึ้นทั่วทั้งจอภาพ ทำให้บริเวณที่เป็นเมนูใช้งานและพื้นที่แสดงผลต่างๆบนจอค่อนข้างมีด้วยกันและไม่คุ้มชัดนักเนื่องจากແຕກที่ติดกันจะแสดงผลสลับกัน นอกจากนี้จะทำให้พื้นที่ในการแสดงผลลดลงไปครึ่งหนึ่งเนื่องจากภาพข้ายังหรือขวามารถแสดงผลได้เพียงเส้นเดียวเท่านั้น การโปรแกรมจะต้องอ่านภาพข้ายัง-ขวามาทีละเส้นแล้วแสดงผลสลับกัน



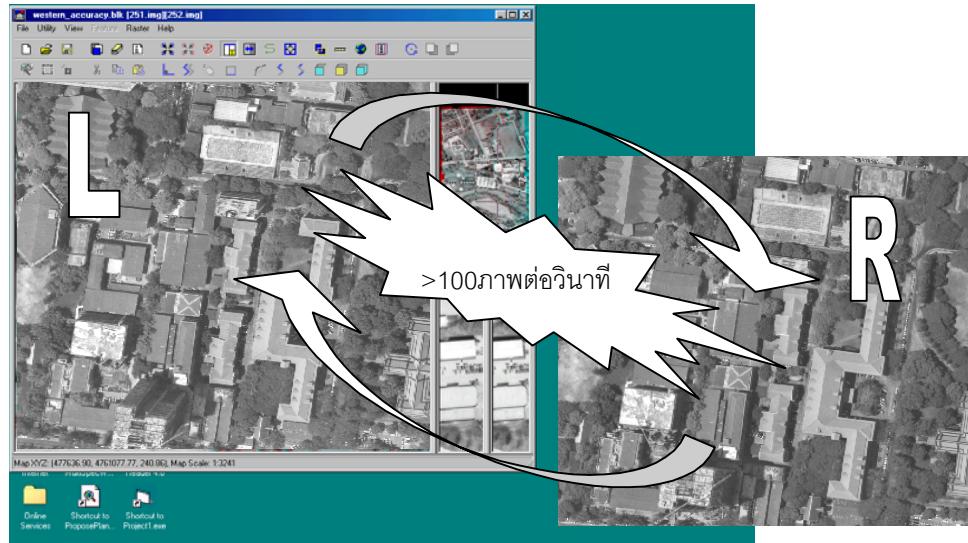
รูปภาพ 4-9 การสลับเส้น (Line-Interlacing)

4.3.2.2 การสลับเฟรม(Alternate Frame)

การสลับเฟรม (alternate frame) เป็นเทคนิคของแสดงผลโดยให้ภาพข้ายังและภาพขวาแสดงผลสลับกัน จอแสดงภาพและกราฟฟิกส์การ์ด จะต้องมีความสามารถเร็วสูงมาก โดยทั่วไปสูงกว่า 100 Hz หรือภาพต่อวินาที นอกเหนือจากนี้กราฟฟิกส์การ์ดต้องมีหน่วยความจำอย่างพอเพียงเพื่อให้ภาพข้ายังและขวาเข้าไปอยู่ในบัฟเฟอร์ได้มาตรฐาน OpenGL (<http://www.opengl.org>) ที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมประยุกต์กราฟฟิกส์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ตามมาตรฐาน OpenGL จะต้องมีบัฟเฟอร์สำหรับ “ความลึก” (Z-Buffer) ที่มีขนาดเท่ากับความละเอียดของจอกาฟฟิกหนึ่น ดังนั้นมีอัตราการรับประมวลด้วย OpenGL ต้องใช้กราฟฟิกส์การ์ดและไดรเวอร์ที่มีให้รองรับ Quad-Buffer ได้ วิธีนี้หากครบเงื่อนไขดังกล่าวก็จะสามารถให้ภาพสามมิติที่คมชัด จอภาพ

กว้าง ภาพมีความคมชัด พื้นที่ส่วนที่มองเห็นเป็นสามมิติจะเกิดเฉพาะในหน้าต่าง(Window)นั้นๆ พื้นที่อื่นๆบนจอจะยังสามารถใช้งานได้ปกติ เช่นเดียวกับการใช้งานวินโดส์ทั่วไป

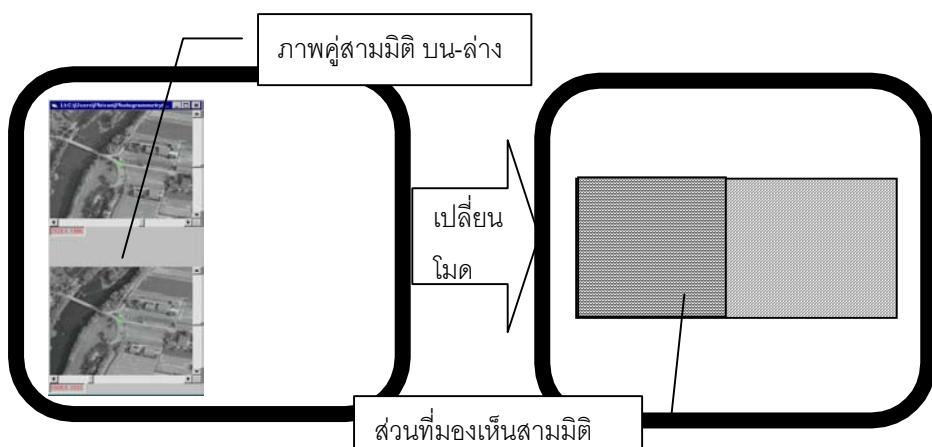
ในภาพแสดงลักษณะการทำงานชนิดสลับภาพ



รูปภาพ 4-10 การสลับเฟรม (Alternate Frame) บน StereoAnalyst โดย ERDAS Imagine (<http://www.erdas.com>)

4.3.2.3 การแบ่งจอ(Split-Screen)

การแบ่งจอ (Split-Screen) เป็นการนำภาพมาแสดงผลบนจอ อย่างละครึ่ง วิธีนี้ที่ทำได้ง่ายที่เรียกว่า บน-ล่าง (Above-Below) เมื่อตำแหน่งของภาพสัมพันธ์ถูกต้อง อิเลกทรอนิกส์ก็จะทำการสลับเส้น ทำให้เห็นภาพในจอเหลือเพียงครึ่งเดียวต่อคราว แต่จากจุดภาพของภาพคู่สามมิติจะแสดงผลสลับกันที่ตำแหน่งเดียวกันบนแต่ละของภาพที่ลากเส้น เข้าจังหวะการเปิดปิดของแวนชัตเทล วิธีนี้ค่อนข้างแพรว่ายเนื่องจากสายด่วนทำได้ง่าย ความเร็วของจอภาพและการฟิกส์การ์ดไม่ต้องเร็วมาก เนื่องจากจำนวนเส้นของจอภาพลดลงครึ่งหนึ่ง โดยทั่วไปสามารถใช้ได้กับจอภาพและการฟิกส์การ์ดที่ความเร็วระดับ 60-70 Hz ภาพจะมีความสว่างพอสมควรเมื่อในการแสดงผลปกติ



รูปภาพ 4-11 การแบ่งครึ่งจอ จาก Chula-DPWS

ข้อเสียของวิธีนี้คือพื้นที่อื่นๆ ที่ไม่ใช้กราฟฟิกส์โดยเฉพาะส่วนที่เป็นเมนูและการแสดงผลที่จะต้องให้งานจะสลับกันจนอ่านไม่ออก และจะต้องมีการสลับการทำงานเพื่อให้กลับมาอยู่ในรูปแบบการทำงาน(mode) ปกติ ดังนั้นระหว่างการทำงานต้องสลับรูปแบบการทำงานไปมา แต่ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการใช้กราฟฟิกส์การ์ดชนิดต่อได้สองจอภาพพร้อมกัน หรือใช้กราฟฟิกส์การ์ดสองกราฟฟิกส์การ์ดต่อ กับ สองจอภาพสองจอภาพ โดยให้จอภาพหนึ่งแสดงผลสำหรับสลับภาพเพื่อการวัดสามมิติเพียงอย่างเดียว และว่าให้อีกจอภาพหนึ่งแสดงผลการวัดในรูปของตัวอักษรเพียงอย่างเดียว

4.3.3 การใช้จอโพลาไรซ์ (Polarized Screen)

อีกวิธีการหนึ่งที่จำให้ภาพซ้ายและขวาให้ปรากฏแก่สายตาได้ โดยการใช้คุปกรณ์โปรดีเจร์รี่ แสดงบังหน้าจอ มิเตอร์ อุปกรณ์โปรดีเจร์รี่ แสดงบังหน้าจอสามารถในการเปลี่ยนสถานะให้ภาพคู่สามมิติผ่านอุปกรณ์โปรดีเจร์รี่ แสดงบังหน้าจอ สามารถเปลี่ยนสถานะสลับไปมาในการทำให้แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านได้ คือองค์ประกอบของเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งและในแนวนอน การเปลี่ยนสถานะจะเข้าจังหวะกับการสลับภาพซ้าย-ขวาของคอมอนิเตอร์ควบคุมด้วยกราฟฟิกส์การ์ด ดังภาพ



รูปภาพ 4-12 จอโพลาไรซ์ (Polarized Screen) รุ่น Zscreen 2000 โดย Stereographic Inc.

ในขณะเดียวกันผู้ปฏิบัติงานจะสวมใส่แว่นตาที่กระจายเป็นกระจกโพลาไรซ์ที่ยอมให้องค์ประกอบในแก่นนอนและดึงเฉพาะตาซ้ายซ้ายหรือขวาเท่านเดียวกัน ดังนั้นเมื่อรวมการทำงานของกราฟฟิกส์การ์ดและจอสลับเปลี่ยนสภาวะโพลาไรซ์ ผู้ปฏิบัติงานก็จะมองเห็นเป็นสามมิติได้

ข้อดีของวิธีนี้คือ แว่นตาจะมีน้ำหนักเบา สามารถดูพร้อมกันหลาย ๆ คนได้ อิเล็กทรอนิกส์โดยฯ สามารถดูพร้อมกันหลาย ๆ คนได้

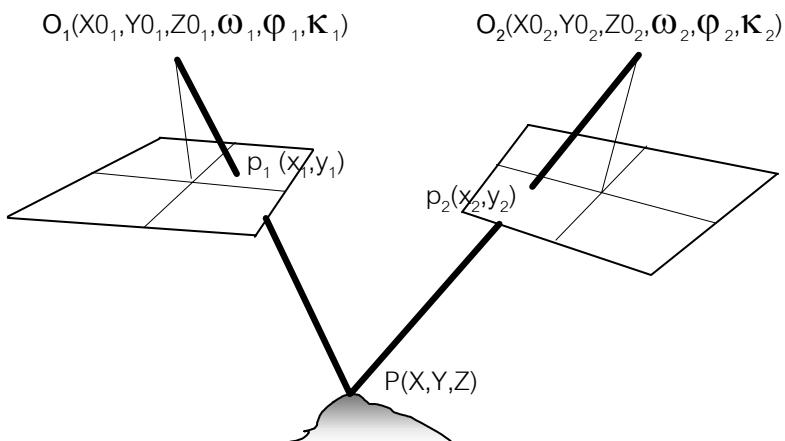
ข้อเสียคือราคาหน้ากากโพลาไรซ์และอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมมีราคาแพง

4.4 การคำนวณพิกัดวัตถุจากค่าภาพสามมิติ

เมื่อสามารถมองเห็นสามมิติได้ สามารถที่จะแปลภาพเข้าใจถึงสถานการณ์บนแบบจำลอง การวัดพิกัดบนภาพคู่สามมิติทำได้โดยการวัดบนจุดจุดเดียวกันบนวัตถุที่ปรากฏบนภาพทั้งสอง ค่าพิกัดที่ได้ในเบื้องต้นจะเป็นค่าพิกัดเครื่องมือวัดเท่านั้น ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนเป็นพิกัดภาพโดยการหาความสัมพันธ์ของการแปลงค่าพิกัดก่อนหน้านี้ ซึ่งในขั้นตอนนี้เรียกว่า การวิเคราะห์การจัดวางภาพภายใน (Interior Orientation)

ค่าพิกัดภาพที่ได้จะสามารถนำไปใช้คำนวณค่าพิกัดของวัตถุนั้นได้ในระบบพิกัดของวัตถุในทั้งทางขวา และทางดึง เช่นในกรณีของภาพถ่ายทางอากาศ ระบบพิกัดที่ใช้อาจเป็นระบบพิกัดภาพพื้นดิน

การในการหาค่าพิกัดของวัตถุโดยที่ปรากฏอยู่ในส่วนข้างของภาพโดยการคำนวณจากค่าพิกัดภาพของจุดจุดเดียวกันบนภาพคู่สามมิติ เรียกว่า Two-photo Intersection หรือ Space Intersection เป็นวิธี โดยที่ค่าการจัดวางตัวภายในนอก (Exterior Orientation Parameters) ของภาพทั้งสองต้องทราบมาก่อน แนวทางหนึ่งโดยการใช้การคำนวณที่ให้ในที่นี่คือการใช้คณิตศาสตร์ของภาพถ่ายคู่ที่มีสมการสภาวะร่วมเส้นสองเส้นที่ตัดกันที่จุดบนวัตถุ สมการที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ของพิกัดวัตถุและพิกัดภาพถ่ายบนภาพทั้งสองมาช่วยในการ



รูปภาพ 4-13 เรขาคณิตของ Two-photo Intersection

คำนวณหาค่าดังกล่าว

จากภาพข้างบนนี้ค่า Exterior Orientation parameters ของทั้งสองภาพ คือ O_1 ($X0_1, Y0_1, Z0_1, \Omega_1, \Phi_1, K_1$) และ O_2 ($X0_2, Y0_2, Z0_2, \Omega_2, \Phi_2, K_2$) สำหรับ “ภาพซ้าย” และ “ภาพขวา” ตามลำดับให้เป็นพารามิเตอร์ที่ทราบค่า และมีค่าพิกัดของจุดใดๆที่วัดได้ในรูปของ photo coordinate เป็น $p_1(x_1, y_1)$ และ $p_2(x_2, y_2)$ ตามลำดับ ค่าพิกัดของภาพถ่าย $p_1(x_1, y_1)$ และ $p_2(x_2, y_2)$ นี้อาจจัดได้โดยตรง แต่จะวัดในระบบพิกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดบนภาพ หลังจากนั้นทำแปลงพิกัดเครื่องมือเหล่านั้นให้เป็นค่าพิกัดภาพถ่าย เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสอง โดยทั่วไปจะใช้การแปลงค่าพิกัดแบบแอกฟีฟีโน่ (affine transformation) แนวลักษณะที่ผ่าน perspective center จุดภาพนั้นบนภาพถ่าย ผ่านไปถึงตัววัตถุเอง ให้พิกัดของจุดที่กำลังพิจารณาเป็น $P(X, Y, Z)$ เป็นตัวไม่ทราบค่า (Unknowns) เมื่อใช้การคำนวณด้วยเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุด (Least-square adjustment computation) จะสามารถให้คำตอบดังกล่าวได้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ เส้นรังสีทั้งสองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_1 + v_1 = -f \frac{a'_{1,1} * (X - X0_1) + a'_{1,2} * (Y - Y0_1) + a'_{1,3} * (Z - Z0_1)}{a'_{3,1} * (X - X0_1) + a'_{3,2} * (Y - Y0_1) + a'_{3,3} * (Z - Z0_1)} \quad \text{สมการ 4-1}$$

$$y_1 + v_2 = -f \frac{a'_{2,1} * (X - X0_1) + a'_{2,2} * (Y - Y0_1) + a'_{2,3} * (Z - Z0_1)}{a'_{3,1} * (X - X0_1) + a'_{3,2} * (Y - Y0_1) + a'_{3,3} * (Z - Z0_1)} \quad \text{สมการ 4-2}$$

$$x_2 + v_3 = -f \frac{a''_{1,1} * (X - X0_2) + a''_{1,2} * (Y - Y0_2) + a''_{1,3} * (Z - Z0_2)}{a''_{3,1} * (X - X0_2) + a''_{3,2} * (Y - Y0_2) + a''_{3,3} * (Z - Z0_2)} \quad \text{สมการ 4-3}$$

$$y_2 + v_4 = -f \frac{a''_{2,1} * (X - X0_2) + a''_{2,2} * (Y - Y0_2) + a''_{2,3} * (Z - Z0_2)}{a''_{3,1} * (X - X0_2) + a''_{3,2} * (Y - Y0_2) + a''_{3,3} * (Z - Z0_2)} \quad \text{สมการ 4-4}$$

โดยที่สมบัติที่ $a'_{1,1}$ ถึง $a'_{3,3}$ คือเป็นพังก์ชันของ $(\Omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$ สำหรับภาพคู่สามมิติภาพข่าย และ สมบัติที่ $a''_{1,1}$ ถึง $a''_{3,3}$ คือเป็นพังก์ชันของ $(\Omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$ สำหรับภาพคู่สามมิติภาพขาว มีค่าดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} a'_{1,1} = \cos(\varphi_1) * \cos(\kappa_1) \\ a'_{1,2} = -\cos(\varphi_1) * \sin(\kappa_1) \\ a'_{1,3} = \sin(\varphi_1) \\ a'_{2,1} = \cos(\omega_1) * \sin(\kappa_1) + \sin(\omega_1) * \sin(\varphi_1) * \cos(\kappa_1) \\ a'_{2,2} = \cos(\omega_1) * \cos(\kappa_1) - \sin(\omega_1) * \sin(\varphi_1) * \sin(\kappa_1) \\ a'_{2,3} = -\sin(\omega_1) * \cos(\varphi_1) \\ a'_{3,1} = \sin(\omega_1) * \sin(\kappa_1) - \cos(\omega_1) * \sin(\varphi_1) * \cos(\kappa_1) \\ a'_{3,2} = \sin(\omega_1) * \cos(\kappa_1) + \cos(\omega_1) * \sin(\varphi_1) * \sin(\kappa_1) \\ a'_{3,3} = \cos(\omega_1) * \cos(\varphi_1) \\ \\ a''_{1,1} = \cos(\varphi_2) * \cos(\kappa_2) \\ a''_{1,2} = -\cos(\varphi_2) * \sin(\kappa_2) \\ a''_{1,3} = \sin(\varphi_2) \\ a''_{2,1} = \cos(\omega_2) * \sin(\kappa_2) + \sin(\omega_2) * \sin(\varphi_2) * \cos(\kappa_2) \\ a''_{2,2} = \cos(\omega_2) * \cos(\kappa_2) - \sin(\omega_2) * \sin(\varphi_2) * \sin(\kappa_2) \\ a''_{2,3} = -\sin(\omega_2) * \cos(\varphi_2) \\ a''_{3,1} = \sin(\omega_2) * \sin(\kappa_2) - \cos(\omega_2) * \sin(\varphi_2) * \cos(\kappa_2) \\ a''_{3,2} = \sin(\omega_2) * \cos(\kappa_2) + \cos(\omega_2) * \sin(\varphi_2) * \sin(\kappa_2) \\ a''_{3,3} = \cos(\omega_2) * \cos(\varphi_2) \end{array} \right\} \text{สมการ 4-5}$$

4.4.1 วิธีการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

ปัญหา Two-Photo Intersection สามารถหาตำแหน่งได้โดยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดดังนี้

1) กำหนดให้

-ค่าการจัดวางภาพภายนอกของรูปทั้งสองกำหนดให้เป็น

สำหรับภาพซ้าย $O_1(X_0, Y_0, Z_0, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1)$ และ

สำหรับภาพขวา $O_2(X_0, Y_0, Z_0, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$ ซึ่งให้เป็นค่าคงที่ในระบบสมการ

-ค่าพิกัด photo coordinate ของจุด $P(X, Y, Z)$ บนรูปถ่าย "ซ้าย" เป็น $p_1(x_1, y_1)$ และ "ขวา" เป็น $p_2(x_2, y_2)$

2) ต้องการหา

ค่าพิกัด $P(X, Y, Z)$ ซึ่งเป็น 3 Unknowns ($u=3$)

$$X = (X \quad Y \quad Z)^t \quad \text{สมการ 4-6}$$

3) วิธีการ

คำนวณปรับแก้โดยวิธี Least square เวกเตอร์ของค่าสั้งเกตเป็น L โดยมีขนาด $n=4$

$$L = (x_1 \quad y_1 \quad x_2 \quad y_2)^t \quad \text{สมการ 4-7}$$

ค่าประมาณของพิกัด $P(X, Y, Z)$

$$X^0 = (X^0 \quad Y^0 \quad Z^0)^t \quad \text{สมการ 4-8}$$

Vegaเตอร์ของค่าประมาณของค่าสั้งเกต

$$L^0 = \begin{vmatrix} F_1(X_0, Y_0, Z_0, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X^0, Y^0, Z^0) \\ F_2(X_0, Y_0, Z_0, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X^0, Y^0, Z^0) \\ F_3(X_0, Y_0, Z_0, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X^0, Y^0, Z^0) \\ F_4(X_0, Y_0, Z_0, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X^0, Y^0, Z^0) \end{vmatrix} \quad \text{สมการ 4-9}$$

โดยที่ F_1, F_2, F_3 และ F_4 คือ Colinearity Function ของลำแสงสองเส้น ที่มีรูปแบบสมการแสดงไว้โดย
ละเอียดแล้วก่อนหน้านี้

จะได้เมทริกซ์แบบจำลองเป็น

$$A = \begin{vmatrix} \left(\frac{\partial F_1}{\partial X}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_1}{\partial Y}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_1}{\partial Z}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial F_2}{\partial X}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_2}{\partial Y}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_2}{\partial Z}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial F_3}{\partial X}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_3}{\partial Y}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_3}{\partial Z}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial F_4}{\partial X}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_4}{\partial Y}\right)^0 & \left(\frac{\partial F_4}{\partial Z}\right)^0 \end{vmatrix} \quad \text{สมการ 4-10}$$

สำหรับ model matrix A อาจใช้ numerical differential หรือใช้วิธีการหาอนุพันธ์ของ model matrix A สำหรับแต่ member ของ A ก็ได้

หากใช้วิธีเชิงเลข (numerical method) อย่างง่ายทำได้ดังนี้

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x} \approx \frac{dF(x)}{dx} \approx \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} \quad \text{สมการ 4-11}$$

แต่อย่างไรก็ตามต้องระวังการเลือกใช้ Δx จะต้องไม่ใหญ่เกินไปจนทำให้ความละเอียดถูกต้องของผลคำตอบไม่พอ หรือเล็กเกินไป จนหาคำตอบไม่ได้ หรือสภาวะทางเชิงเลขไม่เสถียร ความไม่เสถียรต้องกล่าวเกิดจากตัวหารมีค่าน้อยมาก จนใกล้ศูนย์

4) คำตอบ

จากนั้นทำการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธี Least square

$$\begin{aligned} l &= L - L^0 && : \text{shortend observation vector} \\ N &= A^t A \\ n &= A^t l \\ x &= N^{-1} n \\ X^1 &= X^0 + x \end{aligned} \quad \text{สมการ 4-12}$$

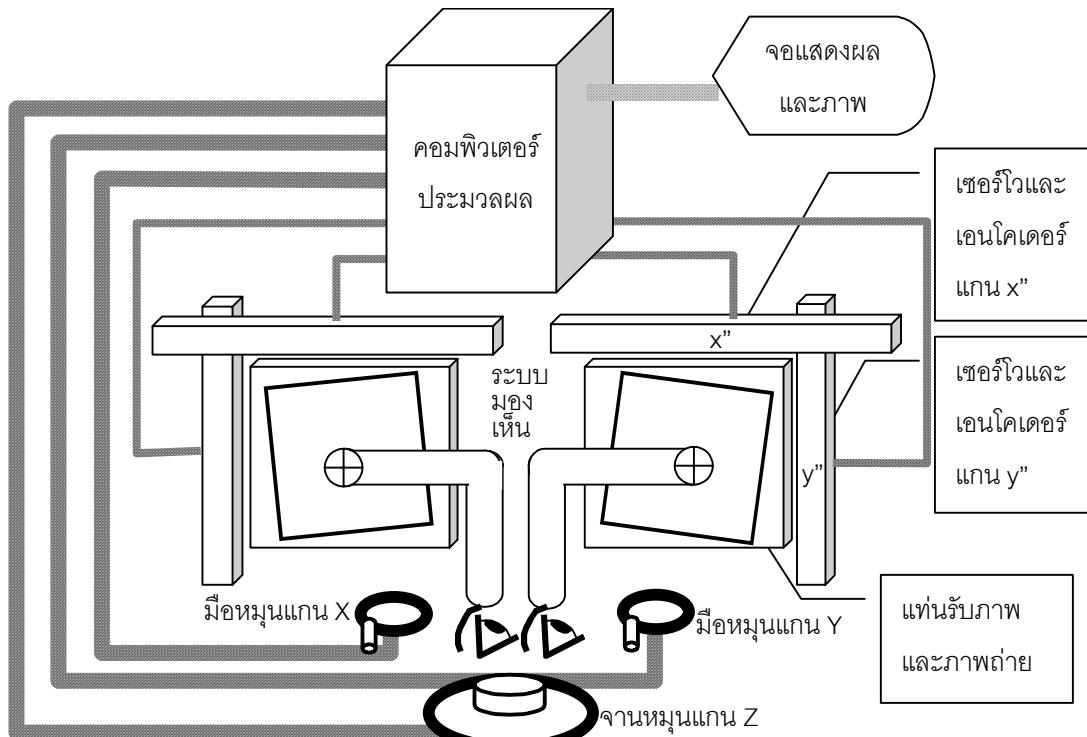
จากนั้นคำนวณหา Unknown โดยการวนซ้ำ จนกว่าทั้ง

$$|X^{i+1} - X^i| \leq \varepsilon \quad \text{สมการ 4-13}$$

ก็จะได้คำตอบคือค่าภาพพิกัดวัตถุ $P(X, Y, Z)$ ของภาพที่กำลังพิจารณาจากเวกเตอร์ X รอบสุดท้ายของ การคำนวณ

4.5 หลักการของเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์

หน้าที่หลักของเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ (Analytical Stereoplotter) คือเครื่องมือชนิดเครื่องกลไก ละเอียดและไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการรังวัดบนคู่ภาพสามมิติเพื่อให้ได้พิกัดวัตถุในมิติทั้งสาม โดยการรังวัด มีกระบวนการรวมของเห็นสามมิติ การวัดจุดพิกัดในสามมิติ การเลื่อนพิกัดในแบบจำลองไปในทิศทางต่างๆพร้อมๆ กับการเดือน “แท่นรับภาพ” ของภาพคู่สามมิติข้างละภาพคู่สามมิติข้ามอย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งโดยหลักการ สามารถอธิบายได้ดังภาพ



รูปภาพ 4-14 หลักการทำงานของเครื่องเขียนแผนที่สามมิติเชิงวิเคราะห์

จากภาพจะเห็นว่าเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ประกอบด้วย “แท่นวางภาพ (Photo Stage)” ซึ่งเป็น กระจากรไสเนื้อดี ความผิดเพี้ยนต่ำ ติดตั้งให้ทำงานสัมพันธ์กับชุดขั้บเคลื่อนที่ประกอบด้วยเซอร์โว(Servo) และ เอนโคเดอร์(Encoder)ทำให้แท่นวางภาพสามารถเคลื่อนที่ไปมาในระนาบทั้งสองแกนโดยการควบคุมจาก คอมพิวเตอร์ได้ ได้หรือบนแท่นรับภาพจะมีจุดสองส่วนที่ทำให้ภาพปรากฏแก่สายตาของผู้ปฏิบัติงานได้โดย อาศัย “ระบบมองดู (Viewing System)” เนื่องจากภาพที่ใช้จะเป็นภาพที่ปรับเปลี่ยนได้อาพอยซิติฟ ภาพที่ปรากฏ จะหักเหเข้าสูงตามผู้ปฏิบัติโดยปรัชีนและเลนส์ต่างๆที่ประกอบกันเป็นระบบมองดู

ที่จุดศูนย์ของระบบมองดูทั้งสองจะมีจุดที่ใช้เป็นเครื่องหมายในการวัด ซึ่งสำหรับการมองเห็นในสาม มิตินี้เรียกว่า จุดลอย (floating mark) การเคลื่อนไหวของแท่นรับภาพทั้งสองจะสามารถกำหนดได้จาก คอมพิวเตอร์ และค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่จุดลอยปรากฏอยู่บนภาพจะเป็นค่าลักษณะ (x', y') และ (x'', y'') ซึ่ง จะถูกส่งผ่านเข้าไปในคอมพิวเตอร์ควบคุม

ที่ผู้ปฏิบัติจะมีอุปกรณ์เอนโคเดอร์ที่เป็นชนิดหมุน (Rotary Encoder) สามตัว rotate เป็นอุปกรณ์เชิง ทัศน์-อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนการหมุนเป็นรหัสเชิงเลขได้



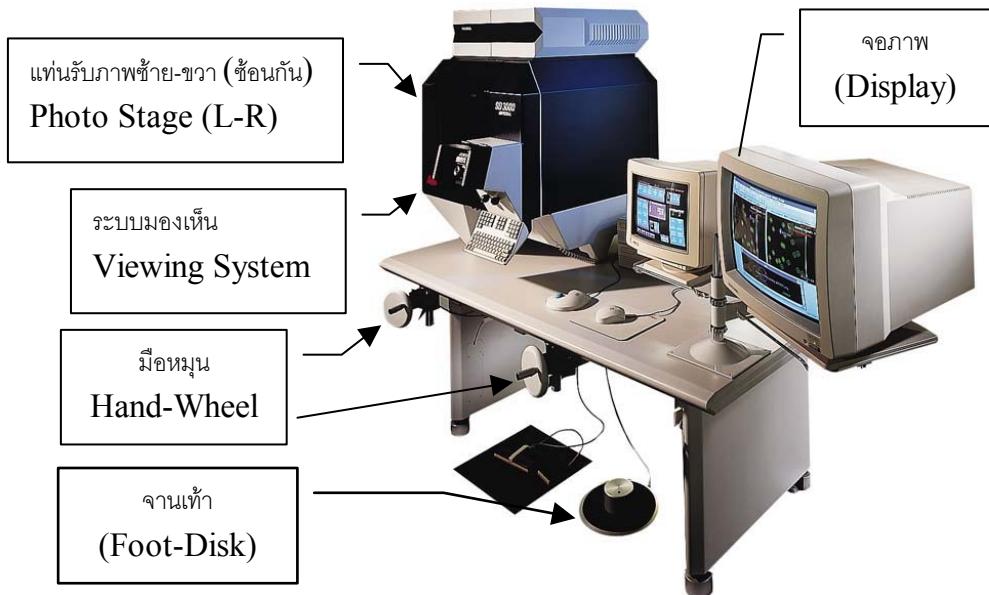
รูปภาพ 4-15 แสดงเอนโคดเดอร์ชั้นดีมุนโดย Haidenhain (<http://www.haidenhain.com>)

ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถที่จะบังคับจุดโดยให้เคลื่อนที่ไปในอากาศ โดยการหมุนเอนโคดเดอร์ X และ Y ซึ่งถูกสร้างให้อยู่ในรูปของ “มือหมุน (Hand-wheel)” ติดตั้งในระดับที่ความสูงเดียวกับโต๊ะทำงานให้ผู้ปฏิบัติสามารถใช้มือซ้ายและมือขวาจับและหมุนได้สะดวก ส่วนเอนโคดเดอร์สำหรับการบังคับจุดโดยในอากาศ ในทิศทางตั้งคือ Z ถูกสร้างให้อยู่ในรูปของ “จานเท้า (Foot-disk)” วางอยู่บนพื้น ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะใช้เท้าในการบังคับงานเท้าให้หมุนไปมาในทิศทางที่ให้จุดโดยให้ขึ้นลงไปตามภูมิประเทศในแบบจำลอง โดยการที่คอมพิวเตอร์นำเอาสัญญาณไฟฟ้าจากงานเท้าไปประมวลผลแล้วไปยังแท่นรับภาพทั้งสองอย่างเป็นระบบ จึงทำให้ผู้ปฏิบัติงานมองเห็นจุดโดยขึ้นลงดังกล่าว

ในการรังวัดจุดบนภูมิประเทศจะเริ่มต้นจากการที่วัดค่าพิกัดของจุดดัชนีของภาพเพื่อใช้ทำการจัดวางภายใน (Interior Orientation) แล้วผู้ปฏิบัติทำการบังคับจุดโดยให้ไปตามภูมิประเทศตามที่ต้องการ โดยการทำงานประสานร่วมกันระหว่างค่าพิกัดภาพคู่สามมิติซ้าย(x',y')และขวา(x'',y'') ค่าพิกัดในแบบจำลองที่ผู้ปฏิบัติบังคับ (X,Y,Z) และประกอบกับการที่ค่าการจัดวางภาพภายนอกทราบแล้วของภาพทั้งสอง ค่าการจัดวางภาพภายนอกในทางปฏิบัติหมายได้จากการประมวลผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศก่อนหน้านี้แล้ว

หลังจากที่ผู้ปฏิบัติงานได้สั่งคำสั่งให้คอมพิวเตอร์คำนวณผลลัพธ์ค่าพิกัดของวัตถุที่วัดได้ ค่าพิกัดก็จะถูกนำมาแสดงผลบนจอภาพเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับทราบและตรวจสอบความถูกต้อง ในอีกทางหนึ่งค่าพิกัดวัตถุถูกบันทึกลงบนหน่วยความจำคอมพิวเตอร์เพื่อจัดเก็บไว้ประมวลผลต่อไป

ในภาพต่อไปเป็นตัวอย่างของเครื่องเขียนแผนที่สามมิติเชิงวิเคราะห์ที่พัฒนาล่าสุด ผลิตโดย Leica-Helava SystemGroup Inc. รุ่น SD-3000



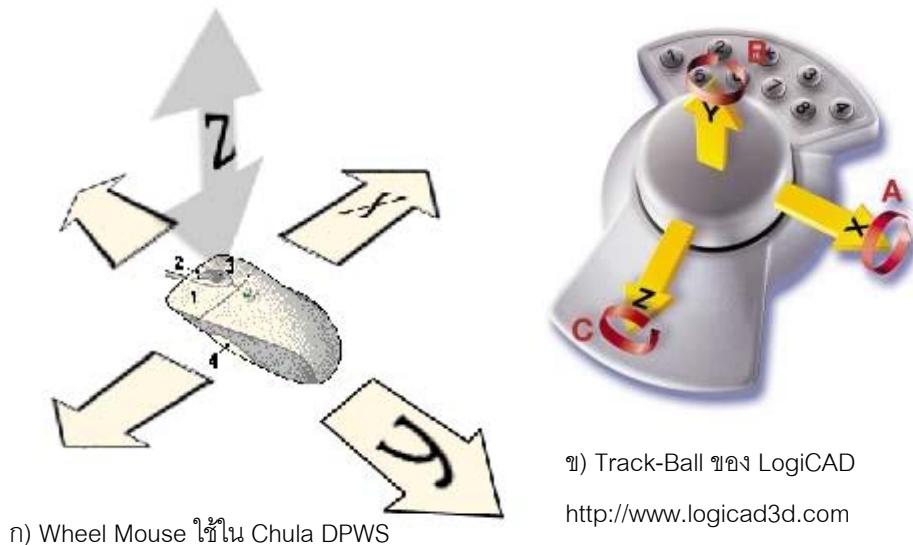
รูปภาพ 4-16 เครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ Leica SD-3000

4.6 หลักการของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล (**Digital Stereoplotter**)

เครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัลจะเป็นส่วนหนึ่งของ Digital Photogrammetric Workstation (DPWS) ที่ทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลพิกัดสามมิติจากภาพคู่สามมิติ หลักการของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัลจะมีหลักการเดียวกันกับเครื่องเขียนแผนที่สามมิติเชิงวิเคราะห์ แต่มีความแตกต่างที่ใช้ภาพดิจิทัลและใช้คอมพิวเตอร์กราฟฟิกในการแสดงผลภาพหน้าจอ ในการมองเห็นสามมิติก็จะใช้ เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติ (Stereoscopic Viewing System) ซึ่งจะเป็นคุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น แว่นสลับภาพ (Shuttle-glasses) หรือ จอภาพโพลาไรซ์ (Polarized Screen) ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในลำดับถัดไป ด้วยความสามารถของ Graphical User Interface (GUI) ทำหน้าที่แสดงภาพ ย่อและขยาย ตลอดจนขยับภาพไปมาบนจอภาพ

ผู้ผลิตซอฟต์แวร์สำหรับงานสำรวจด้วยภาพดิจิทัลบางผู้ผลิต ยังมีแนวความคิดในการใช้=enโคดเดอร์ฯ นิดหมุนเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานเคลื่อนที่จุดโดยไปตามจุดต่างๆบนภาพได้สะดวกและอย่างคุ้นเคย สำหรับการใช้งานที่ไม่ใช้การผลิตแผนที่บิรามนมาก ก็อาจออกแบบให้ใช้คุปกรณ์ง่ายๆที่ใช้กับคอมพิวเตอร์อยู่แล้ว เช่น วีลเม้าส์ (Wheel-mouse) หรือ แทรคบล็อก (Trackball) ซึ่งจะถูกโปรแกรมให้การเคลื่อนที่บนหน้าจอให้เป็นเป็นการเคลื่อนที่ X-Y ส่วนการหมุนวีล (Wheel) ให้สมพันธ์กับค่าพิกัดวัตถุ Z

วีลเม้าส์และแทรคบอลล์มีลักษณะการทำงานดังภาพ



รูปภาพ 4-17 แสดงอุปกรณ์ชี้ (Point Device) ที่สามารถนำมาใช้ในระบบรังวัดด้วยภาพดิจิทัลได้

สำหรับการปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพมากกว่า มีการออกแบบและผลิตอุปกรณ์เสริมสำหรับการรังวัดพิกัดในสามมิติ ต้องการความคล่องแคล่ว ต้องช่วยลดความเห็นด้วยตาในการรังวัด มีฟังก์ชันของการรังวัดที่จำเป็นสำหรับการรังวัดด้วยภาพดิจิทัล ตัวอย่างของอุปกรณ์ดังกล่าวได้แก่ Topomouse โดยบริษัท Leica Geosystems



รูปภาพ 4-18 แสดงอุปกรณ์สำหรับช่วยการรังวัดในสามมิติ ก) โดย Leica Geosystems ข) โดย immersion

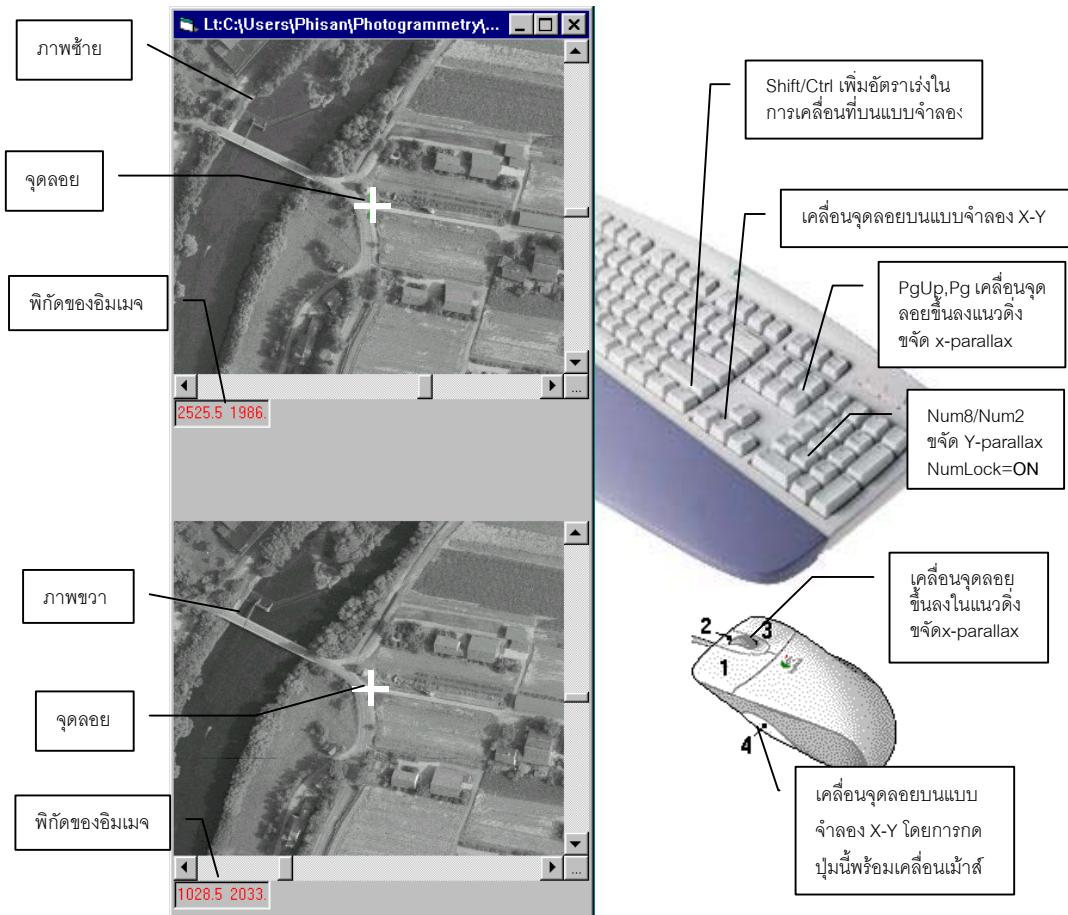
ที่ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจได้มีการศึกษาวิจัยในการสร้างระบบตั้นแบบเรียกชื่อว่า Chulalongkorn Digital Photogrammetric Workstation (Chula-DPWS) ซึ่งประกอบด้วยซอฟต์แวร์เขียนข้อภาษา Visual Basic และ C/C++ ระบบสามารถที่จะแสดงภาพคู่สามมิติบนจอภาพ ทำงานร่วมกับแต่น้ำหนักเทิดกลาง “Eye3D” โดย I-Art Corporation การทำงานของ Chula-DPWS ทำงานในโมดูลของการแบ่งจอดูจีบัน-ล่าง ซอฟต์แวร์วิ่งอยู่บนระบบปฏิบัติการ Microsoft Window 95/98/NT ซึ่งหากว่าระบบปฏิบัติใช้ Microsoft Window 98 สนับสนุนการทำงานในโมดูล Dual-Screen จะทำให้ทำงานสะดวกขึ้น เนื่องจากการทำงานในโหมด Dual-Screen สามารถแยกการแสดงผลส่วนที่เป็นภาพสามมิติออกจากส่วนที่แสดงผลและใช้งานทั่วไปได้ ดังภาพ



รูปภาพ 4-19 องค์ประกอบของ Chula DPWS

Chula-DPWS สามารถที่จะปรับพาราแอกซ์ได้ทั้งทางแกน X และ Y โดยการใช้ปุ่มพังก์ชันต่างๆ โดยเฉพาะการปรับพาราแอกซ์ทาง X เพื่อให้จุดโดยไป “แตะ” สามผัสพื้นผิวของภูมิประเทศในแบบจำลอง สามารถใช้วีลเม้าส์ได้สะดวก ขณะนี้ผลการวิจัยพัฒนาอยู่ในขั้นที่ผู้ปฏิบัติสามารถวัดพิกัดของวัตถุบนภาพคู่สามมิติในรูปของค่าพิกัดเครื่องมือและนำผลการวัดวัดไปคำนวนค่าพิกัดวัตถุกับชุดซอฟต์แวร์ “Resect” และ “Intersect” ซึ่งเป็นโมดูลย่อยของ Chula-DPWS

ในภาพข้างล่างแสดงให้เห็นหน้าจอของ Chula-DPWS และการใช้งานโดยการใช้ฟังก์ชันคีย์ต่างๆ



รูปภาพ 4-20 โปรแกรมช่วยจัดภาพและวัดในสามมิติใน Chula-DPWS และการใช้งาน

4.7 อัลกอริธึมของเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์

เมื่อมีภาพคู่สามมิติดตั้งบนเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์หรือเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัลโดยการนำภาพขึ้นมาแสดงผลบนหน้าจอ เมื่อเริ่มต้นภาพคู่สามมิติจะมีพารามิเตอร์ของการจัดวางตัวภายใน (interior orientation) และการจัดวางตัวภาพภายนอก (exterior orientation) ดังที่กล่าวมาแล้วในการรังวัดด้วยภาพพื้นฐานก่อนหน้านี้

เมื่อผู้รังวัดต้องการที่จะวัดจุดใดบนภูมิประเทศจะอาศัยการมองเห็นสามมิติของภูมิประเทศที่เกิดจากส่วนข้อมูลของภาพคู่สามมิติและจุดโดยที่เคลื่อนที่ไปบนหรือเหนือภูมิประเทศจำลอง ผู้ทำการรังวัดสามารถบังคับจุดโดยและการเคลื่อนที่บนแบบจำลอง ทำการหมุนเอนโคเดอร์ในรูปของมือหมุน (Hand-wheel) ข้ายและขวาเพื่อเปลี่ยนแปลงพิกัดทางราบตามแกน X และ Y พัฒนากับการหมุนเอนโคเดอร์ในรูปของจานเท้า(Foot-disk) สำหรับเลื่อนจุดโดยขึ้นลงจนกว่าทั้ง จุดโดยลงไป "แตะ" ภูมิประเทศ และในปัจจุบันมีการใช้เมาส์ชนิดมีล้อหมุนหรือที่เรียกว่า วีลเม้าส์ (wheel mouse) กับคอมพิวเตอร์อย่างแพร่หลาย จึงมีการตัดแปลงฟังก์ชันของการหมุนของล้อดังกล่าวให้สัมพันธ์กับการประมวลผลจุดโดยสูงขึ้นหรือต่ำลงในแบบจำลองสามมิติ ส่วนการเคลื่อนที่ของเมาส์ในแนวราบก็สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่จุดโดยในแนวราบบนภูมิประเทศ การเคลื่อนที่จะประมวลผลแก่สายตาผู้ที่ทำการรังวัดเสมือนว่าสามารถบังคับจุดโดยให้เคลื่อนที่ไปในภูมิประเทศได้ ความสัมพันธ์และการบังคับของจุดโดย ภาพคู่สามมิติ ให้ประมวลผลแก่สายตาผู้รังวัด การเคลื่อนไหวและความสัมพันธ์ดังกล่าวทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ในกระบวนการสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่องค์ประกอบต่างๆ และการคำนวณได้ดังนี้

4.7.1 เมื่อเริ่มต้น

ทั้งภาพข้ายและขวาได้ทำการวางแผนภัยในไปแล้ว โดยการวัดพิกัดของจุดดังนี้แล้วเทียบกับพิกัดของดัชนีที่ควรจะเป็น ทำการหาความสัมพันธ์ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้ affine transformation โดยที่ทั้งภาพข้ายและภาพขวาจะมีค่าพารามิเตอร์อย่างละหนึ่งชุดแยกอิสระต่อกัน โดยกำหนดให้พารามิเตอร์มีดังนี้

ภาพคู่สามมิติ	ค่าพารามิเตอร์การวางแผนตัวภัยใน	ค่าพารามิเตอร์การวางแผนตัวภัยนอก
ภาพข้าย	$a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$	$X0_1, Y0_1, Z0_1, \varpi_1, \varphi_1, \kappa_1$
ภาพขวา	$a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$	$X0_2, Y0_2, Z0_2, \varpi_2, \varphi_2, \kappa_2$

ส่วนค่าพิกัดของจุดที่ต้องการหาค่าพิกัดวัดถูกัดได้เป็นพิกัดเครื่องมือ (ξ_1, η_1) สำหรับภาพข้ายและ (ξ_2, η_2) สำหรับในภาพขวาซึ่งในเบื้องต้นนี้ให้ค่าพิกัดเป็นพิกัดเครื่องมือวัดซึ่งอาจเป็นพิกัดของแท่นรับภาพในเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์หรือพิกัดบนภาพดิจิทัล

4.7.2 สิ่งที่ต้องคำนวณหา

สิ่งที่ต้องการคำนวณหาคือค่าพิกัดของวัตถุที่ โดยที่อาศัยสายตาในการวางแผนภาพข้ายและภาพขวา โดยการบังคับแท่นรับภาพข้ายและขวาไปพร้อมๆ กัน จนท้ายที่จะเห็นจุด จุดโดยลงไปแตะภูมิประเทศบนภาพทั้งสอง จากนั้นซอฟต์แวร์จะทำการคำนวณค่าพิกัดของวัตถุ $P(X, Y, Z)$ ได้

4.7.3 ขั้นตอนการทำงาน Solution:

การคำนวนหาມีขั้นตอนดังนี้

1) สมมุติค่าความสูง

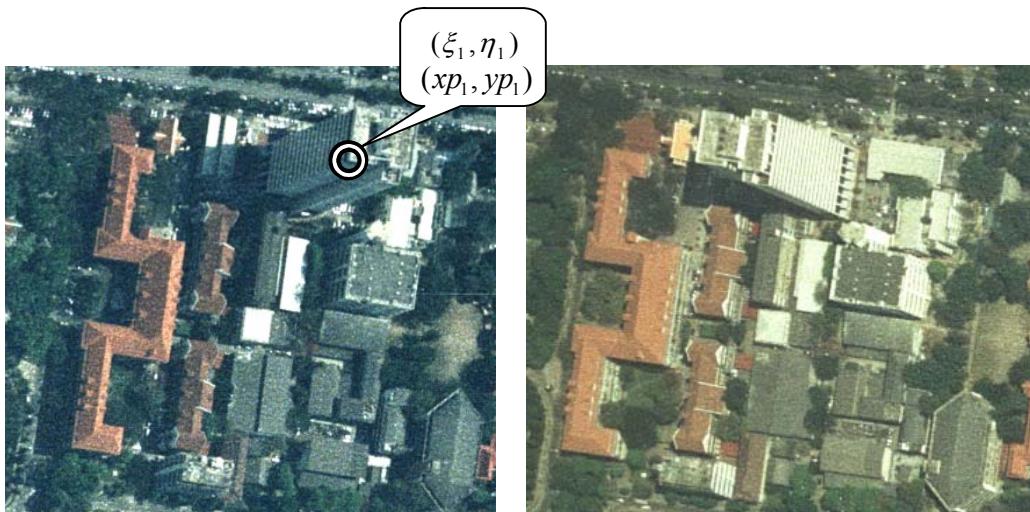
เมื่อเริ่มต้นซอฟต์แวร์จะทำการสุมค่าความสูงของจุดที่รังวัดปัจจุบันเสียก่อนหรืออาจจะใช้ค่าระดับจาก การวัดครั้งล่าสุด นั่นคือ

$$Z = \zeta \quad \text{const.}$$

สมการ 4-14

2) แปลงพิกัดเครื่องวัดให้เป็นพิกัดภาพ

ขณะที่ผู้ปฏิบัติพยายามที่จะนำจุดลงอย่างไปแตะจุดใดที่ต้องการวัดบนภาพช้าย (ξ_1, η_1) ซึ่งจะ สามารถคำนวนให้เป็นพิกัดภาพถ่าย เช่นมุมของอาคารสูงดังภาพ



รูปภาพ 4-21 แสดงตำแหน่งที่ต้องการวัดบนภาพช้าย

เนื่องจากทราบความสัมพันธ์การจัดวางภาพภายใน จะคำนวนพิกัดภาพได้ดังนี้

$$xp_1 = a_1 \cdot \xi + b_1 \cdot \eta + c_1 \quad \text{สมการ 4-15}$$

$$yp_1 = d_1 \cdot \xi + e_1 \cdot \eta + f_1 \quad \text{สมการ 4-16}$$

ค่าพิกัดภาพของวัตถุที่ต้องการรังวัดขณะนี้เป็น (xp_1, yp_1) จะถูกนำไปใช้กับสมการสภาวะร่วมเดิน เพื่อคำนวนหาค่าพิกัดของมุมอาคารสูง $P(X, Y, Z)$ ต่อไป

3) คำนวนพิกัดวัตถุ $P(X, Y, Z)$ จากภาพช้าย

เมื่อพิจารณาภาพช้าย เมื่อมีค่าการวางตัวภาพนอก $X0_1, Y0_1, Z0_1, \varpi_1, \varphi_1, \kappa_1$ และค่าพิกัดภาพ (xp_1, yp_1) พร้อมกับค่าความสูงประมาณที่ได้ขณะนี้คือ $Z = \zeta$ จะสามารถคำนวนพิกัดวัตถุ $P(X, Y, Z)$ จากความสัมพันธ์ Colinearity Equation

$$X = X0_1 + (Z0_1 - \zeta) \left(\frac{a11_1 \cdot xp_1 + a12_1 \cdot yp_1 + a31_1 \cdot (-f)}{a31_1 \cdot xp_{\hat{a}} + a32_1 \cdot yp_{\hat{a}} + a33_1 \cdot (-f)} \right) \quad \text{สมการ 4-17}$$

$$Y = Y0_1 + (Z0_1 - \zeta) \left(\frac{a21_1 \cdot xp_{\hat{a}} + a22_1 \cdot yp_{\hat{a}} + a23_1 \cdot (-f)}{a31_1 \cdot xp_{\hat{a}} + a32_1 \cdot yp_{\hat{a}} + a33_1 \cdot (-f)} \right) \quad \text{สมการ 4-18}$$

$$Z = \zeta \quad \text{สมการ 4-19}$$

โดยที่ $a11_1, a12_1, a13_1, a21_1, a22_1, a23_1, a31_1, a32_1, a33_1$ คือสมาชิกของเมตริกซ์ของการหมุนที่เป็นพังค์ชันของ $\varpi_1, \varphi_1, \kappa_1$ และ f คือความยาวไฟกัสของกล้อง

4) คำนวณค่าพิกัดภาพ (xp_2, yp_2) บนภาพขาว

ค่าพิกัดภาพ (xp_2, yp_2) บนภาพขาวสามารถคำนวณได้จากการสภาวะร่วมเส้นโดยเมื่อมี

$$xp_2 = (-f) \cdot \left(\frac{a11_2 \cdot (X - X0_2) + a21_2 \cdot (Y - Y0_2) + a31_2 \cdot (Z - Z0_2)}{a13_2 \cdot (X - X0_2) + a23_2 \cdot (Y - Y0_2) + a33_2 \cdot (Z - Z0_2)} \right) \quad \text{สมการ 4-20}$$

$$yp_2 = (-f) \cdot \left(\frac{a12_2 \cdot (X - X0_2) + a23_2 \cdot (Y - Y0_2) + a32_2 \cdot (Z - Z0_2)}{a13_2 \cdot (X - X0_2) + a23_2 \cdot (Y - Y0_2) + a33_2 \cdot (Z - Z0_2)} \right) \quad \text{สมการ 4-21}$$

โดยที่ $a11_2, a12_2, a13_2, a21_2, a22_2, a23_2, a31_2, a32_2, a33_2$ คือสมาชิกของเมตริกซ์ของการหมุนที่เป็นพังค์ชันของ $\varpi_2, \varphi_2, \kappa_2$ และ f คือความยาวไฟกัสของกล้อง

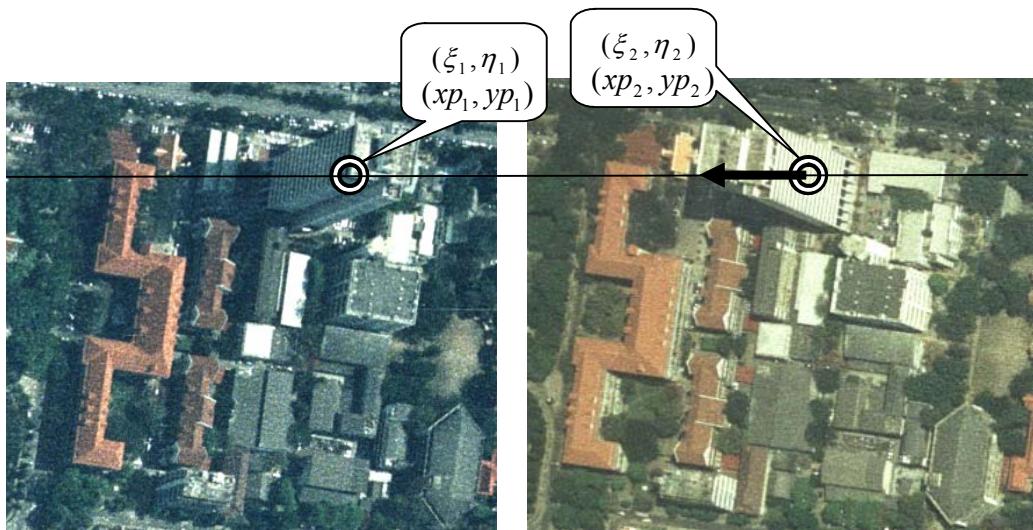
5) คำนวณค่าพิกัดเครื่องมือ (ξ_2, η_2) จากค่าพิกัดภาพ (xp_2, yp_2) บนภาพขาว

คำนวณค่าพิกัดเครื่องมือ (ξ_2, η_2) บนภาพขาวจากพิกัดภาพ (xp_1, yp_1) โดยการใช้ค่าการจัดวางภาพภายใน การแปลงไปข้างหน้าเป็น $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การแปลงกลับที่สอดคล้องกัน เป็น $a'_2, b'_2, c'_2, d'_2, e'_2, f'_2$

ดังนั้นค่าพิกัดเครื่องมือของจุดบนภาพขาวคำนวณได้จาก

$$\xi_2 = a'_2 \cdot xp_2 + b'_2 \cdot yp_2 + c'_2 \quad \text{สมการ 4-22}$$

$$\eta_2 = d'_2 \cdot xp_2 + e'_2 \cdot yp_2 + f'_2 \quad \text{สมการ 4-23}$$



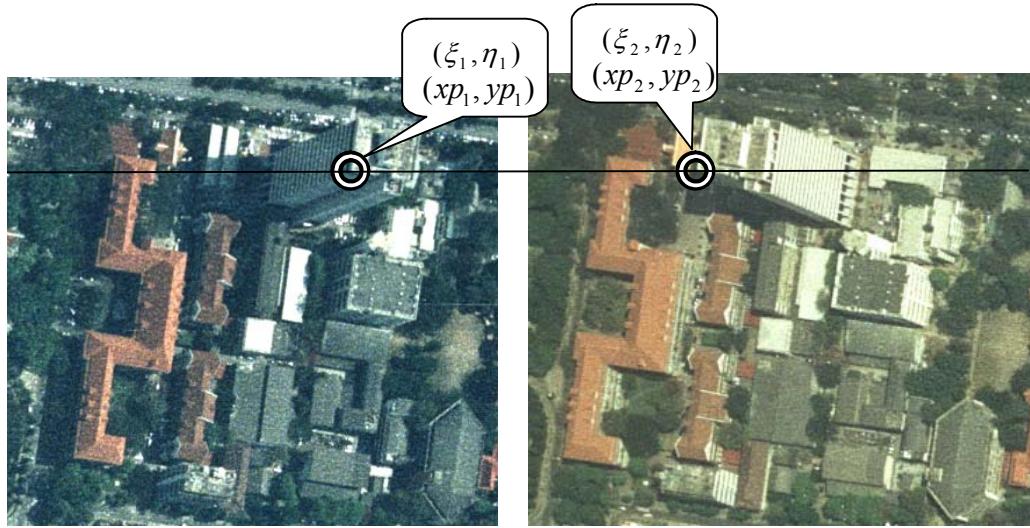
รูปภาพ 4-22 แสดงตำแหน่งที่ต้องการวัดบนภาพขาวที่ได้จากการคำนวณ แต่อากาศเคลื่อน ด้วยความสูงสมมุติ $Z = \zeta$

6) การปรับเปลี่ยนและขับแท่นรับภาพขาว

เมื่อได้ค่าพิกัดภาพที่ควรจะเป็นสำหรับภาพขาว (ξ_2, η_2) คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบังคับหรือคอมพิวเตอร์กราฟฟิกส์จะขับแท่นรับภาพขาวจนกว่าทั้งพิกัด (ξ_2, η_2) เข้ามาอยู่ใกล้กันในภาระของเห็น นั่นคือจุดอยหรือจุดวัดสำหรับภาพขาวมีอี

7) ทำการวนซ้ำ

เนื่องจากในเบื้องต้นเป็นสมมุติความความความสูงของจุด P ให้เป็น $Z = \zeta \text{ const.}$ จึงต้องมีการวนซ้ำของการพยายามลงจุดวัดให้แต่ภูมิประเทศที่จุด P ซึ่งโดยการเปลี่ยนค่าระดับของจุด P โดยที่ผู้ปฏิบัติมีความสังเกตว่าเมื่อปรับค่าระดับ Z ไปในทิศทางใด จุดอยจะลงไปแต่ภูมิประเทศใกล้ขึ้นไปเรื่อยๆ การคำนวณที่กล่าวมาเบื้องต้นก็จะเกิดซ้ำ



รูปภาพ 4-23 แสดงตำแหน่งที่ต้องการวัดบนภาพขาวที่ได้จากการคำนวณ และได้ปรับความสูงขึ้น ตามที่ปรากฏแก้ไขตาม

เมื่อผู้วัดรู้สึกว่าจุดด้อยแตะที่ภูมิประเทศพอดี ค่าพิกัดเครื่องมือ (ξ_1, η_1) สำหรับภาพช้ายและ (ξ_2, η_2) สำหรับในภาพขาว ที่ได้สุดท้ายนี้สามารถนำไปคำนวนหาพิกัดภาพด้วยค่าพารามิเตอร์การวางแผนตัวภาพในและค่าพิกัดของวัตถุที่ถูกต้องระบบพิกัดภาพพื้นดินโดยค่าพารามิเตอร์การวางแผนตัวภาพนอกของภาพช้าย และข่าวด้วยวิธี Two-photo Intersection เป็นต้น

4.8 อัลกอริธึมของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล

การแสดงภาพในรูปแบบสามมิติและการวัดรัศมีในแบบจำลองสามมิติเป็นหน้าที่หนึ่งของ Digital Photogrammetric Workstation เท่านั้น ในส่วนของการวัดบนคู่ภาพสามมิติ เมื่อมีภาพคู่สามมิติในรูปแบบดิจิทัลแสดงภาพขึ้นมาบนจอแสดงผล หลักการของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัลจะมีหลักการเดียวกันกับเครื่องเขียนแผนที่สามมิติเชิงวิเคราะห์ แต่มีความแตกต่างที่สำคัญคือการวัดค่าพิกัดบนภาพในเบื้องต้นจะได้พิกัดเครื่องมือวัดที่มีหน่วยเป็น จุดภาพ (Pixel) ในเชิงการวัดบนภาพดิจิทัลสามารถที่จะวัดได้เล็กกว่าจุดภาพ (sub-pixel) นอกจากนั้นความละเอียดของภาพดิจิทัลขึ้นอยู่กับวิธีการที่สแกนมาด้วย ถ้าเป็นภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนมาด้วย “สแกนเนอร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพ” สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องถึง “หนึ่งในสามของจุดภาพ” และโดยทั่วไป จะสแกนภาพถ่ายทางอากาศที่ความละเอียดจุดภาพ 10-30 ไมครอน และในการขั้นตอนการวัดค่าพิกัดสามมิติบนเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัลควรขยายภาพให้ใหญ่พอที่จะวัดได้ละเอียดกว่าจุดภาพ ในขั้นตอนการคำนวนซึ่งจะมีการหาองค์ประกอบของการจัดภาพภาพใน ก็จะทำมีค่าสัมประสิทธิ์การแปลงค่าพิกัดทำให้ค่าพิกัดที่วัดได้เป็นจุดภาพสามารถคำนวนกลับเป็นค่าพิกัดของจุดภาพที่จะวัดมีหน่วยเป็นหน่วยการวัดปกติได้ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในอัลกอริธึมของเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล

4.9 การเปรียบเทียบเครื่องเขียนแผนที่

ดังนั้นในตารางต่อไปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบที่ต่างๆระหว่างองค์ประกอบในเครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์และเครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล

หน้าที่หรือ องค์ประกอบที่ใช้	เครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์	เครื่องเขียนแผนที่ดิจิทัล
ภาพคู่สามมิติ	ภาพไดอาพอชีต์ฟิล์ม	ภาพดิจิทัล
แท่นรับภาพ	กระจากใส	Graphical User Interface
การวัดค่าพิกัด	เอนโคดเดอร์ ละ เอียง ดู ก ต้องถึง ไมโครเมตร	ซอฟต์แวร์ เคอร์เซอร์ ปรับเปลี่ยนได้
ความละเอียด ถูกต้อง	ขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องของกล้อง และอุปกรณ์เชิงทัศน์ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ใน ระดับต่ำกว่า 5 ไมครอน	ขึ้นอยู่กับความละเอียดของภาพดิจิทัล ถ้า เป็นภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนมาด้วย “สแกนเนอร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพ” สามารถวัดได้ละเอียดถูกต้องถึง “หนึ่งใน สามของจุดภาพ” โดยทั่วไป จะสแกนภาพถ่ายทางอากาศที่ ความละเอียดจุดภาพ 10-30 ไมครอน
หน่วยของค่าพิกัด	ไมครอน	จุดภาพ (pixel) แต่สามารถวัดได้เล็กกว่า จุดภาพ (sub-pixel)
การเลื่อนภาพ	เซอร์โวขับเคลื่อนทำงานประสานกับเอน โคดเดอร์	สโคลบาร์ (Scroll Bar) หรือพังก์ชันคีย์ ต่างๆ สามารถโปรแกรมได้
ระบบการมองเห็น สามมิติ	ไฟสองสว่าง ปริซึม และเลนส์ พร้อมกล้อง ^{ไก} การย่อ-ขยาย	แวนชัทเทิลทำงานประสานกับกราฟฟิกส์ การ์ด
พิกัดของวัตถุที่ได้	-จัดเก็บลงในคอมพิวเตอร์ -แสดงผลบนจอ -ต่อตัวร่องรอยลงบนโน๊ตบุ๊คเขียนแผนที่ -ต่อเข้าซอฟต์แวร์อื่นๆ ได้บ้างแต่จำกัด เนื่องจากเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำได้ยุ่งยาก	-จัดเก็บลงในคอมพิวเตอร์ -แสดงผลบนจอ -ติดต่อเข้ากับซอฟต์แวร์สารสนเทศ ภูมิศาสตร์ (GIS) หรือซอฟต์แวร์ช่วยเขียน แบบ (CAD) ในอย่างดี เนื่องจากเป็นการ สื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ ด้วยกัน
พื้นที่ที่ต้องการใช้	ต้องมีพื้นที่กว้างพอสมควร 3-5 ตาราง เมตร สำหรับเครื่องมือที่เป็นกลไกวัด ละเอียด ไวต่อสิ่งแวดล้อม	ให้ทำงานสำหรับคอมพิวเตอร์กราฟฟิกส์ และภาพขนาดใหญ่ 15-21 นิ้วเพื่อความ สะดวก
ราคา	ราคางบประมาณที่ต้องการคือ 3-5 หมื่นบาท รวมค่าเครื่องเขียน ไม้ปากกา กระดาษ และอุปกรณ์ต่างๆ	ราคางบประมาณตามความต้องการของผู้ใช้ โดยทั่วไปเป็นมูลค่าของซอฟต์แวร์อย่าง เดียว

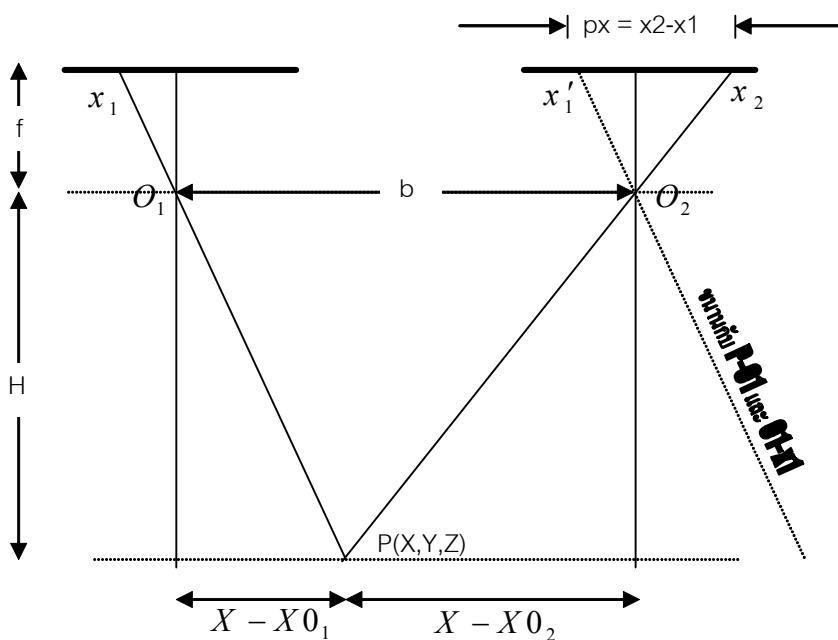
ตาราง 4-1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเครื่องเขียนแผนที่

4.10 ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาพคู่สามมิติ

ความละเอียดของการวัดคุณภาพคู่สามมิติสามารถหาได้จากการหลักของการแพร์เซนต์ของความผิดพลาด โดยจะเป็นการวิเคราะห์หาความละเอียดถูกต้องของตัวไม่ทราบค่า $P(X,Y,Z)$ ในปัญหา Two-photo Intersection เป็นวิธี โดยที่ค่าการจัดวางตัวภายนอก (Exterior Orientation Parameters) ของภาพทั้งสองต้องทราบมาก่อนให้เป็นค่าคงคี่ ค่าพิกัดภาพถ่ายที่วัดได้จากภาพทั้งสองก็จะใช้ค่าสังเกตโดยให้มีความความละเอียดถูกต้องอยู่รูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อคำนวนไปสู่ค่าน้ำหนักในระบบสมการของ การแก้ปัญหาด้วยกำลังสองน้อยที่สุด ความละเอียดถูกต้องของค่าการจัดวางตัวภายนอกของภาพคู่สามมิติอาจได้มาจากการคำนวนปรับแก้ก่อนหน้านี้ ดังนั้นจะอยู่ในรูปของ Variance-Covariance Matrix ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอนข้างบุ่งยาก และในความเป็นจริงเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ก็มีสภาวะของระบบที่ไม่ตรงกับข้อเท็จจริง

4.10.1 การวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องจากการภาพถ่ายดึงในอุดมคติ

วิธีนี้ของการวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาพคู่สามมิติที่สะดาวรและพอเพียง ต่อการใช้งานคือการวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องโดยประมาณจากภาพถ่ายดึงในอุดมคติ และให้แกนพิกัดภาพถ่ายของภาพคู่สามมิติทั้งสองจัดวางในลักษณะให้แกน x ขนานกับแกน X ของระบบพิกัดวัตถุ ดังนั้นจะทำให้การวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดวัตถุที่ได้เป็นดังนี้



รูปภาพ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดวัตถุและพิกัดภาพบนภาพถ่ายดึงในอุดมคติ

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม O_1O_2P จะได้ว่า

$$\frac{X - X0_1}{x_1} = \frac{H}{f} \quad \text{สมการ 4-24}$$

ทำการยกข้างตัวแปรต่างๆเพื่อหาค่า X

$$X = X_0 + \frac{H}{f} \cdot x_1 \quad \text{สมการ 4-25}$$

ทำการติดไฟเรนทิโอด X เทียบกับ x_1

$$dX = \frac{H}{f} \cdot dx_1 \quad \text{สมการ 4-26}$$

ถ้าค่าความละเอียดถูกต้องของ การวัดค่าพิกัดภาพทางแกน x เป็น σ_x จะหาค่าความละเอียดถูกต้องของพิกัดวัตถุทางแกน $X \sigma_X$ โดย

$$\sigma_X = \frac{H}{f} \sigma_{x1} \quad \text{สมการ 4-27}$$

เช่นเดียวกัน สำหรับแกน Y แล้วทำการติดไฟเรนทิโอด จะได้ว่า

$$dY = \frac{H}{f} \cdot dy_1 \quad \text{สมการ 4-28}$$

ซึ่งถ้าค่าความละเอียดถูกต้องของ การวัดค่าพิกัดภาพทางแกน x เป็น σ_y จะหาค่าความละเอียดถูกต้อง σ_y โดย

$$\sigma_Y = \frac{H}{f} \sigma_y \quad \text{สมการ 4-29}$$

สำหรับการหาค่าความละเอียดถูกต้องทางด้านระดับสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าพาราแอกซ์ทางแกน x จะได้ว่า

$$px = x_2 - x_1 \quad \text{สมการ 4-30}$$

เมื่อ Lak เส้นช่วงที่นานกับ O_1x_1 ผ่านจุด O_2 ที่ปรากฏดังรูปให้เป็น $O_2x'_1$ โดยที่

$$x'_1 = x_1 \quad \text{สมการ 4-31}$$

จะเห็นได้ว่า สามเหลี่ยม $\Delta O_2x'_1x_2$ คล้ายกับสามเหลี่ยม ΔPO_1O_2 ดังนั้น

$$\frac{H}{b} = \frac{f}{px} \quad \text{สมการ 4-32}$$

แทนค่าพาราแอกซ์ x พร้อมกับข่าย b ไปทางด้านขวา จะได้

$$H = \frac{b \cdot f}{px} \quad \text{สมการ 4-33}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของ H เทียบกับ px

$$dH = -\frac{b \cdot f}{px^2} dpx \quad \text{สมการ 4-34}$$

px สามารถเขียนในอีกรูปแบบหนึ่งจากสมการ 4-32 ดังนี้

$$px = \frac{b \cdot f}{H} \quad \text{สมการ 4-35}$$

แทนค่า px^2 จาก px ที่ได้จากสมการ 4-35 จะได้

$$dH = -\frac{b \cdot f}{\left(\frac{b \cdot f}{H}\right)^2} dpx \quad \text{สมการ 4-36}$$

ทำให้ง่ายขึ้นเป็น

$$dH = -\frac{H^2}{b \cdot f} dpx \quad \text{สมการ 4-37}$$

ดังนั้นหากให้ความละเอียดถูกต้องของการวัดพาราแอกซ์บนภาพเป็น σ_{px} จะสามารถคำนวณหาค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดระดับเป็น σ_H โดยที่

$$\sigma_H = \frac{H^2}{b \cdot f} \sigma_{px} \quad \text{สมการ 4-38}$$

ความละเอียดถูกต้องของการวัดพาราแอกซ์ σ_{px} วิเคราะห์จากสมการของการวัดพาราแอกซ์ โดยเพื่อให้ง่ายและสอดคล้องกับความเป็นจริง ให้การวัดบนภาพมีความละเอียดถูกต้องเท่ากันทางด้านแกน x ทั้งบนภาพซ้ายและขวา นั่นคือ

$$\sigma_x = \sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} \quad \text{สมการ 4-39}$$

จะได้ค่าความถูกต้องของการวัดพาราแอกซ์จากกฎของการแพร่ของความผิดพลาด (Error Propagation Theory) และการวิเคราะห์สมการ 4-30 เป็น

$$\sigma_{px}^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 = 2 \cdot \sigma_x^2 \quad \text{สมการ 4-40}$$

จากสมการ 4-40 ดังนั้นค่าประมาณของความถูกต้องของการวัดพาราแอกซ์เป็น

$$\sigma_{px} \approx 1.4 \cdot \sigma_x \quad \text{สมการ 4-41}$$

4.10.2 การวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องจากระบบงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ

แต่อย่างไรก็ตามค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าพิกัดทางดิจินัล ในทางปฏิบัติพบว่าความละเอียดถูกต้องขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของระบบงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศโดยเฉพาะความสูงบินถ่ายภาพ

เป็นปัจจัยหลัก ทั้งนี้โดยมีสมมุติฐานที่ว่าระบบการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพทางอากาศให้ผลการรังวัดที่มีความละเอียดถูกต้องสูงสุด ระบบการบันทึกภาพและประมวลผลที่ให้ผลการรังวัดเข่นนั้นประกอบด้วยเลนส์และกลไกในการจับยึดฟิล์มให้เรียบเป็นระนาบ กระบวนการบันทึกด้วยฟิล์มและอัดล้างตลอดจนการสำเนา และขีดความสามารถในการประมวลผลที่มีการรังวัดสนามประกอบ การรังวัดบนภาพถ่ายในกระบวนการขยายจุดบังคับภาพถ่าย และท้ายที่สุดการวัดบนภาพคู่สามมิติที่ต้องอาศัยความชำนาญของผู้รังวัดในการวางแผนจุดลงส้มสัพเพื่อภูมิประเทศ

ดังนั้นจึงได้มีผู้ทำการวิจัยหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการประมาณความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดทางดึงบนแบบจำลองสามมิติ ซึ่งนำไปสู่การหาความสัมพันธ์นินิเด็บบินสูตรเอมพิริกอล (empirical formula) ดังต่อไปนี้

K.Kraus ประมาณความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าพิกัดทางดึงกรณีที่เป็นจุดให้สัญญาณ (Signalised Points) สำหรับกล้องถ่ายภาพ Normal Angle – Wide Angle เป็น

$$\sigma_H = 0.06 \% \times H \quad \text{สมการ 4-42}$$

ความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าพิกัดทางดึงสำหรับกล้องถ่ายภาพ Super Wide Angle เป็น

$$\sigma_H = 0.08 \% \times H \quad \text{สมการ 4-43}$$

สำหรับจุดทั่วไป และระบบงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นมาตรฐาน ความละเอียดถูกต้องของ การวัดค่าพิกัดทางดึงนั้นที่เด่นชัด และผู้รังวัดมีความชำนาญ สามารถประมาณได้จากความสูงบินเฉลี่ยเหนือภูมิประเทศ และเพื่อความปลอดภัยหากนำไปใช้ในการออกแบบระบบงาน อาจเลือกใช้ค่าที่ใหญ่โดยประมาณความละเอียดถูกต้องของค่าระดับที่วัดได้จากการ

$$\sigma_H = 0.15 \% \times H \quad \text{สมการ 4-44}$$

4.10.3 ความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดภาพเพื่อใช้ในการคำนวนพิกัดวัตถุ

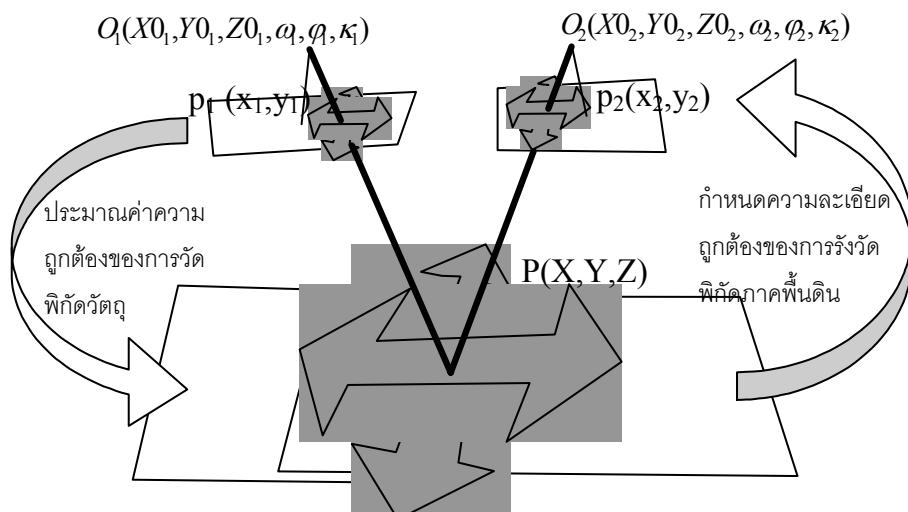
ค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาพถ่ายทางอากาศ ขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องของเครื่องมือวัดพิกัด โดยเฉพาะความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าพิกัดทั้งสองแกน σ_x ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของค่า x-parallax คุณภาพของภาพ ความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ตลอดจนลักษณะของวัตถุที่จะวัด

จากประสบการณ์และการวิจัย ในเบื้องต้นค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดของวัตถุบนภาพ แบ่งเป็นตามคุณภาพของจุดวัตถุที่พิจารณา อาจใช้ค่าดังต่อไปนี้

ประเภทของจุดที่รังวัด	ความละเอียดถูกต้องในการวัดพิกัดภาพถ่าย (ไมครอน)
จุดชนวนภาพถ่ายทางอากาศ	5-10
จุดบังคับภาพชนิดให้สัญญาณ	10
จุดที่เด่นชัดในภูมิประเทศ	10-15
รั้ว ขอบตีก รอยตัดของถนน รอยต่อของพื้นและคอนกรีต	20-30

4.10.4 การนำผลการวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องไปใช้ออกแบบระบบงาน

ความละเอียดถูกต้องสำหรับการวัดบนภาพคู่สามมิติสำหรับทั้งทางราบและทางดิ่ง นอกจากระยะที่ใช้ในการประมาณค่าความละเอียดถูกต้องที่จะคาดหวังได้จากการวัดค่าพิกัดวัตถุแล้ว ในทางกลับกันยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบว่า หากความสามารถในการรังวัดบนภาพที่ทำได้นั้นมีความละเอียดถูกต้องเป็นเท่าใด จะต้องทำการรังวัดจุดบังคับภาพพื้นดินด้วยความละเอียดเท่าใดดังภาพข้างล่างนี้



รูปภาพ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของการวัดบนภาพคู่สามมิติกับความคลาดเคลื่อนของรังวัดบนพื้นดิน

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น จึงควรขอยกตัวอย่างการคิดคำนวณเพื่อใช้ในการหาข้อสรุปความละเอียดถูกต้องของระบบและความถูกต้องของข้อมูลในการทำงานในภาคพื้นดินในการรังวัดค่าพิกัดหมุดควบคุมภาพถ่ายดังตัวอย่างดังไปนี้

ตัวอย่าง 4.10.4.1 การประมาณค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดวัตถุด้วยเรขาคณิต

ในการรังวัดบนภาพถ่ายทางอากาศที่มาตราส่วน 1:15,000 ส่วนช้อนด้านหน้าเป็น 60% ส่วนช้อนด้านข้างเป็น 25% ภาพได้จากการถ่ายภาพความถ่ายไฟฟ้าเป็น 153 มิลลิเมตร ทำการวัดจุดรังวัดชนิดให้สัญญาณ (Signalized Control Point) ที่ปรากฏบนภาพถ่ายทางอากาศอย่างชัดเจน และคาดว่ามีความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดภาพเป็น 10 ไมครอน จงหาความละเอียดถูกต้องของพิกัดวัตถุบนพื้นดินที่คาดว่าจะได้จากการรังวัดนี้

วิธีทำ

จากความสัมพันธ์ใน สมการ 4-27

$$\text{มาตราส่วนภาพถ่าย} = m = 15,000$$

$$\text{ความสูงบินคิดเป็น } H = f \cdot m = 0.153 \times 15,000 = 2,295 \text{ เมตร}$$

$$\text{ระยะฐานบินคิดเป็น } b = (1 - 0.6) \cdot s \cdot m = 0.4 \times 0.23 \times 15,000 = 1,380 \text{ เมตร}$$

ความละเอียดถูกต้องของการวัดภาพถ่ายในทางแกน x หรือ y $\sigma_x = \sigma_y = 10$ ไมครอน

$$\text{เนื่องจาก เลขมาตราส่วนของภาพถ่ายคือ } m = \frac{H}{f} = 15,000$$

$$\text{ความละเอียดถูกต้องของพิกัดวัตถุในทางราบคิดเป็น } \sigma_x = \frac{H}{f} \sigma_x = m \cdot \sigma_x$$

$$\therefore \sigma_x = 15,000 \cdot (10 \cdot 10^{-6}) = 0.15 \text{ เมตร} \quad \text{ตอบ}$$

สำหรับความละเอียดถูกต้องของพิกัดวัตถุในทางดิ่ง

$$\text{คำนวณความละเอียดถูกต้องของการวัด x-parallax ได้จาก } \sigma_{px} = \approx 1.4 \cdot \sigma_x$$

$$\therefore \sigma_{px} = (1.4) \cdot 10 = 14 \text{ ไมครอน}$$

$$\text{ความละเอียดถูกต้องของพิกัดวัตถุในทางดิ่งคิดเป็น } \sigma_H = \frac{H^2}{b \cdot f} \sigma_{px}$$

$$\therefore \sigma_H = \frac{(2295)^2}{1389 \times 0.153} \times (14 \times 10^{-6}) = 0.35 \text{ เมตร} \quad \text{ตอบ}$$

ดังนั้นความละเอียดถูกต้องบนพื้นดินจากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตในสมการ 4-27 คิดเป็นความคลาดเคลื่อนบนภาคพื้นดินสำหรับทางราบ 7.5 เซนติเมตร สำหรับทางดิ่งคิดเป็น 35 เซนติเมตร ตอบ

นอกจากนี้การประมาณค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดจุดระดับยังสามารถคำนวณได้จากความสูงบินเพียงอย่างเดียว ดังในตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง 4.10.4.2 การประมาณค่าความละเอียดถูกต้องของวัดจุดระดับจากสูตรเรอมพิริกัล

ในการรังวัดบนสภาพถ่ายทางอากาศ เมื่อพิจารณาค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายของภาพนี้มีค่า (3709.139, 2100.536, 2258.708) เมตร การบินออกแบบไร้ออกแบบไว้ที่มาตราส่วน 1:13,000 ส่วนข้อนด้านหน้าเป็น 60% ส่วนข้อนด้านข้างเป็น 25% ภาพได้จากการถ่ายภาพความยาวโฟกัสเป็น 154.006 มิลลิเมตร ความสูงเฉลี่ยของภูมิประเทศบริเวณภาพดังกล่าวเป็น 206.7 เมตร ทำการวัดจุดรังวัดจุดบนภูมิประเทศที่มีความชัดเจน ซึ่งได้ได้ง่ายบนสภาพคู่สามมิตรของภาพถ่ายทางอากาศ จนหาความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าระดับของพิกัดวัดถูกนับพื้นดินที่คาดว่าจะได้จากการรังวัดนี้ โดยใช้การคำนวณจากการวิเคราะห์ข้อมูลความสามารถของการวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศเท่านั้น

วิธีทำ

จากการวิจัยขึ้นได้ว่าความสามารถระบบงานรังวัดด้วยภาพมานาตรฐานและจาก平均值การจะได้จุดรังวัดทั่วไป ความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าพิกัดทางดึงกรณี ประมาณสูตรเรอมพิริกัล

$$\sigma_H = 0.15\% \times H$$

คำนวณระยะห่างของกล้องจากความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (Average Ground Level : AGL)

$$H = 2,258.708 - 206.7 = 2,052.008 \text{ เมตร}$$

∴ ความละเอียดถูกต้องของการวัดค่าระดับของพิกัดวัดถูกนับพื้นดินที่คาดว่าจะได้

$\sigma_H = \frac{0.15}{1000} \times (2258.708 - 206.7) = 0.31 \text{ เมตร} \quad \text{ตอบ}$

จะเห็นได้ว่าจากการประมาณค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดจุดระดับโดยประมาณจากเว็บไซต์ เมื่อความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดภาพเป็น 10 ไมครอนจะได้ค่าเป็น 0.35 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณจากสูตรเรอมพิริกัลที่ได้ค่าเป็น 0.31 เมตร จะได้เห็นว่ามีความแตกต่างกัน 4 เซนติเมตรซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระดับความละเอียดถูกต้องที่คำนวณได้คิดเป็น 31 เซนติเมตร

ตัวอย่าง 4.10.4.3 การประยุกต์ใช้งาน

จากการประมาณค่าความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาพคู่สามมิติที่จะให้ผลลัพธ์ท้ายสุดเกี่ยวข้อง กับค่าพิกัดวัดจุดบนภาพพื้นดิน ค่าความละเอียดถูกต้องที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบรังวัดสำหรับ การรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน โดยคิดในทางกลับกัน

ในการรังวัดบนภาพถ่ายทางอากาศที่มาตราส่วน 1:15,000 ใช้จุดธรรมาติที่เด่นชัดเป็นจุดบังคับ ภาพถ่ายที่อาจเรียกว่าเป็นวิธีการ Post-marking

จากตัวอย่างการคำนวนหาค่าพารามิเตอร์ของการจัดวางภาพภายนอก โดยให้ความละเอียดถูกต้องที่คาดหวังได้ของ การวัดจุดธรรมาติบนภาพเป็น 10 เมตรอน ดังนั้น จะได้ว่าความละเอียดถูกต้องของจุดบังคับภาพถ่ายเป็น 15 เซนติเมตร ส่วนความละเอียดถูกต้องของ การวัดจุดระดับหรือค่าความสูงจะละเอียดถูกต้องเป็น 31 เซนติเมตร

ประกอบกับสมมติฐานในการรังวัดควบคุมเพื่อนำผลลัพธ์ไปสนับสนุนงานรังวัดชั้นรองลงมา โดยทั่วไป จะต้องทำการรังวัดด้วยความละเอียดถูกต้องที่สูงกว่า และโดยทั่วไป อาจละเอียดถูกต้องดีกว่า 1 ถึง 2 เท่า หรือ เมื่อคิดคำนวนอัตราส่วนความละเอียดถูกต้องระหว่างความละเอียดถูกต้องที่คาดหวังในสัดส่วนกับความละเอียดถูกต้องของงานควบคุม คิดเป็น $\frac{1}{2}$ ถึง $\frac{1}{3}$ เท่า

∴ ในกรณีข้างต้นภาคพื้นดินจะต้องมีการรังวัดค่าพิกัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินด้วยความละเอียดถูกต้องดีกว่า ± 5 เซนติเมตร ถึง ± 7.5 เซนติเมตร สำหรับการรังวัดทางราบ และความละเอียดถูกต้องการรังวัดดีกว่า 10 เซนติเมตร สำหรับการรังวัดทางดิ่ง

ตอบ

4.11 คำาณท์ทัยบท

- 1) ถ้าวัดค่าพิกัดของจุดใดบนภาพถ่ายทางอากาศด้วยความละเอียดถูกต้อง 20 ไมครอน บนภาพนี้ที่มีมาตราส่วน 1:6,000 ได้จากกล้องที่มี $f=153$ มม. และถ้าเป็นการวัดบนภาพคูณมิติจะเป็นภาพมีส่วนขยายปูนต่อคือ 60 % จงหาความละเอียดถูกต้องทางทฤษฎีของค่าพิกัดทั้งทางระบและดึงที่ควรจะได้ตามหลักการของการแพร่ของความผิดพลาด โดยอาศัยสมการดิฟเพอเรนเชียลเท่านั้น
- 2) เช่นเดียวกับข้อ 1) แต่หากว่าเป็นกล้องที่มี $f=305$ มม. จงหาความละเอียดถูกต้องทางทฤษฎีของค่าพิกัดทั้งทางระบและดึงที่ควรจะได้
- 3) ในการนี้ใช้ในการวัดพิกัดในเมืองเช่นกรุงเทพที่มีตึกสูง ภาพที่ได้จากกล้องไหนจะมีปัญหาระบบบังช่องตึกสูงมากกว่า จงหาดภาณุประกอบ ข้อสังเกตภาพทั้งสองมีมาตราส่วนเท่ากันนั้นคือ 1:6,000 จึงมีพื้นที่ครอบคลุมเท่ากัน แต่มีความสูงขณะที่บินถ่ายต่างกัน
- 4) จงเปรียบเทียบความเหมาะสมของกล้องถ่ายภาพความยาวโฟกัส 153 มม. และ 305 มม. ว่าอย่างใดมีความเหมาะสมแก่การทำแผนที่ในกรุงเทพ เมื่อคำนึงถึง การบดบังของตึกสูง และความละเอียดถูกต้องที่ได้โดยเฉพาะทางดึง

5 ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation หรือ Aerotriangulation) เป็นกระบวนการในการคำนวณหาค่าการจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation) ของภาพพร้อมกับทั้งบล็อก นอกเหนือไปยังเป็นการเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย (Photo Control Points) ในบล็อกของภาพถ่ายของทุกภาพเป็นจำนวนมาก ค่าพิกัดใหม่ที่ได้จากการคำนวณไม่ต้องทำการรังวัดจากในสนาม การเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาพนิยมเรียกว่า การขยายจุดควบคุม (Photo Control Extension) แต่จะต้องมีการรังวัดจุดควบคุมภาพในสนามบ้างบางจุดจำนวนหนึ่ง

จุดควบคุมภาพถ่ายคือจุดใดบนภาพถ่ายที่มีลักษณะเด่นชัด สามารถระบุชัดทางตำแหน่งได้อย่างชัดเจนบนภาพและในสนามที่เรียกว่า "Well Identified Point" เมื่อลงไปในสนามจุดดังกล่าวก็จะสามารถค้นหาได้่ายเนื่องจากมีความเด่นชัด จุดควบคุมภาพถ่ายส่วนหนึ่งจะทราบค่าพิกัดในระบบพิกัดของวัตถุหรือระบบพิกัดภาคพื้นดินเป็นอย่างดี และอีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นส่วนมากจะไม่ทราบค่าพิกัดในระบบพิกัดวัตถุหรือระบบพิกัดภาคพื้นดิน หลังการคำนวณปรับแก้ทางคณิตศาสตร์จะได้ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายที่มีความละเอียดถูกต้องเชื่อถือได้ สามารถนำไปใช้ในงานสำรวจอื่นๆในการรังวัดด้วยภาพได้

งานหลักในการประมวลในการรังวัดด้วยภาพได้แก่ การรังวัดพิกัดบนภาพคู่สามารถมิตรเพื่อเขียนແນที่ลายเส้น หรือวัดค่าพิกัดวัตถุด้วยความละเอียดถูกต้องสูง และการให้สร้างภาพถ่ายดัดแก้อror ให้นำไปผลิตແນที่ภาพในกระบวนการเหล่านี้จำเป็นต้องรู้ค่าการจัดวางภาพภายนอกเสียก่อน

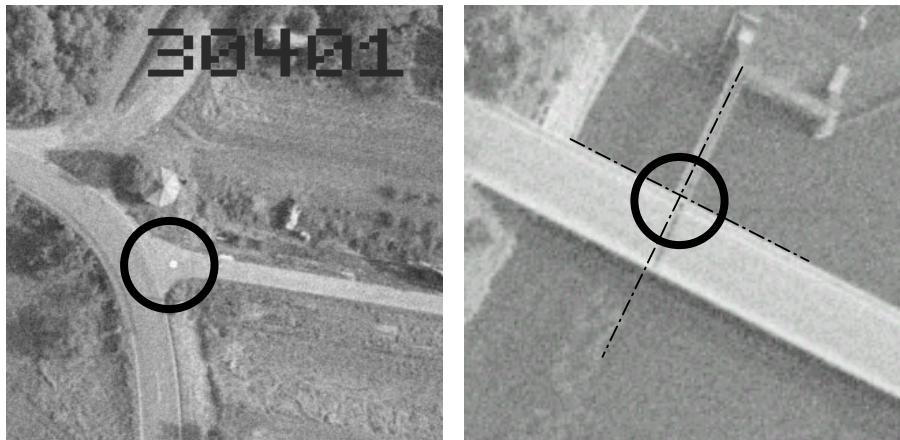
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงหลักการของข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ที่ประยุกต์ใช้กับบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งจะเป็นบล็อกของภาพถ่ายดิจิทัลที่มีแกนของกล้องถ่ายรูปขนาดไปทิศทางเดียวกัน การจัดเรียงรูปเป็นแนวบินอย่างมีระบบ การคำนวณปรับแก้ที่กล่าวถึงก็จะเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันที่ให้ความละเอียดถูกต้องและความเชื่อมั่นสูงสุดนั่นคือวิธีการปรับแก้ของบล็อกค่าล้ำ (Bundle Block Adjustment)

แม้ว่าจะกล่าวถึงแต่หลักการของข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ แต่ในหลักการแล้วก็จะสามารถนำไปประยุกต์กับบล็อกของการรังวัดด้วยภาพถ่ายอื่นได้เช่นกันหากเงื่อนไขในการรังวัดและแบบจำลองครบถ้วน

5.1 จุดควบคุมภาพถ่าย

จุดควบคุมภาพถ่ายคือจุดที่ปรากฏหรือจุดที่ปั้งบอกได้จากสิ่งแวดล้อมที่ปรากฏ บนภาพถ่ายที่มีลักษณะเด่นชัด สามารถชี้ชัดทางตำแหน่งได้อย่างชัดเจนบนภาพ และเมื่อลงไปในสนามจุดดังกล่าวก็จะสามารถค้นหาได้่ายบนวัตถุหรือภูมิประเทศ

ตัวอย่างของจุดควบคุมภาพถ่าย (Photo Control) ในงานข่ายสามเหลี่ยมจะมีทั้งหมดที่ทราบค่าพิกัดภาคพื้นดินและไม่ทราบค่าพิกัดภาคพื้นดิน มีความเด่นชัดดังตัวอย่าง



ก) จุดควบคุมภาพถ่าย เป็นจุดที่มีการเตรียมการล่วงหน้าก่อนปันทำภาพ

ข) จุดควบคุมภาพถ่าย ได้จากการสูงสุดที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในพื้นที่ที่ต้องการทำแผนที่อาจมีการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดที่เป็นเป้าล่วงหน้า (Pacemarking Target) หรือเป้าชนิดให้สัญญาณ (Signalized Target) ซึ่งเป็นการเตรียมเป้าในสนามด้วยวัสดุที่ทำให้มีความคมชัดตัดกับสภาพแวดล้อม เป้ามีรูปร่างที่เด่นชัดในภูมิประเทศ มีส่วนที่เป็นเป้าพยานซึ่งเป็นเป้าประกอบที่ชัดได้จากภาพ และตัวเป้าเองก็ออกแบบให้มีขนาดใหญ่พอที่จุดอยู่ในเครื่องเขียนแผนที่สามารถมองเห็นได้แต่หัวใจ สำหรับสัมผัสได้ชัดเจน ในการนี้เป้าจะประกอบด้วยภาพดิจิทัล ก็จะคำนึงว่าเมื่อสแกนไปแล้ว ภาพดิจิทัลของเป้าจะประกอบภาพดิจิทัลในขนาด 5-10 จุดภาพ เป้าล่วงหน้าต้องสร้างให้เสร็จและมีการเฝ้าระวังจนกว่าจะมีการบินผ่านเพื่อบันทึกภาพ

รูปภาพ 5-1 จุดควบคุมภาพถ่าย

ในการนี้ที่ต้องการให้ผลของการคำนวนปรับแก้ของงานช่วยสามเหลี่ยมให้มีคุณภาพดีขึ้นและมีความละเอียดถูกต้องสูงขึ้นนั่น才เรียกว่าเป้าถูกต้อง ซึ่งจะส่งผลทำให้ผลิตผลแผนที่มีความละเอียดถูกต้องสูงขึ้นตามไปด้วย ในพื้นที่ที่ต้องการทำแผนที่อาจมีการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดที่เป็นเป้าล่วงหน้า (Pacemarking Target) หรือเป้าชนิดให้สัญญาณ (Signalized Target) ซึ่งเป็นการเตรียมเป้าในสนามด้วยวัสดุที่ทำให้มีความคมชัดตัดกับสภาพแวดล้อม เป้ามีรูปร่างที่เด่นชัดในภูมิประเทศ มีส่วนที่เป็นเป้าพยานซึ่งเป็นเป้าประกอบที่ชัดได้จากภาพ และตัวเป้าเองก็ออกแบบให้มีขนาดใหญ่พอที่จุดอยู่ในเครื่องเขียนแผนที่สามารถมองเห็นได้แต่หัวใจ สำหรับสัมผัสได้ชัดเจน ในการนี้เป้าจะประกอบด้วยภาพดิจิทัล ก็จะคำนึงว่าเมื่อสแกนไปแล้ว ภาพดิจิทัลของเป้าจะประกอบภาพดิจิทัลในขนาด 5-10 จุดภาพ เป้าล่วงหน้าต้องสร้างให้เสร็จและมีการเฝ้าระวังจนกว่าจะมีการบินผ่านเพื่อบันทึกภาพ



ก) จุดเป้าล่วงหน้าและเป้าพยานชนิด 4 ชา

ข) ตำแหน่งของเป้าล่วงหน้าต้องมีการรังสรรค์พิกัดภาคพื้นดิน

รูปภาพ 5-2 จุดเป้าล่วงหน้า

5.2 ชนิดของจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

ในเบื้องต้นของภาพถ่ายทางอากาศ ชนิดของจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศสามารถจำแนกได้ตามลักษณะที่ไปปรากฏบนภาพถ่ายทางอากาศและบทบาทในการคำนวณปรับแก้ ซึ่งจะได้กล่าวในภายหลังว่าการคำนวณปรับแก้ชนิดบังคับภาพถ่ายจะเป็นการใช้สมการร่วมเส้น ดังนั้นชนิดจุดบังคับภาพถ่ายแบ่งออกเป็นสามประเภทตามหน้าที่ดังนี้

5.2.5 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point)

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point) เป็นจุดบังคับภาพถ่ายที่เห็นเด่นชัดบนภาพถ่ายและชัดได้บนภาคพื้นดิน จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีค่าพิกัดในทั้งสามมิติ มีการไปรังวัดในสนาม ด้วยเครื่องมือและวิธีการที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงในระดับที่สามารถนำมาควบคุมงานช่างสามเหลี่ยมทางอากาศ

ในแต่ละการคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยม ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินจะนำไปใช้เป็นค่าคงที่ในสมการ ดังนั้นการวัดค่าพิกัดภาพถ่ายบนภาพที่เป็นของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจะให้สมการเพิ่มขึ้น 2 สมการเสนอ โดยที่จะไม่ทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น

$$x_i + vx_i = -f \frac{[a_{11}^p(X_g - X0) + a_{12}^p(Y_g - Y0) + a_{13}^p(Z_g - Z0)]}{[a_{31}^p(X_g - X0) + a_{32}^p(Y_g - Y0) + a_{33}^p(Z_g - Z0)]} \quad \text{สมการ 5-1}$$

$$y_i + vy_i = -f \frac{[a_{21}^p(X_g - X0) + a_{22}^p(Y_g - Y0) + a_{23}^p(Z_g - Z0)]}{[a_{31}^p(X_g - X0) + a_{32}^p(Y_g - Y0) + a_{33}^p(Z_g - Z0)]} \quad \text{สมการ 5-2}$$

โดยที่ x_i, y_i คือค่าพิกัดภาพถ่ายจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ปรากฏบนภาพหน้างาน และ X_g, Y_g, Z_g เป็นค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินใดที่เป็นค่าคงที่ p คือตัวนี้คือตัวของภาพถ่าย

ในทางปฏิบัติหากว่าจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ปรากฏบนภาพถ่ายมากกว่า 2 ภาพยิ่งเป็นผลดีเนื่องจากทำให้สามารถวัดค่าพิกัดภาพถ่ายได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างสมการค่าสั่งเกตเพิ่มขึ้นได้อีก 2 สมการต่อการวัดค่าพิกัดบนภาพที่เพิ่มขึ้นหนึ่งภาพเสมอ การมีจำนวนสมการค่าสั่งเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวณปรับแก้ไม่ความละเอียดถูกต้องและนำเข้าอีกมากขึ้นไปด้วย

5.2.6 จุดควบคุมภาพถ่ายชนิดระดับ (Levelling Control Point)

จุดควบคุมภาพถ่ายระดับ (Levelling Control Point) เป็นจุดบังคับภาพถ่ายที่เห็นเด่นชัดบนภาพถ่ายและชัดได้บนภาคพื้นดิน จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีแต่ค่าพิกัดในแนวตั้ง ค่าระดับมีการไปรังวัดในสนาม ด้วยเครื่องมือและวิธีการที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงในเกณฑ์ที่สามารถนำมาควบคุมงานช่างสามเหลี่ยมทางอากาศได้ ซึ่งโดยทั่วไปหากเป็นการใช้การเดินระดับ ก็จะทำให้ได้精度และสะดวกกว่าจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่เป็นชนิดมีพิกัดครบในทั้งสามแกน

ดังนั้น จุดควบคุมภาพถ่ายระดับ ควรจะเลือกเป็นจุดที่อยู่บนภูมิประเทศที่ค่อนข้างราบเรียบ เนื่องจากว่าเป็นการชี้ชัดสำหรับการใช้งานระดับเพียงอย่างเดียว หากผู้ที่ทำการรังวัดระดับคาดเคลื่อนทางตำแหน่งไปบ้าง ก็จะทำให้ผลลัพธ์ของการคำนวณปรับแก้ไม่ได้รับผลกระทบ

จุดควบคุมภาพถ่ายระดับ ได้รับความนิยมลดลงเนื่องจากการรังวัดค่าพิกัดในสนามด้วยการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสเมื่อความสะดวก รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย

5.2.7 จุดผ่าน (Pass Point)

จุดผ่านคือจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดหนึ่งที่มีการขีดตัวแทนบนภาพถ่าย แต่ไม่จำเป็นต้องลงไปคืนหา และรังวัดค่าพิกัดในสนาม จุดผ่านจะต้องปรากฏบนภาพถ่ายอย่างน้อยสองถูกขึ้นไป โดยที่ตัวแทนของจุดผ่าน จะต้องปรากฏอยู่บนส่วนข้อนด้านหน้าของภาพถ่ายทางอากาศ หรือกล่าวได้ว่าต้องอยู่ในส่วนข้อนที่อยู่ในแนวบิน โดยที่การเลือกจุดผ่านใหม่หนึ่งจุดจะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าในการคำนวนปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพิ่มขึ้น 3 ตัว ค่าพิกัดที่วัดได้บนภาพอย่างน้อยสองภาพจะเป็นค่าสังเกตที่ทำให้ค่าพิกัดไม่ทราบค่า คำนวนออกมากได้ หลังการคำนวนปรับแก้จุดผ่านจะมีค่าพิกัดในห้องสมุด ที่สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้

ดังนั้นในเบื้องต้นของการคำนวนปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยม เมื่อมีการเลือกจุดผ่านมาหนึ่งจุดจะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น 3 ตัว ในขณะที่หากทำการรังวัดค่าพิกัดภาพถ่ายบนภาพ 2 ภาพ ก็จะสามารถสร้างสมการค่า สังเกตได้ดังนี้

สมการค่าสังเกตสำหรับภาพที่แรกที่พิจารณา

$$x_i + vx_i = -f \frac{[a_{11}^p(X_t - X0^p) + a_{12}^p(Y_t - Y0^p) + a_{13}^p(Z_t - Z0^p)]}{[a_{31}^p(X_t - X0^p) + a_{32}^p(Y_t - Y0^p) + a_{33}^p(Z_t - Z0^p)]} \quad \text{สมการ 5-3}$$

$$y_i + vy_i = -f \frac{[a_{21}^p(X_t - X0^p) + a_{22}^p(Y_t - Y0^p) + a_{23}^p(Z_t - Z0^p)]}{[a_{31}^p(X_t - X0^p) + a_{32}^p(Y_t - Y0^p) + a_{33}^p(Z_t - Z0^p)]} \quad \text{สมการ 5-4}$$

โดยที่ x_i, y_i คือค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดผ่านที่ปรากฏบนภาพ และ X_t, Y_t, Z_t เป็นค่าพิกัด ของจุดผ่านที่ให้เป็นตัวไม่ทราบค่าในระบบสมการ และ ตัว i คือตัวนีของจุดการรังวัดพิกัดภาพถ่ายแต่ละภาพ ตัวนี p คือตัวนีลำดับของภาพถ่าย

เช่นเดียวกันสำหรับสมการค่าสังเกตของภาพคู่ข้อมูลดังได้ไป

$$x_{i+1} + vx_{i+1} = -f \frac{[a_{11}^{p+1}(X_t - X0^{p+1}) + a_{12}^{p+1}(Y_t - Y0^{p+1}) + a_{13}^{p+1}(Z_t - Z0^{p+1})]}{[a_{31}^{p+1}(X_t - X0^{p+1}) + a_{32}^{p+1}(Y_t - Y0^{p+1}) + a_{33}^{p+1}(Z_t - Z0^{p+1})]} \quad \text{สมการ 5-5}$$

$$y_{i+1} + vy_{i+1} = -f \frac{[a_{21}^{p+1}(X_t - X0^{p+1}) + a_{22}^{p+1}(Y_t - Y0^{p+1}) + a_{23}^{p+1}(Z_t - Z0^{p+1})]}{[a_{31}^{p+1}(X_t - X0^{p+1}) + a_{32}^{p+1}(Y_t - Y0^{p+1}) + a_{33}^{p+1}(Z_t - Z0^{p+1})]} \quad \text{สมการ 5-6}$$

โดยที่ x_{i+1}, y_{i+1} คือค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดผ่านที่ปรากฏบนภาพในลำดับถัดมา และ X_t, Y_t, Z_t เป็น ค่าพิกัดของจุดผ่านที่ให้เป็นตัวไม่ทราบค่าในระบบสมการเป็นตัวเดียวกับที่กำหนดในสมการค่าสังเกต สมการ 5-1 และสมการ 5-1 ก่อนหน้านี้ ดังนั้นจำนวนตัวไม่ทราบค่าจึงไม่เพิ่มขึ้น และ ตัว i คือตัวนีของจุดการรังวัด พิกัดภาพถ่ายแต่ละภาพ ตัวนี p คือตัวนีลำดับของภาพถ่าย

ซึ่งจะเห็นว่าในการวัดอย่างน้อยที่สุด สองจุดบนภาพสองภาพนี้จะทำให้เกิดสมการค่าสังเกตขึ้น 4 สมการ จำนวนสมการจะเกินจำนวนตัวไม่ทราบค่า 3 ตัว อยู่ 1 สมการเสมอ

ในทางปฏิบัติหากว่าจุดผ่าน ปรากฏบนภาพถ่ายมากกว่า 2 ภาพจะต้องทำการรังวัดเพิ่มต่อไป ในการวัดจุดผ่านเดิมที่นับภาพต่อไป ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นได้อีก 2 สมการต่อการวัดค่าพิกัดบนภาพที่เพิ่มขึ้นหนึ่งภาพเสมอ โดยที่ตัวไม่ทราบค่าจะไม่เพิ่มขึ้นอีก

การมีจำนวนสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวนปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้นไป ตามหลักของสถิติและการคำนวนปรับแก้

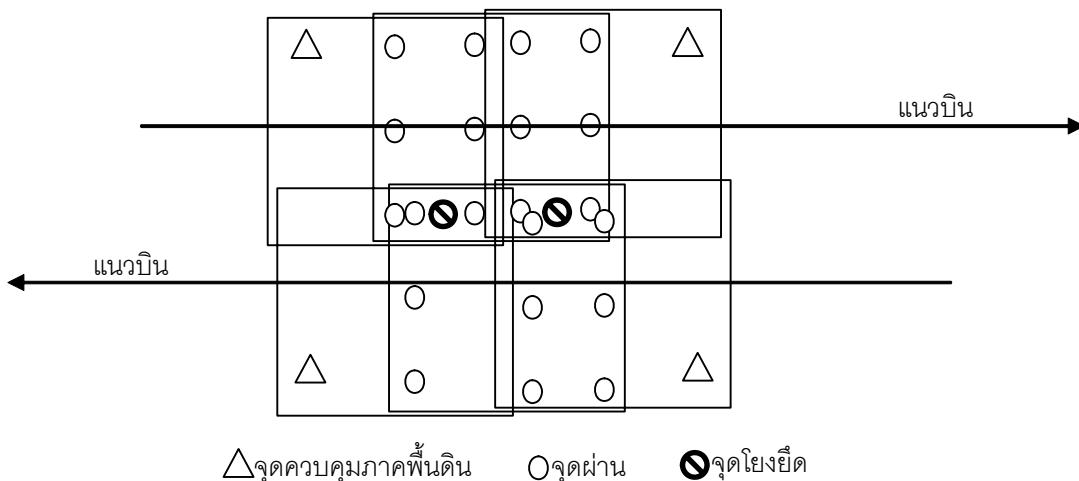
5.2.8 จุดโยงยืด (Tie Point)

จุดโยงยืดคือจุดควบคุมภาพถ่ายที่มีการใช้ข้อมูลตำแหน่งบนภาพถ่าย แต่ไม่จำเป็นต้องลงไปทั้งหมดและรังวัดค่าพิกัดจริงในสนาม จุดโยงยืดจะต้องปรากฏบนภาพถ่ายอย่างน้อยสองรูปขึ้นไป โดยที่ตำแหน่งของจุดผ่านจะต้องปรากฏอยู่บนส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวบิน นอกเหนือจากความแตกต่างในการปรากฏบนภาพถ่ายในบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศแล้ว

จุดโยงยืดจะมีคุณสมบัติและบทบาทในการคำนวนปรับแก้ เช่นเดียวกับจุดผ่านทุกประการ ดังนี้ในส่วนของการรังวัดและการคำนวนปรับแก้สามารถนำหลักการของจุดผ่านมาประยุกต์ใช้ได้

5.3 ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่าย

ผลจากการวิจัยในการหาตำแหน่งและความเหมาะสมของ จุดผ่านและจุดอยิง ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งและจำนวนของจุดควบคุมภาพถ่ายในการรังวัดเพื่อคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศในภาพดังนี้



รูปภาพ 5-3 ชนิดของจุดควบคุมภาพถ่ายตามนิยาม

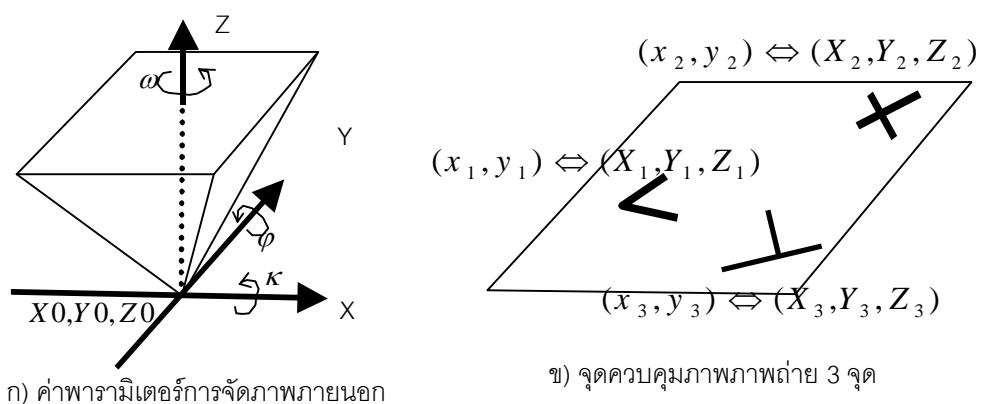
จะเห็นได้ว่า

- 1) จุดควบคุมภาพพื้นดิน ส่วนใหญ่จะอยู่ตามขอบพื้นที่โดยรอบของช่องบล็อกและบางส่วนในกลาง-บล็อก ซึ่งหลักการและเหตุผลจะได้กล่าวในหัวข้อ 5.9 การจัดวางจุดพิกัดควบคุมภาพพื้นดิน ในลำดับต่อไป
- 2) จุดผ่าน จะต้องกำหนดให้มีอย่างน้อย 6 จุดกระจายอยู่บนส่วนข้อนด้านหน้าในแนวบินเดียวกันดังภาพ
- 3) จุดอยิงยึด จะต้องกำหนดให้มีทุกแบบจำลอง ของส่วนข้อนด้านข้าง หรือ อาจให้เว้นได้ทุกหนึ่งแบบจำลอง

หากยึดข้อกำหนดดังกล่าว ในภาพก็จะพบว่ามีจุดผ่านและจุดอยิงยึดจำนวนมากอยู่ในส่วนข้อนด้านข้างระหว่างแนวบิน จากการวิเคราะห์ผ่านมาจะเห็นว่าการที่ทำให้เกิดจุดผ่านหรือจุดอยิงยึด จะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้นทีละ 3 ตัว ดังนั้นหากในการเลือกจุดผ่านและจุดอยิงยึดที่อยู่ใกล้กัน ควรจะหลีกเลี่ยงโดยการกำหนดจุดเหล่านั้นให้เป็นจุดเดียวกัน ซึ่งจะทำให้หันออกจากจำนวนเต็วไม่ทราบค่าลดลงแล้ว ยังทำให้สัดส่วนของตัวไม่ทราบค่าต่อค่าสังเกตลดลงอีกด้วย ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณปรับแก้ไม่คุ้มค่าโดยต้องและนำไปเชื่อมต่อค่ามากขึ้น

5.4 วิธีการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอก

การระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกของภาพถ่ายสามารถระบุด้วยค่าพารามิเตอร์ที่บอกร่องรอยของจุดเปิดถ่ายภาพและความเอียงของกล้อง $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ และ ยังสามารถระบุโดยนัยได้ โดยการระบุจุดควบคุมภาพถ่ายในรูปของตำแหน่งทั้งบนภาพและบนวัตถุหรือบนพื้นดินในกรณีภาพถ่ายทางอากาศ ในภาพข้างล่างแสดงการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกที่เทียบเท่ากัน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกมี 6 พารามิเตอร์ในภาพทางขวา มีจุดควบคุมภาพถ่ายสามจุดซึ่งโดยวิธี การวัดยืนของภาพถ่ายเดียว (Single Photo Resection) จะสามารถใช้คำนวณยืนกลับไปหาพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกได้



รูปภาพ 5-4 วิธีการระบุค่าการจัดวางภาพนอกของภาพถ่าย

การระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกด้วยวิธีจุดควบคุมภาพถ่ายอย่างน้อย 3 จุด มีข้อดีคือค่าที่ได้สามารถนำไปใช้กับซอฟแวร์หรือเครื่องมือใดก็ได้ โดยแต่ละซอฟแวร์หรือเครื่องมือก็จะทำการแก้ปัญหา ด้วยวิธี Single Photo Resection ก็จะได้ค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก ส่วนการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกด้วยการระบุค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกโดยตรง มักจะมีปัญหานอนนิยามของแมทริกซ์ของการหมุนเช่นลำดับของพารามิเตอร์ ω, φ, κ ซึ่งทำให้ค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกไม่สามารถใช้ร่วมกันได้

5.5 เทคนิคการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมแบบสามเหลี่ยมเป็นบล็อก

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ทฤษฎีของเทคนิคงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ และแสดงแนวความคิดของข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

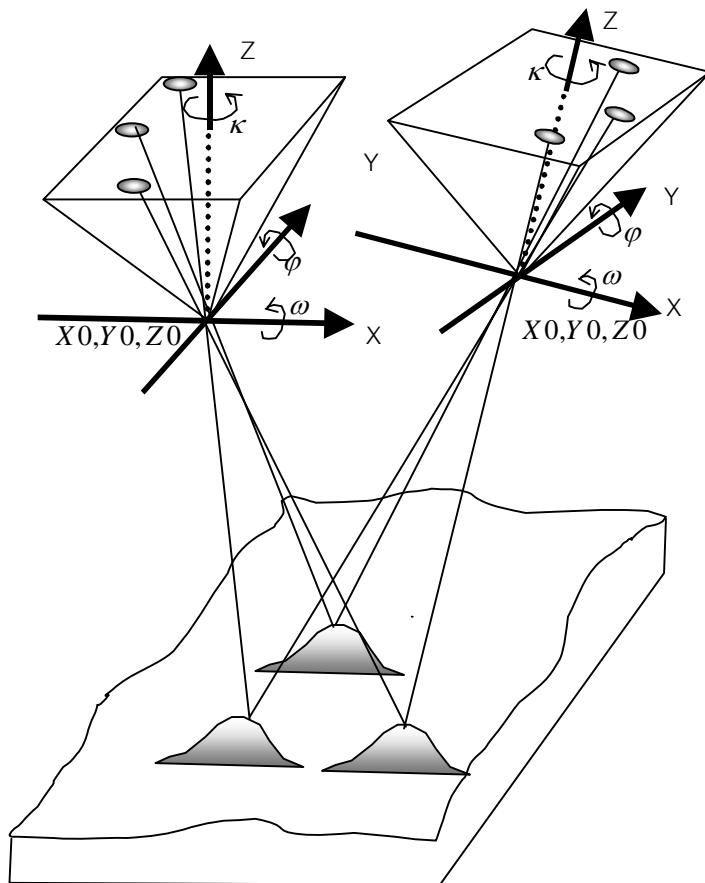
การที่จะหาค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกของภาพในเบื้องต้นได้ก่อนมาแล้วในหลักการของการวัดยั่งบนภาพถ่ายเดี่ยว แต่ในทางปฏิบัติโดยเฉพาะการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศครอบคลุมพื้นที่กว้างขวาง ทำให้การวัดยั่งบนภาพถ่ายเดี่ยวไม่มีประสิทธิภาพและต้องเปลี่ยนไปนิยมทำเข็นนั้นเนื่องจาก

- 1) ต้องมีการรังวัดจุดควบคุมภาพพื้นดินให้ปรากฏบนทุกภาพถ่ายอย่างน้อยสามจุด โดยเฉพาะในกรณีของภาพถ่ายทางอากาศ ทำให้ลับเปลี่ยนค่าใช้จ่าย
- 2) ไม่มีการใช้ประโยชน์ของการที่ภาพถ่ายทางอากาศในบล็อกมีส่วนซ้อนกันอย่างเป็นระบบ ด้วยพื้นที่ส่วนซ้อน 60%-80% ซึ่งสามารถที่จะวัดพิกัดของภาพถ่ายของจุดที่ไม่ต้องลงไปรังวัดในส่วน แต่ปรากฏบนภาพถ่ายมากกว่าสองชุดขึ้นไป จุดเหล่านี้ก็คือ จุดผ่าน (Pass Point) และจุดโยงยึด (Tie Point)

ดังนั้นหากต้องการแก้ปัญหาสิ่งเหล่านี้ จะสามารถทำได้โดยการแก้ปัญหาของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศทั้งบล็อกดังนี้

5.5.5 การพิจารณาคู่ภาพที่อยู่ติดกัน

เมื่อพิจารณาภาพคู่สามมิติสองภาพที่ได้จากการบันทึกในแนวบินเดียวกันซึ่งโดยปกติเป็นคู่ภาพที่มีส่วนซ้อนด้านหน้าประมาณ 60% ในทฤษฎีของการจัดวางภาพสามพันธ์(Relative Orientation) Wolf, 1983 ซึ่งกล่าวถึงการที่ภาพคู่สามมิติในอากาศสามารถนำมาสามพันธ์กันในลักษณะที่รังสีของแสงที่มาจากจุดจุดเดียวกันบนภาพคู่สามมิติ จะตัดกันในทุกๆ ลักษณะที่เกิดจากจุดอื่นๆ ที่ปรากฏบนภาพ หรือรู้จักกันในนามของทฤษฎีของสภาวะร่วมระนาบ (Coplanarity Condition) ความสามพันธ์ระหว่างภาพคู่สามมิตินี้สามารถทำได้โดยพารามิเตอร์ของกล้องฉายที่เป็นอิสระต่อกัน 5 พารามิเตอร์



รูปภาพ 5-5 วิธีการระบุค่าการจัดวางภาพของภาพถ่าย

นั่นหมายความว่าสถาะจะร่วมระนาบสามารถสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดยการวัดจุดที่ปรากฏบนภาพทั้งสองอย่างน้อย 3 จุดซึ่งจะให้สมการค่าสังเกต 6 สมการ ซึ่งมากพอที่จะคำนวณหาพารามิเตอร์ 5 พารามิเตอร์นั้นได้ การวัดบนส่วนข้อนี้จะวัดมากกว่านั้น เพื่อให้เกิดความละเอียดถูกต้องสูงและเชื่อถือได้ โดยทั่วไปจากการวิจัยและทดสอบในทางปฏิบัติพบว่าควรใช้จุดในการจัดความสัมพันธ์ใช้ 6 จุดกระจายตัวทั้งส่วนข้อนี้ของภาพคู่สามมิติ

ดังนั้นอย่างน้อยที่สุดจะมีการวัดจุดที่เด่นชัดบนภาพคู่สามมิติอย่างน้อย 3 จุดโดยวัดบนทั้งสองภาพ เพื่อให้ภาพทั้งสองสามารถโดย Yingyid กันได้ จุดเหล่านี้ซึ่งภายหลังนี้เรียกว่า จุดผ่าน (Pass Point) ถ้าเป็นจุดที่วัดบนภาพที่มีส่วนซ้อนในแนวบิน (Overlap) และจุด Yingyid (Tie Point) เมื่อเป็นวัดในส่วนซ้อนที่อยู่ระหว่างแนวบิน (Sidelap)

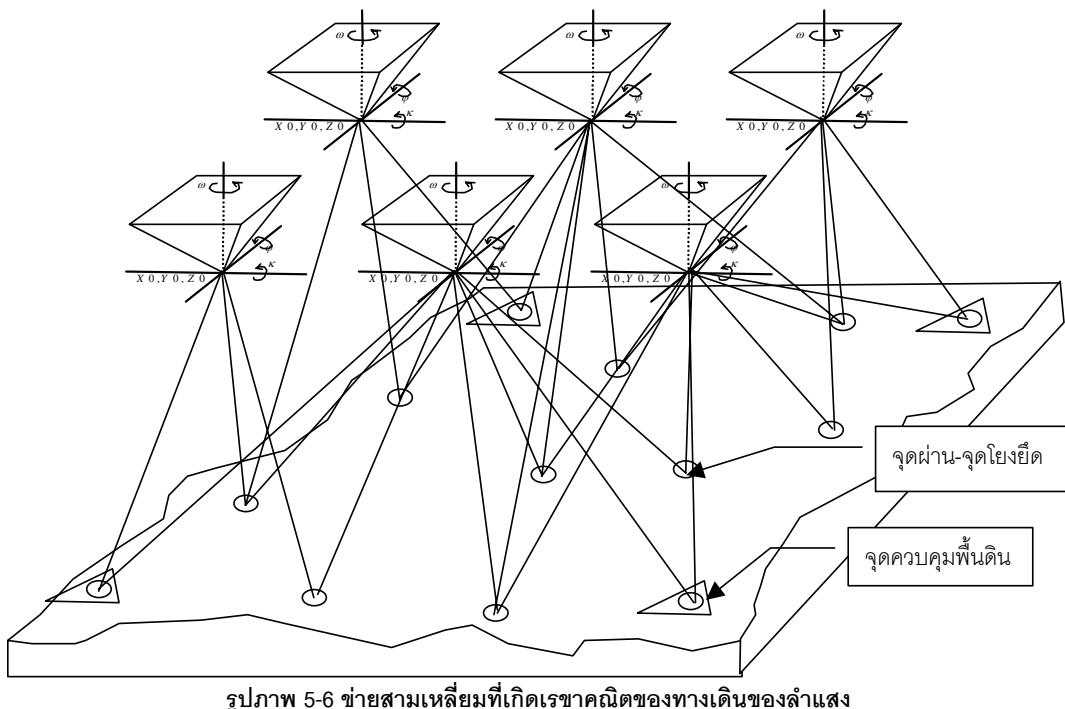
5.5.6 การพิจารณาบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

เมื่อภาพถ่ายอยู่ยึดกันในสามมิติแต่ละระบบพิกัดยังเป็นของตนเอง ดังนั้นจะต้องทำการจัดวางแบบจำลองให้สัมพันธ์กับระบบพิกัดภาคพื้นดิน ในกระบวนการสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสามมิติในอากาศกับระบบพิกัดภาคพื้นดินสามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์แบบเฉลี่ยร์เชิญดามมิติ หรือที่เรียกว่า การแปลงค่าพิกัดสามมิติชนิด 7 พารามิเตอร์ โดยแบบจำลองจะมีความอิสระในการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานได้ 1 มาตรวาสุน เคลื่อนย้ายจุดกำหนดแกนพิกัดได้ทั้งสามแกน และ การทำมุนกันระหว่างระบบพิกัดด้วยมุนรอบแกนสามแกนทั้งสามมุน เมื่อทำการเปรียบเทียบพิกัดของแบบจำลองที่เกิดจากการอยู่ยึดของบล็อกภาพถ่ายมีพิกัดเป็นพิกัดของแบบจำลองโดยอิสระอยู่ในอากาศ เมื่อนำค่าพิกัดของแบบจำลองในสามมิติมาเปรียบเทียบกับพิกัดภาคพื้นดิน 3 จุด ก็จะสามารถสร้างสมการได้ 9 สมการ ซึ่งจะพอเพียงแล้วกินต่อการที่จะแก้ปัญหาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 7 ค่า ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้มากกว่านั้นเพื่อให้เกิดความละเอียดถูกต้องสูงและเชื่อถือได้

ดังนั้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดพื้นดินและระบบพิกัดในแบบจำลองจะเป็นต้องมีจุดบังคับภาคพื้นดิน (Ground Control Point) ซึ่งเป็นจุดที่เห็นเด่นชัดในภาพถ่าย ซึ่งตั้งในสถานที่ด้อย่างชัดเจนทางตำแหน่งทั้งราบหรือทางดิบหรือในทั้งสามแกนทั้งหมดพร้อมกัน จุดบังคับภาคพื้นดินเป็นจุดที่มีค่าพิกัดในระบบพิกัดภาคพื้นดิน มีความละเอียดถูกต้องสูงเนื่องจากต้องนำไปในการบังคับการคำนวณข่ายสามเหลี่ยม ซึ่งในทางปฏิบัติต้องไปรังวัดในสนาม โดยเทคนิคการสำรวจปกติ เช่นการทำวงรอบ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ แต่ในปัจจุบันนิยมทำสำรวจด้วยดาวเทียมจีพีเอสมากกว่า เพราะมีความสะดวก มีความอิสระในการเลือกวิวัฒน์ มีความละเอียดถูกต้องสูง และเชื่อถือได้ นอกจากนี้เครื่องมือสำรวจด้วยดาวเทียมจีพีเอสจะมีราคาถูกและใช้งานได้สะดวกขึ้นเรื่อยๆ

5.5.7 รูปแบบของโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

การขยายจุดควบคุมภาพถ่ายด้วยวิธีข่ายสามเหลี่ยมเป็นการนำค่าจุดควบคุมภาพถ่ายที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินด้วยความละเอียดถูกต้องสูงมาใช้ในการคำนวณเพื่อทำการจัดวางแบบจำลองของบล็อกในอากาศให้สัมพันธ์กับระบบพิกัดภาพพื้นดิน จุดบังคับภาพถ่ายชนิดจุดควบคุมภาพพื้นดินสามารถที่จะใช้สร้างสมการค่าสั่งเกตสำหรับสมการร่วมเลนส์ได้ 2 สมการ โดยให้ค่าพิกัดที่รังวัดมาด้วยความละเอียดถูกต้องสูงเป็นค่าคงที่ ดังนั้นหมายความว่าทุกครั้งที่มีจุดควบคุมพื้นดินจะให้ค่าสั่งเกตเพิ่มขึ้นเสมอ และไม่ทำให้ระบบสมการมีจำนวนไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น



รูปภาพ 5-6 ข่ายสามเหลี่ยมที่เกิดเรขาคณิตของทางเดินของล้ำแสง

ขีกส่วนหนึ่งเป็นการรังวัดจุดโยงยืดและการรังวัดจุดผ่าน สามารถสั่งเกตเห็นได้ขั้นตอนภาพแต้มจำเป็นต้องไปรังวัดภาคพื้นดิน การรังด์ค่าพิกัดบนภาพถ่ายหรือภาพดิจิทัลที่เป็นจุดที่รังวัดบนส่วนซ้อนจะให้สมการค่าสั่งเกต 2 ค่าและสมการ 2 สมการซึ่งจะเป็นสมการที่ได้รวมอย่างน้อย 4 สมการ อย่างไรก็ตามจุดผ่านและจุดโยงยืดเป็นจุดที่ยังไม่ทราบค่าพิกัดดังนั้นต้องมีการกำหนดให้ตัวไม่ทราบค่าเกิดขึ้นใหม่ 3 ตัวต่อจุดโยงยืดหรือจุดผ่าน เมื่อจุดผ่านจุดโยงยืดพบในภาพเพียงสองภาพจะมีสมการเกินมา 1 สมการ ดังนั้นจุดผ่านหรือจุดโยงยืดจะต้องปรากฏอยู่บนภาพอย่างน้อยสองภาพขึ้นไป จึงจะสามารถหาคำตอบได้

5.6 การแก้ปัญหาข่ายสามเหลี่ยม

ความสัมพันธ์ของลำแสงที่โดยยึดภาพด้วยจุดโดยยึด จุดผ่าน และจุดควบคุมภาคพื้นดิน นำไปสู่การสร้างระบบสมการร่วมเส้นสำหรับแต่ละลำแสง เมื่อมีจำนวนค่าสังเกตพอย่างก็จะสามารถทำให้คำนวณค่าพิกัดของจุดผ่าน-จุดโดยยึดออกมาได้ ค่าการจัดภาพภายนอกของทุกรูปก็ให้เป็นตัวไม่ทราบค่าก็จะสามารถหาคำตอบได้

เมื่อพิจารณาปัญหาของข่ายสามเหลี่ยมจะเห็นได้ว่า จำนวนตัวไม่ทราบค่าจะวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) ภาพถ่ายทางอากาศทุกรูปจะต้องหาค่าการจัดวางภาพนอก 6 ค่า หากมี i รูป จะมีตัวไม่ทราบค่าในบล็อก $6 \cdot i$ ตัว
- 2) การวัดจุดโดยยึดหรือจุดผ่าน p จุดที่ปรากฏบนภาคพื้นดิน ซึ่งจะทำให้มีตัวไม่ทราบค่าเกิดขึ้นใหม่โดยที่จะนับเฉพาะที่เกิดขึ้นใหม่บนภาคพื้นดิน ดังนั้นจะมีตัวไม่ทราบค่า $3 \cdot p$

เมื่อพิจารณาจำนวนค่าสังเกตจะวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) หากมีการวัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน g จุด โดยที่แต่ละจุดนั้นปรากฏบนภาพถ่ายอย่างน้อยหนึ่งภาพ ถ้าให้แต่ละจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินปรากฏบนภาพ n_g^i ใน การวัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินบนภาพหนึ่งภาพจะได้ค่าสังเกตเพิ่มขึ้น 2 ค่า หากมีการวัดบนภาพในแต่ละภาพในบล็อก n_g นั้นคือคือค่าสังเกตจะมี $2 \cdot n_g$
 - 2) สำหรับจุดโดยยึด/จุดผ่าน แต่ละจุดต้องปรากฏบนภาคพื้นดิน 2 ภาพขึ้นไป ถ้าให้แต่ละจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินปรากฏบนภาพ n_p^j เมื่อนับการวัดพิกัดภาพ บันทึกเป็นจำนวนทั้งสิ้น n_p จะได้ค่าสังเกต $2 \cdot n_p$ ค่า
- ดังนั้นตัวไม่ทราบค่าในบล็อกทั้งสิ้น ก็จะเป็น

$$u = 6 \cdot i + 3 \cdot p$$

สมการ 5-7

โดยที่ จำนวนค่าสังเกตคิดเป็น

$$n = 2 \cdot n_g + 2 \cdot n_p$$

$$n_g = \sum_{i=1}^g n_g^i \quad \text{foreach } n_g^i \geq 1$$

สมการ 5-8

$$n_p = \sum_{j=i}^p n_p^j \quad \text{foreach } n_p^j \geq 2$$

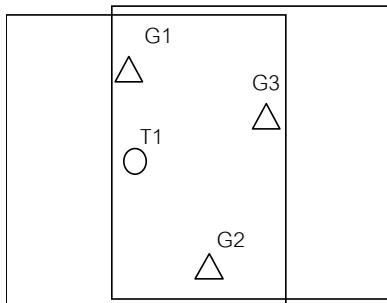
สมการเป็นเชิงตรรกะต่อ กันทั้งหมด ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะแก้ปัญหาได้ก็ต่อเมื่อจำนวนสมการที่มีความเป็นเชิงตรรกะได้จากค่าสังเกต n มีมากกว่าจำนวนตัวไม่ทราบค่า u

$$n \geq u$$

สมการ 5-9

5.7 ตัวอย่างการสร้างระบบสมการ

ในตัวอย่างนี้เป็นการสมมุติให้มีบล็อกของภาพถ่ายที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้คือ 2 ภาพ และมีการวัดจุดผ่าน 3 จุด และมีค่าพิกัดภาคพื้นดิน 3 จุดดังรูป



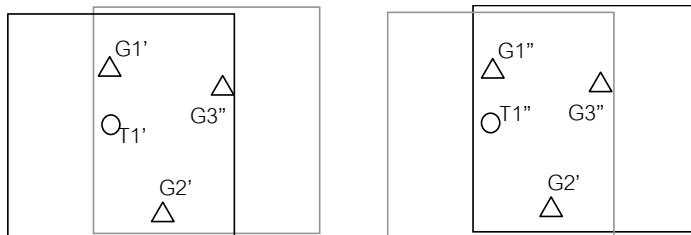
รูปภาพ 5-7 ตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายในข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศที่เล็กที่สุด

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวัดไปยังจุดภาคพื้นดินซึ่งมีค่าดังนี้

จุดภาคพื้นดิน	ค่าพิกัด	บทบาทในปัญหา
G1	X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}	เป็นค่าคงที่
G2	X_{G2}, Y_{G2}, Z_{G2}	
G3	X_{G3}, Y_{G3}, Z_{G3}	
T1	X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}	เป็นตัวไม่ทราบค่า

ตาราง 5-1 ค่าพิกัดของจุดภาคพื้นดินและบทบาท

เมื่อพิจารณาค่ารังวัดที่จะเป็นค่าสังเกต ในภาพทำการแยกภาพให้เห็นการวัดบนภาพ โดยให้สัญลักษณ์ของการวัดพิกัดภาพไปยังจุด G1 เป็น $G1'$ ในขณะที่การวัดจุด G1 เดียวกันนี้ได้ค่าพิกัดภาพบนภาพขวาเป็น $G2''$ เช่นเดียวกันกับจุด G2,G3,T1,T2,T3 ดังตารางข้างล่างนี้



ก) การวัดพิกัดภาพบนภาพซ้าย

ข) การวัดพิกัดภาพบนภาพขวา

รูปภาพ 5-8 การวัดพิกัดภาพบนภาพคู่สามมิติ

จะเห็นได้ว่ามีค่าสังเกตต่างๆ เนื่องจากการวัดบนภาพซ้ายและภาพขวาไปยังจุดต่างๆ ดังนี้

จุดบังคับภาพถ่าย	ค่าพิกัดภาพซ้าย	ค่าพิกัดภาพขวา
$G1$	(x'_{G1}, y'_{G1})	(x''_{G1}, y''_{G1})
$G2$	(x'_{G2}, y'_{G2})	(x''_{G2}, y''_{G2})
$G3$	(x'_{G3}, y'_{G3})	(x''_{G3}, y''_{G3})
$T1$	(x'_{T1}, y'_{T1})	(x''_{T1}, y''_{T1})

ตาราง 5-2แสดงค่าพิกัดที่เป็นค่าสังเกตของจุดบังคับภาพถ่ายที่รังวัดได้

5.7.5 การแก้ปัญหาด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การแก้ปัญหาโดยกอกของคำแสงนิยมใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนดังนี้

5.7.6 เวกเตอร์ของค่าสังเกต

ส่วนของเวกเตอร์ของค่าสังเกตที่เป็นการวัดไปยังจุดบังคับภาพพื้นดิน เป็นการวัดบนภาพซ้ายเป็น

$$L'_G = [x'_{G1} \quad y'_{G1} \quad x'_{G2} \quad y'_{G2} \quad x'_{G3} \quad y'_{G3}]^t \quad \text{สมการ 5-10}$$

ส่วนของเวกเตอร์ของค่าสังเกตที่เป็นการวัดไปยังจุดบังคับภาพพื้นดิน เป็นการวัดบนภาพขวาเป็น

$$L''_G = [x''_{G1} \quad y''_{G1} \quad x''_{G2} \quad y''_{G2} \quad x''_{G3} \quad y''_{G3}]^t \quad \text{สมการ 5-11}$$

ส่วนของเวกเตอร์ของค่าสังเกตที่เป็นการวัดไปยังจุดผ่าน เป็นการวัดบนภาพซ้ายเป็น

$$L'_T = [x'_{T1} \quad y'_{T1}]^t \quad \text{สมการ 5-12}$$

ส่วนของเวกเตอร์ของค่าสังเกตที่เป็นการวัดไปยังจุดผ่าน เป็นการวัดบนภาพขวาเป็น

$$L''_T = [x''_{T1} \quad y''_{T1}]^t \quad \text{สมการ 5-13}$$

ดังนั้นจะได้เวกเตอร์ของค่าสังเกตทั้งหมดเป็น

$$L = [L'_G \quad | \quad L''_G \quad | \quad L'_T \quad | \quad L''_T]^t \quad \text{สมการ 5-14}$$

5.7.7 เวกเตอร์ของตัวไม่ทราบค่า

เวกเตอร์ของตัวไม่ทราบค่าของภาพซ้าย

$$X' = [X0' \quad Y0' \quad Z0' \quad \omega' \quad \phi' \quad \kappa']^t \quad \text{สมการ 5-15}$$

เวกเตอร์ของตัวไม่ทราบค่าของภาพขวา

$$X'' = [X0'' \quad Y0'' \quad Z0'' \quad \omega'' \quad \phi'' \quad \kappa'']^t \quad \text{สมการ 5-16}$$

เวกเตอร์ของตัวไม่ทราบค่าของจุดผ่าน T1

$$X_T = [X_{T1} \quad Y_{T1} \quad Z_{T1}]^t$$

สมการ 5-17

เวกเตอร์ของตัวไม่ทราบค่า

$$X = [X' \mid X'' \mid X_T]^t$$

สมการ 5-18

5.7.8 สมการค่าสังเกต

สมการค่าสังเกตเป็นความสัมพันธ์ที่ได้สมการร่วมเส้นแทนค่าของตัวไม่ทราบค่าที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้น ซึ่งจะถูกปรับปรุงในรอบของการวนซ้ำลำดับลัดไป

สำหรับค่าสังเกตที่วัดไปบนจุดบังคับปัจจุบัน แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสังเกตที่บนภาพข้าง เมื่อหาค่าอนพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าต่างๆ ได้ดังนี้

-ค่าสังเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพข้างไปยังจุด G1

$$x'_{G1} = x(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}) \quad \text{สมการ 5-19}$$

$$y'_{G1} = y(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}) \quad \text{สมการ 5-20}$$

ฟังก์ชัน $x()$ และ $y()$ คือสมการสภาวะร่วมเส้นดังที่กล่าวมาแล้ว

-ค่าสังเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพข้างไปยังจุด G2

$$x'_{G2} = x(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{G2}, Y_{G2}, Z_{G2}) \quad \text{สมการ 5-21}$$

$$y'_{G2} = y(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{G2}, Y_{G2}, Z_{G2}) \quad \text{สมการ 5-22}$$

-ค่าสังเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพข้างไปยังจุด G3

$$x'_{G3} = x(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{G3}, Y_{G3}, Z_{G3}) \quad \text{สมการ 5-23}$$

$$y'_{G3} = y(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{G3}, Y_{G3}, Z_{G3}) \quad \text{สมการ 5-24}$$

-ค่าสังเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพขวาไปยังจุด G1

$$x''_{G1} = x(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}) \quad \text{สมการ 5-25}$$

$$y''_{G1} = y(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}) \quad \text{สมการ 5-26}$$

-ค่าสังเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพขวาไปยังจุด G2

$$x''_{G2} = x(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{G2}, Y_{G2}, Z_{G2}) \quad \text{สมการ 5-27}$$

$$y''_{G2} = y(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{G2}, Y_{G2}, Z_{G2}) \quad \text{สมการ 5-28}$$

-ค่าสังเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพขวาไปยังจุด G3

$$x''_{G3} = x(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{G3}, Y_{G3}, Z_{G3}) \quad \text{สมการ 5-29}$$

$$y''_{G3} = y(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{G3}, Y_{G3}, Z_{G3}) \quad \text{สมการ 5-30}$$

หลังจากนี้จะเป็นการวัดไปบนจุดผ่านหรือจุดโดยยึดทุกจุดแล้วให้เป็นตัวไม่ทราบค่า ค่าสั้งเกตต่อไปยังแต่ละจุดโดยยึดต้องปราศจากอย่างน้อยสองภาพ จึงจะสามารถหาค่าตอบได้

-ค่าสั้งเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพชั้ยไปยังจุดผ่าน T1

$$x'_{T1} = x(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}) \quad \text{สมการ 5-31}$$

$$y'_{T1} = y(X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa', X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}) \quad \text{สมการ 5-32}$$

-ค่าสั้งเกตจากการวัดพิกัดภาพบนภาพชั้ยาไปยังจุดผ่าน T1

$$x''_{T1} = x(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}) \quad \text{สมการ 5-33}$$

$$y''_{T1} = y(X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa'', X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}) \quad \text{สมการ 5-34}$$

5.7.9 แมทริกซ์แบบจำลอง

แมทริกซ์ของแบบจำลองได้จากการนำอนุพันธ์ของค่าสั้งเกตมาจัดรูป โดยให้ในแนวคอลัมน์เป็นกลุ่มของกลุ่มตัวไม่ทราบค่าการจัดวางภาพภายนอกเรียงตามลำดับแล้วตามด้วยตัวไม่ทราบค่าของจุดผ่านหรือจุดโดยยึด

ดังนั้นในกรณีของปัญหานี้จะทำการหาอนุพันธ์เรียงตามลำดับตัวแปรดังนี้ $X0', Y0', Z0', \omega', \varphi', \kappa'$, $X0'', Y0'', Z0'', \omega'', \varphi'', \kappa''$, X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1} ไปตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณา การวัดพิกัดภาพบนภาพชั้ยกับตัวไม่ทราบค่าการจัดวางภาพภายนอกของภาพชั้ยจะได้ส่วนของแมทริกซ์ดังนี้

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'_{G1}}{\partial X0'} & \frac{\partial x'_{G1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x'_{G1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x'_{G1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x'_{G1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x'_{G1}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y'_{G1}}{\partial X0'} & \frac{\partial y'_{G1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y'_{G1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y'_{G1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y'_{G1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y'_{G1}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial x'_{G2}}{\partial X0'} & \frac{\partial x'_{G2}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x'_{G2}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x'_{G2}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x'_{G2}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x'_{G2}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y'_{G2}}{\partial X0'} & \frac{\partial y'_{G2}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y'_{G2}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y'_{G2}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y'_{G2}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y'_{G2}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial x'_{G3}}{\partial X0'} & \frac{\partial x'_{G3}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x'_{G3}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x'_{G3}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x'_{G3}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x'_{G3}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y'_{G3}}{\partial X0'} & \frac{\partial y'_{G3}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y'_{G3}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y'_{G3}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y'_{G3}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y'_{G3}}{\partial \kappa'} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-35}$$

แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสั้งเกตที่วัดบนภาพชั้ย เมื่อหาค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าคือค่าการจัดวางภาพภายนอกของภาพชั้ยจะไม่เกี่ยวข้องกัน ได้ดังนี้

$$A_{12} = |0| \quad \text{สมการ 5-36}$$

แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสังเกตที่บันวัดภาพพื้นที่ของจุดควบคุมภาคพื้นดิน เมื่อหาค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของจุดผ่านใหม่ T1 จะไม่เกี่ยวข้องกัน ได้ดังนี้

$$A_{13} = [0] \quad \text{สมการ 5-37}$$

แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสังเกตที่วัดบนภาพขาว เมื่อหาค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าคือค่าการจัดภาพภายนอกของภาพพื้นที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ได้ดังนี้

$$A_{21} = [0] \quad \text{สมการ 5-38}$$

แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสังเกตที่บันภาพขาว เมื่อหาค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของค่าการจัดวางแผนภายนอกของภาพขาว ได้ดังนี้

$$A_{22} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x''_{G1}}{\partial X0'} & \frac{\partial x''_{G1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x''_{G1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x''_{G1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x''_{G1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x''_{G1}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y''_{G1}}{\partial X0'} & \frac{\partial y''_{G1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y''_{G1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y''_{G1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y''_{G1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y''_{G1}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial x''_{G2}}{\partial X0'} & \frac{\partial x''_{G2}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x''_{G2}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x''_{G2}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x''_{G2}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x''_{G2}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y''_{G2}}{\partial X0'} & \frac{\partial y''_{G2}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y''_{G2}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y''_{G2}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y''_{G2}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y''_{G2}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial x''_{G3}}{\partial X0'} & \frac{\partial x''_{G3}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x''_{G3}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x''_{G3}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x''_{G3}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x''_{G3}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y''_{G3}}{\partial X0'} & \frac{\partial y''_{G3}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y''_{G3}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y''_{G3}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y''_{G3}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y''_{G3}}{\partial \kappa'} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-39}$$

แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสังเกตที่บันวัดภาพขาวของจุดควบคุมภาคพื้นดิน เมื่อหาค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของจุดผ่านใหม่ T1 จะไม่เกี่ยวข้องกัน ได้ดังนี้

$$A_{23} = [0] \quad \text{สมการ 5-40}$$

สำหรับค่าสังเกตที่วัดไปบนจุดผ่าน T1

แมทริกซ์แบบจำลองของค่าสังเกตที่วัดบนภาพพื้นที่ไปบนจุดผ่าน เป็นค่าอนุพันธ์บางส่วนเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของจุดใหม่

-แมทริกซ์อนุพันธ์บางส่วนของการวัดจุดผ่าน T1 บนภาพพื้นที่เทียบกับตัวไม่ทราบค่าของค่าการจัดวางแผนภายนอกของภาพพื้นที่ จะได้

$$A_{31} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'_{T1}}{\partial X0'} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y'_{T1}}{\partial X0'} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial \kappa'} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-41}$$

-แมทริกซ์อนุพันธ์บางส่วนของการวัดจุดผ่าน T1 บนภาพพื้นที่เทียบกับตัวไม่ทราบค่าของค่าการจัดวางแผนภายนอกของภาพพื้นที่ จะไม่เกี่ยวข้องกัน จะได้

$$A_{32} = [0]$$

สมการ 5-42

-แมทริกซ์อนุพันธ์บ่งส่วนของการวัดจุดผ่าน T1 บนภาพข้ามเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของจุดผ่าน T1

$$A_{33} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x'_{T1}}{\partial X_{T1}} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial Y_{T1}} & \frac{\partial x'_{T1}}{\partial Z_{T1}} \\ \frac{\partial y'_{T1}}{\partial X_{T1}} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial Y_{T1}} & \frac{\partial y'_{T1}}{\partial Z_{T1}} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-43}$$

-แมทริกซ์อนุพันธ์ของการวัดจุดผ่าน T1 บนภาพข้ามเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของการจัดวางภาพ
ภายใต้เงื่อนไขของภาพข้าม จะไม่มีความเกี่ยวข้องกัน ดังนี้

$$A_{41} = [0]$$

สมการ 5-44

-แมทริกซ์อนุพันธ์บ่งส่วนของการวัดจุดผ่าน T1 บนภาพข้ามเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของการจัดวาง
ภายใต้เงื่อนไขของภาพข้ามจะได้ดังนี้

$$A_{42} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x''_{T1}}{\partial X0'} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial \kappa'} \\ \frac{\partial y''_{T1}}{\partial X0'} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial Y0'} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial Z0'} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial \omega'} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial \varphi'} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial \kappa'} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-45}$$

-แมทริกซ์อนุพันธ์บ่งส่วนของการวัดจุดผ่าน T1 บนภาพข้ามเทียบกับตัวไม่ทราบค่าของค่าพิกัด
ภาคพื้นดินของจุดผ่าน T1

$$A_{33} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x''_{T1}}{\partial X_{T1}} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial Y_{T1}} & \frac{\partial x''_{T1}}{\partial Z_{T1}} \\ \frac{\partial y''_{T1}}{\partial X_{T1}} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial Y_{T1}} & \frac{\partial y''_{T1}}{\partial Z_{T1}} \\ \frac{\partial Z_{T1}}{\partial X_{T1}} & \frac{\partial Z_{T1}}{\partial Y_{T1}} & \frac{\partial Z_{T1}}{\partial Z_{T1}} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-46}$$

เมื่อประกอบแมทริกซ์ย่อยเข้ากันเป็นแมทริกซ์แบบจำลอง A ของระบบจะได้เป็น

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-47}$$

แมทริกซ์ A จะมีลักษณะประกอบด้วยบล็อกของแมทริกซ์ย่อย และมีหลายส่วนที่มีค่าเป็น 0
เสมอ เมื่อสร้างสมการปกติ N (Normal Equation) ที่เกิดจาก $N = A^t PA$ ตามหลักการของการคำนวณ
ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด แมทริกซ์ N ของสมการปกติจะเป็นแมทริกซ์ชนิดสมมาตร(symmetry) และยังคงมี
หลายส่วนเป็น 0 ในทางปฏิบัติจะใช้วิธีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา โดยเฉพาะแมทริกซ์ขนาดใหญ่และมี

สมาชิกที่ไม่เป็นศูนย์น้อยๆ ที่เรียกว่า Sparse Matrix โดยทำให้การใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์น้อยที่สุด โดยการนำเอาประยุกต์ของโครงสร้างที่แน่นอน และมีแมตริกซ์อย่างบางแมตริกซ์เป็นศูนย์อย่างเป็นระบบ ดังในสมการต่อไปนี้

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & 0 & A_{33} \\ 0 & A_{42} & A_{43} \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-48}$$

5.7.10 ผลคำตอบ

ปัญหาการคำนวนข่ายสามเหลี่ยมโดยเทคนิคบล็อกของลำแสงสามารถคำนวนได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เมื่อไม่มีความผิดปกติใด โดยอาศัยวิธีการเชิงเลข (Numerical Method) คำตอบของระบบสมการควรจะเข้า (Convert) สู่คำตอบแล้ว จะได้คำตอบของระบบสมการเป็นไปตามการจัดลำดับของตัวไม่ทราบค่าที่กำหนดไว้ตั้งแต่ตอนต้น ได้แก่ ค่าการจัดวางภาพภายนอกสำหรับแต่ละภาพทั้ง 6 ค่าเรียงไปตามลำดับ หลังจากนั้นจะตามด้วยค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดผ่าน ซึ่งในที่นี้คือค่าพิกัดทั้งสามมิติของจุดผ่าน T1 ตามที่ต้องการ

5.8 การกำหนดความละเอียดถูกต้องของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

การกำหนดความละเอียดถูกต้องของจุดควบคุมภาคพื้นดินสามารถทำได้โดยการประมาณค่าความละเอียดถูกต้องที่คาดหวังได้จากการวัดบนภาพคู่สามมิติด้วยเรขาคณิต ภาพคู่สามมิติได้จากภาพถ่ายดิจิทัลในอุปกรณ์ดังกล่าว

สำหรับความละเอียดถูกต้องทางดิจิทัลในทางปฏิบัติ นิยมใช้

$$\sigma_H = 0.15\% \times H \quad \text{สมการ 5-49}$$

$$\text{หรือ } \sigma_H = \frac{0.15}{1,000} \times H$$

เมื่อยกเว้นรับว่าการวัดบนภาพมีความละเอียดถูกต้องดังนี้

ชนิดบังคับภาพถ่าย	ความละเอียดถูกต้องในการวัดพิกัดภาพ σ_x และ σ_y (เมตร)
จุดเป้าล่วงหน้า	5
จุดที่เด่นชัดในภูมิประเทศ	10
จุดเจาะบนไดอะฟอซิทีฟ	10-30

ตาราง 5-3 ความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดภาพ

เมื่อกำหนดให้ภาพมีส่วนช้อนปกติ 60 % และมีความละเอียดถูกต้องในการวัดพิกัดจุดบังคับภาพถ่ายเป็น

$$\sigma_x = \sigma_y = 10 \mu m \quad \text{สมการ 5-50}$$

ดังนั้นความละเอียดถูกต้องในการวัดพาราแอลกอริทึม

$$\sigma_{px} = \sqrt{2} \sigma_x \approx 14 \mu m \quad \text{สมการ 5-51}$$

จะได้ตารางแสดงความละเอียดถูกต้องที่คาดหวังได้ของจุดบนภาพพื้นดิน

เลข มาตรา ส่วน	ความ ยาว โพกัส	ขอบเขต ครอบคลุม	ระยะฐาน บิน	ความสูง บิน	ความละเอียด ถูกต้องทางราบ	ละเอียด ถูกต้องทางดิ่ง เชิงเรขาคณิต	ละเอียด ถูกต้องทางดิ่ง เชิงปฏิบัติ
	(mm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
50000	153	11500	4600	7650	0.50	1.16	1.15
50000	305	11500	4600	15250	0.50	2.32	2.29
25000	153	5750	2300	3825	0.25	0.58	0.57
25000	305	5750	2300	7625	0.25	1.16	1.14
15000	153	3450	1380	2295	0.15	0.35	0.34
15000	305	3450	1380	4575	0.15	0.70	0.69
6000	153	1380	552	918	0.06	0.14	0.14
6000	305	1380	552	1830	0.06	0.28	0.27

ตาราง 5-4 ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาคคู่สามมิติ

5.8.1 ตัวอย่าง

สมมุติให้เป็นการบินถ่ายภาพที่มาตราส่วน 1:15,000 ด้วยกล้องถ่ายภาพทางอากาศความยาวโพกัส 153 มม. ต้องการรังวัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ด้วยเหตุผลของความสามารถในการวัด เครื่องมือวัดพิกัด จุดภาพ และ ชนิดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ให้ความละเอียดถูกต้องในการวัดเป็น 10 ไมครอน เช่นเดียวกับ ข้างต้น

จะได้ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาคคู่สามมิติจะได้ดังนี้ ความละเอียดถูกต้องทางราบเป็น 0.15 เมตร ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งตามทฤษฎีเป็น 0.35 เมตร ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งในทางปฏิบัติ เป็น 0.34 เมตร

หากใช้สมมุติฐานที่ว่าหากต้องการรังวัดควบคุม การรังวัดจะต้องมีความละเอียดถูกต้องกว่าหนึ่งระดับ ซึ่งเพื่อความประยุตและให้ได้ผลดีพอกสมควรอาจเลือกใช้ การรังวัดควบคุมที่มีความละเอียดถูกต้องสูงกว่าหนึ่ง ในสาม กล่าวคือ

การรังวัดควบคุมสำหรับทางราบจะต้องใช้วิธีและเครื่องมือที่ให้ความละเอียดถูกต้องถึง 0.05 เมตร และ ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งถึง 0.12 เมตร จึงจะพอเพียง เป็นต้น

5.9 การจัดวางจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดิน

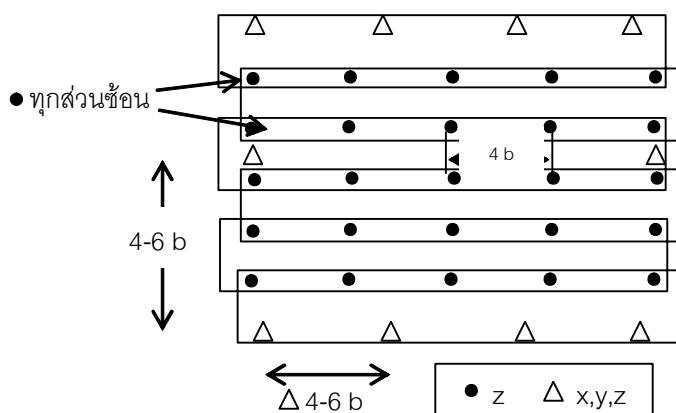
จุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินมีความสำคัญต่อความสำเร็จของงานรังวัดด้วยภาพอย่างยิ่ง จุดพิกัดภาคพื้นดินเป็นจุดพิกัดที่รังวัดความละเอียดถูกต้องสูงในนาม เป็นจุดที่เห็นเด่นชัดทั้งในภูมิประเทศและในภาพถ่าย ค่าความถูกต้องพิกัดของจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินจะถูกถ่ายทอดเข้าไปในระบบสมการของการคำนวณปรับแก้ในเบล็อกของภาพถ่าย ความผิดพลาดของจุดควบคุมภาพพื้นดินจะแพร่เข้าไปในผลลัพธ์ หากมีจำนวนจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินมากก็จะทำให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ นอกจากนั้นเราคาดหวังของบล็อกค่ายมีความสำคัญต่อความละเอียดถูกต้องที่จะได้ตำแหน่งที่ตั้งของจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินที่มีความสำคัญ เช่น กัน นอกเหนือจากความละเอียดถูกต้องที่ต้องคงไว้ด้วยเหตุผลใน 5.8 การกำหนดความละเอียดถูกต้องของจุดควบคุมภาคพื้นดิน ดังนั้นการเลือกการจัดวางตำแหน่งและจำนวนของจุดพิกัดภาพพื้นดินจึงเป็นเรื่องสำคัญ

ตำแหน่งการจัดวางจุดบังคับภาคพื้นดินและจำนวนที่เหมาะสม คือจำนวนไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น ในขณะเดียวกันให้ผลลัพธ์การคำนวณปรับแก้ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงพอสมควร การที่จะหาตำแหน่งการจัดวางจุดบังคับภาคพื้นดินและจำนวนที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการสร้างสนามทดสอบที่มีจุดบังคับภาพพื้นดินอย่างหนาแน่น แล้วทำการคำนวณปรับแก้ เปรียบเทียบผลลัพธ์ของ “จุดตรวจสอบ” กับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดินที่มีความละเอียดถูกต้องสูงกว่า หลังจากนั้นทำการคำนวณใหม่โดยการลดจำนวนการจัดวางจุดบังคับภาคพื้นดินลง แล้วทำการคำนวณเปรียบเทียบกับ จุดตรวจสอบ ซึ่งจะสามารถนำไปสู่ข้อสรุปของ ตำแหน่งการจัดวางจุดบังคับภาคพื้นดินและจำนวนที่เหมาะสมที่สุดได้

ต่อไปนี้เป็นรูปแบบการจัดวางจุดพิกัดภาพพื้นดินที่เหมาะสม สำหรับรูปแบบของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศดังนี้ตาม “คู่มือการปฏิบัติงานรังวัดด้วยภาพ” Photogrammetric Guide (Albertz 1989) แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ บล็อกปกติ บล็อกความถูกต้องสูง บล็อกมีแล็บคลูม นอกจากนี้ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมยังมีการนำเทคโนโลยีรังวัดด้วยดาวเทียมมาใช้ด้วย จึงมีการประยุกต์ใช้ที่เรียกว่า บล็อกคลีฟีเอส อีกด้วย

5.9.5 บล็อกปกติ (Typical Block)

บล็อกปกติคือบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่บินถ่ายภาพด้วยส่วนช้อน 60% และมีส่วนช้อนด้านข้าง 20-30 % ตำแหน่งการจัดวางจุดบังคับภาคพื้นดินและจำนวนที่เหมาะสมจะมีลักษณะดังนี้



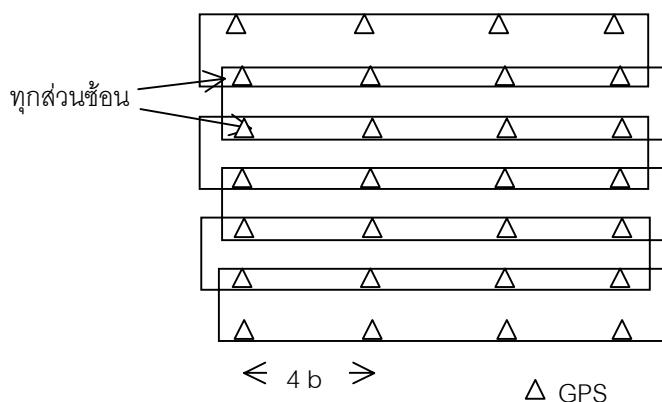
รูปภาพ 5-9 ตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกปกติ

จะเห็นได้ว่าสำหรับบล็อกภาคติรอนฯ บล็อกจะต้องมีจุดควบคุมภาคพื้นดินทุกๆ ระยะ 4 ถึง 6 เท่าของระยะฐานบินหรือเรียกว่าระยะ 4b ถึง 6b ตามลำดับ (Albertz 1989)

ระหว่างส่วนซ้อนด้านข้างทุกๆ ส่วนซ้อนระหว่างแนวบินจะต้องมี จุดควบคุมภาคพื้นดิน ทุกๆ ระยะสี่เท่าของระยะฐานบิน (4 b) จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ปรากฏบนส่วนซ้อนด้านข้างนี้ เป็นจุดอย่างน้อยมีค่าระดับบก พอกเพียง ซึ่งด้วยวิธีการรังวัดสนามโดยการใช้กล้องสำรวจจะสามารถช่วยให้งานสนามน้อยลงได้

ปัจจุบันมีการใช้การรังวัดด้วยดาวเทียมที่มีความละเอียดถูกต้องที่จะใช้บังคับงานข่ายสามเหลี่ยมได้ จึงนิยมที่จะใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ส่วนซ้อนด้านข้างเป็นจุดพิกัดที่มีค่าพิกัดทั้งสามแกน แต่อย่างไรก็ตามการใช้ค่าพิกัดจากการรังวัดดาวเทียมต้องคำนึงถึงความแตกต่างระหว่างค่าระดับแบบอร์โตรเมติกกับค่าระดับเหนือหัวเรือ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

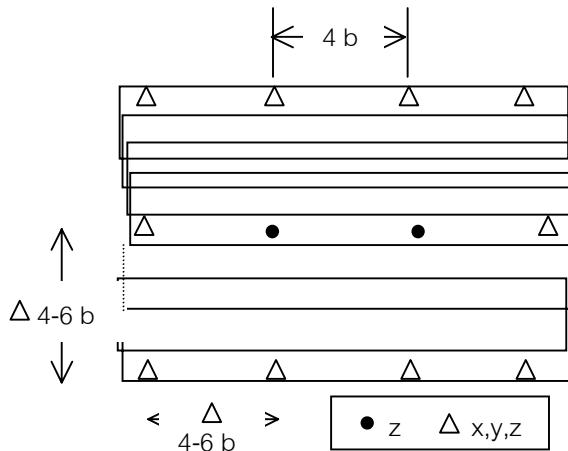
ดังนั้นสำหรับ บล็อกภาคติรอนฯ มีการใช้การรังวัดดาวเทียมจีพีเอสที่ให้ค่าพิกัดพร้อมกันในทั้งทางราบและทางดิ่งด้วยความละเอียดถูกต้องสูง ในแต่ละบล็อกจึงอาจกำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมภาคพื้นที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสดังภาพ



รูปภาพ 5-10 ตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกภาคติรอนฯ โดยการใช้การรังวัดจีพีเอส

5.9.6 บล็อกความถูกต้องสูง (High-Accuracy Block)

บล็อกความละเอียดถูกต้องสูงหมายถึงบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่มีส่วนซ้อนด้านหน้าเป็น 60% และส่วนซ้อนด้านข้างเป็น 60 % ซึ่งการทำเช่นนี้จะทำให้ภาพถ่ายมีการยืดแน่นมากขึ้นโดยเฉพาะระหว่างแนวบินดังรูป



รูปภาพ 5-11 ตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับล็อกความถูกต้องสูง

จะเห็นได้ว่าสำหรับบล็อกความถูกต้องสูง รอบๆบล็อกจะต้องมีจุดควบคุมภาคพื้นดินทุกๆระยะ 4 ถึง 6 เท่าของระยะฐานบิน (b) เช่นเดียวกับบล็อกปกติ

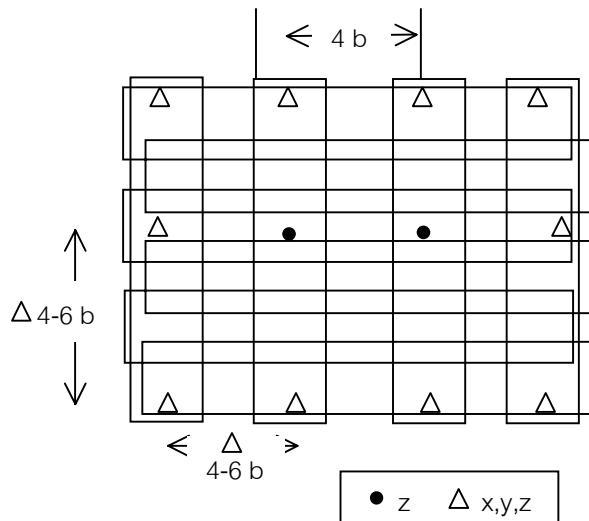
แต่ภายในบล็อกจะระหว่างส่วนซ้อนด้านข้างจะต้องมี จุดควบคุมภาคพื้นดิน ทุกๆระยะ 4b โดยที่ส่วนซ้อนระหว่างแนวบินจะสามารถเว้นไปได้ทุกๆ 4b ถึง 6 b จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ปรากฏบนส่วนซ้อนด้านข้างนี้เป็นจุดอย่างน้อยมีค่าระดับก็พอเพียง

การที่ภายในบล็อกมีจุดควบคุมภาคพื้นดินบนส่วนซ้อนด้านข้างเป็นระยะห่าง 4b ถึง 6 b ก็จะทำให้งานสนำลดลงไปได้มากโดยเฉพาะบล็อกที่มีขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามสำหรับบล็อกความถูกต้องสูง ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบินถ่ายภาพและบันทึกภาพมากขึ้น เมื่อจำนวนแนวบินเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้มีงานสำนักงานเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการวัดจุดผ่านและจุดโดยยึด

บล็อกความถูกต้องสูง ควรจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือสูงมาก และให้ความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดจุดผ่านจุดโดยยึดติดขึ้น และจำนวนจุดผ่านและจุดโดยยึดจะมีมากขึ้นด้วย

5.9.7 บล็อกมีແບຄຸມ (Block with Control Strips)

บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่มีແບຄຸມหมายถึงบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศคล้ายกับ "บล็อกปกติ" แต่มีการบินถ่ายเพิ่มเติมโดยการบินขวางซ้อนทับกับแนวบินของบล็อกปกติ แนวบินที่ขวางซ้อนทับโดยทั่วไปจะให้ห่างกัน 4 b แนวบินที่ขวางซ้อนทับนี้เรียกว่า ແບຄຸມ (Control Strip)

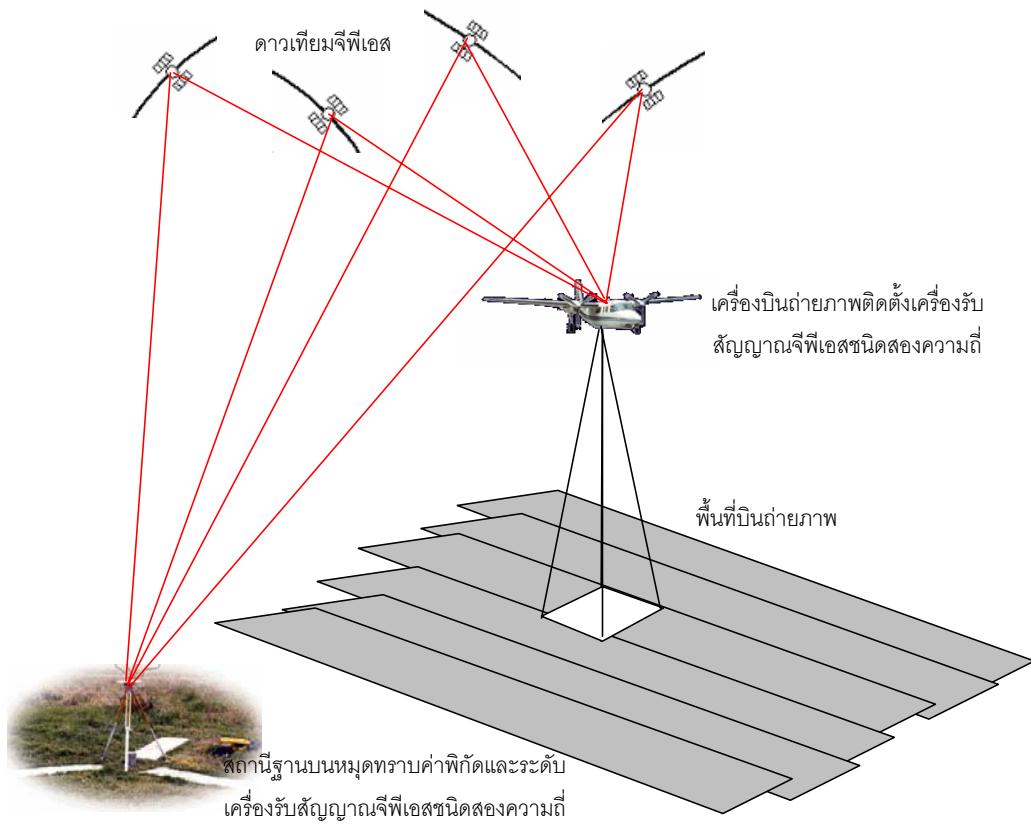


รูปภาพ 5-12 ตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภายนอกสำหรับล็อกมีແບຄຸມ

จะเห็นว่าบล็อกมีແບຄຸມຈະມีจำนวนແນວບິນໄມ່ຕ່າງຈາກບັດປົກຕິມາກັນກຳ ໃນຂະນະທີ່ສາມາດດັດດານ
ສະນາມລົງໄປໄດ້ມາກ ໂດຍທີ່ໄມ່ຕ້ອງຮັງວັດຈຸດຄວບຄຸມການພື້ນດິນທີ່ສ່ວນຫຼຸອນດ້ານໜ້າທຸກສ່ວນຫຼຸອນ ແຕ່ຍ່າງໄຮກ້ຕາມ
ງານວັດຈຸດຜ່ານແລະຈຸດໂຢງຢືດຈະມາກຂຶ້ນດ້ວຍ ວິທີນີ້ນໍາຈະເປັນທາງເລືອກທີ່ສ່ວນຫຼຸອນ ເນື່ອຈາກສາມາດນໍາເລີກແລ້ວຢູ່ກາ
ເຂົ້າດຶງຈຸດຈຳນວນນາກໃນກຸມປະເທດທີ່ຖຸກັນດາຍາກຕ່ອງການເຂົ້າດຶງ

5.9.8 บლ็อกຈີ່ເພື່ອສ (GPS Block)

ບັດປົກຈີ່ເພື່ອສໍາມາຍດຶງບັດປົກທີ່ມີສ່ວນຫຼຸອນດ້ານໜ້າ 60% ແລະສ່ວນຫຼຸອນດ້ານໜ້າ 30% ມີກາຣໃຊ້ເຄື່ອງ
ເຄື່ອງຮັບສ້າງຄູ່າວຸນຈີ່ເພື່ອສໍານິດສອງຄວາມຄືເພື່ອໃຫ້ຫາພິກັດຂອງຈຸດເປີດດໍາຍໝາຍທີ່ບິນດໍາຍໝາພ ໃນເວລາເດືອນບັນ
ການພື້ນດິນໃນຮະບະທ່ານໄມ່ເກີນ 40-60 ກິໂລເມຕຣ໌ ອ່ອມາກວ່າ ມີກາຣຕັ້ງເຄື່ອງຮັບສ້າງຄູ່າວຸນຈີ່ເພື່ອສໍານິດສອງຄວາມຄືບິນ
ຮມຸດຄວບຄຸມທີ່ທຽບຕ່າງພິກັດອ້າງອີງທີ່ເຮືອກວ່າ ສະຖານີສູານ (base-station) ຄວາມຄືຂອງການຮັບສ້າງຄູ່າວຸນອາຈສູງເຖິງ 1
ເຊີຣຕ(Hz) ດ່າວິກັດຂອງຈຸດເປີດດໍາຍໝາພທີ່ຮັງວັດດໍາຍຈີ່ເພື່ອສບນເຄື່ອງແລະຫຼຸອນທີ່ຮັບໄດ້ຈາກສະຖານີສູານຈະຄຸກນຳມາ
ຈຳນວນປັບປຸງແກ້ເຂົ້າກັບຮບສມກາ ທຳໄໝກາຮ່ານວນປັບປຸງແກ້ມີຄວາມເຂົ້າໄດ້ສູງ ເປົ້າຍບ່ານເອົນນີ້ "ຈຸດຄວບຄຸມ
ກາພດໍາຍກາຄອກາສ" ກຳກັບກາພດໍາຍທຸກຮູບ ທຳໄໝສາມາດດັດຈຳນວນຈຸດຄວບຄຸມການພື້ນດິນ



รูปภาพ 5-13 ปฏิบัติการ GPS Photogrammetry

แต่อย่างไรก็ตามค่าพิกัดที่ได้จากการรับสัญญาณจีพีเอสเป็นค่าพิกัดของเส้าอากาศรับสัญญาณจีพีเอสซึ่งมักจะติดตั้งบนลำตัวของอากาศยาน ดังนั้นจึงต้องมีการหาค่าออฟเซ็ตระยะห่างระหว่างเส้าอากาศรับสัญญาณจีพีเอสและจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องถ่ายภาพทางอากาศ วิธีหนึ่งที่มีความละเอียดถูกต้องสูงและน่าเชื่อคือการใช้วิธีการวัดโดยใช้กล้องธีโอดิไลท์ กล้องรังวัดอิเล็กทรอนิกส์หรือกล้องสถานีรวมประกอบกับเป้าปริซึมในการวัดทิศทางราบมุมตั้งและระยะทาง เพื่อใช้ในการคำนวนค่าออฟเซ็ต ค่าออฟเซ็ตจะบรรยายด้วยค่าต่างของพิกัดเส้าอากาศรับสัญญาณจีพีเอสและจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องถ่ายภาพทางอากาศในแนวกับ x ที่ให้ขานนกับกึ่งกลางแกนลำตัวเครื่องบิน กึ่งกลางแกนลำตัวเครื่องบินอาจนิยามด้วยจุดปลายสุดยอดส่วนหัวและปลายสุดยอดของส่วนท้ายของลำตัวเครื่องบิน แกนตั้งหรือแกน z มักจะใช้แนวแกนที่ตั้งได้จากกับพื้นห้องโดยสารเครื่องบินเป็นแกนข้างอิ่ง



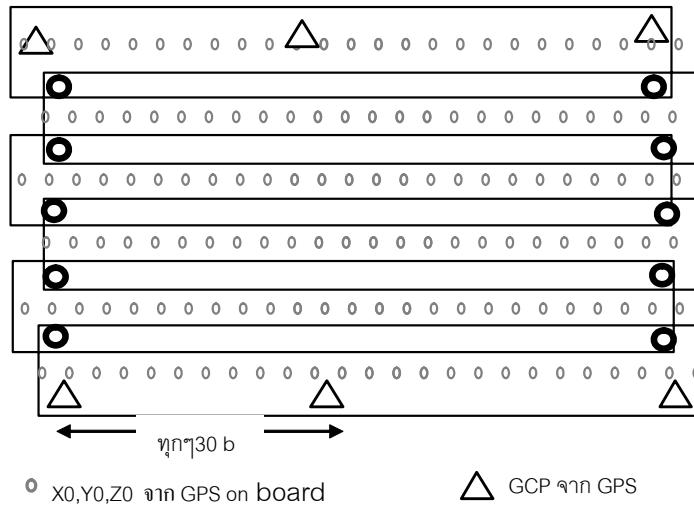
รูปภาพ 5-14 แสดงวิธีการใช้กล้องสถานีรวมหาค่าจีพีเอสของเฟ็ชต์ (กรุงเทพฯ 2546)

จากงานวิจัยที่มหาวิทยาลัย Hannover พบร่วมกับมหาวิทยาลัยในประเทศเยอรมัน พบว่าเมื่อใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่มุ่งของบล็อกเพียง 1 ถึง 4 จุดก็พอเพียง ผลการคำนวณปัจจุบันแก้ไขสามเหลี่ยมด้วยวิธีบล็อกคลัสเตอร์แบบร่วมกับค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสบนเครื่องบิน จะได้ผลลัพธ์เทียบเท่ากับบล็อกปกติ (Lee 1996, Jacobsen 2002) บล็อกปกติคือบล็อกของภาพถ่ายที่กล่าวมาแล้วใน 5.9.5 บล็อกปกติ (Typical Block)

เมื่อบล็อกจีพีเอสต้องการจุดควบคุมภาคพื้นดินที่มุ่งของบล็อก 4 จุด จึงสามารถที่จะเพิ่มคุณภาพของช่องสามเหลี่ยม ความละเมียดฉุกเฉียดและความต้องและความต้องมั่นใจโดยการใช้จุดควบคุมภาคพยากรณ์ให้สัญญาณ (Signalized Control Point) ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ทำได้เนื่องจากมีจำนวนน้อย และมีความคุ้มค่าที่จะทำมาก จุดควบคุมภาคพื้นดินสำหรับบล็อกจีพีเอสจึงนิยมที่จะทำเป็นจุดควบคุมภาคถ่ายชนิดให้สัญญาณ นอกเหนือจากนี้การใช้จุดควบคุมมากกว่า 3 จุด จะช่วยให้สามารถแปลงพื้นหลังฐานอ้างอิงทางระดับจากระบบความสูงบนทรงรีให้เป็นระบบความสูงเหนือพื้นผิวยื่อยด้วยวิธีการที่ได้อธิบายไว้

5.9.8.1 มาตรฐานจุดควบคุมภาคพื้นดินสำหรับบล็อกจีพีเอส

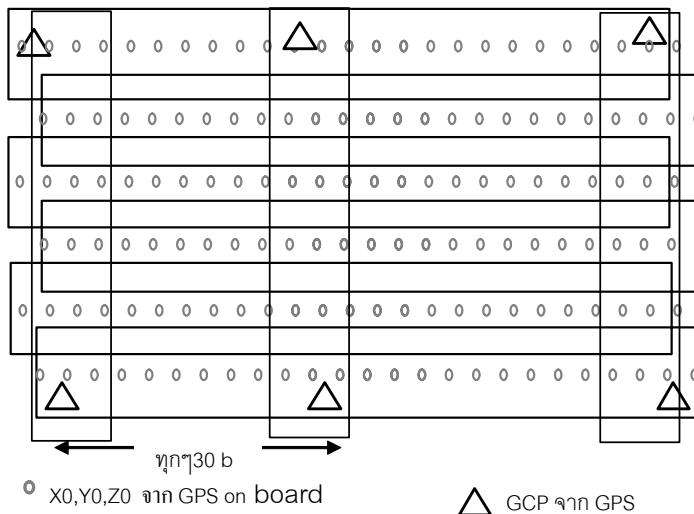
นอกจากจะต้องมีจุดควบคุมภาคพื้นที่ดิน (GPS) ที่มุ่งทั้งสี่แล้ว ควรที่จะมีจุดควบคุมภาคพื้นดินชนิดค่าระดับเพียงอย่างเดียวในส่วนข้อนด้านข้างระหว่างแนวบิน โดยจำกัดเฉพาะที่บริเวณเริ่มต้นแนวบินและแนวสิ้นสุดแนวบิน กรณีที่มีภาพถ่ายเป็นจำนวนมากในแต่ละแนวบิน แนะนำให้เพิ่มจุดควบคุมภาคพื้นดินในแนวบินแรกและแนวบินสุดท้าย สำหรับภาพถ่ายทุกระยะ 30 ของระยะฐานบิน (30b) ดังภาพ



รูปภาพ 5-15 ตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับล็อกจีพีเอส

หากต้องการหลีกเลี่ยงการใช้ Leveling GCP จำนวนมากที่แนวเริ่มของแนวบินและปลายสุดแนวบิน อาจใช้วิธีการบินขวางที่แนวเริ่มด้านแนวบิน และที่แนวสิ้นสุดแนวบิน หากแนวบินยาวมากให้บินขวางทุกระยะ 30b ดังภาพ

จะเห็นได้ว่ามีเม็ดค่าใช้จ่ายการบินบันทึกภาพเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย และมีการรังวัดพิกัดเพิ่มเติมอีกด้วย



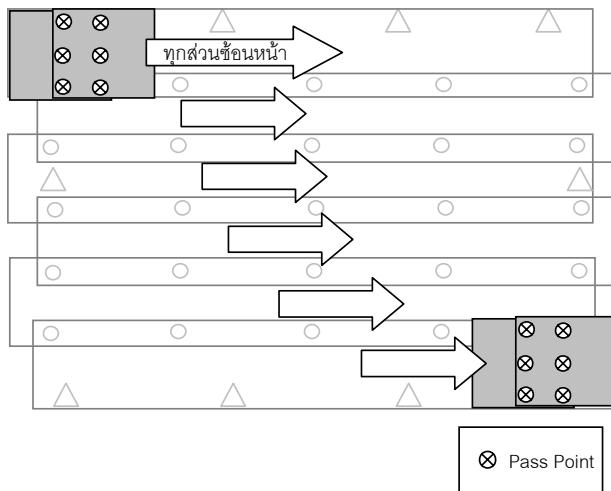
รูปภาพ 5-16 ตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับล็อกจีพีเอส

5.10 ขั้นตอนการรับส่งงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

บล็อกปกติมักจะหมายถึงการบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยภาพถ่ายทางอากาศขนาดมาตรฐาน โดยมีส่วนข้อนของแต่ละภาพที่อยู่ในแนวบินเดียวกันเป็น 60% ของความกว้างของภาพ และมีส่วนข้อนด้านข้างระหว่างสองแนวบินที่อยู่ติดกันเป็น 30% เมื่อต้องการรังวัดเพื่อทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะต้องมีขั้นตอนการรังวัดดังนี้

5.10.1 การวัดจุดผ่าน (Pass Points)

จุดผ่านจะต้องถูกวัดอย่างน้อย 6 จุดบนส่วนข้อนระหว่างภาพในแนวบินหรือทุกๆแบบจำลอง จุดโดยยึดเป็นจุดที่เด่นชัดในภูมิประเทศและปรากฏชัดบนภาพถ่ายและไม่ทราบค่าพิกัดมาก่อน ซึ่งหลังจากการปรับแก้แล้วจะได้ค่าพิกัดภาพพื้นดินในทั้งสามมิติโดยที่ไม่ต้องไปรังวัดในสนามซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของการทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ในภาพแสดงให้เห็นถึงการวัดจุดผ่านในบล็อก

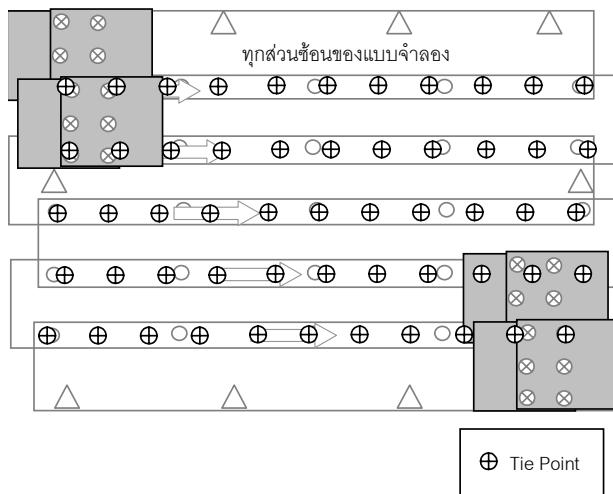


รูปภาพ 5-17 การวัดจุดผ่าน

ดังนั้นทุกภาพจะปรากฏจุดผ่านอย่างน้อย 9 จุดบนแต่ละภาพภายหลังการวัดและคำนวนปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยม สำหรับภาพแรกและภาพสุดท้ายในแนวบินอาจมีจุดผ่านเพียง 6 จุดก็ได้เนื่องจากไม่มีส่วนข้อนกับภาพอื่นๆในแนวบินเดียวกัน จุดผ่านทั้ง 9 จุดบนทุกๆภาพจะถูกคำนวนในขั้นตอนของการคำนวนปรับแก้ในข่ายสามเหลี่ยม ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการคำนวนพิกัดของจุดใดๆในบันส่วนข้อนของภาพคู่สามมิติ การเขียนแผนที่และการผลิตภาพถ่ายออกอีกด้วย

5.10.2 การวัดจุดโยงยึด (Tie Point)

จุดโดยยึด คือจุดที่เด่นชัดบนภาพที่ปรากฏอยู่ระหว่าง “แบบจำลอง(model)” ที่มีส่วนข้อนกันระหว่างสองแนวบินที่ติดกัน ทุกๆหนึ่งหรือสองแบบจำลองจะต้องมีการวัดจุดโดยยึดหนึ่งจุด จุดโดยยึดเป็นจุดที่เด่นชัดบนภาพถ่ายแต่ไม่จำเป็นต้องเด่นชัดบนภาคพื้นดินและไม่ทราบค่าพิกัดมาก่อน ในภาพแสดงการวัดจุดโดยยึดในบล็อก

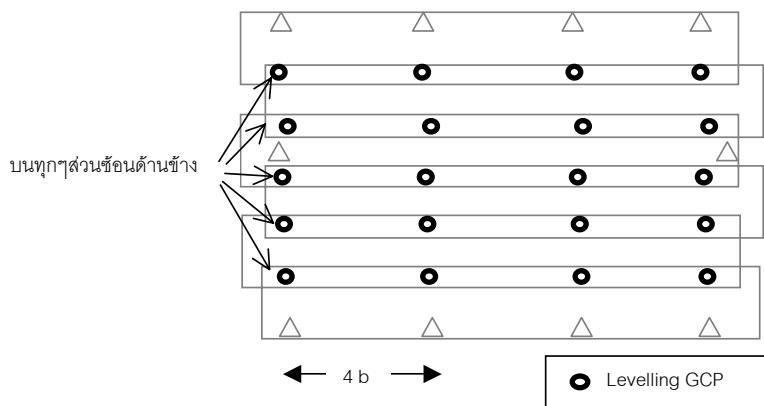


รูปภาพ 5-18 การวัดจุดโดยยึด

ซึ่งหลังจากการปรับแก้แล้วจะได้ค่าพิกัดภาคพื้นดินในทั้งสามมิติโดยที่ไม่ต้องไปรังวัดในสนามซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของการทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เนื่องจากมีปัจจัยครั้งที่จุดโดยยึดและจุดผ่านปราภูมิอยู่ใกล้กัน ควรที่จะใช้จุดเหล่านี้เป็นจุดเดียวที่วัดเพื่อจะทำให้ผลลัพธ้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นเนื่องจากการสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของคาสังเกตกับตัวไม่ทราบค่า

5.10.3 การวัดจุดบังคับภาคพื้นดินชนิดจุดระดับ (Levelling GCP)

การวัดจุดบังคับภาคพื้นดินชนิดจุดระดับ (Levelling GCP) เป็นการวัดบนภาพถ่ายของจุดบังคับภาพถ่ายชนิดที่เป็นจุดที่มีการวัดภาคพื้นดินที่ใช้ค่าระดับเพียงอย่างเดียว จุดนี้ที่ปราภูมิชัดเจนบนภาพถ่ายในส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวบิน สำหรับลักษณะปกติทุกๆ ส่วนซ้อนด้านข้างจะต้องมีจุดบังคับภาคพื้นดินชนิดระดับเท่านั้นอยู่ห่างเป็นระยะสี่เท่าของความยาวของระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่ายของสองรูปที่อยู่ติดกันในแนวบินเดียวกัน นั่นคือทุกๆ 4b จุดระดับควรเป็นจุดที่อยู่บนพื้นที่ค่อนข้างราบเรียบ ซึ่งหากเป็นการรังวัดในแบบจำลองสามมิติ เช่นบนเครื่องเขียนแผนที่สามมิติ ก็อาจใช้จุดที่ไม่เด่นชัดทางตำแหน่ง แต่ออาศัยเครื่องช่วยมองสามมิตินำจุดลงไป"ແຕะ" ก็พอเพียง เพราะมีคุณลักษณะของสามมิติได้

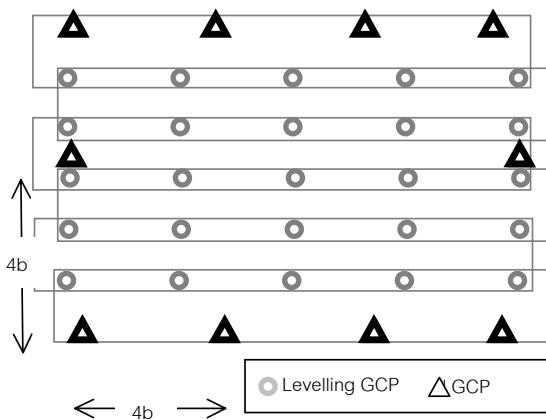


รูปภาพ 5-19 การวัดจุดโดยยึด

แต่ในปัจจุบันการวัดข่ายสามเหลี่ยมมักทำบนภาพดิจิตอลในซอฟต์แวร์ด้วย softcopy photogrammetry และจะเป็นการวัดค่าพิกัดภาพบนภาพโดยตรงที่ลักษณะ และรวมไปจนถึงการวัดจุดอย่างยืดแบบอัตโนมัติโดยอาศัยหลักการประมวลผลภาพ จึงจำเป็นต้องเลือกจุดที่เด่นชัดและพิสูจน์ทราบได้ในทั้งทางราบและทางดิ่ง เพื่อให้สามารถซึ้งตำแหน่งและวัดซ้ำได้ในหลายภาพ นอกเหนือนี้ในกรณีที่ความสูงนี้รังวัดมาจากระบบ GPS ซึ่งให้ค่าพิกัดในทั้งสามแกน ก็สามารถนำมาใช้ในการทำจุดอย่างยืดได้เช่นกัน โดยที่ค่าพิกัดในสามมิติก็สามารถนำมาใช้งานได้แล้วทำให้การคำนวนปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องสูงขึ้น

5.10.4 การวัดจุดบังคับภาพถ่าย (Ground Control Point)

การวัดจุดบังคับภาพถ่าย (Ground Control Point) จุดบังคับภาพถ่ายชนิดเติมเป็นจุดที่มีค่าพิกัดแล้วในทั้งทางราบและทางดิ่ง เป็นจุดรังวัดที่ปรากฏชัดเจนบนภาพถ่ายและมักปรากฏอยู่รอบๆ บล็อก เพื่อความประหยดจะมีการกำหนดจุดให้น้อยที่สุด แต่ก็ให้ความละเอียดถูกต้องในการคำนวนอยู่ในเกณฑ์พอเพียง จุดบังคับภาพถ่ายชนิดเติมเป็นจุดที่เด่นชัด และมีค่าพิกัดได้จากการรังวัดที่มีความละเอียดถูกต้องสูง เช่นการรังวัดภาคพื้นดินด้วยงานวงรอบ หรืองาน GPS โดยเฉพาะงาน GPS ให้ความละเอียดถูกต้องสูง สะดวกและรวดเร็ว



รูปภาพ 5-20 การวัดจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดิน

5.11 ข้อควรระวังและข้อสังเกต

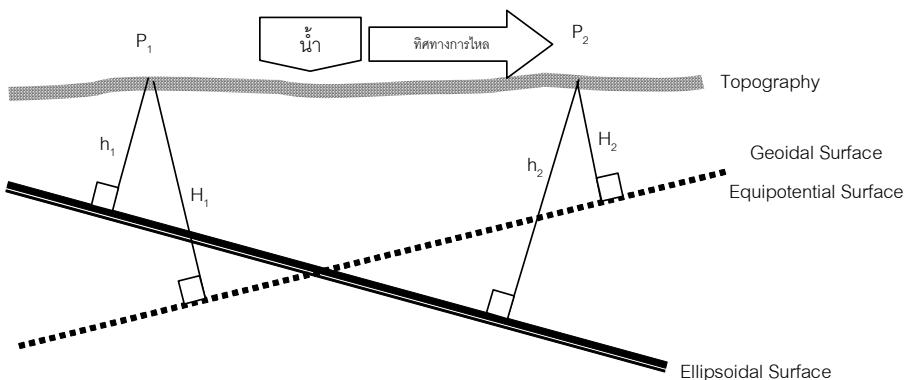
5.11.1 การเลือกจุดบังคับภาพ

การรังวัดจุดที่อยู่บนส่วนซ้อนของภาพทั้งในแนวบินเดียวกันและระหว่างแนวบินที่เป็นการกำหนดจุดใหม่บนภาพถ่ายทางอากาศ ในการเลือกจุดผ่านจุดโดยภาพและจุดบังคับภาพต่างๆนั้น การเลือกจุดที่ซ้ำกันได้จะทำให้ความละเอียดถูกต้องสูงขึ้นและความนำเข้าถือสูงขึ้น ทั้งนี้ เพราะการวัดบนจุดใหม่ที่ไม่ทราบค่าพิกัดทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่า 3 ตัว ในขณะที่การวัดจุดพิกัดบนภาพถ่ายแต่ละภาพทำให้เกิดค่าสังเกต 2 ค่า ดังนั้นการวัดซ้ำบนจุดเดิมในรูปที่มีส่วนซ้อนกันยิ่งทำให้ค่าเกิน (redundancy) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

5.11.2 ระบบความสูงของค่าระดับ

การจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายทั้งชนิดให้พิกัดทั้งสามมิติและจุดบังคับภาพชนิดจุดระดับ ปัจจุบันนิยมจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายดังกล่าวด้วยวิธีการรังวัดด้วยระบบ GPS ซึ่งให้ความละเอียดถูกต้องสูงและรวดเร็ว แต่มีข้อควรระวังคือการอ้างอิงระบบความสูง (Height System) การอ้างอิงความสูงที่ได้จากการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GPS จะเป็นความสูงเหนืออุปทรงรี (Ellipsoidal Height) ซึ่งหากว่าเป็นงานรังวัดด้วยภาพถ่ายเพื่องานแผนที่หรืองานวิศวกรรมอื่นๆ ความสูงที่ใช้คือระบบความสูงความสูงแบบออโรมेटริก (Orthometric Height) ที่ค่าต่างของความสูงนี้จะสอดคล้องกับการไล่ลงของน้ำ ดังนั้นหากจะใช้ความสูงจากงาน GPS จึงต้องมีกระบวนการแปลงจากความสูงเหนืออุปกรณ์ให้เป็นความสูงแบบออโรมेटริกเสียก่อน แล้วจึงจะนำมาใช้ในการบังคับและการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ ความสูงแบบออโรมेटริกสามารถสร้างขึ้นและคำนวณได้จากการระดับ (differential levelling)

ตัวอย่างในภาพ แสดงส่วนของพื้นผิวโลกที่จุด P_1 และ P_2 จุด P_1 มีความสูงของออโรมेटริกเป็น H_1 และความสูงเหนืออุปกรณ์เป็น h_1 ส่วนจุด P_2 มีความสูงของออโรมेटริกเป็น H_2 และความสูงเหนืออุปกรณ์เป็น h_2 โดยที่ $H_1 > H_2$ และ $h_1 < h_2$ หากมีน้ำตกลงบนพื้นผิวดังกล่าว น้ำจะไหลไปทางขวาเมื่อ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก



รูปภาพ 5-21 แสดงค่าต่างระดับจากค่าความสูงในสองระบบ

5.12 การวัดสอบตนเอง (**Self-Calibration**)

การวัดสอบตนเองคือการคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมที่มีการจำลองแบบทั้งที่เป็นระบบเพื่อให้ Systematic Parameter และไม่เป็นระบบที่ใช้ความชำนาญเพื่อให้ได้ Empirical Parameter ที่มีนัยสำคัญต่อการคำนวณปรับแก้ของแบบจำลอง ทำให้ความคลาดเคลื่อนต่างๆลดลง อันเนื่องจากบางส่วนถูกจำลองแบบให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ตัวอย่างของความคลาดเคลื่อนที่อาจจำลองให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่

- 1) ความคลาดผิดเพี้ยนของเลนส์
- 2) ค่าการจัดภาพภายใน ความยาวโฟกัส f ความคลาดเคลื่อนของจุดมุขย์สำคัญ x_0, y_0
- 3) การยืดหดของฟิล์มในทิศทางต่างๆ ที่ไม่เท่ากันเนื่องจากกลไกการหมุนฟิล์ม กระบวนการล้างและอัดรูป
- 4) ความผิดปกติของชั้นบรรยายการศัลยบันทึกภาพ
- 5) ความผิดพลาดที่เป็นระบบต่างๆ

เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ แม้ว่าบางส่วนจะเกิดขึ้นจนปรากฏทางกายภาพ เช่น ความคลาดผิดเพี้ยนของเลนส์ ความยาวโฟกัส f ความคลาดเคลื่อนของจุดมุขย์สำคัญ x_0, y_0 จะได้รับการวัดสอบในห้องปฏิบัติการวัดสอบ มาแล้ว แต่ในทางปฏิบัติสภาวะที่ใช้งานจริงมิได้สอดคล้องกับสภาวะในห้องปฏิบัติการวัดสอบ ซึ่งเป็นสมมุติฐานว่าจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนตามที่ได้จำลองแบบขึ้นมา

ในสภาวะจริง เช่น ขณะบินถ่ายภาพมักจะทำให้ห้องโดยสารเครื่องบินมีอุณหภูมิและความดันปกติ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติการถ่ายภาพ ต้นหนน และนักบิน สามารถทำงานได้สะดวก แต่ในขณะที่ส่วนอกเครื่องบินมี อุณหภูมิต่ำ และความดันต่ำกว่ามาก จึงอาจทำให้กล้องและเลนส์อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันภายใต้ ภายนอกห้องโดยสารเครื่องบิน กล้องถ่ายภาพทางอากาศจะได้รับความดันของอากาศที่เปลี่ยนไปและต้อง ปรับตัวให้เข้ากับอุณหภูมิสองด้านที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นก็อาจจะทำให้พารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวัดสอบ ในห้องปฏิบัติการไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง นอกจากนั้นยังมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นระบบอื่นๆ ที่ได้จาก ความชำนาญของนักวิจัย

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้การวัดสอบตนเองกับบล็อกของข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะทำให้พารามิเตอร์เพิ่มขึ้น การจำลองแบบที่นิยมใช้ได้แก่การใช้ไฟลิโนเมียลิติกิร์ต่างๆ ดังนั้นการคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมด้วยการวัดสอบตนเองมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งคือการคำนวณปรับแก้ชนิดมีพารามิเตอร์เพิ่ม (Additional Parameters) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบที่เป็นระบบหรือด้วยความชำนาญจะต้องได้รับการทดสอบ ทางสถิติว่ามีนัยสำคัญ จึงจะนำมาใช้ได้ นอกจากนี้การใช้เทคนิคการวัดสอบตนเอง ต้องใช้ ความรู้ความเข้าใจ ผนวกกับความชำนาญ จึงจะได้ผลดี นอกจากนั้นการมีพารามิเตอร์ที่เป็นตัวไม่ทราบค่าการคำนวณปรับแก้ จะต้องมีค่าสังเกตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

การประยุกต์ใช้งานเทคนิคการวัดสอบตนเองที่ได้ผลดีอีกในลักษณะหนึ่งคือการใช้กล้องถ่ายภาพที่ เป็นชนิดไม่มีองค์ประกอบการจัดภาพภายในหรือกล้องถ่ายภาพที่ไม่ใช่ทำขึ้นเพื่อการรังวัดโดยเฉพาะ (Non-metric Camera) ตัวอย่างหนึ่งได้แก่การใช้กล้องดิจิทัลที่หาได้ทั่วไปในห้องทดลองมาใช้ในการรังวัดด้วยภาพ ภาพ ประยุกต์ใช้กล้องดิจิทัลอาจให้ผลการวัดสอบตนเองจะแสดงได้เห็นดังนี้

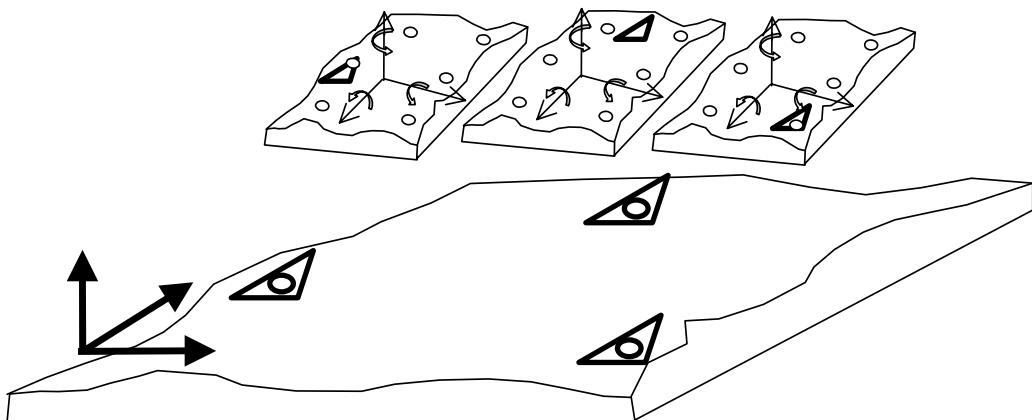
El Habrouk และคณะ ได้ศึกษากล้องถ่ายภาพดิจิทัล Fuji DS-100 ที่มีจำนวนจุดภาพในแต่ละเฟรม 720x488 จุดภาพ ได้ทำการปรับแก้ให้ชนิดไม่มีและมีค่าการจัดวางภาพภายใน f และ x_0, y_0 โดยทำการทดลองบันทึกสนับสนุนทดสอบในที่มาตรฐาน 1:50 และ 1:300 พบร่วม เมื่อมีการปรับแก้โดยการประยุกต์ใช้งาน เทคนิคการวัดสอบตนเอง ทำให้ค่าความละเอียดถูกต้องของระบบดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (El-Habrouk et.al. 1996) ดังในตารางข้างล่างนี้

แบบจำลอง	มาตรฐาน 1:50		มาตรฐาน 1:300	
	$\sigma_x (\mu m)$	$\sigma_y (\mu m)$	$\sigma_x (\mu m)$	$\sigma_y (\mu m)$
ไม่มีพารามิเตอร์เพิ่ม	78	61	61	43
มีพารามิเตอร์ f และ x_0, y_0	11	11	4	4

ซอฟแวร์ที่มีความสามารถในการประยุกต์ใช้การวัดสอบตนเอง จะต้องเปิดโอกาสให้ผู้ใช้เลือกพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ตามคุณลักษณะที่ต้องการและตามความชำนาญ ซอฟแวร์จะต้องมีเอกสารบรรยายแบบจำลองต่างๆที่มีให้ใช้เหล่านี้

5.13 การคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีแบบจำลองอิสระ

การคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีแบบจำลองอิสระ (Independent Model Adjustment) เป็นวิธีการคำนวณปรับแก้ที่นิยมมากในช่วงที่ผ่านมา เนื่องจากความแพร่หลายของเครื่องมือวัดพิกัดสามมิติในแบบจำลองสามมิติ โดยที่ยังไม่ต้องจัดวางภาพให้มีระบบพิกัดสองคล้องกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน กระบวนการจะประกอบด้วยการนำภาพคู่สามมิติมาที่ละคู่ภาพ นำภาพคู่สามมิติมาจัดวางภาพให้สมพันธ์กัน ทำการวัดพิกัดในแบบจำลองสามมิติอิสระในระบบพิกัดของแบบจำลองเอง เมื่อมีการวัดจุดผ่านและจุดโดยง่ายด ตลอดจนมีการวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินอย่างพอเพียง ดังแสดงให้เห็นในภาพ



รูปภาพ 5-22 ความสัมพันธ์แบบจำลองอิสระกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน

โดยการใช้แบบจำลองในการปรับแก้คือการแปลงค่าพิกัดในสามมิติชนิดเจ็ดพารามิเตอร์ โดยที่สมการค่าสังเกตเป็น สำหรับจุดผ่านและจุดโดยง่ายด เป็น ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_m \\ \Delta Y_m \\ \Delta Z_m \end{bmatrix} + (1 + \Lambda_m) R(\Omega_m, \Phi_m, K_m) \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-52}$$

โดยที่ x_i, y_i, z_i คือค่าสังเกตได้จากการวัดพิกัดบนแบบจำลองอิสระที่จุดที่ i

$\Delta X_m, \Delta Y_m, \Delta Z_m$ คือตัวไม่ทราบค่าของแบบจำลองที่ m

Λ_m คือมาตราส่วนของแบบจำลองที่ m

$R(\Omega_m, \Phi_m, K_m)$ คือแมทริกซ์ของการหมุนของแบบจำลองที่ m

X_j, Y_j, Z_j คือตัวไม่ทราบค่าของจุดผ่าน-จุดโดยง่ายดที่ j

ส่วนสมการค่าสังเกตของจุดควบคุมภาพพื้นดินเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_m \\ \Delta Y_m \\ \Delta Z_m \end{bmatrix} + (1 + \Lambda_m) R(\Omega_m, \Phi_m, K_m) \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} \quad \text{สมการ 5-53}$$

โดยที่ x_i, y_i, z_i คือค่าสังเกตได้จากการวัดพิกัดบนแบบจำลองอิสระที่จุดที่ i

$\Delta X_m, \Delta Y_m, \Delta Z_m$ คือตัวไม่ทราบค่าของแบบจำลองที่ m

Λ_m คือมาตราส่วนของแบบจำลองที่ m

$R(\Omega_m, \Phi_m, K_m)$ คือแม่ทริกซ์ของการหมุนของแบบจำลองที่ m

X_g, Y_g, Z_g คือค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ g ซึ่งให้เป็นค่าคงที่ในสมการ

ผลการคำนวณปรับแก้ ทุกแบบจำลองจะได้มาตราส่วน Λ_m และแม่ทริกซ์ของการหมุน $R(\Omega_m, \Phi_m, K_m)$ รวมไปถึงค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นที่เป็นของจุดผ่านและจุดโยงยื่น X_j, Y_j, Z_j ด้วย ซึ่งจะเป็นการขยายจุดบังคับภาพถ่ายตามวัตถุประสงค์ของการทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเข่นกัน

จะเห็นได้ว่าวิธีนี้มีการวัดพิกัดในสามมิติบนแบบจำลองสามมิติด้วยเครื่องเขียนแผนที่เชิงทัศน์-กลไก ซึ่งความผิดพลาดของการจัดวางภาพแบบสามมิติ ความผิดพลาดของกลไก-ทัศนูปกรณ์ในการวัดจะมีผลต่อค่าพิกัดที่จะนำໄไปคำนวณปรับแก้ เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณปรับแก้แบบบล็อกคำแสงเป็นการวัดโดยตรงบนภาพถ่ายแล้วนำผลลัพธ์ไปคำนวณปรับแก้โดยตรง

ดังนั้นการคำนวณปรับแก้บล็อกของภาพถ่ายด้วยการปรับแก้แบบบล็อกของคำแสงจะให้ความถูกต้องน่าเชื่อถือเดียวกับวิธีการปรับแก้โดยใช้แบบจำลองอิสระ ตลอดจนวิธีการของ การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล ด้วย Softcopy Photogrammetry ที่สามารถใช้ซอฟแวร์ง่ายๆ สามารถวัดค่าพิกัดภาพถ่ายได้ การคำนวณปรับแก้แบบบล็อกของคำแสงจึงกลายเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบัน

5.13.1 การเปรียบเทียบวิธีปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยม

การคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมจะนำไปสู่การหาคำตอบของแบบจำลองที่ดีที่สุด ของการจัดวางภาพภายนอกสำหรับภาพถ่ายทางอากาศในบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศด้วยกันทั้งสิ้น วิธีการดังกล่าวในช่วงที่ผ่านมาสามารถเลือกได้สองเทคนิคคือ การคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมจากแบบจำลองอิสระและการคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมจากบล็อกของคำแสง การสร้างข่ายสามเหลี่ยมจากแบบจำลองอิสระได้จากการคำนวณแบบจำลอง แต่ในปัจจุบันเรานิยมจะรังวัดพิกัดภาพโดยตรงบนภาพถ่ายทางอากาศ แล้วนำผลที่ได้ไปสู่กระบวนการหาคำตอบของ การจัดวางภาพภายนอกโดยตรงที่เรียกว่า การคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมจากบล็อกของคำแสง

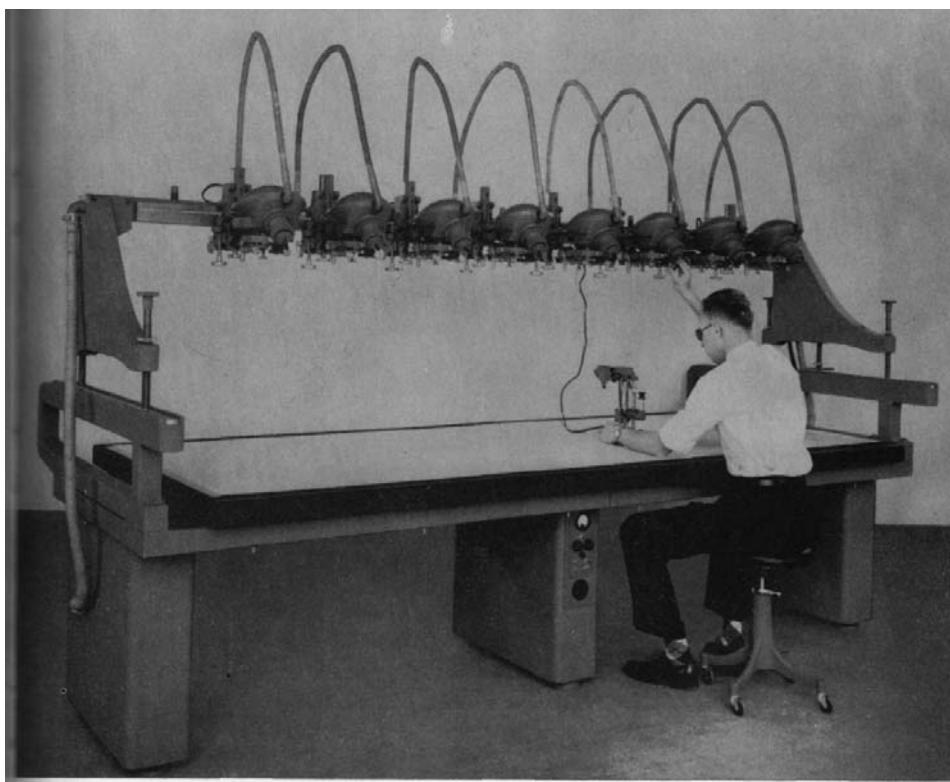
ในตารางข้างล่างนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคทั้งสอง

คุณลักษณะ	วิธีแบบจำลองอิสระ	วิธีบล็อกของลำแสง
เครื่องมือวัด	เครื่องเขียนแผนที่เชิงทัศน์-กล	คอมพิวเตอร์ หรือ วัดบนภาพดิจิตอล
ค่าสังเกต	ค่าพิกัดสามมิติในแบบจำลองที่ยังไม่มีการจัดวางในระบบพิกัดวัตถุ เป็นค่าพิกัดในสามมิติตามมาตรฐานของแบบจำลองที่จัดภาพ สัมพันธ์แบบสัมพัทธ์ (relative orientation)	ค่าพิกัดภาพถ่าย
แบบจำลอง	การแปลงค่าพิกัดสามมิติชนิด เจ็ต พารามิเตอร์	สมการร่วมเส้น
ความละเอียดถูกต้อง	ความผิดพลาดของ การจัดวางภาพแบบสัมพัทธ์ ความผิดพลาดของกลไก-ทัศนูปกรณ์	มีแต่ความผิดพลาดจากเครื่องมือวัดค่าพิกัด ในกรณีที่ใช้ภาพดิจิตอล ภาพจะต้องถูกสแกนมาด้วยความละเอียดถูกต้อง

ตาราง 5- 1 เปรียบเทียบวิธีการรังวัดข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

5.14 วิัฒนาการของงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

อันเนื่องมาจากการที่งานรังวัดด้วยภาพมักจะเกี่ยวข้องกับการทำแผนที่ครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางมาก จึงจำเป็นต้องมีการบินถ่ายภาพเป็นบล็อก ในยุคเริ่มต้นของการใช้การรังวัดด้วยภาพมาใช้ในการทำแผนที่นั้น เป็นการใช้เครื่องมือที่เรียกว่าโต๊ะรังวัดภาพถ่าย (Table Photogrammetry) ซึ่งประกอบด้วยกล้องฉาย (Projector) ที่สามารถบรรจุฟิล์มเข้าไปได้ มีองค์ประกอบการจัดภายนในชั้นเดียวกับกล้องถ่ายภาพ เช่นความยาวโฟกัส มีระบบส่องสว่าง ทำให้ภาพฉายปราศจากบันตุ์ ด้วยแสงสีต่างๆ เพื่อให้สามารถมองเห็นสามมิติได้ด้วยวิธีของลีฟ กล้องฉายสามารถจัดให้มีพื้นที่กันจนเกิดแบบจำลองสามมิติ แบบจำลองสามมิติจะสามารถปรับให้มีระบบพิกัดเดียวกับระบบพิกัดภาคพื้นดินได้ เมื่อมีต้นร่างแผนที่ที่มีตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ปราศจากบันตุ์ เครื่องมีจะมีความอิสระที่สามารถจัดแบบจำลองให้หมุนและย่อขยายจนกระทั่ง ภาพของจุดบังคับภาพถ่ายปราศจากบันตุ์ ด้วยการแก้ไขตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่าย เมื่อมีลักษณะดังกล่าว ก็จะสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติที่ต่อเนื่องขนาดใหญ่เป็นแบบเช่นเดียวกับ การบินบันทึกภาพเป็นแนวบิน ในมาตรฐานที่ต้องการได้ ตัวอย่างของการทำงานในลักษณะดังกล่าวจะเห็นได้จาก โต๊ะรังวัดด้วยภาพ ชนิดหลายกล้อง Balplex (Bausch and Lomb) ดังภาพข้างล่างนี้



รูปภาพ 5-23 การทำข่ายสามเหลี่ยมบนโต๊ะรังวัดด้วยภาพถ่ายด้วยหลายกล้องฉาย

จากนั้นวิัฒนาการของเครื่องคำนวนไฟฟ้าและ เครื่องคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถคำนวนปรับแก้เพื่อขยายโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศได้ โดยในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 20 อันมีการใช้ค่าพิกัดสามมิติจากแบบจำลองสามมิติอิสระมาใช้ในการคำนวนปรับแก้ จนถึงในช่วงปลายของศตวรรษที่ 20 ก็จะมีเครื่องมือวัดพิกัดภาพถ่ายได้โดยตรง ผนวกกับความสามารถในการคำนวนด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้การคำนวนปรับแก้ด้วยบล็อกคล้ายแสงได้รับความนิยม ซึ่งเป็นวิธีการที่เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน

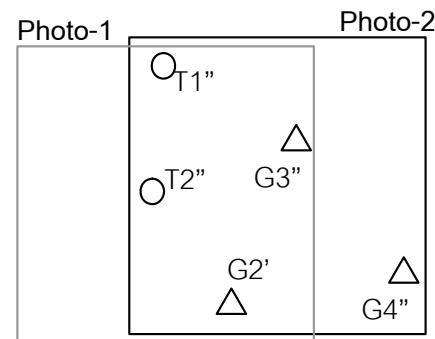
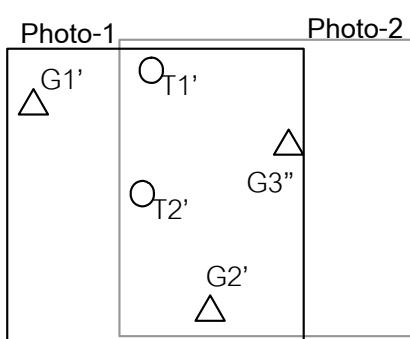
ในตารางต่อไปนี้แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศโดยสรุป

วิธีการ	ปีที่เริ่ม	ความละเอียดถูกต้องของ บล็อกค์ σ_0	ความละเอียดถูกต้องของ จุดตรวจสอบอิสระ $\sigma_{x,y,z}$	จำนวนจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ต้องใช้
Strip	1960	20 μm	100 μm	ทุกๆ 5 แบบจำลองต่อแนวบิน
Interpolation				
Model block adjustment	1970	10 μm	20 μm	ทุกๆ 5 แบบจำลอง
Bundle block adjustment	1970	8 μm	10 μm	ทุกๆ 5 แบบจำลอง
Using additional parameter	1980	5 μm	8 μm	ทุกๆ 5 แบบจำลอง
GPS-support bundle block Adjustment	1992	5 μm	8 μm	เพียง 4 จุดที่มุ่งบล็อก
Direct Georeferencing	2000	5 μm	8 μm	หนึ่งจุดหรือไม่ต้องใช้เลย
GPS/IMU flight				

ตาราง 5-5 วิวัฒนาการของงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ตัดแปลงจาก **Konecny 1994**

5.15 คำาณท์ทัยบท

1. จงอธิบายว่าเหตุใดจุดควบคุมภาพพื้นดินจึงสามารถปรากฏและทำการรังวัดอยู่บนภาพถ่ายทางอากาศ เพียงภาพเดียวได้ แต่ในขณะเดียวกันจุดบังคับภาพชนิดจุดผ่านหรือจุดโดยยึดจะต้องรังวัดบนภาพถ่ายทางอากาศอย่างน้อยสองภาพให้ครบถ้วน
2. จากบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่มีรูปถ่ายทางอากาศเพียง 2 รูปคือรูป Photo-1 และ Photo-2 และมีการรังวัดจุดผ่าน 2 จุด T1 และ T2 และมีการรังวัดค่าพิกัดภาพพื้นดิน 4 จุด G1, G2, G3 และ G4 ดังรูป ให้สังเกตว่าจุด G1 รังวัดบนภาพได้เฉพาะภาพ Photo-1 ส่วน G4 รังวัดบนภาพได้เฉพาะ Photo-2



ก) การรังวัดพิกัดภาพบนภาพซ้าย (Photo-1)

ข) การรังวัดพิกัดภาพบนภาพขวา (Photo-2)

ผลการรังวัดได้ค่าภาพ และได้มีการรังวัดจุด GCP สำหรับ G1 ถึง G4 ดังนี้ดังนี้

จุดควบคุมภาพ	ค่าพิกัดบนพื้นดิน GCP	ค่าพิกัดภาพบน Photo-1	ค่าพิกัดภาพบน Photo-2
G1	X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1}	xp'_1, yp'_1	ไม่พบ
G2	X_{G2}, Y_{G2}, Z_{G2}	xp'_2, yp'_2	xp''_2, yp''_2
G3	X_{G3}, Y_{G3}, Z_{G3}	xp'_3, yp'_3	xp''_3, yp''_3
G4	X_{G4}, Y_{G4}, Z_{G4}	ไม่พบ	xp''_4, yp''_4
T1	X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1}	xp'_{T1}, yp'_{T1}	xp''_{T1}, yp''_{T1}
T2	X_{T2}, Y_{T2}, Z_{T2}	xp'_{T2}, yp'_{T2}	xp''_{T2}, yp''_{T2}

จะแสดงการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศด้วยวิธี Bundle Block Adjustment โดยแสดง เวกเตอร์ของค่าสังเกต เวกเตอร์ตัวไม่ทราบค่า สมการค่าสังเกต แมทริกของแบบจำลอง ขั้นตอนการคำนวน

3. ในการเตรียมงานจัดทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพื่อใช้ในการทำแบบจำลองระดับบล็อกและภาพถ่ายดัดแก้ไขโดยในการทำแผนที่นี้ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานคร บริเวณความกว้างเหนือจรดใต้เป็น 40 กม. และครอบคลุมจากตะวันตกไปตะวันออกเป็นระยะ 60 กม. ใช้ภาพถ่าย มาตราส่วน 1:25,000 ด้วยกล้องความยาวโฟกัส 153 มม. บล็อกของภาพถ่ายเป็นบล็อกปกติ จงคำนวนหาว่า
- 3.1) ต้องใช้ภาพถ่ายกี่ແຕรุกะกีภาพ สำหรับบล็อกปกติ
 - 3.2) จงออกแบบจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเพื่อใช้ในการขยายหมุดควบคุมภาพด้วยวิธีข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ โดยจะต้องหา ตำแหน่งและจำนวนหมุดที่ต้องการ
 - 3.3) ให้สเกตซ์ภาพของบล็อกที่ออกแบบได้ โดยแสดงแนวของภาพถ่ายทางอากาศ ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ต้องใช้
 - 3.4) จงประมาณการความละเอียดถูกต้องสำหรับพิกัดทางราบและพิกัดทางดิ่ง ที่คาดหวังไว้จากการรังวัดข่ายสามเหลี่ยม โดยคิดอย่างประมาณการจากการรังวัดจุดพิกัดในสามมิติบนคู่ภาพสามมิติที่ได้จากภาพดิ่งในจุดมุม แล้วกำหนดความละเอียดถูกต้องของการรังวัดค่าพิกัดภาพเป็น 10 ไมตรอน
 - 3.5) จงกำหนดวิธีการการรังวัดภาคพื้นดินที่จำเป็นต้องใช้ เพื่อรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP) ว่าจำเป็นดำเนินการให้มีความละเอียดถูกต้องทั้งทางและทางดิ่งเท่าไร
 - 3.6) หากว่าการรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินด้วยวิธีการรังวัดจีพีเอสแบบสติ๊กคิดประมาณการจุดละ 5,000 บาท จงประมาณการค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

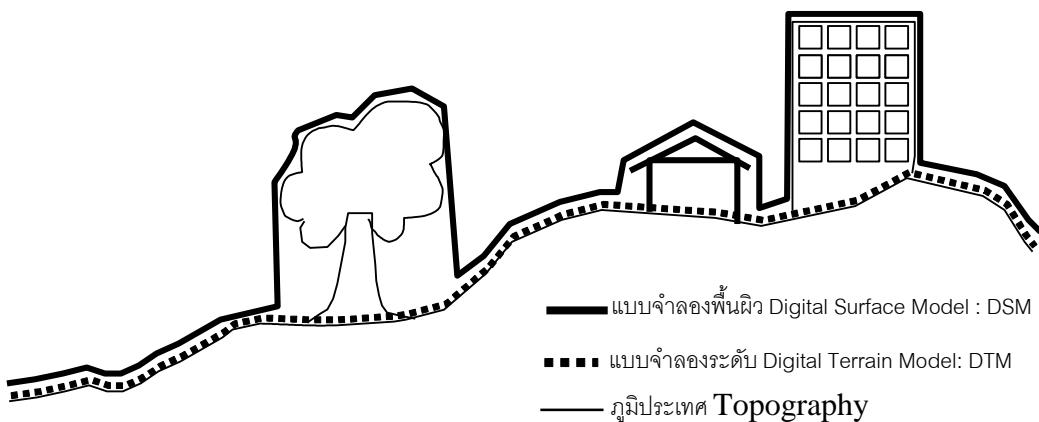
6 แบบจำลองระดับ

6.1 บทนำ

แบบจำลองระดับ (Digital Elevation Model: DEM) คือกระบวนการการรังวัดความสูงที่เป็นตัวแทนของภูมิประเทศ แบบจำลองระดับมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพถ่ายด้วยแก็อกอิทที่จะผลิตได้ เมื่อจากค่าระดับสูงที่เรียกออกมาใช้ในระหว่างการคำนวนความคลาดเคลื่อนบนภาพถ่ายทางอากาศเมื่อจากความสูงต่างของภูมิประเทศ (Relief Displacement) ตั้งนั้นจึงต้องมีการกำหนดวิธีการรังวัด วิธีการประมาณผล และวิธีการจัดเก็บให้ดีกุญ เพื่อให้ได้แผนที่ภาพอิฐที่มีความถูกต้องทางตำแหน่ง เช่นเดียวกับแผนที่ในรูปแบบอื่นตามที่มุ่งหวัง

การรังวัดด้วยภาพโดยเฉพาะการวัดบนภาพคู่สามารถให้ผลลัพธ์เป็นค่าพิกัดของภูมิประเทศ พร้อมค่าระดับ การวัดบนภาพคู่สามารถเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถให้ข้อมูลนำไปสร้างแบบจำลองระดับได้เป็นอย่างดี เพราะสามารถวัดบนภูมิประเทศในขอบเขตที่กว้างขวาง ไม่จำเป็นต้องเข้าถึงจุดที่ต้องรังวัด ผลลัพธ์ให้ความละเอียดถูกต้องสูง

โดยทั่วไปแบบจำลองระดับจะเป็นตัวแทนของภูมิประเทศ บริเวณที่มีสิ่งปลูกสร้างหรือมีต้นไม้ทึบหนาแน่น อาจเป็นคุณสมบัติของการวัดระดับจากภาพถ่ายได้ ปัจจุบันเนื่องจากชีวิตร่วมสามารถในการประมาณผลทางคอมพิวเตอร์กราฟฟิกและการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายขึ้น การวัดความสูงสิ่งปลูกสร้างและพื้นไม้น้ำสันใจและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เราเรียกแบบจำลองในลักษณะนี้ว่า แบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างสองแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังภาพ

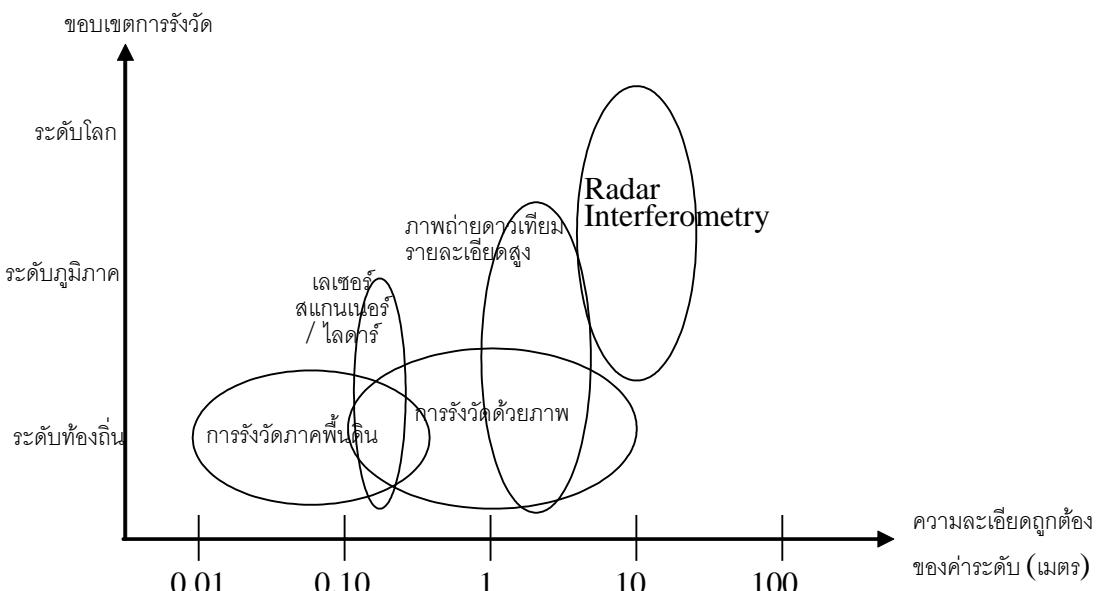


รูปภาพ 6-1 การรังวัดจุดระดับและความสูงภูมิประเทศ

ปัจจุบัน DSM ถูกใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการนำไปใช้สร้างแบบจำลองของเมือง และในระยะต่อไปยังจะมีการนำไปใช้ในการแก้ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งยอดของสิ่งปลูกสร้าง ที่ปัจจุบันยังถูกละเลยอยู่ภาพดัดแก้ที่ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนที่นำ DSM มาใช้อาจเรียกว่า "True Orthophoto"

6.2 เทคโนโลยีการรังวัดค่าระดับ

การสร้างแบบจำลองระดับเรามาหารดีอกให้เทคโนโลยีได้หลายแบบ การเลือกเทคโนโลยีเป็นไปตามความต้องการของความละเอียดถูกต้องที่จะเสียด้วยตัว เช่นติเมตร เดซิเมตร เรื่อยไปจนถึง เมตรและหลายสิบ เมตร ความกว้างขวางของอาณาบริเวณที่ต้องการสร้างแบบจำลองระดับ ในกราฟต่อไปนี้เป็นภาพรวมของเทคโนโลยีการรังวัดค่าระดับเพื่อสร้างแบบจำลองระดับ โดยแสดงให้เห็นถึงความสามารถของเทคโนโลยีในการใช้เพื่อสร้างแบบจำลองระดับ



รูปภาพ 6-2 เทคโนโลยีการรังวัดแบบจำลองระดับ

ในภาพจะเห็นว่า

- 1) การรังวัดภาคพื้นดิน (Terrestrial Survey) จะให้ความละเอียดถูกต้องสูงสุดในระดับเซนติเมตรถึง เมตร เครื่องมือหลักได้แก่กล้องโทรอลสเตชัน (Totalstation) แต่ขอบเขตการทำงานจำกัดเฉพาะในระดับท้องถิ่น เนื่องจากการที่ต้องเข้าถึงในพื้นที่ที่ต้องไปรังวัดโดยตรง จึงจำกัดของการมองเห็นด้วยอุปกรณ์เชิงทัศน์ของกล้องรังวัด ระยะทางที่จำกัดของการวัดระยะด้วยอิเล็กทรอนิกส์ หากเป็นพื้นที่เปิดโล่งอาจใช้การรังวดดาวเทียมจีพีเอส(GPS) ก็ได้
- 2) การรังวัดด้วยภาพ (Photogrammetry) สามารถให้ผลการรังวัดที่ความละเอียดถูกต้องในระดับเดซิเมตรถึงเมตร สามารถใช้งานได้ในพื้นที่กว้างขวางขึ้นถึงระดับภูมิภาค การสำรวจรังวัดมีความสะดวกไม่ต้องเข้าถึงโดยตรง แต่ก็จำกัดด้วยเครื่องมือภาพถ่ายทางอากาศ และวิธีการที่ซับซ้อน
- 3) เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser-Scanner) หรือ ไลดาร์ (Light Detection and Ranging : Lidar) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังแข่งขันโดยตรงกับการรังวัดด้วยภาพ โดยเฉพาะหากมีความต้องการใน

สร้างแบบจำลองระดับความละเอียดถูกต้องสูงอย่างรวดเร็ว ได้ดาวเทียมเทคโนโลยีเข้าเลเซอร์ติดตั้งบนเครื่องบิน พร้อมอุปกรณ์นำหนนที่มีความละเอียดถูกต้องสูงผสมผสานระหว่าง GPS และ IMU (Initial Measurement Unit) ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งได้ละเอียดถูกต้องถึง 5-10 เมตร และกำหนดมุมเอียงทั้งสามได้ละเอียด 5-15 พลิปดา สามารถทำได้ทั้งกลางวันและกลางคืน เนื่องจากกระบวนการเป็นติดตั้งสิ้น ดังนั้นรอบเวลาของการทำงานตั้งแต่บินเก็บข้อมูลจนนาข้อมูลประมวลผลจึงเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว

- 4) ภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูง (High-resolution Satellite Imager) เป็นเทคโนโลยีการสำรวจระยะใกล้แบบใหม่ การบันทึกภาพสามารถบันทึกภาพบริเวณเดียว กันได้โดยมุ่งกล้องที่อยู่เบื้องหน้าในมุมที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถสร้างข้อมูลจาก “ภาพคู่สามมิติ” และรังวัดความสูงของภูมิประเทศได้ ภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูงจะให้จุดภาพมีความละเอียดสูงถึง 1-2 เมตร และสามารถใช้ผลิตแบบจำลองระดับด้วยความละเอียดถูกต้องเมตรได้ ปัจจุบันภาพดาวเทียมรายละเอียดสูงได้จากการบันทึกภาพหลายดวง เช่น

- IKONOS ความละเอียดจุดภาพ 1 เมตร
- QuickBird ความละเอียดจุดภาพ 1 เมตร
- ALOS ความละเอียดจุดภาพ 2.5 เมตร
- THEOS ความละเอียดจุดภาพ 2 เมตร
- Terra / ASTER ความละเอียดจุดภาพ 15 เมตร

ดาวเทียมเหล่านี้มีการบันทึกภาพแบบสเตอโริโธศักยภาพในการสร้างแบบจำลองสามมิติ ตลอดจนใช้วัดความสูงภูมิประเทศเช่นกัน

- 5) เรดาห์ ด้วยเทคนิค Interferometry สามารถที่จะใช้วัดความสูงของภูมิประเทศได้ ข้อดีของเรดาห์คือการที่เป็นระบบ Active สามารถตรวจสภาวะอากาศที่ปิดหรือมีเมฆ ได้ ทำให้ผลการวัดได้ตัวอย่างของแบบจำลองความสูงนี้คือแบบจำลองระดับใหม่ครอบคลุมพื้นผิวโลกที่บินถ่ายด้วย Space Shuttle ใน Shuttle Radar Topography Mission ที่จะให้แบบจำลองระดับที่ความละเอียดบนพื้นผิวโลก 30 เมตรและค่าระดับมีความถูกต้องถึง 5-15 เมตร ซึ่งนับว่าเป็นครั้งแรกของมนุษยชาติที่มีการคาดพื้นผิวโลกเพื่อการรังวัดระดับในครั้งเดียวภายในระยะเวลาเพียง 11 วัน นอกจากนั้นยังมีระบบเรดาห์ที่ติดตั้งบนดาวเทียมและเครื่องบิน ระบบเรดาห์บนเครื่องบินสามารถให้ความละเอียดถูกต้องของระดับถึงเมตร แต่จะจำกัดเฉพาะการทำงานในพื้นที่ที่เล็กลงมา

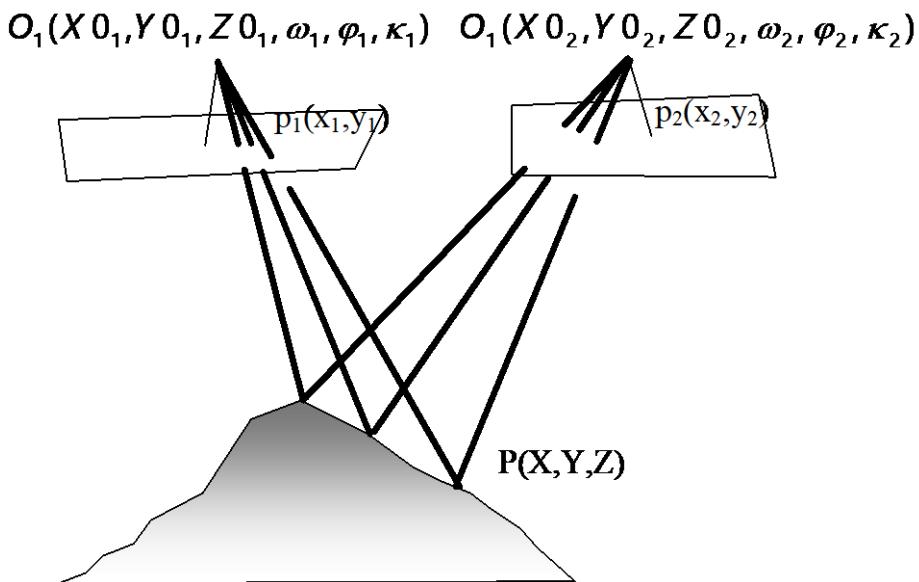
นอกจากนี้ยังมีความพยายามในการสร้างแบบจำลองระดับด้วยข้อมูลภาพเรดาห์จากดาวเทียมที่มีเซนเซอร์ต่อไปนี้ด้วยเทคนิค Interferometry คือได้แก่

- ERS-1 และ ERS-2 ของสหภาพยุโรป
- Envisat ของสหภาพยุโรป
- Radarsat ของประเทศไทย

- RadarSAT-2 ของประเทศไทยและแคนาดา
- PALSAR บันดาเวที่ยม ALOC ของประเทศไทย
- Terra-X SAR ของประเทศไทย

6.2.1 การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ

เมื่อใช้วิธีการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ การรังวัดค่าระดับบนภูมิประเทศได้จากการรังวัดจุดๆ นิดเดียว กันที่ปีกภูมิประเทศทั้งสองข้างแบบจำลองสามมิติ ด้วยวิธีนี้ภาพคู่สามมิติที่จะคู่จะถูกเลือกเข้ามาเพื่อทำการรังวัดจุดความสูงบนภูมิประเทศ



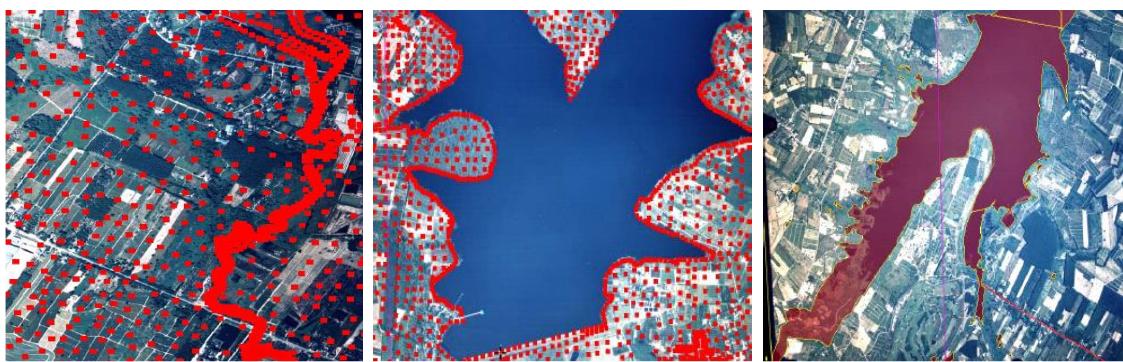
รูปภาพ 6-3 การวัดความสูงภูมิประเทศจากภาพคู่สามมิติ

การรังวัดสามารถทำได้ทั้งบนเครื่องร่างແນที่สามมิติเชิงวิเคราะห์ (Analytical Stereoplotter) ซึ่งจะต่อเชื่อมตรงกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่าจุดพิกัดพร้อมค่าระดับสูงเพื่อประมวลผลต่อไป การวัดบนเครื่องร่างແນที่สามมิติแบบบิเคระห์ที่ถือว่าเป็นวิธีวัดที่ให้ผลลัพธ์มีความละเอียดถูกต้องสูงสุดที่จะทำได้ในเทคโนโลยีการรังวัดด้วยภาพ แต่การรังวัดโดยใช้สายตาประกอบกับเครื่องมือที่เป็นเชิงทัศนผู้ปฏิบัติงานต้องมีความชำนาญและมีความอดทนในการทำงาน

วิถีทางเลือกหนึ่งที่เป็นอัตโนมัติและรวดเร็วกว่าโดยวิธีการทาง Digital Photogrammetry จุดระดับความสูงบนภาพคู่สามมิติจะถูกวัดโดยอัตโนมัติอย่างรวดเร็ว โดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลภาพที่เรียกว่า การจับคู่ภาพ (Image Matching) เทคนิคการจับคู่ภาพอาจเป็นวิธี Least-squares Matching หรือ Image Correlation ผู้ปฏิบัติงานก็ต้องรู้แล้วเข้าใจหลักการประมวลผลภาพพิจิทัลเพื่อให้ผลลัพธ์ออกมากตามความต้องการ ผลการวัดด้วยซอฟแวร์อัตโนมัติโดยทั่วไปจะให้ผลได้ดีเทียบเท่ากับการวัดด้วยสายตาตามนุชช์บันเครื่องร่างແນที่สามมิติเชิงวิเคราะห์ เมื่อเงื่อนไขการเตรียมข้อมูลให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลนั้นมีคุณภาพดี และให้พารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพได้เหมาะสม โดยสรุปคือ

- ภาพถูกแสกนด้วย Precise Scanner ที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งสูงเทียบเท่ากับภาพต้นฉบับ
- ภาพถูกแสกนด้วย Precise Scanner ด้วยความละเอียดสูงในช่วง 10 ถึง 30 ไมครอน
- ภาพถูกแสกนด้วย Precise Scanner ที่ให้ภาพมีความคมชัดเทียบเท่ากับภาพต้นฉบับ
- ใช้พารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพได้เหมาะสมกับชนิดของ Texture
- อัลกอริธึมที่ใช้ในการจับคู่ภาพ

การรังวัดจุดความสูงจะเป็นการรังวัดความสูงที่เป็นตัวแทนของภูมิประเทศเท่านั้น ในภูมิประเทศที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงอย่างเฉียบพลัน เช่น ร่องน้ำ สันเข้า สันเขื่อน ขอบเขตบริเวณพื้นน้ำ จะต้องมีการรังวัดเพิ่มเติมด้วยมือและสายตาพร้อมระบุข้อมูลว่าเป็น Break-line ข้อมูล Break-line จะต้องจัดเก็บกำกับไปพร้อมกับจุดที่รังวัดนั้นๆ เพื่อว่าซอฟแวร์ประมวลผลจะได้รับรู้และนำไปคิดคำนวณได้ เช่นเดียวกับพื้นน้ำควรจะรังวัดเป็นจุดถี่โดยรอบเพื่อให้แบบจำลองแสดงค่าระดับน้ำที่มากจะให้เป็นค่าคงที่หรืออาจกำหนดให้เป็นบริเวณที่เรียกว่าไม่มีข้อมูลที่อาจเรียกว่า “NoData” หรือ “Void” เพื่อว่าแบบจำลองระดับที่ผลิตได้จะมีความถูกต้องสอดคล้องกับภูมิสัณฐาน (geomorphology) ของภูมิประเทศให้มากที่สุด

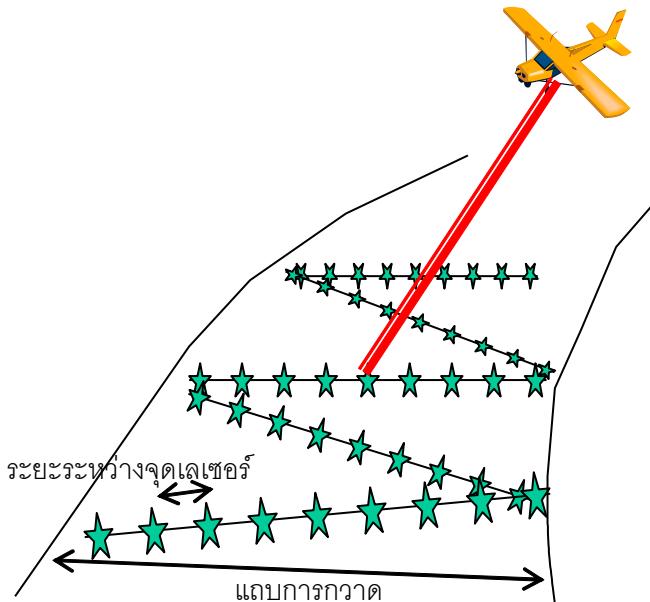


รูปภาพ 6-4 ก) การรังวัดและการกระจายจุดระดับบนภูมิประเทศ ข) Break-line ของพื้นที่กักเก็บน้ำ ค) การกำหนดค่าระดับของพื้นที่กักเก็บน้ำ

6.2.2 การรังวัดด้วยไลดาเรอร์

การรังวัดแบบจำลองระดับด้วยเครื่องเลเซอร์วัดระยะทางที่เรียกว่า ไลดาเรอร์ (Light Detection and Ranging: :Lidar) เป็นวิธีหนึ่งที่สำคัญในปัจจุบันที่จะทำให้ได้แบบจำลองระดับมีความละเอียดถูกต้องสูงถึงระดับเดซิเมตร และจุดระดับที่ได้กรอบกลุ่มพื้นอย่างหนาแน่นถึงมากกว่าหนึ่งจุดต่อตารางเมตร ไลดาเรอร์ได้รับการพัฒนาจนมาณับลิบปีในกุญแจพัฒนาเครื่องวัดระยะและระบบอิเล็กทรอนิกส์วัดระยะทาง แต่ไลดาเรอร์เพิ่งจะได้รับการยอมรับมาใช้ในการรังวัดและสร้างแบบจำลองระดับอย่างกว้างขวางในช่วงเปลี่ยนศตวรรษ 2000 นี้ ไลดาเรอร์เป็นเครื่องวัดระยะทางที่ปล่อยคลื่นเลเซอร์ด้วยความถี่สูงมากเพื่อวัดระยะทางจากอากาศยานไปสู่พื้นผิวภูมิประเทศระยะทางที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณให้เป็นค่าระดับจำนวนมากของจุดบนภูมิประเทศ ไลดาเรอร์ในรุ่นแรกๆ มีความถี่ในการปล่อยคลื่นเพื่อวัดระยะทางเริ่มต้นที่ประมาณ 5,000 Hz หรือ 50,000 ลูกคลื่นต่อวินาที พัฒนาการไลดาเรอร์จนปัจจุบันบางรุ่นมีความถี่การปล่อยคลื่นเลเซอร์สูงถึง 100,000 Hz หรือ 100,000 ลูกคลื่นต่อวินาที

การรังวัดด้วยไลดาเรอร์ขัดเป็นการรังวัดโดยตรงจากอากาศยาน ความละเอียดถูกต้องสูง ค่าระดับที่รังวัดได้จากไลดาเรอร์เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความละเอียดถูกต้องสูงในช่วง 10 ถึง 30 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดถูกต้องของการรังวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ของประกอบกับตำแหน่งของอากาศยานที่สามารถตรวจจับด้วยความละเอียดถูกต้องสูงที่เป็นระบบบรังวัดตำแหน่งและการวางแผนตัวด้วยเทคโนโลยี Global Positioning System (GPS) และ Inertial Motion Unit (IMU) ดังนั้นระบบไลดาเรอร์จึงมีความสามารถยึดหยุ่นสามารถติดตั้งบนอากาศยานหลากหลายชนิดทั้งชนิดปีกแข็ง (fixed wing type) และปีกหมุน(helicopter)



รูปภาพ 6-5 แสดงหลักการการกวาดของเลเซอร์จากไลดาเรอร์เพื่อบันทึกแบบจำลองระดับ

ไลดาเรอร์มีความสามารถในการทะลุทะลวงยอดไม้และพืชที่ไม่หนาเทามาก ในพื้นที่ป่าไม้และมีพืชพรรณปกคลุม เลเซอร์สามารถถูกต้องจากไลดาเรอร์ซึ่งมีโอกาสที่จะทะลุทะลวงช่องว่างลงไปสัมผัสพื้นผิวภูมิประเทศและสะท้อนกลับมาบั้ง เช่น เซอร์ ระบบไลดาเรอร์ยังสามารถทำงานได้ค่อนข้างอิสระจากสภาพอากาศที่ไม่ดีนัก เมื่อเทียบกับเทคนิคการรังวัดด้วยภาพที่ต้องการสภาพอากาศที่โปร่งใส มีแสงอาทิตย์ส่องสว่างพื้นภูมิประเทศที่พอเหมาะสม

มุมสูงดวงอาทิตย์ต้องไม่สร้างเงาของวัตถุบนภูมิประเทศที่ทอดยาวให้เป็นอุปสรรคต่อการรังวัด เนื่องจากไลดาร์ เป็นระบบที่มีพลังงานในตัวเองจึงไม่ต้องพึ่งพาแสงอาทิตย์ ดังนั้นการบันทึกข้อมูลสามารถทำได้โดยไม่ต้อง คำนึงถึงมุมสูงของดวงอาทิตย์ และทำได้ทั้งกลางวันกลางคืน แบบจำลองระดับจากไลดาร์มีจุดระดับที่ถือมากๆเมื่อ เทียบกับจุดระดับที่เดินจะได้จากการรังวัดด้วยภาพ และสามารถสร้างแบบจำลองได้กว่างานรังวัดด้วยภาพ เช่น ในเมืองที่อาคารสูงมีการบดบังซึ่งกันและกัน

ไลดาร์มีข้อความสามารถในการสร้างแบบจำลองของภูมิประเทศที่มีความน่าเชื่อถือ และความละเอียดถูกต้องในระดับเดียวกับงานรังวัดด้วยภาพ การรังวัดด้วยภาพโดยปกตินี้เป็นเทคนิคการสร้าง ข้อมูลเชิงตำแหน่งและแผนที่ ได้จากการถ่ายทางอากาศที่บันทึกจากเครื่องบินชนิดที่มีเสียงรบกวนสูงและบินที่ ระดับเพียงบินระดับใดระดับหนึ่งคงที่ ในขณะที่ไลดาร์สามารถติดตั้งบนอากาศยานได้หลายชนิดที่กล่าวมาแล้ว ไลดาร์มีร่องการทำงานที่รวดเร็วกว่าการสร้างแบบจำลองระดับจากงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศมาก เพราะ เป็นการวัดความสูงภูมิประเทศโดยตรงจากอากาศยานและระบบการบันทึกข้อมูลและประมวลผลทั้งหมดเป็นการ ทำงานด้วยเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์

ปัจจุบันเทคโนโลยีไลดาร์เป็นที่ยอมรับในหน่วยงานทำแผนที่ในทวีปอเมริกาเหนือ อุรุป และญี่ปุ่น ว่า มีข้อความสามารถเทียบเท่าการสำรวจด้วยภาพถ่ายดังเดิม การประยุกต์ใช้ถูกเน้นใช้ในการสร้างแบบจำลองระดับ ความละเอียดสูงสำหรับแผนที่มาตรฐานสากล ให้ผล แบบจำลองระดับด้วยงานสำรวจด้วยวัดด้วยภาพถือได้ว่า เป็นงานที่ใช้เวลา แรงงานและความชำนาญมาก หน่วยงานทำแผนที่ในนานาประเทศเช่น USGS, FEMA/USA, Ordnance Surveys, Baden Wuertemburg State Mapping Office/Germany ต่างก็ยอมรับและมีการนำไลดาร์มาใช้ ในงานปฏิบัติจริงเพื่อเสริมงานสำรวจด้วยภาพถ่ายอย่าง ได้ผล แบบจำลองระดับที่ได้จากไลดาร์นอกจากการ ผลิตแผนที่ภูมิประเทศ เช่น ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการก่อทำใหม่ เช่น การสำรวจออกแบบเส้นทางอย่าง รวดเร็วเพื่อการสร้างถนนและแนวติดตั้งสาธารณูปโภค การป้องกันน้ำท่วมในระดับห้องถัง การสร้างแบบจำลอง เมื่อง การบำรุงรักษาสายสั้งศักย์สูง การทำแผนที่ชายฝั่ง การหาปริมาตรป่าไม้ เป็นต้น โดยเฉพาะการป้องกันและ บรรเทาสาธารณภัยจากน้ำท่วมสามารถสร้างการประยุกต์ใช้งานด้านธุรกิจ เช่น กรณีของหน่วยงานบรรเทาสาธารณภัยของสหรัฐอเมริกา (Federal Emergency Management Agency : FEMA) ได้จัดทำมาตรฐานแผนที่อัตราการ ประกันภัยสำหรับความเสี่ยง Digital Flood Insurance Rate Map: DFIRM ในโปรแกรมการป้องกันและบรรเทา สาธารณภัยน้ำท่วม (FEMA 2001)

การประยุกต์ใช้ไลดาร์ในประเทศไทยครั้งแรกของประเทศไทย ได้เริ่มเกิดขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2547 โดยความ ร่วมมือของกรมทางหลวง กรมแผนที่ทหาร และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พร้อมกับการ สนับสนุนจากประเทศแคนาดาโดยหน่วยงาน GPR Consultant Canada และ Canadian International Development Agency (CIDA) ในการดำเนินการ โครงการศึกษา การประยุกต์ใช้ไลดาร์สำหรับงานวิศวกรรม (พฤษภาคม 2550)

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนั้นได้มีการทดสอบระบบในพื้นที่เป็นบริเวณกว้างทางด้านตะวันตกของ สนามบินสุวรรณภูมิและตามแนว蚜ของเส้นทางมหิดล เอราว์เจรูสราฐฯ-ชลบุรีรวมเป็นพื้นที่กว่า 250 ตาราง กิโลเมตร ใน การบันทึกข้อมูลเมื่อเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2548 ได้ใช้เวลา 9 ชั่วโมงบิน ได้ผลการบันทึก ข้อมูลและประมวลผลในระยะเวลา 1.4 จุดต่อตารางเมตร จุดละ 1 ล้านจุด ความหนาแน่นของจุดระดับโดยเฉลี่ย ข้อมูลสำรวจที่ได้ได้นำไปศึกษาวิจัยและศึกษาการประยุกต์ใช้งาน ในการเรียน การสอน ในสถาบันอุดมศึกษา

หน่วยงานวิจัย หน่วยงานทำแผนที่ และได้ยังมีการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้ส่วนราชการและเอกชนต่างๆ เป็นจำนวนมาก

6.2.2.1 ระบบไลดาร์

ในโครงการศึกษา การประยุกต์ใช้ไลดาร์สำหรับงานวิศวกรรม (ไฟศาล 2550) ได้ทำการติดตั้งระบบไลดาร์บนเครื่องบินที่เดิมใช้งานบันทึกภาพถ่ายทางอากาศอยู่แล้ว การติดตั้งเครื่องมือในตำแหน่งเดิมที่เคยติดตั้งกล้องถ่ายภาพทางอากาศใช้เวลาประมาณครึ่งวัน ตามด้วยการรังวัดอ็อฟเซ็ตจากศูนย์กลางเสາอากาศจีพีเอสไปยังจุดข้างอิฐบันกล่องปริซึมของระบบไลดาร์ การรังวัดอ็อฟเซ็ตนี้ใช้กล้องトイเทลลสเตรชันและเป้าปริซึม ผลลัพธ์ของทำการกำหนดตำแหน่งคาดว่าจะดีกว่า 1 ซม. หลังจากนั้นเป็นบินทดสอบและปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบ



รูปภาพ 6-6 การติดตั้งไลดาร์และการรังวัดอ็อฟเซ็ต

บันทึกข้อมูลในพื้นที่โดยรอบสนามบินสุวรรณภูมิและได้มีประมวลผลข้อมูลไลดาร์โดยเนพาการสร้างแบบจำลองระดับรายละเอียดสูงโดยการใช้เครื่องไลดาร์ Optech ATLM 2050 เครื่องไลดาร์ที่ใช้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดเลเซอร์ คอมพิวเตอร์ควบคุมและบันทึกข้อมูล ระบบเลเซอร์พร้อมปริซึมเบี่ยงเบนลำแสงเลเซอร์ให้กวดล้ำแสงเลเซอร์ครอบคลุมภูมิประเทศเป็นแนบทวิภาค ระบบดังกล่าวแสดงให้เห็นดังภาพ



รูปภาพ 6-7 แสดงเครื่องมือไลดาร์ Optech ALTM 2050 เชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์บังคับการ Kavanaugh ด้วยสายไฟเบอร์ออฟติก

ระบบไลดาร์ Optech ATLM 2050 ตามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต ระบบมีขีดความสามารถในการทำแผนที่โดยให้ความละเอียดถูกต้องในการทำแผนที่สำหรับดังนี้

- ความละเอียดถูกต้องทางระดับเป็น 15 เซนติเมตร กรณีบินสูง 1,200 เมตร
- ความละเอียดถูกต้องทางระดับเป็น 25 เซนติเมตร กรณีบินสูง 2,000 เมตร
- ความละเอียดถูกต้องทางราบคิดเป็น 1/2000 ของความสูงบิน เช่น บินสูง 1,000 เมตร ความละเอียดถูกต้องทางราบคิดเป็น 0.5m

6.2.2.2 ความละเอียดถูกต้องของค่าระดับจากระบบไลดาร์

ในการศึกษาได้มีการตรวจสอบค่าระดับที่ได้กับค่าระดับที่รังวัดด้วยกล้องトイเทลลสเตชันที่ถือว่ามีความละเอียดถูกต้องสูงระดับ มิลลิเมตร. ถึงเซนติเมตร Profile มา กกว่าสองแนวยาวประมาณ 100-200 เมตร ได้ถูกจุดทำเข็มในพื้นที่ที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันเพื่อใช้ตรวจสอบค่าระดับที่ได้จากไลดาร์ ค่าระดับของหมุดที่ตั้งของกล้องトイเทลลสเตชันได้จากการระดับเข็ม 3 ในตารางข้างล่าง แสดงผลการเปรียบเทียบที่แนว Profile B และ Profile E

แนว Profile	ความยาว (เมตร)	RMSE (เมตร)	ความละเอียดถูกต้อง (LMIC1999: LE95%) (เมตร)
Profile B	162	0.08	0.16
Profile E	118	0.05	0.10

ตาราง 6-1 แสดงความละเอียดถูกต้องของ Profile ที่ตรวจสอบได้

ในภาพต่อไปนี้แสดงกราฟของ Profile B และผลต่างค่าระดับที่ได้จากไลดาร์และトイทอลลสเตชัน

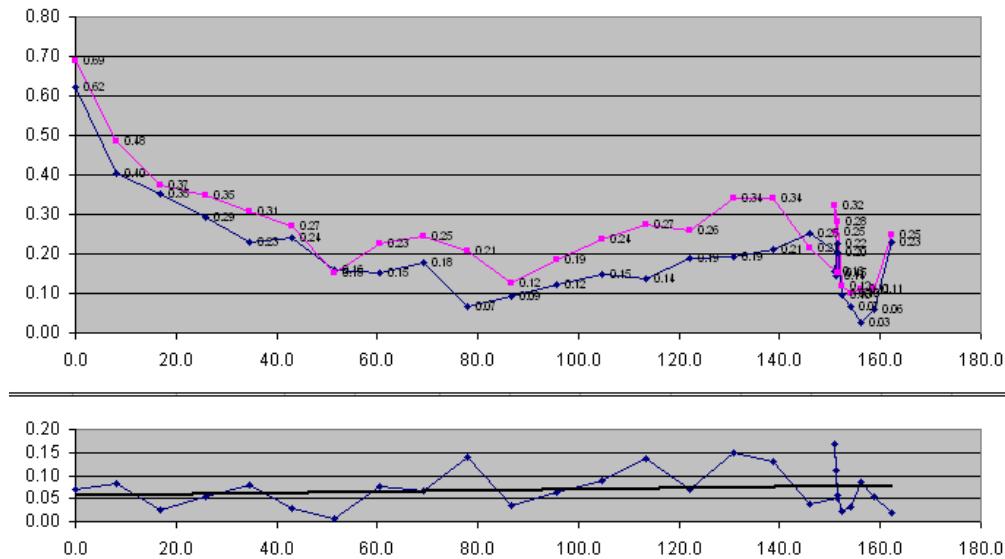
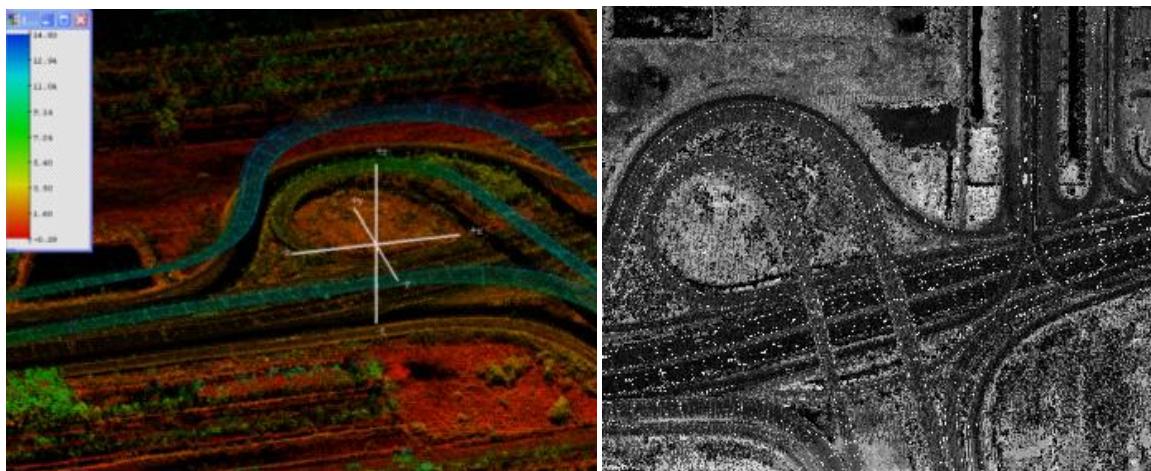


Figure 1 (บ) ค่าระดับจากกล้องโทรทรรศน์ที่เปลี่ยนไปตามค่าระดับจากไลดาร์ (ล่าง) ค่าต่างของค่าระดับ

6.2.2.3 ผลผลิตจากการสำรวจด้วยไลดาร์

ผลการรังวัดด้วยไลดาร์ที่สำคัญคือข้อมูลกลุ่มจุดระดับหน้าแน่นที่เรียกว่า Point Cloud จุดระดับที่ได้จะมีทั้งค่าพิกัดทางราบและค่าระดับ กลุ่มจุดระดับที่ได้ได้จากการสะท้อนกลับของสัญญาณเลเซอร์ ที่อาจกระทบได้ทั้งต้นไม้ พืชพรรณป่าคุณ หลังคาของอาคารและสิ่งปลูกสร้าง ลิงปลูกสร้างต่างๆ พื้นผิวน้ำ รวมทั้งจุดระดับบนภูมิประเทศ ผลการรังวัดที่สำคัญที่สุดก็คือ จุดระดับจำนวนมากที่สามารถใช้แสดงแบบจำลองพื้นผิว (DSM) ได้ทันที รูปแบบหนึ่งที่พบบ่อยคือการใช้รหัสของเขตสี แทนความสูงต่างของพื้นผิวที่ได้ และในอีกรูปแบบหนึ่งคือความเข้มของการสะท้อนสัญญาณเลเซอร์ (Intensity Map) ที่อาจนำมาใช้เป็นแผนที่ภาพօร์โท ได้ทันที หากแต่ว่ามีความละเอียดจุดภาพและโหนสีที่แตกต่างไปจากแผนที่ภาพօร์โทขาวดำที่ได้จากการถ่ายทางอากาศ



รูปภาพ 6-8 ผลการรังวัดด้วยไลดาร์ริเวลทั่งเข้าสานมันสุวรรณภูมิ ภาพซ้ายแสดง DSM ในรูปแบบสามมิติภาพขาวดำ Intensity Map

เนื่องจากจุดระดับมีเป็นจำนวนมาก ในการนี้จำเป็นต้องขอฟ์แวร์ที่มีความสามารถในการอ่านข้อมูลจุดระดับความหนาแน่นสูง บริหารจัดการหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ได้ดี หลักเลี้ยงการคำนวณที่กินทรัพยากรากันโดยไม่จำเป็น เช่น การเลือกอ่านจุดระดับจำนวนจำกัดให้เป็นตัวแทนเท่านั้น การลดจำนวนจุดระดับจำนวนมากเพื่อใช้ในการแสดงผลระหว่างตอบโต้กับผู้ใช้ เช่น การหมุน การเลื่อน แบบจำลองระดับ เป็นต้น American Society for Photogrammetry and Remote Sensing ได้กำหนดมาตรฐานรูปแบบของการจัดเก็บข้อมูลระดับไลดาร์ เรียกว่า LAS format ตามที่ปรากฏในมาตรฐาน LIDAR Data Exchange Format Standard Version 1.0 และ 1.1 ของสมาคม ASPRS (ASPRS 2003) ปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 1.1 ขอฟ์แวร์ประมวลผลไลดาร์ส่วนใหญ่ใช้รูปแบบการจัดเก็บ LAS Format ตั้งแต่ล่าสุด

6.2.2.4 เปรียบเทียบการรังวัดไลดาร์และการรังวัดด้วยภาพ

หากเปรียบเทียบเทคนิคการรังวัดเพื่อสร้างแบบจำลองระดับ จะเห็นว่าการรังวัดจากการถ่ายทางอากาศโดยใช้ภาพคู่สามมิติ และ การรังวัดค่าระดับโดยตรงจากอากาศยานด้วยเลเซอร์วัดระยะทาง จะสามารถสรุปได้ในตารางต่อไปนี้

การสำรวจด้วยภาพ	การสำรวจด้วยไลดาר์
<ul style="list-style-type: none"> เทคโนโลยีมีใช้งานมานานแล้วและปัจจุบันเป็นระบบดิจิทัลที่มีความสะดวกพอสมควร เครื่องบินต้องมีเสถียรภาพสูง อาศัยการส่องสว่างจากดวงอาทิตย์และต้องการมุมสูงของดวงอาทิตย์ที่พอเหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงแสงเงาที่ทอดยาวบนถนน การรังวัดมีขั้นการซับช้อน ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติที่มีความรู้ความชำนาญ ผลลัพธ์ที่ได้มีความหลากหลาย ทั้งแบบจำลองระดับแผนที่ภาพออร์ทอความละเอียดสูง แบบจำลองสเตอเรอิโสามมิติ 	<ul style="list-style-type: none"> ระบบประกอบด้วย เครื่องกำเนิดเลเซอร์ GPS/IMU ซึ่งค่อนข้างซับช้อนและมีราคาแพง อากาศຍานที่ติดตั้งไลดาร์ไม่ต้องมีเสถียรภาพมากนัก เช่นเครื่องบินใบพัดเดียว หรือ เครื่องบินปีกหมุน การทำงานสามารถทำได้ทั้งกลางวันกลางคืน และในสภาวะอากาศไม่อำนวยสำหรับการถ่ายภาพทางอากาศ เช่นจากเดเชอร์มีพลงงานในตอนเช้า การรังวัดโดยตรงจากภูมิประเทศ ทำให้ได้จุดระดับความละเอียดถูกต้องสูงและมีจุดระดับความหนาแน่นมาก กรณีเป็นป่าไม้หรือพืชพรรณปกคลุมหนาทึบ หากไลดาร์ที่ประกอบจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์มีความถี่สูง ยังมีโอกาสบ้างที่จะรังวัดได้ค่าระดับความสูงของพื้นผิวภูมิประเทศบ้าง เช่นจากเดเชอร์บังส่วนยังคงไปบนพื้นผิวภูมิประเทศได้ รังวัดได้ทั้งกลุ่มจุดระดับของพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณ พื้นผิวภูมิประเทศ และภาพความเข้มสัญญาณ รอบการทำงานเพื่อผลิตแบบจำลองระดับเร็วกว่า งานรังวัดด้วยภาพ การผลิตแบบจำลองระดับจากไลดาร์ที่คุณภาพสูงกว่าและเร็วกว่า 2-5 เท่า การบินบันทึกข้อมูล 1 วัน การประมาณผลสมบูรณ์ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน (ไพศาล 2550)

ตาราง 6-2 แสดงข้อดีและข้อด้วย เปรียบเทียบเทคโนโลยีการรังวัดด้วยภาพและการสำรวจด้วยไลดาร์

ปัจจุบันแนวโน้มการใช้งานไลดาร์เพื่อรังวัดแบบจำลองระดับของภูมิประเทศมีมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเหตุผลของความละเอียดถูกต้อง ความสมบูรณ์ของแบบจำลองที่ได้ทั้งแบบจำลองพื้นผิวและแบบจำลองระดับความน่าเชื่อถือ ความเร็วของการสำรวจและการผลิต แบบจำลองระดับและแบบจำลองพื้นผิวความละเอียดสูง ทำให้เกิดความเป็นได้ในการสร้างผลิตภัณฑ์แผนที่ใหม่ๆ เช่น การสร้างแบบจำลองของเมือง การตัดแก้ภาพออร์ทอฟันด์แทรจริง (True Orthophoto) เป็นต้น

6.3 เกณฑ์ความละเอียดถูกต้องของจุดค่าระดับ

ระยะห่างของจุดระดับขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องของแผนที่ที่ต้องการสร้างและความลาดชันของภูมิประเทศเป็นสำคัญ ความลาดชันของภูมิประเทศตามมาตรฐานของสหพันธ์รัฐเยอรมันนีและในประเทศญี่ปุ่นมักกำหนดเป็น 3 ระดับคือ ที่ราบ เนินเขา และภูเขาสูงชัน ตามความลาดชัน (α) ที่กำหนดเป็นองศา ดังในตารางข้างล่างนี้ หากว่ามีความต้องการความละเอียดสำหรับการทำแผนที่ในครั้งนี้เป็น 3 ระดับตามความลาดชันของภูมิประเทศ ประกอบกับหลักการของภูมิศาสตร์ในการเขียนเส้นขั้นความสูง สำหรับแผนที่มาตราส่วน 1:5000 และ 1:10000 ด้วย Ideal Equi-Distance Formula ของ Imhof (1965) จะได้ว่า

ชนิดของภูมิประเทศ	มาตราส่วนของแผนที่	
	1:5,000	1:10,000
ราบ夷บ $\alpha < 10^\circ$	1 เมตร	2 เมตร
เนินเขา $\alpha < 25^\circ$	2 เมตร	5 เมตร
ภูเขาสูงชัน $\alpha < 45^\circ$	5 เมตร	10 เมตร

ตาราง 6-1 แสดง Ideal Equidistance สำหรับเส้นขั้นความสูง (Imhof 1965)

เมื่อพิจารณาเกณฑ์ความถูกต้องของงานที่ได้จากการวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนใดๆ หากสมมุติฐานของการวัดบนภาพด้วยความละเอียดถูกต้อง σ_{xp} ถึง 10° ไมครอน จะสามารถคำนวณความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดวัตถุที่ได้จากการวัดบนภาพสามมิติในทางทฤษฎีดังตารางข้างล่างนี้ โดยใช้ความล้มเหลว

$$\sigma_x = \frac{H}{f} \sigma_{xp} \quad \text{สมการ 6-1}$$

$$\sigma_y = \frac{H}{f} \sigma_{yp} \quad \text{สมการ 6-2}$$

โดยที่ σ_x คือ ค่าความถูกต้องของพิกัดวัตถุทางแกน X, H คือความสูงบินเหนือภูมิประเทศ, f คือความยาวโฟกัส, σ_{xp} คือค่าความถูกต้องของการวัดพิกัดภาพถ่าย เช่นเดียวกับทางด้านแกน Y

$$\sigma_H = \left(\frac{H^2}{f \cdot b} \right) \sigma_{px} \quad \text{สมการ 6-3}$$

โดยที่ความถูกต้องของการวัดพาราเลลล์เป็น

$$\sigma_{px} = \sqrt{2} \sigma_{xp} \quad \text{สมการ 6-4}$$

โดยที่ σ_H คือ ค่าความถูกต้องของพิกัดวัตถุทางแกนดิจิทัล, b คือระยะฐานบินถ่ายซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนช้อนของภาพและมาตราส่วนของภาพถ่าย, σ_{px} คือค่าความถูกต้องของการวัดระยะเหลื่อม (parallax measurement)

ส่วนความถูกต้องทางตำแหน่งทางดิ่งในทางปฏิบัติสามารถคำนวณได้จาก

$$\sigma_H = 0.15\% H$$

สมการ 6-5

โดยที่ σ_H คือ ค่าความถูกต้องของพิกัดวัตถุทางแกนดิ่ง, H คือความสูงบินถ่ายภาพ

ในตารางข้างล่างจะเป็นตัวอย่างของการออกแบบเพื่อการรังวัดแบบจำลองระดับสำหรับภาพถ่ายทางอากาศบินถ่ายที่มาตราส่วน 1:25,000 เมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบจะได้ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนคู่ภาพสามมิติดังปรากฏในตารางข้างล่างนี้

ความยาว ไฟฟ้า (mm)	พื้นที่ ครอบคลุม (kmxkm)	เส้นฐาน (b) (m)	ความสูงบิน (m)	ความถูกต้อง ทางราบ (ทฤษฎี) (m)	ความถูกต้อง ทางดิ่ง (ทฤษฎี) (m)	ความถูกต้อง ทางดิ่ง (ปฏิบัติ) (m)
153	5.75 x 5.75	2300	3800	0.25	0.58	0.57
305	5.75 x 5.75	2300	7625	0.25	1.17	1.14

ตาราง 6-2 ความละเอียดถูกต้องของการวัดบนภาพคู่สามมิติ

ค่าความละเอียดถูกต้องตามตารางนี้จะใช้ได้กับจุดบนพื้นดินที่สามารถเข้าชัดได้บนภาพอย่างชัดเจน แต่สำหรับจุดความสูงบนภูมิประเทศโดยทั่วไปเน้นก็จะมีความถูกต้องน้อยกว่า และเมื่อพิจารณาว่าจุดความสูงบนภูมิประเทศนั้นเป็น "รายละเอียดแผนที่" ที่ต่างจากจุดบังคับภาพหรือจุดที่เข้าชัดได้ทั่วไป ดังนั้นจึงสามารถกำหนดความถูกต้องทางดิ่งของค่าระดับสำหรับ "รายละเอียดทั่วไปบนแผนที่" สำหรับแต่ละภูมิประเทศดังนี้

ชนิดภูมิประเทศ	มาตราส่วน 1:5,000 (เมตร)	มาตราส่วน 1:10,000 (เมตร)
ราบเรียบ $\alpha > 10^\circ$	1	2
เนินเขา $\alpha > 25^\circ$	2	5
ภูเขาสูงชัน $\alpha > 45^\circ$	5	10

ตาราง 6-3 ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งสำหรับ "รายละเอียดของแผนที่"

จะเห็นได้ว่าความละเอียดถูกต้องจากการรังวัดด้วยภาพที่มาตราส่วน 1:25,000 ข้างต้น มีความละเอียดถูกต้องพอเพียงสำหรับงานผลิตแผนที่ที่มาตราส่วน 1:5,000 และ 1:10,000

6.4 ความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับจากภาพดิจิทัล

โดยทั่วไปความละเอียดในการสแกนภาพดิจิทัลขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยทั่วไปเป็นยอมรับกันแล้วว่าภาพถ่ายทางอากาศมีความสามารถในการบันทึกรายละเอียดได้ถึง 40 ถึง 50 คู่เส้นต่อ มิลลิเมตร (line-pair/mm หรือ lp/mm) ซึ่งหากใช้ค่า 50 lp/mm เป็นเกณฑ์จะได้ว่าขนาดของวัตถุที่ละเอียดที่สุดที่ภาพถ่ายทางอากาศจะสามารถบันทึกได้เป็น 10 ไมครอน จากการวัดด้วยเครื่องขยาย倍率ที่เชิงวิเคราะห์ที่ถือว่าให้ความละเอียดถูกต้องสูงสุด ก็สามารถที่จะวัดพิกัดภาพถ่ายได้ละเอียดถูกต้องถึง 10 ไมครอนเข่นกัน

เมื่อใช้สมมุติฐานที่ว่าภาพถ่ายทางอากาศสามารถวัดได้ด้วยความละเอียดในระดับ sub-pixel โดยที่เป็นยอมรับกันทั่วไปว่าเราสามารถวัดละเอียดถึง 1/3 จุดภาพ เมื่อประกอบกับข้อเท็จจริงของขนาดของวัตถุที่ละเอียดที่สุดที่ภาพถ่ายทางอากาศจะสามารถบันทึกได้และความสามารถที่จะวัดพิกัดภาพถ่าย ดังนั้นก็อาจ จะอนุมานได้ว่าการสแกนภาพถ่ายทางอากาศสามารถสแกนได้ตั้งแต่ 10 ถึง 30 ไมครอน

จากการวิจัยของ OEEPE โดยการสแกนภาพถ่ายทางอากาศให้เป็นดิจิทัลด้วยความละเอียด 15 และ 30 ไมครอน แล้วทำการวัดเพื่อทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศด้วยซอฟแวร์อัตโนมัติ พบร่วงการทำข่ายสามเหลี่ยมบนภาพที่สแกนด้วยความละเอียด 15 ไมครอนให้ผลความถูกต้องด้านตำแหน่งหลังการปรับแก้แล้วประมาณ 20 % ดีกว่าบันภาพที่สแกนด้วยความละเอียด 30 ไมครอน (Rottensteiner 1996)

ในการผลิตแบบจำลองระดับด้วยซอฟแวร์จับคู่ภาพของงานวิจัย OEEPE Automatic DEM Extraction ระหว่างปี 1996-2000 กลุ่มนักวิจัยจาก Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart ได้ทำการทดสอบภาพชุด Vaihingen โดยการสแกนที่ 15 และ 30 ไมครอน แล้วทำการให้กำเนิดแบบจำลองระดับโดยการจับคู่ภาพพบว่า ภาพถ่ายที่สแกนด้วยความละเอียด 15 ไมครอน ให้แบบจำลองระดับที่มีความถูกต้องทางระดับที่ดีกว่าเพียง 10 % เท่านั้น ซึ่งก็ให้ผลสอดคล้องกับนักวิจัยจากกลุ่มอื่นในทวีปยุโรปเช่นกัน

จากการวิจัยเดียวกันนี้พบว่าความละเอียดถูกต้องจากการใช้การวัดโดยซอฟแวร์อัตโนมัติเพื่อสร้างแบบจำลองระดับจากการรังวัดจุดระดับ โดยที่ความละเอียดความถูกต้องคิดเป็น

$$\sigma_H = 0.12\% H \quad \text{สมการ 6-6}$$

โดยที่ σ_H คือความถูกต้องของค่าระดับเฉลี่ย และ H คือความสูงที่บินถ่ายในภูมิประเทศ (Fritsch 1998)

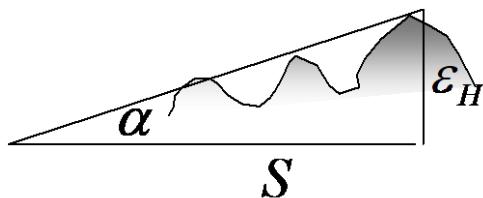
ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการวัดจุดระดับกับรวมวิธีการวัดจุดระดับบนภาพถ่ายทางอากาศ มาตรฐานด้วยเครื่องมือวัดรังวัดสำหรับงานสำรวจด้วยภาพ เช่นเครื่องขยาย倍率ที่เชิงวิเคราะห์จะได้ความละเอียดถูกต้องเป็น

$$\sigma_H = 0.15\% H \quad \text{สมการ 6-7}$$

ซึ่งสูงกว่าเล็กน้อย

6.5 ระยะห่างของจุดระดับ

จากข้อพิจารณาข้างต้นด้วยขีดความสามารถในการวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศและข้อกำหนดในการเขียนแผนที่ตามหลักวิชาภูมิศาสตร์ จะสามารถคำนวณระยะห่างของจุดบนภูมิประเทศเพื่อให้ได้แบบจำลองความสูงที่มีความละเอียดถูกต้องและมีระยะห่างที่จะต้องวัดความสูงที่เหมาะสมดังนี้



รูปภาพ 6-9 ภูมิประเทศ ความผิดพลาดของค่าระดับ และระยะที่ต้องสูழเก็บ

จากรูปให้ α เป็นความลาดชันของภูมิประเทศ ϵ_H คือความคลาดเคลื่อนของค่าระดับที่ยอมรับได้ S คือระยะบนภูมิประเทศที่ต้องสูழเก็บค่าระดับเพื่อมิให้ความคลาดเคลื่อนของค่าระดับเกินเกณฑ์ที่ยอมให้ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรดังนี้

$$\tan(\alpha) = \frac{\epsilon_H}{S} \quad \text{สมการ 6-8}$$

ตัวอย่างเช่น สำหรับภูมิประเทศที่มีความลาดชัน $\alpha < 10^\circ$ และให้ความคลาดเคลื่อนทางระดับที่ยอมได้เป็น 2 เมตร จะได้ความสัมพันธ์ตามรูปดังนี้

$$\tan(10^\circ) = \frac{2}{S} \quad \text{สมการ 6-9}$$

ข่ายข้างและหาค่าตอบ จะได้

$$S = \frac{2}{\tan(10^\circ)} \quad \text{สมการ 6-10}$$

$$S = 11.3 \text{ m}$$

เช่นเดียวกันนี้ นำไปประยุกต์ใช้กับงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศสำหรับแผนที่มีมาตราส่วน 1:5,000 และ 1:25,000 ซึ่งจะสามารถสรุปผลการพิจารณาระยะห่างระหว่างจุดระดับความสูงที่ต้องวัดบนแบบจำลองเพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องของแผนที่ที่ต้องการได้ดังนี้

ชนิดภูมิประเทศ	มาตราส่วน 1:5,000		มาตราส่วน 1:10,000	
	ความถูกต้อง ทางเดิน (เมตร)	ระยะห่างระหว่าง จุดระดับ (เมตร)	ความถูกต้อง ทางเดิน (เมตร)	ระยะห่างระหว่าง จุดระดับ (เมตร)
ราบเรียบ $\alpha < 10^\circ$	1	5	2	10
เนินเขา $\alpha < 25^\circ$	2	4	5	11
ภูเขาสูงชัน $\alpha < 45^\circ$	5	5	10	11

ตาราง 6-4 ความละเอียดถูกต้องขององ่าระดับสำหรับ "รายละเอียดของแผนที่" และระยะห่างระหว่างจุดระดับ

จะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องของระยะห่างระหว่างจุดระดับที่ต้องทำการรังวัดเพื่อสร้างแบบจำลองระดับต้องมีช่วงความห่างระหว่างจุดบนภูมิประเทศเป็น 4 เมตร และ 10 เมตร สำหรับการผลิตแผนที่ที่มาตราส่วน 1:5,000 และ 1:10,000 ตามลำดับ

6.6 รูปแบบการจัดเก็บแบบจำลองระดับ

การจัดแบบจำลองระดับทำได้แบบขึ้นอยู่กับวิธีการรังวัด สภาพภูมิประเทศ ปริมาณข้อมูลที่ต้องการจัดเก็บและประมาณผล วิธีการแสดงผลแบบจำลอง

6.6.1 แบบจำลองระดับแบบแอสกี (ASCII)

การเก็บค่าระดับแบบแอสกีเป็นการใช้รหัส ASCII ในการจัดเก็บ โดยรูปแบบที่ง่ายที่สุดคือการระบุค่าพิกัดของความสูง ตามด้วยค่าความสูงเอง แบบจำลองระดับแบบแอสกี จำกัดการใช้งานเฉพาะแบบจำลองขนาดเล็ก แต่ก็มีความง่ายในการบริหารจัดการและเรียกใช้งาน เช่น ผู้ใช้สามารถใช้ Text Editor ทั่วไปเปิดดูหรือแก้ไขแบบจำลองระดับก็ได้โดยตรง บางครั้งอาจมีข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมอื่นๆ ประกอบมาด้วย รูปแบบมักจะเป็นหนึ่งจุดความสูงต่อหนึ่งบรรทัดข้อมูล ดังตัวอย่างในภาพ

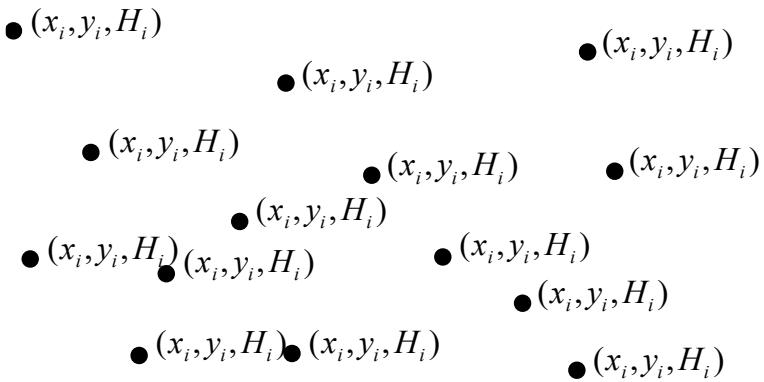
DGM - FILE : 372301		DATUM : 13.03.1997						
1	3534000.00	5794000.00	1	136.12	-6.45	-5.98	8.77	52.42
2	3534000.00	5794012.50	1	134.71	-5.09	-6.50	8.23	42.25
3	3534000.00	5794025.00	1	133.64	-5.85	-6.07	8.41	48.82
4	3534000.00	5794037.50	1	132.12	-5.07	-10.97	12.04	27.37
5	3534000.00	5794050.00	1	130.86	-2.41	-9.40	9.70	15.87
.								
.								
25106	3536000.00	5795937.50	1	72.18	0.58	-1.13	1.27	369.81
25107	3536000.00	5795950.00	1	72.04	0.29	-0.70	0.76	375.00
25108	3536000.00	5795962.50	1	71.98	0.11	-0.50	0.51	386.21
25109	3536000.00	5795975.00	1	71.89	0.20	-0.46	0.50	373.89
25110	3536000.00	5795987.50	1	71.82	-0.02	-0.52	0.52	2.45
25111	3536000.00	5796000.00	1	71.71	-0.03	-0.56	0.56	3.41

รูปภาพ 6-10 ส่วนหนึ่งของข้อมูล จากไฟล์ 372301.dgm ตอนต้นและตอนท้ายสุด

ในภาพแสดงให้เห็นถึงแบบจำลองระดับ DGM-5 (Digital Elevation Model 5) ของประเทศไทยมันนี้ จัดเก็บในรูปแบบอัลกอริทึม โดยคอลัมน์แรกเป็นหมายเลขจุด คอลัมน์ที่ 2 และ 3 เป็นค่าพิกัดทางราบของจุด คอลัมน์ที่ 5 เป็นค่าระดับ ส่วนคอลัมน์อื่นๆ เป็นข้อมูลอุตสาหกรรมเพิ่มเติม

6.6.2 แบบจำลองระดับแบบจุดสุ่ม

แบบจำลองระดับแบบจุดสุ่ม (Random Spot-height) ในที่นี้หมายถึง แบบจำลองที่มีการเก็บค่าพิกัดของจุดความสูงแต่ละจุดพร้อมค่าระดับประจำจุดนั้น โดยการสุ่มเลือกจุดบนพื้นผิวภูมิประเทศที่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองระดับที่เป็นตัวแทนภูมิประเทศ ซึ่งข้อมูลในลักษณะนี้สามารถใช้ประโยชน์จาก ข้อมูลชนิดนี้ที่เป็นมาตรฐานในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้ นั่นคือข้อมูลประเภทจุด (Point) โดยที่จะต้องมีฟลัตของค่าระดับเป็นข้อมูลอุตสาหกรรมเพิ่มเติม หากแสดงด้วยภาพจะแสดงดังรูป



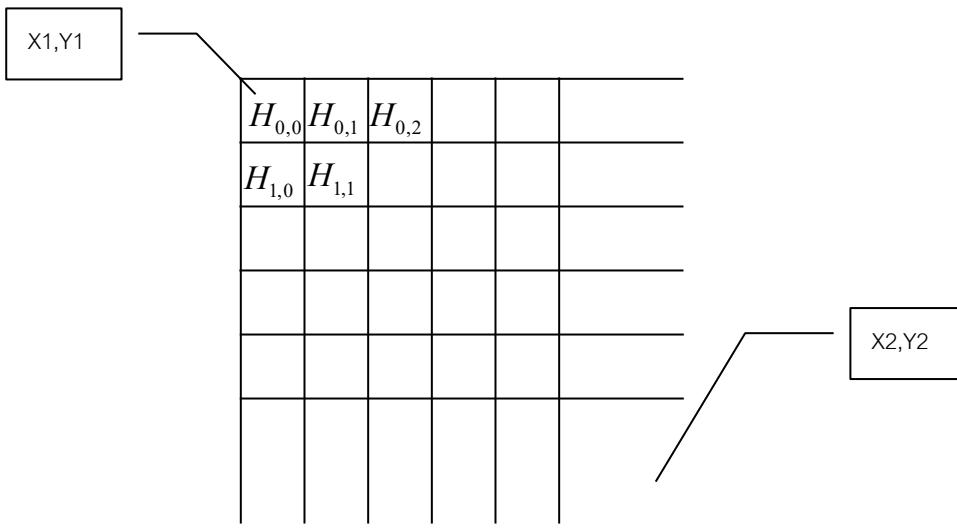
รูปภาพ 6-11 แบบจำลองระดับแบบจุดต่อม

โดยทั่วไปการสุมเก็บค่าระดับจะหนาแน่นขึ้นบริเวณที่การเปลี่ยนแปลงความสูง หรือเป็นภูมิประเทศสูง ชันและซับซ้อน และจุดระดับจะสุมเก็บเบาบางบริเวณพื้นที่ราบและในพื้นที่อยู่อาศัย พื้นที่มนุษย์อยู่อาศัย โดยทั่วไปมากเป็นพื้นที่ที่ราบ

6.6.3 แบบจำลองระดับแบบแรสเตอร์หรือกริด

แบบจำลองระดับแบบแรสเตอร์ (Raster) หรือกริด (Gridded Data) คือแบบจำลองระดับที่จัดเก็บจุดระดับเป็นถูกเป็นแนวอย่างมีระบบ โดยตำแหน่งที่จัดเก็บจะมีตำแหน่งแน่นอนเป็นระยะห่างที่เท่ากันที่เรียกว่า เป็น แรสเตอร์หรือกริด ระยะห่างของจุดค่าระดับเท่ากัน พื้นที่ที่จัดเก็บก็จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยม จตุรัส ด้วยวิธีนี้สามารถหลีกเลี่ยงการบันทึกค่าพิกัดได้เป็นจำนวนมาก โดยการบันทึกเฉพาะค่าพิกัดของจุดระดับ ที่มุ่งด้านใดด้านหนึ่งกับค่าพิกัดของจุดระดับที่อยู่ในด้านตรงข้าม ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้กล่าวมาแล้วใน การระบุ ค่า พิกัดโลก (Georeferencing) ทุกจุดก็จะมีค่าระดับ ซึ่งนิยมที่จะเข้าเป็นรหัสใบนำร่องที่คอมพิวเตอร์เข้าใจได้

ตัวอย่างของแบบจำลองระดับแบบแรสเตอร์หรือกริด



รูปภาพ 6-12 แบบจำลองระดับแบบแรสเตอร์

ค่าระดับชนิดไปนารีสามารถเลือกได้จากช่วงความสูงที่ต้องการเทียบกับหน่วยของการจุดเก็บในคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างของชนิดข้อมูลในคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้ในการจัดเก็บค่าระดับมีดังนี้

ชนิดข้อมูล	ขนาด (ไบต์)	รูปแบบของบิต	ช่วงความสูง
Signed Integer (Short)	2	15+1	$-32768 \leq H \leq +32767$
Unsigned Integer	2	16	$0 \leq H \leq +65535$
Single Precision Float	4	24+8	$1.17549435 \times 10^{-38} \leq H \leq 3.40282347 \times 10^{+38}$

ตาราง 6-5 ชนิดข้อมูลในคอมพิวเตอร์สำหรับการจัดเก็บ

ดังนั้นการเลือกชนิดข้อมูลสำหรับค่าระดับมีความจำเป็น เนื่องจากจะทำให้การจัดเก็บประยุกต์ สามารถเรียกใช้ได้รวดเร็ว ด้วยเหตุผลของการที่ค่าระดับมีความละเอียดถูกต้องที่จำกัดด้วยวิธีการรังวัดและสภาพทางกายภาพของจุดความสูงที่มีความไม่แน่นอนในการกำหนดตำแหน่งอยู่แล้วในธรรมชาติ เช่นสถานการณ์ที่จุดความสูงอยู่บนพื้นดินมีภัยป่าคลุมและพื้นผิวชุ่มฉะ

ในการจัดเก็บค่าระดับที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพ สามารถที่จะปัดเศษจุดทศนิยมของค่าระดับซึ่งไม่มีนัยสำคัญต่อความละเอียดถูกต้องทั้งได้ ด้วยวิธีนี้จะต้องมีการกำหนด สเกลแฟคเตอร์ (Scale Factor) ขึ้นมาโดยนำสเกลแฟคเตอร์ไปคูณค่าระดับ ดังตัวอย่างข้างล่างนี้

ในตารางต่อไปนี้เป็นค่าระดับค่าหนึ่ง เมื่อพิจารณาความละเอียดถูกต้องสามารถจัดเก็บด้วยชนิดข้อมูล Signed Integer หรือ Unsigned Integer ดังนี้

ตัวอย่างค่าระดับ	ความละเอียดถูกต้อง	สเกลแฟคเตอร์	ค่าระดับที่จัดเก็บ
10.256 เมตร	เซนติเมตร	100	1026
10.256 เมตร	เดซิเมตร	10	103

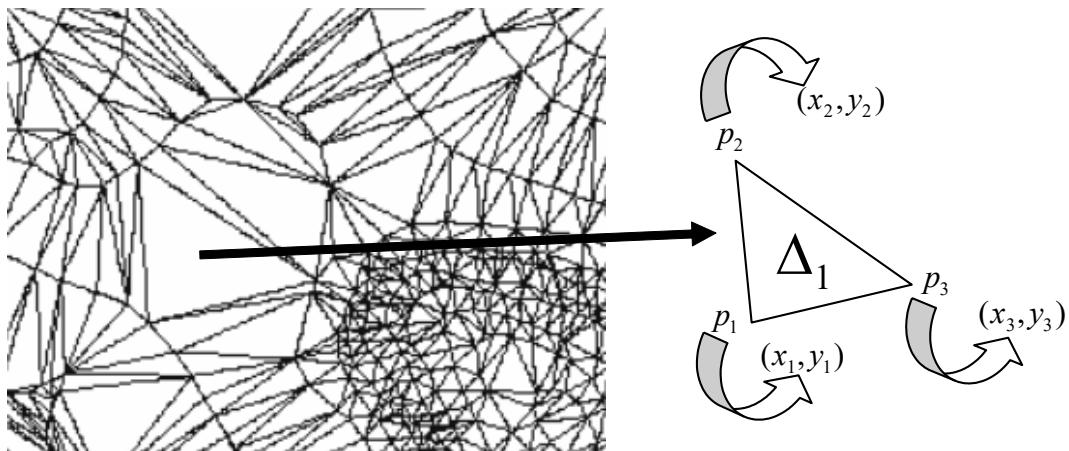
ตาราง 6-6 ตัวอย่างของค่าระดับจัดเก็บโดยคำนึงถึงความละเอียดถูกต้อง

นอกจากการพิจารณาความละเอียดถูกต้องที่มีนัยสำคัญเพื่อนำไปสู่การเลือกสเกลแฟคเตอร์แล้วยังต้องคำนึงถึงช่วงต่ำสุดและสูงสุดที่ข้อมูลชนิดนั้นจะจัดเก็บได้

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับข้อมูลแรสเตอร์หากขนาดของข้อมูลที่จะใช้ในการจัดเก็บค่าระดับต่างกันสองเท่า ปริมาณข้อมูลที่ต้องจัดเก็บจะเพิ่มขึ้นเป็นสี่เท่า นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าวิธีการจัดเก็บค่าระดับแบบแรสเตอร์มีหลักการเดียวกับการจัดเก็บภาพดิจิทัล เพียงแต่ค่าที่ประจำแต่ละจุดภาพเป็นค่าระดับ ดังนั้นจึงสามารถนำรูปแบบการจัดเก็บภาพดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ได้ รูปแบบการจัดเก็บภาพดิจิทัลก็ต้องมีความสามารถที่จะจัดการกับอ้างอิงพิกัดโลก (Georeferencing) ได้ด้วย ตัวอย่างของรูปแบบการจัดเก็บนี้ได้แก่ GeoTIFF หรือรูปแบบอื่นๆ ที่ออกแบบไว้จัดเก็บแบบจำลองระดับโดยเฉพาะได้แก่ USGS SDTS/DEM

6.6.4 แบบจำลองระดับแบบข่ายสามเหลี่ยมไม่สมมาตร

แบบจำลองระดับแบบข่ายสามเหลี่ยมไม่สมมาตร Triangulated Irregular Network หรือ TIN เป็นบันทึกค่าระดับที่มีการระบุความสัมพันธ์ระหว่างจุดระดับที่อยู่ใกล้กันที่ลักษณะจุด แบบจำลองระดับแบบข่ายสามเหลี่ยมไม่สมมาตร จะประกอบด้วยสามเหลี่ยมขนาดต่างๆที่ปรับตัวไปตามภูมิประเทศ โครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน ดังในภาพ



รูปภาพ 6-13 แบบจำลองระดับ TIN และโครงสร้างข้อมูลแต่ละรูปสามเหลี่ยม

รูปแบบหนึ่งของการจัดเก็บ TIN คือเมื่อโครงสร้างตารางของรูปสามเหลี่ยมดังนี้

รูปสามเหลี่ยม	จุดมุน
Δ_1	p_1, p_2, p_3
Δ_2	p_1, p_2, p_4
Δ_3	p_2, p_3, p_4
...	
Δ_n	p_p, p_q, p_r

ในตารางจะเห็นว่ามีรูปสามเหลี่ยม n รูป ที่ประกอบด้วยจุดมุนเพียง 3 จุดที่จัดเก็บเฉพาะหัวทั้งนั้น ค่าระหัสของชื่อจุดมุนของสามเหลี่ยมต่างๆจะเชื่อมโยงไปยังค่าพิกัด ความสัมพันธ์นี้เรียกว่า Tesselation ความสัมพันธ์แสดงได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง ดังนี้

จุดมุม	พิกัด	ค่าระดับ
p_1	(x_1, y_1)	H_1
p_2	(x_2, y_2)	H_2
p_3	(x_3, y_3)	H_3
...
p_m	(x_m, y_m)	H_m

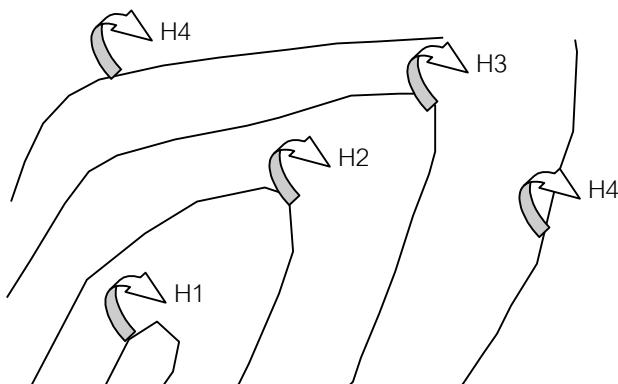
จากตารางจะเห็นว่าเป็นตารางค่าพิกัดของจุดมุมของรูปสามเหลี่ยม ซึ่งมีทั้งสิ้น m จุด ที่ตารางนี้ก็จะเก็บค่าระดับไว้ด้วย การประมวลผล TIN พัฒนาบนพื้นฐานของทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Delaunay Triangulation

ในทางปฏิบัติแบบจำลอง TIN ได้จากการวัดระดับบนภูมิประเทศสูงไปตามพื้นที่ที่มีความสูงเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในภูมิประเทศ ซอฟแวร์จะทำการอ่านค่าพิกัดและค่าระดับของจุดสูงที่รังวัดได้แล้วสร้างรูปสามเหลี่ยมที่มีลักษณะ ดี กล่าวคือสามเหลี่ยมจะต้องไม่ป้านจนเกินไป ซึ่งหมายความว่าจุดยอดของสามเหลี่ยมอยู่ใกล้กันมาก จะทำให้มีอัตราความลาดชั้ดจากรูปสามเหลี่ยมนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกับภูมิประเทศได้

6.6.5 แบบจำลองระดับแบบเวกเตอร์

แบบจำลองระดับโดยใช้เวกเตอร์ เป็นแบบจำลองระดับที่ผู้ใช้แผนที่คุ้นเคยเป็นอย่างดี แต่รู้จักและใช้งานในรูปแบบอื่นๆ นั่นคือการใช้เส้นขั้นความสูงบนแผนที่ แบบจำลองระดับแบบเวกเตอร์คือการจัดเก็บเวกเตอร์ที่ลากผ่านจุดระดับที่มีความสูงเท่ากัน (Iso-Height) ดังนั้นแบบจำลองระดับโดยใช้เวกเตอร์จะได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองระดับอื่นๆ เช่น แบบจำลองระดับแบบจุดสูง หรือแบบจำลองระดับ TIN

ภาพข้างล่างแสดงตัวอย่างของแบบจำลองระดับแบบเวกเตอร์ที่สามารถใช้โครงสร้างข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์สำหรับข้อมูลเวกเตอร์ทั่วไปในการจัดเก็บ พร้อมกับมีข้อมูลอրรถារินัยสำหรับระดับ ในที่นี่คือ $H1, H2, H3$ และ $H4$ ตามลำดับ



รูปภาพ 6-14 แบบจำลองระดับแบบเวกเตอร์

6.7 การประมวลผลแบบจำลอง

การประมวลผลแบบจำลองระดับสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางภูมิศาสตร์กายภาพ การไหลของน้ำในทางทุกศาสตร์ การพังทลายของดินในทางปั๊ปี ความคุณสมบูรณ์ของพืชพรรณในทางการเกษตรและป่าไม้

นอกจากนี้ผลลัพธ์การประมวลผลแบบจำลองระดับสามารถนำไปแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เพื่อช่วยในการตัดสินใจ และวิเคราะห์ได้ ผลการประมวลผลได้แก่

6.7.1 การหาความลาดชันและทิศทางความลาดชันจากแบบจำลองแรสเตอร์

กรณีที่เป็นข้อมูลแบบแรสเตอร์ ความชันที่คำนวณได้จะมีได้สองทิศทางคือตามแนวแกนเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก-ตะวันตก ดังนั้นผลการคำนวนความลาดชันจะต้องระบุทิศทางของความชันว่าเป็นความชันตามแนวแกน x หรือ y หากข้อมูลแรสเตอร์ เป็นดังภาพ

$H_{0,0}$	$H_{0,1}$	$H_{0,2}$			
$H_{1,0}$	$H_{1,1}$	$H_{1,2}$			
$H_{2,0}$	$H_{2,1}$	$H_{2,2}$			

$\alpha_{0,0}$	$\alpha_{0,1}$	$\alpha_{0,2}$			
$\alpha_{1,0}$	$\alpha_{1,1}$				

รูปภาพ 6-15 แรสเตอร์ของค่าความลาดชัน

หากให้ระยะห่างของแรสเตอร์เป็น S ความชันตามแนวแกน x จะหาได้จาก

$$a = \frac{(H_{0,0} + H_{0,1} + H_{0,2} + H_{1,0} + H_{1,1} + H_{1,2} + H_{2,0} + H_{2,1} + H_{2,2})}{9} \quad \text{สมการ 6-11}$$

$$b = \frac{(-H_{0,0} + H_{0,2} - H_{1,0} + H_{1,2} - H_{2,0} + H_{2,2})}{9}$$

$$c = \frac{(H_{0,0} + H_{0,1} + H_{0,2} - H_{2,0} - H_{2,1} - H_{2,2})}{9}$$

ความลาดชันหาได้จาก

$$\alpha_{i,j} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{สมการ 6-12}$$

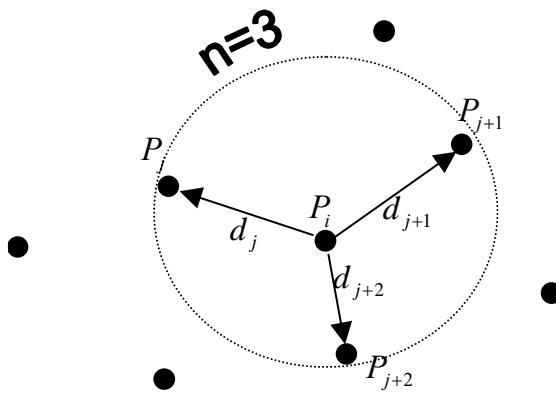
ทิศทางความลาดชันหาได้จาก

$$\kappa = \tan^{-1} \left(\frac{c}{b} \right)$$

สมการ 6-13

6.7.2 การประมาณค่าระดับด้วยวิธี IDW

การประมาณค่าระดับเป็นวิธีการหาค่าระดับที่ทำແเน່ງໃດບັນແບບຈຳລອງຈະດັບ การประมาณค่าความสูงด้วยวิธี Inverse Distance Weighting (IDW) ສາມາດໃຫ້ໄດ້ກັບແບບຈຳລອງຈະດັບທີ່ເປັນຈຸດສູນ ແຮສເຕອຣ໌ ອົງລົງ ທີ່ໄວ້ອານື້ອງຈາກເປັນວິທີທີ່ອາຍຸສົມມຸຕືສູນທີ່ວ່າ ດັນ ຈຸດໃດໆທີ່ກຳລັງພິຈາຮານາຫາຄ່າຮະດັບ ຈາກຈຸດຂໍ້າງເຄີຍທີ່ອູ້ຮ່າຍລ້ອມທີ່ອູ້ໄກລ໌ທີ່ສູດ ດັ່ງນັ້ນໃນການປະຫຼຸກຕົວໃຊ້ຈະຕ້ອນມີການຮຽນຮູ່ດ້ວຍວ່າຈຳນວນຈຸດທີ່ອູ້ໄກລ໌ທີ່ສູດທີ່ຈະນຳມາພິຈາຮານມີຈຸດເຫັນ ກ ຈຸດ ຈາກນັ້ນທີ່ກຳລັງພິຈາຮານໄປຢັງຈຸດທີ່ອູ້ໄກລ໌ທີ່ສູດຈຳນວນ ກ ຈຸດ ຮະຍະທາງທີ່ໄດ້ຈະຄູກນໍາມາຫາຄ່າເຂົ້າລື່ຍທີ່ຄ່າວຸ້ນນໍາຫັກ ໂດຍທີ່ນໍາຫັກຈະເປັນສ່ວນກັບຂອງຮະຍະທາງທີ່ກຳລັງສອງຂອງຮະຍະທາງກີ່ໄດ້ ດັ່ງນີ້



ຮູບພາບ 6-16 ການປະຫຼຸກຕົວໃຊ້ຈຸດທີ່ອູ້ໄກລ໌ທີ່ສູດ ເນື່ອກຳນົດໃຫ້ຈຸດທີ່ໃຫ້ເປັນ $n=3$

ຂໍ້ມູນຕອນການກຳນວນມີດັ່ງນີ້ ໃນຂັ້ນແຮກຕ້ອງທາງຮະຍະທາງຮະຫວ່າງຈຸດ P_i ທີ່ເປັນຈຸດທີ່ຕ້ອງການກຳນົດກ່າວປ່າຍຮະດັບໄປຢັງຈຸດ P_j ໄດ້ທີ່ອູ້ໄກລ໌ທີ່ສູດ ໃນເບື້ອງຕົ້ນຕ້ອງທາງຮະຍະທາງຮະຫວ່າງ P_i ໄປຢັງ P_j ກຳນົດໃຫ້ເປັນ d_j ຈະໄດ້

$$d_j = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

สมการ 6-15

ແລະຄ່ານໍ້າຫັກທີ່ໃຊ້ເປັນ w_j ຈະກຳນວນໄດ້ຈາກ

$$w_j = \frac{1}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$$

สมการ 6-16

ເນື່ອກຳນົດໃຫ້ ແຕ່ລະຈຸດ P_j ມີຄ່າຮະດັບເປັນ H_j ດັ່ງນັ້ນຄ່າຮະດັບເຂົ້າລື່ຍຄ່າວຸ້ນນໍາຫັກ (IDW) H ຈະໄດ້

$$H = \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \left(\sum_{j=1}^n (w_{ij} \cdot H_j) \right)$$

สมการ 6-17

ການນື້ນໃຊ້ກຳລັງສອງຂອງຮະຍະທາງກຳນົດໃຫ້ເປັນນໍ້າຫັກ w_j ຈະກຳນວນໄດ້ຈາກ

$$w_j = \frac{1}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

สมการ 6-18

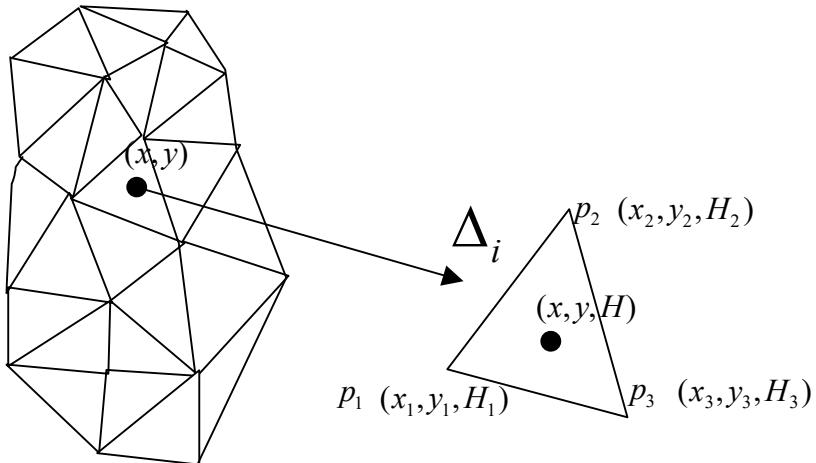
ดังนั้นค่าระดับเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (IDW) H จะคำนวณได้จากสมการข้างต้นนี้

6.7.3 การวิเคราะห์ TIN

TIN เป็นโครงสร้างแบบจำลองระดับที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถแสดงแทนพื้นผิวน้ำมีประโยชน์ได้ทุกรูปแบบ โดยเฉพาะพื้นที่ที่สับซับซ้อน การกระจายของค่าระดับไม่สม่ำเสมอ นอกจากนั้นโครงสร้างของ TIN ยังเอื้ออำนวยให้สามารถคำนวณค่าระดับประมาณ (Height Interpolation) ค่าความลาดชัน(Slope) และทิศทางความลาดชัน (Aspect) ที่จุดใดๆ บนน้ำมีประโยชน์ได้อย่างสะดวกและแม่นยำ

6.7.3.1 การคำนวณความสูงที่จุดใด

หากการคำนวณความสูงที่จุดใด (x, y) จาก TIN ที่มีอยู่ได้โดยการวิเคราะห์หาสามเหลี่ยมใดๆ ที่จุด (x, y) อยู่ภายในรูปสามเหลี่ยมนั้น ปัญหาหารหาจุดใดในรูปหลายเหลี่ยมเป็นปัญหามาตรฐานในทาง Computer Graphic ที่มีวิธีการทำได้ชัดเจน ดังรูป



รูปภาพ 6-17 โครงสร้างข้อมูลของ TIN

จากสมการแนะนำ นำเอาค่าพิกัดและค่าระดับของจุดยอดของสามเหลี่ยม มาเขียนเป็นสมการได้

$$H_1 = ax_1 + b \cdot y_1 + c$$

สมการ 6-19

$$H_2 = ax_2 + b \cdot y_2 + c$$

$$H_3 = ax_3 + b \cdot y_3 + c$$

ซึ่งเป็นสมการ 3 สมการที่มี 3 ตัวแปรที่สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ a, b, c ได้ ดังนั้นค่าระดับที่จุด

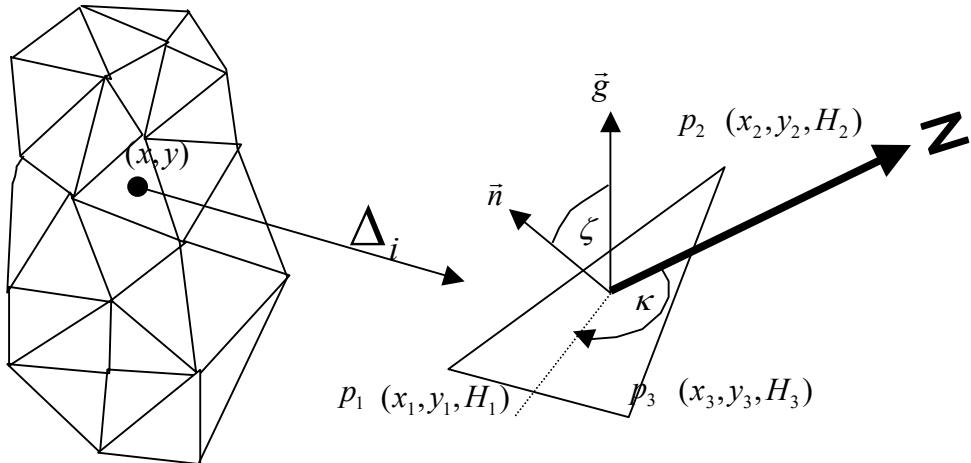
(x, y)

$$H = ax + b \cdot y + c$$

สมการ 6-20

6.7.3.2 การหาความลาดชันและทิศทางความลาดชัน

หากการคำนวณความลาดชันและทิศทางความลาดชันที่จุดใด (x, y) จาก TIN ที่มีอยู่ได้โดยการวิเคราะห์หาสามเหลี่ยมใดๆ ที่จุดใดที่ต้องการ ซึ่งในพื้นที่ของสามเหลี่ยมนั้นมีความลาดชันและทิศทางความลาดชัดไปทิศทางเดียวกันทั้งสิ้น ดังรูป



รูปภาพ 6-18 ความลาดชันและทิศทางความลาดชันของ TIN

จากรูปสามเหลี่ยม จะสามารถเขียนสมการระนาบได้จากการนำจุดยอดทั้งสามมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์ a, b, c ดังนี้

$$\begin{aligned} H &= a \cdot x + b \cdot y + c \\ a \cdot x + b \cdot y - H + c &= 0 \end{aligned} \quad \text{สมการ 6-21}$$

จากทฤษฎีทางเรขาคณิตและเวกเตอร์ จะได้เวกเตอร์ \vec{n} ซึ่งตั้งฉากกับระนาบใน สมการ 6-21

$$\begin{aligned} \vec{n} &= a\vec{i} + b\vec{j} - \vec{k} \\ \vec{n} &= \begin{vmatrix} a \\ b \\ -1 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad \text{สมการ 6-22}$$

ส่วนเวกเตอร์ในแนวตั้ง \vec{g} นิยามได้จาก

$$\vec{g} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad \text{สมการ 6-23}$$

จะได้มุมที่เวกเตอร์ \vec{n} ทำกับ \vec{g} เป็น มุม ζ

$$\zeta = \frac{\vec{n} \bullet \vec{g}}{\|\vec{n}\| \|\vec{g}\|} \quad \text{สมการ 6-24}$$

ดังนั้น ความลาดชัน $\vec{\alpha}$ ของระนาบสามเหลี่ยมดังกล่าวเป็น

$$\alpha = \pi - \zeta$$

สมการ 6-25

ส่วน ทิศทางของความลาดชันได้จากการขยายเวกเตอร์ \vec{n} ลงบนระนาบ x-y และคำนวณมุมอչิม์ทดังนี้

$$\kappa = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

สมการ 6-26

6.8 การควบคุมคุณภาพ

เมื่อทำการผลิตแบบจำลองความสูงจากการวัดจุดความสูงบนภาพจำลองสามมิติแล้ว จะต้องมีการประเมินคุณภาพ (Quality Assessment) ด้วยสายตาอีกครั้ง ซึ่งจำเป็นมากสำหรับการวัดด้วยวิธีทาง Digital Photogrammetry ป้อยครั้งที่ขอฟอร์วัดจุดที่ผิดไปจากวัตถุประสงค์ที่ต้องการวัด ได้แก่ จุดที่เป็นขอบหรือมุมที่เป็นแสงเงาของวัตถุบนภูมิประเทศ จุดที่ปรากฏอยู่บนส่วนบนของวัตถุที่มีความสูงผิดไปจากบนภูมิประเทศ โดยตรง เช่น ยอดดินไม้ หลังคาของบ้านและอาคาร จุดเหล่านี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องด้วยสายตาเปล่าและใช้เครื่องมือช่วย โดยเฉพาะการใช้เครื่องช่วยมองสามมิติในการมองจุดที่คาดขึ้นทับบนแบบจำลองระดับ เมื่อพบจุดที่ผิดพลาดแล้วจะทำการลบจุดเหล่านี้ทิ้งไป พร้อมกันนี้จะได้มีการวัดลงไปทุกแทนที่เมื่อโดยที่จัดที่วัดใหม่แล้วจะอยู่บนภูมิประเทศที่ถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อให้ระยะห่างของจุดระดับไม่ห่างกันจนเกินเกณฑ์ที่ตั้งไว้

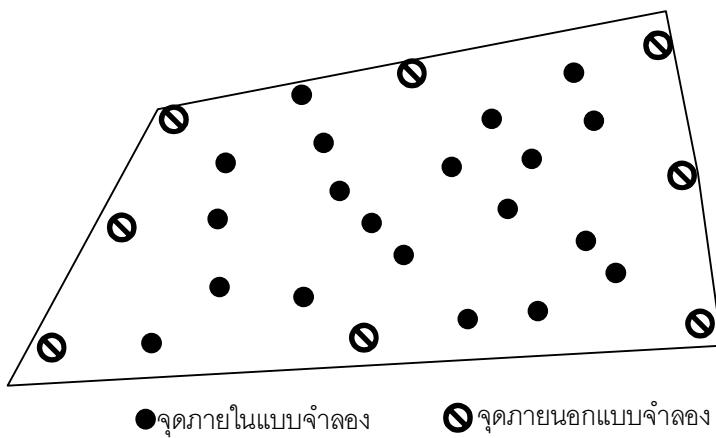
นอกจากนักรายใช้วิธีทางสถิติมาช่วยก็สามารถที่จะตรวจหาความผิดพลาดของ การวัดจุดระดับได้ เช่น สมมติฐานที่ว่าโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงความสูงในภูมิประเทศอย่างเฉียบพลันนั้นไม่มี เช่นอาจใช้อัลกอริズึมในการประมวลผลทางสถิติพร้อมกับการสังเกตค่าความสูงที่มีสถิติผิดปกติ

แบบจำลองระดับที่ได้จากการวัดในเบื้องต้นจะเป็นจุดระดับสูงที่กระจายทั่วภูมิประเทศ การเปลี่ยนรูปแบบการจัดเก็บแบบจำลองระดับในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ การสร้างเป็นเส้นชั้นความสูง การสร้างข่ายสามเหลี่ยมรูปร่างไม่สมมาตร (Triangulated Irregular Network : TIN) การสร้างแบบจำลองสามมิติ (3-D modeling) ตลอดจนการแสดงผลแบบจำลองเสมือนจริงสามมิติ (virtual reality model) ก็จะช่วยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระดับที่วัดได้ เช่นกัน โดยการสังเกตความไม่สอดคล้องกันของภูมิสังขานและรูปร่างที่ผิดปกติอื่นๆ เช่นบริเวณที่มีเส้นชั้นความสูงหนาแน่นมาก บริเวณที่มีสันหรือขอบไม่ตรงกับภาพถ่ายทางอากาศตามภูมิประเทศ

เมื่อได้แบบจำลองระดับจากแต่ละคู่ภาพสามมิติแล้ว จะต้องทำการนำมารวบกับแบบจำลองระดับที่อยู่ติดกัน ระหว่างรายต่อรายต้องตอกันให้สนิท แต่หากมีความเหลื่อมล้ำทางด้านความสูง ค่าແย়েংকিจะต้องไม่เกินเกณฑ์ความถูกต้องทางดิ่งที่กำหนดให้ เมื่อพิจารณาแล้วว่าแบบจำลองทั้งสองจะสามารถตอกันได้ จะต้องมีการผนวกแบบจำลองระดับเข้าเป็นผืนเดียวกัน ค่าระดับที่เป็นของจุดจุดเดียวกันจะต้องทำการเฉลี่ยเข้าหากัน

6.8.1 การประเมินคุณภาพ (Quality Assessment)

แนวทางหนึ่งในการประเมินคุณภาพของแบบจำลองระดับเชิงเลข คือการนำสู่มื้อเอกสารระดับบนแบบจำลองแล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าระดับที่รังวัดด้วยความละเอียดถูกต้องสูงกว่า ตามมาตรฐานหน่วยงาน United States Geological Survey (USGS 1997) (http://mapping.usgs.gov/www/gi/DEM/standard_dem.html) กำหนดให้จุดที่เด่นชัดในภูมิประเทศทางระดับ 28 จุดกระจายอย่างทั่วถึงบนแบบจำลองใช้ในการวิเคราะห์ โดยที่ 8 จุดต้องเป็นจุดที่อยู่ขอบของแบบจำลอง ส่วนอีก 20 จุด ให้เป็นจุดที่อยู่ภายในแบบจำลอง ตั้งภาพ



รูปภาพ 6-19 ตัวແທນ່າງຂອງຈຸດຕວະສອບຮັບຮັດຕັ້ງມາຕຽບສູງ USGS (1997)

เมื่อมีค่าระดับที่ได้จากการรังวัด H_i สำหรับแต่ละจุดระดับที่นำมาตรวจสอบ และนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ได้จากการรังวัด \hat{H}_i ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงกว่า ก็จะสามารถประเมินความละเอียดถูกต้องได้จากค่า Root Mean Square Error (RMSE) เมื่อใช้จุดทดสอบทั้งสิ้น 28 จุด ได้ดังนี้

$$Quality = RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{28} (H_i - \hat{H}_i)^2}{28}} \quad \text{สมการ 6-27}$$

มาตรฐานดังกล่าวสามารถเป็นมาตรฐานเดียวกันกับ National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ออกโดย Federal Geographic Data Committee (FGDC) แห่งสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐานดังกล่าว ยังมีข้อปฏิบัติ เมื่อผู้ใช้ต้องการประเมินความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับหรือการรังวัดค่าระดับในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการใช้แฟกเตอร์ 1.9600 คูณเข้ากับค่า RMSE ที่ได้ (LMIC 1999) ดังสมการ ข้างล่างนี้

$$NSSDA = 1.9600 \cdot RMSE \quad \text{สมการ 6-28}$$

เพื่อให้ง่ายและเกิดความชัดเจนในการปฏิบัติการตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับ Minnesota Planning Land Management Information Center แห่งมลรัฐมิเนโซตา ประเทศสหรัฐอเมริกา

ได้พัฒนา Positional Accuracy Handbook (LMIC 1999) ให้มีชื่อแนะนำในการปฏิบัติการประเมินความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับอย่างเป็นขั้นตอนและขัดเจน

ตัวอย่างหนึ่งที่ชัดเจนได้แก่ การกำหนดรูปแบบตารางที่ใช้ในการแสดงผลการเปรียบเทียบและขั้นตอนในการคิดคำนวณความลับเสียดถูกต้อง ทำให้สามารถประเมินค่าความลับเสียดถูกต้องของค่าระดับเป็น $RMSE_z$ และ NSSDA

Column	Title	Contents
A	Point number	Designator of test point
B	Point description	Description of test point
C	z (independent)	z coordinate of point from independent data set
D	z (test)	z coordinate of point from test data set
E	diff in z	z (independent) - z (test)
F	(diff in z) ²	Squared difference in z = (z (independent) - z (test)) ²
	sum	Σ (diff in z) ²
	average	sum / number of points
	RMSE	Root Mean Square Error (vertical) = average ^{1/2}
	NSSDA	National Standard for Spatial Data Accuracy statistic = 1

รูปภาพ 6-20 ตารางสำหรับการประเมินความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับ (LMIC 1999)

6.9 การแปลงรูปแบบแบบจำลองระดับ

แบบจำลองระดับที่ได้จากการวัดในเบื้องต้นจะเป็นจุดระดับสูงที่กระจายทั่วภูมิประเทศพร้อมคำอوصានิพายสำหรับคุณลักษณะของภูมิสัณฐาน สามารถจัดเก็บลงในรูปแบบข้อมูลที่เป็นจุดในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้ทันที

6.9.1 แบบจำลองระดับชนิดข่ายสามเหลี่ยมรูปร่างไม่สมมาตร

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดบนภาคผืนสามมิติและได้รับการตรวจสอบแล้วว่าถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ ซึ่งอยู่ในรูปของจุดความสูงที่กระจายไปทั่วภูมิประเทศ แต่ละจุดที่ประกอบไปด้วยค่าพิกัดและค่าระดับ พร้อมกันนี้อาจมีคำบรรยายแสดงสถานะสำหรับภูมิสัณฐาน (geomorphology) จะถูกแปลงเป็นข่ายสามเหลี่ยมรูปร่างไม่สมมาตร (Triangulated Irregular Network: TIN) ซึ่งจะยังคงความสอดคล้องได้ดีกับภูมิสัณฐานของภูมิประเทศในพื้นที่นั้นๆ TIN สร้างขึ้นโดยการกำหนดด้วยของรูปสามเหลี่ยมขึ้นจากจุดมุ่งที่เป็นจุดความสูงที่ได้จากการวัดสูมามาข้างต้น โดยที่สามเหลี่ยมที่จะประกอบเป็น TIN ได้ต้องเป็นสามเหลี่ยมมีคุณภาพ “ดี” โดยที่ TIN นั้นจะมีจุดความสูงมีตำแหน่งสูงไปตามภูมิประเทศ บริเวณที่ราบก็จะมีรูปสามเหลี่ยมขนาดใหญ่ ในขณะที่ในพื้นที่สูงชันก็จะมีสามเหลี่ยมขนาดเล็กลดลงไปเรื่อยๆ ในบริเวณที่ความสูงเปลี่ยนแปลงอย่างเฉียบพลันรูปสามเหลี่ยม ก็จะไม่มีการพาดผ่านแนวสันหรือร่องเหล่านั้น แต่จะมีขอบด้านใดด้านหนึ่งของรูปสามเหลี่ยมเป็นส่วนของแนวสันหรือร่องเอง ดังนั้นการประมาณผลและจัดเก็บแบบจำลองระดับในรูปแบบของ TIN จะต้องให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องดีกับภูมิสัณฐานของภูมิประเทศให้มากที่สุด

แบบจำลองระดับในรูปของ TIN มากจะถูกจัดเก็บเป็นรูปแบบที่แต่ละซอฟแวร์คิดคันขึ้นมาเอง (proprietary format) เนื่องจากยังไม่มีมาตรฐานสำหรับโครงสร้างข้อมูล TIN กรณีที่ไม่มีรูปแบบสำหรับ TIN โดยเฉพาะก็อาจใช้รูปแบบรูป ข้อมูล像个เดอร์ชีนเดียวกับข้อมูลชนิดรูปหลายเหลี่ยม (polygon) พร้อมกับข้อมูลของจุดที่มีค่าระดับกำกับ

6.9.2 แบบจำลองระดับชนิดเส้นชั้นความสูง

TIN ที่ได้จะถูกนำมาสร้างเวกเตอร์ของเส้นชั้นความสูง เมื่อมีสมมุติฐานที่ค่าความถูกต้องของกรังวัดค่าระดับเป็น 2 ถึง 5 เมตร ดังข้อพิจารณา ก่อนหน้านี้ สามารถกำหนดให้ระยะห่างเส้นชั้นความสูงเป็น 2.5 เมตร แต่อย่างไรก็ตามเวกเตอร์ของเส้นชั้นความสูงที่สร้างจากซอฟแวร์โดยการจำกัดระยะห่างเส้นชั้นความสูง เป็นค่าคงที่นั้น อาจทำให้ความถูกต้องของภูมิสัณฐานของแบบจำลองระดับในรูปแบบของเส้นชั้นความสูงเทียบกับภูมิประเทศจริงลดลงไปบ้าง แต่อย่างไรก็ตามเส้นชั้นความสูงก็ยังมีประโยชน์ในเรื่องของการคุ้นเคยในการช่วยอ่านและแปลงความหมายภูมิประเทศบนแผนที่

แบบจำลองระดับในรูปของเส้นชั้นความสูงจะถูกจัดเก็บเป็นข้อมูล像个เดอร์ชีนเดียวกับข้อมูลชนิดเส้นในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ทั่วไป โดยมีค่าประจามาสั้นชั้นความสูงกำกับอยู่บนเส้นชั้นความสูงแต่ละเส้น

6.9.3 แบบจำลองระดับชนิดแรสเตอร์

ในอีกทางหนึ่งแบบจำลองระดับที่มีระยะห่างเท่ากันและจัดเก็บเป็นแนวแบบแรสเตอร์จะถูกสร้างขึ้นจาก TIN ด้วยเช่นกัน ระยะห่างของแรสเตอร์สามารถกำหนดได้จากระยะห่างระหว่างจุดที่ต้องทำการ

รังวัดเพื่อให้แบบจำลองระดับมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ก่อภาระมาแล้วข้างต้น แต่โดยสมมุติฐานที่ว่า โดยการประมาณค่าจากรูปสามเหลี่ยม โดยเข่นเดียว กับเส้นชั้นความสูง

6.9.3.1 การจัดเก็บค่าระดับความสูงในรูปแบบแรสเตอร์

การจัดเก็บความสูงในรูปแบบของแรสเตอร์ที่จุดความสูงมีตำแหน่งที่เป็นระบบ มีระยะห่างระหว่างแรสเตอร์ที่แน่นอน ดังนั้นสามารถกำหนดพิกัดบนพื้นโลกของแต่ละจุดภาพบนราสเตอร์ได้เพียงแต่กำหนดค่าพิกัดพื้นโลกของมุมข้างบนสุดและค่าพิกัดพื้นโลกของมุมข้างล่างสุดของแรสเตอร์ พร้อมกับข้อมูลของจำนวนแฉลงและสัดมหานาครของแรสเตอร์ เพียงเท่านี้ก็จะสามารถคำนวณตำแหน่งของจุดพิกัดโลกของแรสเตอร์ได้หากได้ในการทำเข่นนี้เรียกว่า georeferencing

การจัดเก็บข้อมูลแบบแรสเตอร์สำหรับข้อมูลแบบจำลองระดับที่เป็นแรสเตอร์ โดยเฉพาะตัวค่าระดับ ก่อนการจัดเก็บจะต้องมีการคำนึงถึงความละเอียดถูกต้องและขนาดข้อมูลที่จัดเก็บ โดยขนาดของข้อมูลที่จัดเก็บควรจะจัดเก็บให้มีขนาดเล็กที่สุดและเข้ากันได้กับหน่วยการจัดเก็บบนคอมพิวเตอร์ หน่วยการจัดเก็บหนึ่งที่ใช้บ่อยก็คือ signed interger หรือ short ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $-32,768$ ถึง $+32,767$ ซึ่งให้ได้กับภูมิประเทศที่มีความสูงเป็นลบได้ด้วย

ความละเอียดถูกต้องของค่าระดับสำหรับภูมิประเทศมักอยู่ในเกณฑ์เป็น เมตร เดซิเมตร หรือ เชนติเมตร มักจะเป็นตัวเลขจุดศนย์ (floating point) ซึ่งต้องการเนื้อที่ในการจัดเก็บเป็น 4 ไบต์สำหรับชนิด single precision หรือ 8 ไบต์สำหรับ double precision ทำให้เนื้อที่ในการจัดเก็บใหญ่ขึ้นกว่าการจัดเก็บด้วยตัวเลขจำนวนเต็ม 2 ไบต์เป็น 4 เท่าและ 8 เท่าตามลำดับ

ในกรณีที่ค่าระดับเป็นเลขจุดศนย์และต้องการเปลี่ยนให้เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม หากว่าเกณฑ์ความถูกต้องเป็น เดซิเมตร หรือ เชนติเมตร ก็สามารถใช้ตัวคูณ 10 หรือ 100 เป็นตัวคูณก่อนจัดเก็บลง และเป็นตัวหารเมื่อกำหนดเข้ามาประมาณผล โดยมีสมมุติฐานที่ว่าตัวเลขหลังหลักเดซิเมตรหรือหลังหลักเชนติเมตรไม่มีนัยสำคัญในการจัดเก็บ

รูปแบบการจัดเก็บต้องเป็นรูปแบบที่เป็นมาตรฐานที่เป็นกลางยอมรับ โดยหากรูปแบบเป็นที่ยอมรับได้สำหรับผู้ผลิตซอฟแวร์ส่วนใหญ่การจัดเก็บคงคลังระยะยาวจะทำให้ข้อมูลที่มูลค่าสูงมีหนทางที่จะอ่อนออกมากอย่างถูกต้องได้เสมอ จากการเลือกใช้รูปแบบการจัดเก็บที่ผู้ผลิตซอฟแวร์ให้การยอมรับคือผลในทางปฏิบัติที่ซอฟแวร์ส่วนใหญ่รู้จักรูปแบบการจัดเก็บตามมาตรฐาน USGS SDTS เป็นอย่างดีและสามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลในรูปแบบ SDTS ได้โดยตรง รูปแบบของ USGS สำหรับแบบจำลองระดับได้แก่ USGS/DEM หรือ USGS/GeoTIFF อีกรูปแบบหนึ่งที่แพร่หลายในงานภูมิสารสนเทศคือ GeoTIFF ก็สามารถนำมาใช้ในการจัดเก็บเข่นกัน

6.9.3.2 การจัดเก็บค่าระดับความสูงในรูปแบบแรสเตอร์สำหรับประเทศไทย

เมื่อพิจารณาภูมิศาสตร์ของประเทศไทยก็จะพบว่า ค่าต่ำสุดของภูมิประเทศอาจอยู่ที่ต่ำกว่าระดับน้ำที่มีค่าติดลบ ในเบื้องต้นนี้ให้สมมุติว่าเป็น -500 เมตร ในขณะที่จุดสูงสุดในประเทศไทยคือที่ยอดดอยอินทนนท์มีค่าความสูงประมาณ $2,400$ เมตร ดังนั้นค่าระดับที่จัดเก็บก็จะอยู่ในช่วง $-5,000$ ถึง $24,000$ หน่วยความสูง โดยมีตัวคูณ 10 กำกับอยู่

เมื่อพิจารณาหน่วยของการจัดเก็บพบว่า signed integer ขนาด 16 บิตหรือ 2 ไบต์ ซึ่งมีช่วงการจัดเก็บตั้งแต่ $-32,768$ ถึง $+32,767$ มีความเหมาะสมที่สุด เพราะมีช่วงการจัดเก็บครอบคลุมช่วงหน่วยความสูงที่จะต้องใช้ในการจัดเก็บค่าระดับทั้งประเทศ Signed integer จะทำให้ค่านัยสำคัญของความถูกต้องของค่าระดับคงไว้ถูกต้องไว้ในขณะที่ต้องการเนื้อที่ในการจัดเก็บน้อยที่สุด

ตัวอย่าง

หากกำหนดให้ประเทศไทยมีเนื้อที่ $515,559$ ตารางกิโลเมตร จะสามารถเปรียบเทียบเนื้อที่ต้องใช้ในการจัดเก็บแบบจำลองระดับที่ระยะห่างของแรสเตอร์ต่างๆ ดังนี้โดยให้ค่าระดับที่จัดเก็บเป็นจำนวนเต็มขนาด 2 ไบต์

หากต้องการให้ระยะห่างจุดระดับเป็น 1 เมตร จะสามารถคำนวณจุดความสูงทั่วประเทศและปริมาณข้อมูลที่ต้องจัดเก็บดังนี้

$$\text{จำนวนจุดระดับทั่วประเทศคิดเป็น } \frac{515559 \times 1000 \times 1000}{1 \times 1} = 515.6 \times 10^9 \text{ จุด}$$

$$\text{หรือคิดเป็น } 515.6 \times 1000 \times 10^6 = 516 \text{ พันล้านจุด}$$

$$\text{หากคิดเป็นปริมาณข้อมูล คิดเป็น } 2 \times 515.5 \times 10^9 = 1031 \times 10^9 \text{ ไบต์}$$

$$= 1,031 \text{ 吉igaไบต์} \sim 1 \text{ เทρaไบต์} \quad \underline{\text{ตอบ}}$$

ดังนั้นหากพิจารณาแบบจำลองระดับสำหรับประเทศไทยที่ระยะห่างระหว่างจุดระดับ $1, 10, 100$, และ 1000 เมตร จะได้จำนวนจุดระดับและปริมาณข้อมูลแรสเตอร์ที่ต้องจัดเก็บดังตารางนี้

ระยะห่างระหว่างจุดระดับ	จำนวนจุดระดับ	ปริมาณข้อมูลแรสเตอร์
1 เมตร	516 พันล้านจุด	1031 GB
10 เมตร	5.2 พันล้านจุด	10.3 GB
100 เมตร	51 ล้านจุด	103 MB
1000 เมตร	0.515 ล้านจุด	1.03 MB

ตาราง 6-3 ปริมาณข้อมูลแบบจำลองระดับสำหรับประเทศไทย

6.10 การแบ่งข้อมูลแบบจำลองระดับเป็นระหว่างแผนที่

เมื่อสร้างแบบจำลองระดับในรูปแบบต่างๆแล้ว จะต้องทำแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้ง่ายต่อการจัดเก็บ การนำร่องรักษา การนำมาใช้งานบนคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีขีดความสามารถในการบรรจุข้อมูลและหน่วยความจำที่จำกัด ดังนั้นจึงต้องทำการแบ่งแบบจำลองระดับออกเป็นระหว่างแผนที่ โดยให้หน่วยที่เล็กที่สุดของระหว่างมีขอบเขตภูมิศาสตร์ข้อนั้นทับลงพอดีกับการแบ่งระหว่างตามแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหารชุด L7018 ซึ่งมีขนาดระหว่างเป็นสี่เหลี่ยมเกือบจัตุรัสครอบคลุมพื้นที่ตามแนวตะวันออกไปตะวันตก 15 ลิปดาและตามแนวเหนือไปใต้ 15 ลิปดา สำหรับข้อมูลระดับบางประเภทโดยเฉพาะข้อมูลที่เป็นจุดสุม หากพบว่าแบ่งเป็นระหว่างตามแผนที่ภูมิประเทศขนาด 15 ลิปดาแล้วข้อมูลมีน้อยเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้องมีการบริหารการจัดเก็บเพิ่มข้อมูลเป็นจำนวนมากมาก ก็อาจพิจารณาให้ขนาดระหว่างมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นจำนวนเท่าของ 15 ลิปดาหรือจำนวนเท่าของระหว่างแผนที่มาตรฐาน 1:50,000 ได้ตามความเหมาะสม

กรณีการผลิตแบบจำลองมาตรฐานใหญ่ ในการจัดเก็บควรจะแบ่งข้อมูลแบบจำลองระดับออกเป็นพื้นที่ย่อยเป็นระหว่างแผนที่ และอาจเลือกขนาดระหว่างให้เท่ากับระหว่างแผนที่ แปลงที่ดินของกรมที่ดิน สำหรับมาตรฐาน 1:4,000 , 1:2,000, 1:1,000 และ 1:500 (กรมที่ดิน 2547) ระบบการฉายแผนที่ควรเป็นระบบบูรณาการ 2D และมีขนาดระหว่างกว้างและยาวเท่ากันเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ 2×2 ตร.กม. สำหรับมาตรฐาน 1:4,000 การเรียกชื่อระหว่างก็ควรใช้รูปแบบตามระบุของกรมที่ดินด้วย เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกัน และสะดวกในการเรียกใช้

6.11 รูปแบบการจัดเก็บแบบจำลองระดับ

สำหรับรูปแบบในการจัดเก็บนั้นให้ใช้รูปแบบในการจัดเก็บที่เป็นมาตรฐานที่เป็นกลางยอมรับได้สำหรับผู้ผลิตซอฟแวร์ส่วนใหญ่ มาตรฐานหนึ่งที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางคือ Spatial Data Transfer Standard : SDTS ซึ่งเป็นรูปแบบกลางที่หน่วยงานทำแผนที่ของสหรัฐอเมริกาได้แก่ the U.S. Geological Survey และ Federal Geodetic Data Committee (FGDC) ตลอดจนองค์กรมาตรฐานสากล (ISO) โดย Technical Committee TC211 ส่งเสริมให้ใช้ โดยที่โอมเพจของ U.S. Geological Survey จะมีเอกสาร คู่มือซอฟแวร์ไลบรารี พร้อมซอฟแวร์เพื่อใช้ในการเข้าถึงข้อมูล อย่างครบถ้วน

รูปแบบการจัดเก็บ SDTS ถูกออกแบบมาให้เป็นรูปแบบสำหรับจัดเก็บข้อมูล GIS ทุกรูปแบบได้แก่ point, line polygon raster พร้อม attribute ด้วยเหตุนี้ในการจัดเก็บคงคลังระยะยาวจะทำให้ข้อมูลที่มีค่าสูงมีหนทางที่จะอ่านออกมากอย่างถูกต้องได้เสมอ จากการเลือกใช้รูปแบบการจัดเก็บที่ผู้ผลิตซอฟแวร์ให้การยอมรับคือผลในทางปฏิบัติที่ซอฟแวร์ส่วนใหญ่ใช้รูปแบบการจัดเก็บตามมาตรฐาน USGS SDTS เป็นอย่างดีและสามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลในรูปแบบ SDTS ได้โดยตรง ตัวอย่างของซอฟแวร์ที่สามารถอ่านข้อมูลปริภูมิในรูปแบบนี้ที่สำคัญได้แก่ AutoCAD, Intergraph MGE, GeoMedia, ArcView, Arc/Info, Mapinfo, ERDAS, ENVI

เมื่อมีการจัดเก็บในรูปแบบมาตรฐานที่แพร่หลายตามแบบ USGS แล้วยังสามารถที่จะใช้ Software dlgv32 : Software for viewing USGS digital cartographic data ซึ่งใช้ได้กับ Window 95/NT เป็นซอฟแวร์ที่ใช้เรียกดู USGS Digital Line Graph Optional (DLG-O), Digital Raster Graphic (DRG) data และ Spatial Data Transfer Standard (SDTS)

ดังนั้นผลิตผลจากการสร้างแบบจำลองระดับและรูปแบบการจัดเก็บเป็นดังนี้

ผลิตผลแบบจำลองระดับ	ชนิดของข้อมูล	รูปแบบการจัดเก็บ
แบบจำลองระดับชนิดเป็นจุดสูมที่มีระดับห่างบันภูมิประเทศไม่เกินมาตรฐานในการทำแผนที่ภูมิประเทศ	จุดสูมพร้อมค่าระดับและคำอธิบายสำหรับภูมิลักษณ์ฐาน	USGS SDTS with Vector Profile Shapefile ชนิด Point พร้อม Elevation เป็น attribute
ข่ายสามเหลี่ยมรูปร่างไม่สมมาตร (TIN) ที่มีคุณภาพ “ดี” ได้จากการสร้างความสัมพันธ์จากแบบจำลองระดับชนิดเป็นจุดสูม	เวกเตอร์ของรูปหลายเหลี่ยม	(USGS SDTS with Vector Profile)
เส้นชันความสูง	เวกเตอร์พร้อมอธิบายของค่าเส้นชันความสูง	USGS SDTS with Vector Profile Shapefile ชนิด Line พร้อม Elevation เป็น attribute
แรสเตอร์ของระดับทุกรายห่างที่เท่ากัน	แรสเตอร์	USGS SDTS DEM หรือ SDTS GeoTIFF

ตาราง 6-4 แสดงผลผลิตแบบจำลองระดับและคำแนะนำในการจัดเก็บที่เป็นมาตรฐาน

6.12 แบบจำลองระดับพื้นที่

ขั้นเนื่องมาจากการแสลงภัยวัฒน์ทำให้เกิดการติดต่อกันมาตาม เกิดกระแสสังคมและเศรษฐกิจเข้ามาร่วมต่อไปอย่างไรไปทั่วทุกมุมโลก ทำให้มีหน่วยงาน หรือองค์กรที่มีความต้องการในการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิศาสตร์ในระดับโลก ไปจนถึงระดับภูมิภาคหรือท้องถิ่น ในโลกของอินเตอร์เน็ตจะมีข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ให้ใช้เปล่าอยู่จำนวนหนึ่ง และในระดับประเทศมีการจัดทำแบบจำลองระดับที่เป็นมาตรฐานและพื้นที่แบบจำลองระดับครอบคลุมพื้นที่กว้างที่จัดทำขึ้นอาจจัดทำได้จาก

- 1) ราบรื่นและประมาณผลจากแผนที่ที่อยู่ เช่น ETOPO5, Terrain Base, GTOPO30 และ GLOBE เป็นต้น
 - 2) ทำการสำรวจด้วยวิธีทาง SAR Interferometry หรือ Digital Photogrammetry เช่น SRTM, DEM โดยการแทนที่ของกระหวงทางเดิน (2543-2549)
- แบบจำลองระดับต่างมีความละเอียดต่างๆ ดังในตารางนี้

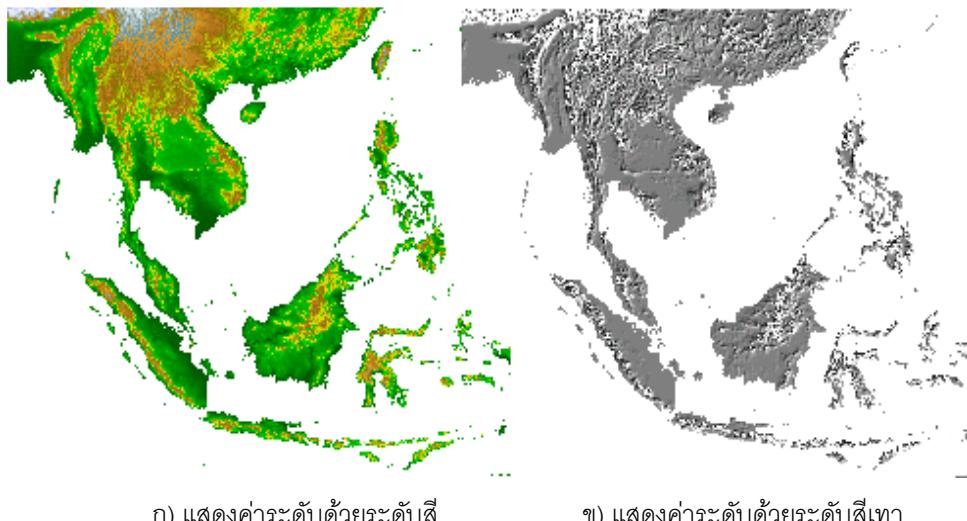
ชื่อแบบจำลองระดับ	ผู้ผลิต	ระยะห่าง ระหว่างจุดระดับ	ความละเอียด ถูกต้องทางดิ่ง	พื้นที่ครอบคลุม
ETOPO5	USGS	5 arc minutes หรือประมาณ 9 กม.		ทั่วโลก รวมถึงความพื้นน้ำ
TERRAIN BASE	NGDC	5 arc minutes หรือประมาณ 9 กม.		ทั่วโลก รวมถึงความพื้นน้ำ
GTOPO30	USGS et.al.	30 arc seconds หรือ 90 เมตร		เฉพาะแผ่นดิน
GLOBE	CEOS	30 arc seconds หรือ 90 เมตร	±300 เมตร (vary)	ทั่วโลก รวมถึงความพื้นน้ำ
SRTM (C-Band) SRTM-1 / SRTM-3 / SRTM-30	NASA/JPL/NIMA	30 เมตร (US) 90 เมตร (World)	±5-15 เมตร	80% ของแผ่นดิน ครอบคลุมทั่วโลก
SRTM (X-Band)	NASA/JPL/DLR/ASI	12.5 เมตร	±1-10 เมตร	เป็นสถาบันไม่สมบูรณ์
DEM กช.	โครงการแผนที่ฯ ของกระหวงทางเดินและสหกรณ์ (2543-2549)	10-15 เมตร	±2-4 เมตร	ทั่วประเทศไทย

ตาราง 6-7 แสดงชนิดของแบบจำลองระดับพื้นที่

6.12.1 แบบจำลองระดับ GLOBE และ GTOPO30

แบบจำลอง GLOBE (the Global Land One-km Base Elevation (GLOBE) Project) โดย the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) ที่มีความละเอียดจุดภาพ 5 arc minutes หรือประมาณ 1 กิโลเมตร แบบจำลองระดับ GLOBE พัฒนาต่อเนื่องจากแบบจำลองระดับ GTOPO30 ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลความสูงจากแผนที่จากหน่วยงานทำแผนที่ทั่วโลก

ปัจจุบันแบบจำลองระดับ GLOBE ถูกทดสอบด้วยแบบจำลองระดับ SRTM-3 ที่สำรวจด้วยวิธีที่ละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือกว่า ตัวอย่างของแบบจำลองระดับสำหรับประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แสดงได้ดังภาพ



รูปภาพ 6-21 แบบจำลองระดับชุดข้อมูล GLOBE

6.12.2 แบบจำลองระดับ SRTM

ข้อมูลแบบจำลองระดับที่เป็นปัจจุบันและทันสมัย มีความละเอียดถูกต้องสูง และมีข้อมูลให้ใช้ได้ทั่วทั้งพื้นที่ ไม่ได้เป็นแบบจำลองระดับที่ SRTM แบบจำลองระดับ SRTM ได้จากการที่เป็นความร่วมมือระหว่าง National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) และ National Aeronautics and Space Administration (NASA) โครงการ SRTM มีการรังวัดแบบจำลองระดับของโลกด้วยเทคนิค SAR Interferometry จาก Space Shuttle เที่ยบินที่ STS-99 ในระยะเวลา 11 วันในเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2000 ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นแบบจำลองระดับที่มีจุดระดับทุกๆ 30 เมตรและความละเอียดถูกต้องของจุดระดับเป็น 5 ถึง 15 เมตร แบบจำลองระดับถูกส่งให้ผู้ใช้เรียกผลิตภัณฑ์นี้ว่า SRTM-1 เนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดระดับเป็น 1 พลิปดา (1 Arc Second) หรือประมาณ 30 เมตร นอกเหนือนี้แล้วยังมี ผลิตภัณฑ์ DEM อื่นที่ได้จากการลดระยะห่างของจุดระดับพร้อมกับการทำค่าเฉลี่ยความสูงของจุดระดับใหม่เพื่อสร้างแบบจำลองระดับที่มีปริมาณข้อมูลเล็กน้อยสามารถใช้งานได้

ง่ายเมื่อทัพยากรคอมพิวเตอร์จำกัด ผลิตภัณฑ์แบบจำลองระดับ SRTM จึงมีซีรีส์เรียกและมีระยะห่างระหว่างจุดระดับตั้งนี้

ผลิตภัณฑ์	ระยะห่างระหว่างจุดระดับ
SRTM-1	1 arc second หรือ ~30 เมตร
SRTM-3	3 arc second หรือ ~90 เมตร
SRTM-30	30 arc second หรือ ~900 เมตร

ตาราง 6-8 แสดงชนิดของแบบจำลองระดับ SRTM

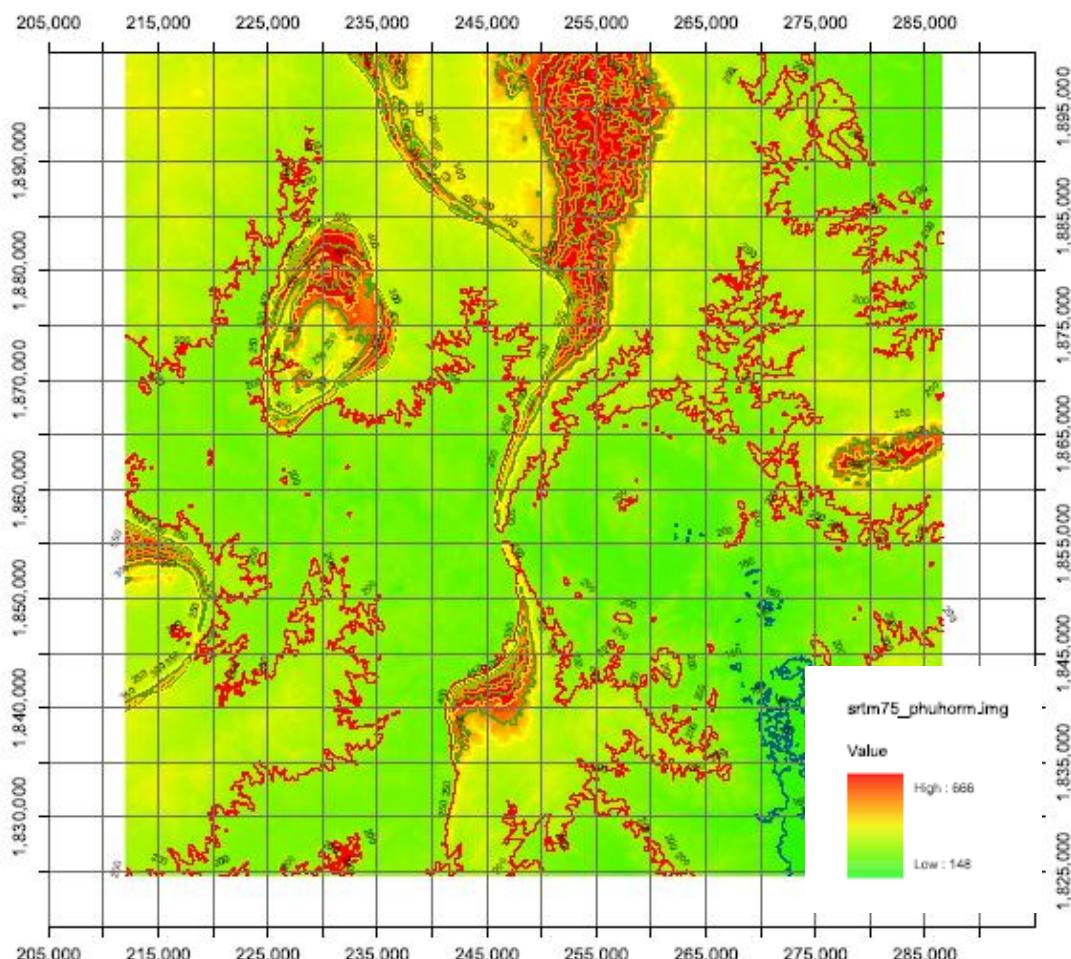
แบบจำลองระดับ SRTM ผู้ใช้สามารถติดตามรายละเอียดและดาวน์โหลดได้จากเวปไซท์ของโครงการ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> และหากต้องการดาวน์โหลดข้อมูลรูปแบบรุ่นล่าสุด SRTM version 3 พร้อมแก้ไขข้อบกพร่องที่มีพื้นที่บางแห่งไม่มีข้อมูล (hole) ผู้ใช้ควรดาวน์โหลดจากเวปไซท์ของ CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) <http://www.csi.cgiar.org/> SRTM จะอยู่ในรูปแบบ GeoTIFF และมีการฉายແຜນที่เป็นชนิดภูมิศาสตร์บนพื้นหลังฐาน WGS-84 ค่าระดับแต่ละจุดภาพเป็นค่าระดับเนื้อน้ำทະເລປານກາຕາງທີ່ພ້ອມໃຫ້ທັນທີ

ไฟศาດ และ ทักษะภูมิ (2544) ได้ประเมินความละเอียดถูกต้องของข้อมูลแบบจำลองระดับ SRTM เปรียบเทียบกับค่าระดับที่อ่านได้จากແຜນที่ภูมิประเทคโนโลยามาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7018 จากกรมแผนที่ทหาร โดยการตรวจสอบจุดระดับจำนวน 28 จุดต่อระหว่างແຜນที่ตามมาตรฐาน Positional Accuracy Handbook ของ สหรัฐอเมริกา ผลปรากฏว่าได้ละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับ SRTM เทียบเท่ากับแบบจำลองระดับที่อາຈ ส້າງຂຶ້ນຈາກແຜນที่ภูมิประเทคโนโลยามาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7018 จากกรมแผนที่ทหาร ผลการเปรียบเทียบข้อมูลแบบจำลองระดับบนແຜນที่ภูมิประเทคโนโลยามาตราส่วน 1:50,000 ทั้ง 6 ระหว่าง ครอบคลุมพื้นที่ระหว่างละ 27 x 28 ตร. กม. (โดยประมาณ) ปรากฏว่าให้เห็นว่าค่าต่างระดับอยู่ในเกณฑ์ 3-11 เมตร ดังแสดงให้เห็นในตารางต่อไปนี้

ระว่าง	ระดับ ต่ำสุด	ระดับ สูงสุด	ผลต่าง RMSE	ลักษณะภูมิประเทศ
4446-II	470	1070	9.9	ภูเขาสูงชัน บริเวณลำน้ำขนาดใหญ่
4445-I	782	1550	9.9	ภูเขาสูงชัน บริเวณลำน้ำขนาดใหญ่
4545-IV	630	1110	9.9	ภูเขาสูงชัน บริเวณลำน้ำขนาดใหญ่
4545-III	750	1116	9.8	ภูเขาสูงชัน บริเวณลำน้ำขนาดใหญ่
4745 IV	275	1864	11.04	ภูเขาสูงด้านตะวันตก และที่ราบในเมืองบริเวณจังหวัดเชียงใหม่
5236-IV	2	4	3.4	ที่ราบลุ่มน้ำเจ้าพระยา บริเวณกรุงเทพมหานคร

ตาราง 6-9 แสดงค่าต่างระดับ RMSE ระหว่างแบบจำลองระดับ SRTM และเส้นขั้นความสูงจากแผนที่ภูมิประเทศชุดT7018

ในภาพแสดงให้เห็นแผนที่แสดงความสูงของภูมิประเทศจาก SRTM บริเวณใกล้ภูมือย่อง จังหวัดขอนแก่น



รูปที่ 6-22 แสดงแบบจำลองระดับและแสดงค่าระดับด้วยเขตสีตั้งสเกลด้านขวาเมื่อ
การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล ผศ. ดร. ไพบูล สันติธรรมนนท์

แบบจำลองระดับที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติและเมื่อนำภาพถ่ายดาวเทียม เช่น ภาพดาวเทียมแลนด์เชก 7 ที่มีความละเอียดจุดภาพ 15 เมตร มาขึ้นทับ ภาพดาวเทียมแลนด์เชก 7 จากโครงการ NASA GeoCover (<http://www.geocover.org>) เป็นภาพดาวเทียมแลนด์เชกที่นำมาจัดทำเป็นแผนที่ภาพคอร์ตและมีให้บริการฟรีครอบคลุมทั่วโลก การผสมผสานแบบจำลองระดับ SRTM และ drape พื้นผิวด้วยภาพสีผสมคล้ายสีธรรมชาติจากแผนที่ภาพคอร์ตจากข้อมูลภาพดาวเทียม ผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถแสดงแบบจำลองเสมือนจริง (Virtual Reality Model) ได้



รูปที่ 6-23 แสดงแบบจำลองสามมิติเสมือนจริง สร้างจากแบบจำลองระดับ SRTM
ปูทับด้วยภาพถ่ายดาวเทียมแลนด์เชก 7 บริเวณขื่อนน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น

6.12.3 แบบจำลองระดับจากโครงการแผนที่ฯ ของกระทรวงเกษตร

ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2549 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้ดำเนินการโครงการจัดทำแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยการบินถ่ายรูปทางอากาศสี มาตราส่วน 1 : 25,000 ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ ภาพที่ได้ถูกนำมาสแกนด้วยสแกนความละเอียดสูง (Precise Scanner) ด้วยความละเอียดจุดภาพ 15 ไม้ครอนหรือคิดเป็นความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.375 เมตร ภาพถ่ายทางอากาศดิจิทัลที่ได้เป็นจำนวนภาพกว่า 70,000 ภาพ ถูกนำมาจัดทำแผนที่รูปถ่ายอร์โธสี ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ที่นิ่งฐานในรูปแบบที่ทันสมัย มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในการจัดทำแผนที่ทรัพย์สินที่และทรัพยากรธรรมชาติ นอกจากนี้ผลิตผลที่ได้ยังพร้อมที่จะนำไปสังเคราะห์เป็นแผนที่ใหม่ (derived map) หรือสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม (value-added products) เช่น ข้อมูลระดับของภูมิประเทศทั่วประเทศที่ทุก ๆ ระยะห่าง 10 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศและจัดเก็บในรูปแบบจำลองระดับเชิงเลขรายรูปแบบ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในมิติที่สามของภูมิประเทศ ซึ่งไม่เคยมีมาก่อนในกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และประวัติศาสตร์การทำแผนที่ของประเทศไทยที่จะมีแผนที่ภาพออร์โธสีความละเอียดสูงทั่วประเทศ นอกจากนี้แบบจำลองระดับเชิงเลข ที่ได้จากการนี้จะอยู่ในรูปแบบเส้นชั้นความสูงโดยมีช่วงต่างเส้นชั้นความสูง (Contour interval) เป็น 2.5 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ



รูปภาพ 6-24 ตัวอย่างภาพแผนที่จากโครงการแผนที่ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ก) ระหว่างหมายเลข 554116616 ครอบคลุมพื้นที่ 3 x 3 ตารางกิโลเมตร

ข) แสดงภาพขยายพื้นที่ 140 x 140 ตร.ม. และตำแหน่งกริดจุดระดับทุก 10 เมตร ที่จะปรากฏในภูมิประเทศ

6.13 คำถາມທ້າຍບທ

☞ ต້ອງການສ້າງແບບຈຳລອງຈະດັບຂອງເກາະແຫ່ງໜຶ່ງ ໃຫ້ມີແບບຈຳລອງຈະດັບແບບແຮສເຕອຣ ໂດຍຈາກການຕຽບສອບໃນແຜນທີ່ເດີມເພື່ອວາງແຜນພບວ່າ ດ່ວຍຕັບມີໜຶ່ງຕັ້ງແຕ່ -15 ເມຕຣ ຈນຖື່ງ 500 ເມຕຣ ເກາະມີຄານາບຣິເວັນຈາກຕະວັນດັກໄປຕະວັນອອກ 22 ກີໂລເມຕຣ ແລະຈາກໄທ້ໄປໜຶ່ງ 48 ກີໂລເມຕຣ

1. ນາກວ່າຕ້ອງກາຈັດເກີບດ້ວຍຄວາມລະເຂີຍດຂອງຄ່າຄວາມສູງເປັນຈຳນວນເຕີມຂອງເມຕຣ ຄວາໃຊ້ Data Type ອະໄວຈຶ່ງຈະເໝາະສົມ
2. ຈາກຂໍ້ອ້າງຕັ້ນ ທ່ານເລືອກ DataType ດັ່ງກ່າວເພວະແຫຼຸດ
3. ຜ່ານຂອງກາຈັດເກີບດ້ວຍ DataType ດັ່ງກ່າວເປັນຍ່າງໄວ
4. ນາກໃຊ້ Ground sample distance (GSD) ທີ່ 2 ເມຕຣ ຈະມີຈຸດຄວາມສູງທ່າທັງພື້ນທີ່ກວ້າງຍາກກີ່ຈຸດກາພ ແລະ ຄິດເປັນທັງໝົດກີ່ຈຸດກາພ
5. ຂໍອມູລແບບຈຳລອງຄວາມສູງດັ່ງກ່າວຄິດເປັນກີ່ເມກກະໄປຕ໌ ນາກບຣຈຸແບບຈຳລອງຄວາມສູງໄວ້ ບນ CD-ROM ຈະຕ້ອງໃຊ້ອ່າງນ້ອຍກີ່ແຜ່ນ (ໃຫ້ CD-ROM ພົບແຜ່ນຈຸໄດ້ 600 Mb)

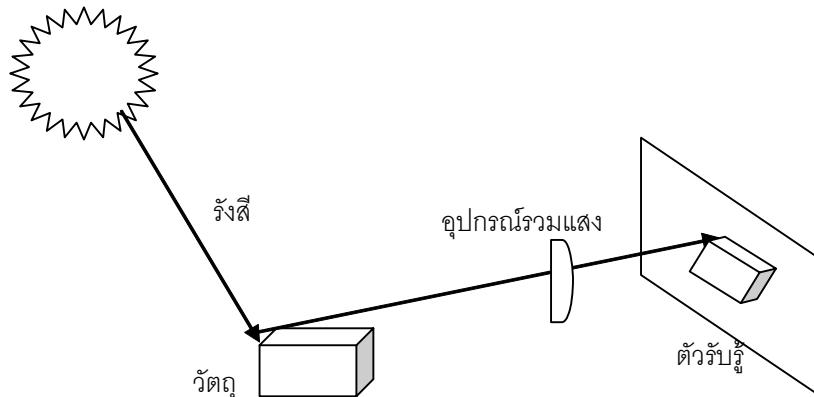
7 การประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพ (Digital Image Processing) คือการเปลี่ยนแปลงนำเข้าภาพเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยอาศัยเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ การนำผลจากการประมวลผลภาพดิจิทัลสามารถนำไปใช้ได้ในสองแนวทางคือในทางหนึ่งเพื่อปรับปรุงข้อมูลภาพสำหรับให้มุ่งเน้นความหมายที่ต้องการ หรืออีกแนวทางหนึ่งก็เพื่อทำให้การรับรู้ของเห็นของสมองกลที่เรียกว่า Machine Perception หรือ Computer Vision ดีขึ้นและเป็นอัตโนมัติมากขึ้น

7.1 กระบวนการดิจิไต์ซ (Digitization)

กระบวนการดิจิไต์ซภาพเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ทำการบันทึกอนุภาคแสงด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กรณีที่เป็นภาพที่บันทึกได้จากธรรมชาติลงสู่เครื่องรับรู้ (Sensor) โดยตรง ตัวตรวจจับเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งในตอนแรกจะเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่อง (Analog) ด้วยกระบวนการครุณไต์ซ (Quantization) และการสุ่มเก็บ (Resampling) ที่คอมพิวเตอร์สามารถนำไปประมวลผลได้

แหล่งกำเนิดแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



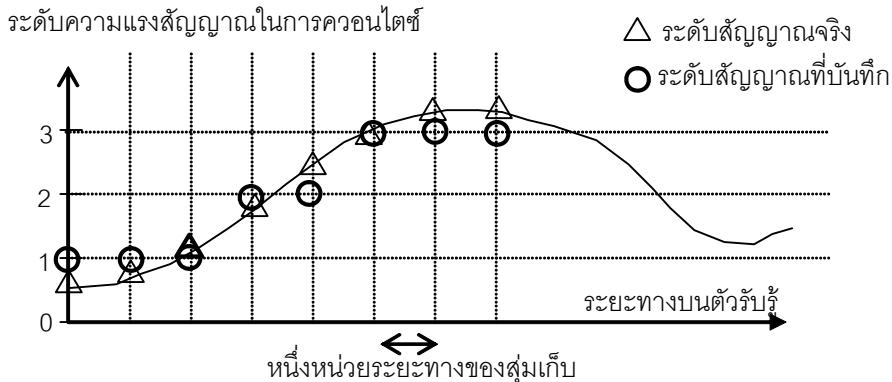
รูปภาพ 7-1 แบบจำลองการบันทึกภาพดิจิทัล

ตัวอย่างในทางปฏิบัติที่สอดคล้องกับแบบจำลองข้างต้นนี้ได้แก่ การใช้กล้องดิจิทัลบันทึกภาพ โดยที่แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือดวงอาทิตย์ แสงอาทิตย์จะหันวัดถูกแล้วผ่านเลนส์กล้องตกลงไปบนรูปแบบ เครื่องรับรู้ เครื่องรับรู้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่วิ่งต่อแสงที่เรียกว่า Charge-Couple Device (CCD) ตัวอย่างของแบบจำลองการบันทึกภาพดิจิทัลที่เห็นได้ชัดที่สุดได้แก่ การที่กล้องถ่ายภาพดิจิทัลต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ทำการดิจิไต์ซภาพแล้วบันทึกลงในหน่วยความจำ

7.1.1 การครุณไต์ซ (Quantization) และการสุ่มเก็บ (Resampling)

การครุณไต์ซคือการแบ่งระดับสัญญาณที่บันทึกได้ให้เป็นขั้นแล้วทำการจัดเก็บ ส่วนการสุ่มเก็บหมายถึงการแบ่งสัญญาณที่ตกลงบนรูปแบบของเซนเซอร์ให้เป็นส่วนๆ โดยที่รูปแบบของเซนเซอร์ประกอบด้วยเซลล์เล็กเป็นแนวเป็นสี่เหลี่ยมๆ อย่างเป็นระเบียบ

ในภาพข้างล่างนี้แสดงกระบวนการการค่อนไตร์ (quantize) และการสูมเก็บ(resampling)



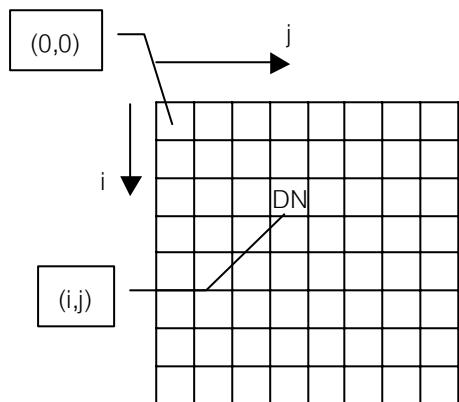
รูปภาพ 7-2 แบบจำลองการบันทึกภาพดิจิทัล

โดยสมมติให้เป็นภาพตัดขวางของสัญญาณที่อกบันระหว่างรับภาพของตัวตรวจจับ การค่อนไตร์กำหนดให้เป็น 4 ระดับจาก 0 ถึง 3 และให้ระยะทางของการสูมเก็บเป็นไปตามขนาดในรูป จะเห็นว่าระดับสัญญาณที่ควรจะบันทึกลงในคอมพิวเตอร์คือที่จุดมีสัญญาลักษณะรูป Δ แต่เมื่อกำหนดความละเอียดของการค่อนไตร์และระยะทางการสูมเก็บตั้งกล่าวทำให้บันทึกระดับสัญญาณได้เฉพาะตำแหน่งที่มีสัญญาลักษณ์ O (วงกลม) ในการนี้จะมีความไม่เที่ยงตรงของสัญญาณที่บันทึกได้แต่ละเมื่อ nano เป็นผลต่อ ก็จะมีความเคลื่อนย้ายเกิดขึ้น

หากต้องการให้สัญญาณที่จะบันทึกมีความเที่ยงตรงเหมือนต้นฉบับมากขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มระดับของการค่อนไตร์หรือเพิ่มความละเอียดของการสูมเก็บหรือทำทั้งสองอย่างพร้อมกัน แต่ข้อจำกัดในการตั้งกล่าวก็คือ จะทำให้ได้ข้อมูลบริมาณมาก ข้อจำกัดของเทคโนโลยีในการสร้างเซ็นเซอร์ตั้งกล่าว ดังนั้นการเพิ่มระดับของการค่อนไตร์และเพิ่มความละเอียดของการสูมเก็บต้องมีการเลือกใช้ให้เหมาะสมตามสถานการณ์ที่เอื้ออำนวย

7.1.2 การแสดงภาพ (Picture Representation)

เมื่อเครื่องรับวิ่งทำการสูมเก็บและค่อนไตร์ โดยที่ไปค่าสัญญาณที่ได้จะเปลี่ยนเป็นรหัสที่คอมพิวเตอร์เข้าใจได้ ภาพที่ได้จะจัดเก็บเป็นระบบเป็นແղມและສدمกร์ ดังนั้นอาจพิจารณาภาพดิจิทัลเป็นฟังก์ชันของสองตัวแปรที่มีค่าของฟังก์ชันเป็นค่ารหัสของสัญญาณไฟฟ้าที่บันทึกได้ ตำแหน่งในภาพสามารถระบุด้วยตัวแปรทั้งสอง ภาพดิจิทัลมักจะให้ระบบพิกัดเป็นระบบพิกัดฉากรหัสที่อ้างอิงโดยແղມ (Row) และ สدمกร์ (Column) ตำแหน่งบนข่ายสุดของภาพกำหนดการอ้างอิงได้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นคือ $(0,0)$ ค่าพิกัดทางด้านส่วนที่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ทางขวาเมื่อ ในขณะเดียวกันตำแหน่งที่อยู่ใต้ลงมาจากการอ้างอิงได้เป็นพิกัดทางด้านແղມ ซึ่งจะเห็นว่าระบบพิกัดภาพดิจิทัลเป็นระบบพิกัดมีข้อว่า ที่มีแกนด้านส่วนที่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ระบบพิกัดฉากในทางคณิตศาสตร์ แต่พิกัดในอีกແղมนั่นคือແղม y จะกลับกับແղมด้านແղມของภาพดิจิทัล ดังปรากฏในภาพ



รูปภาพ 7-3 การแสดงภาพดิจิทัลและการอ้างอิง

ค่าสัญญาณภาพที่จัดเก็บที่ตำแหน่งใด โดยทั่วไปเรียกว่า Digital Number (DN) หรือบางครั้งเรียกว่า Pixel Value กรณีเป็นการบันทึกภาพที่ให้ในสีเป็นภาพขาวดำ ค่าที่จัดเก็บที่ตำแหน่งต่างๆที่เป็นตัวแทนแสดงภาพเรียกว่า Brightness Value หรือ Grey Value แต่หากเป็นการแสดงภาพสีโดยเฉพาะภาพสีรวมชาติ ค่าสัญญาณภาพที่จัดเก็บที่จัดเก็บอาจเรียกว่า Color หรือ RGB Value

7.1.3 ความละเอียดของจุดภาพทางเรขาคณิต

ขนาดจุดภาพที่มีการสุมสัญญาณขึ้นมาเพื่อทำการจัดเก็บจะเป็นความละเอียดของจุดภาพทางเรขาคณิต ยิ่งมีการสุมสัญญาณที่ระยะที่ห่างน้อยยิ่งจะมีความละเอียดและมีความเที่ยงตรงในการแปลงสัญญาณมาก

ในภาพข้างล่างเป็นการเปรียบเทียบภาพถ่ายดัดแก้校正ให้กำเนิดที่ความละเอียด 1,2,4 และ 8 เมตร ตามลำดับ



ก) ความละเอียดจุดภาพ 1 เมตร



ข) ความละเอียดจุดภาพ 2 เมตร



ค) ความละเอียดจุดภาพ 4 เมตร



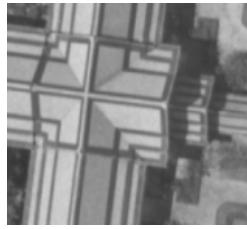
ง) ความละเอียดจุดภาพ 8 เมตร

รูปภาพ 7-4 ความละเอียดของจุดภาพกับการสามารถในการตรวจสอบข้อผิดพลาด

7.1.4 ความละเอียดของจุดภาพทางเรดิโอมิตรี (Radiometric Resolution)

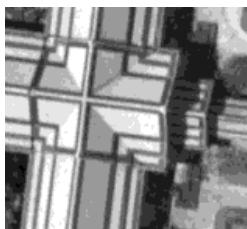
ความละเอียดของจุดภาพทางเรดิโอมิตรี เกี่ยวข้องกับปริมาณของมูลที่จัดเก็บในแต่ละจุดภาพว่าบันทึกมา หรือจัดเก็บด้วยปริมาณมากน้อยเพียงใด ความละเอียดของจุดภาพเชิงรังสีมีผลต่อการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงเรียกค่านี้ว่า Radiometric Depth หรือ Dynamic Range

ในภาพข้างล่างเป็นการเปรียบเทียบภาพถ่ายขาวดำเดิม 8 บิตหรือ 256 ระดับสีเทา ทำการ convolution ต่อส์ ความลึกของเรดิโอมเตอร์ให้เหลือ 64, 16, 4 และ 2 ระดับตามลำดับ ดังแสดงในภาพ ก) ถึง จ) ตามลำดับ ส่วนภาพ ฉ) เป็น convolution ต่อส์ให้เหลือเพียง 1 บิตเช่นเดียวกับภาพ จ) แต่ใช้เทคนิค การดิทเทอวิง (dithering) ช่วย ก็สามารถที่จะคงไว้ซึ่งข้อมูลบางส่วน



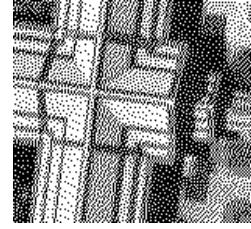
ก) ความลึกของเรดิโอมเตอร์ 8 บิต (256 ระดับ)

ข) ความลึกของเรดิโอมเตอร์ 6 บิต (64 ระดับ)



ค) ความลึกของเรดิโอมเตอร์ 4 บิต (16 ระดับ)

ง) ความลึกของเรดิโอมเตอร์ 2 บิต (4 ระดับ)



จ) ความลึกของเรดิโอมเตอร์ 1 บิต (2 ระดับ)

ฉ) ความลึกของเรดิโอมเตอร์ 1 บิต (2 ระดับ)
 convolution ต่อส์ด้วยดิทเทอวิงเทคนิค

รูปภาพ 7-5 ความละเอียดของจุดภาพกับความสามารถในการตรวจจับวัตถุ

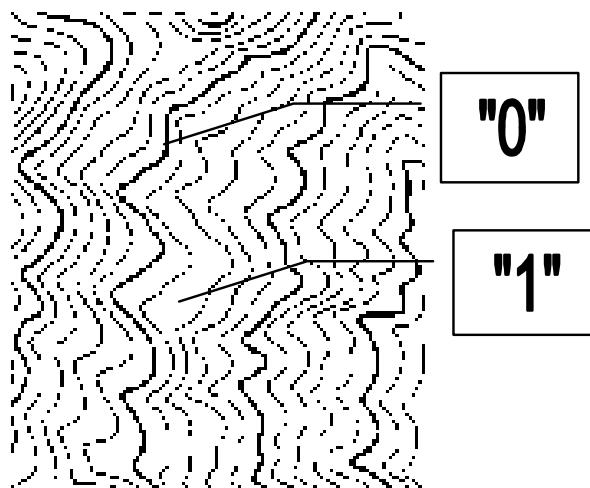
จะเห็นได้ว่าเมื่อมีจำนวนความลึกทางเรดิโอมเตอร์มากข้อมูลภาพจะถูกกรอง化ไว้ใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับ แต่การมีจำนวนระดับความลึกมากจะทำให้ปริมาณเนื้อที่ในการจัดเก็บข้อมูลมากขึ้นไปด้วย

7.2 ชนิดของภาพดิจิทัล

การบันทึกภาพโดยทั่วไปเรามักจะหมายถึงการที่เราบันทึกภาพในช่วงเวลาต่างๆ ให้เป็นไฟล์ต้นกำเนิดของผลงานที่สืบท่อนจากวัตถุมาสู่เครื่องรับรู้คือแสงอาทิตย์ ความสามารถของเครื่องรับรู้จะทำให้ได้ภาพดิจิทัลที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ภาพดิจิทัลหากแบ่งเป็นชนิดตามระดับและช่วงความถี่ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่รับรู้ได้มีดังนี้

7.2.1 ภาพสองระดับสี (Bi-level Image)

ภาพสองระดับสีคือภาพที่แต่ละจุดภาพมีค่าระดับการความโน้มถ่วงสัญญาณเพียงสองระดับ ซึ่งโดยทั่วไปค่าระดับสัญญาณสองระดับจะแทนด้วยค่า “0” หรือ “1” ที่สามารถจัดเก็บได้อย่างประกายด้ในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ด้วยข้อมูลชนิด “บิต” ดังนั้นมีอัตราจัดเก็บแบบอัดแน่น หน่วยความจำหนึ่งไบต์จะใช้บันทึกหัวของจุดภาพได้ 8 จุดภาพ



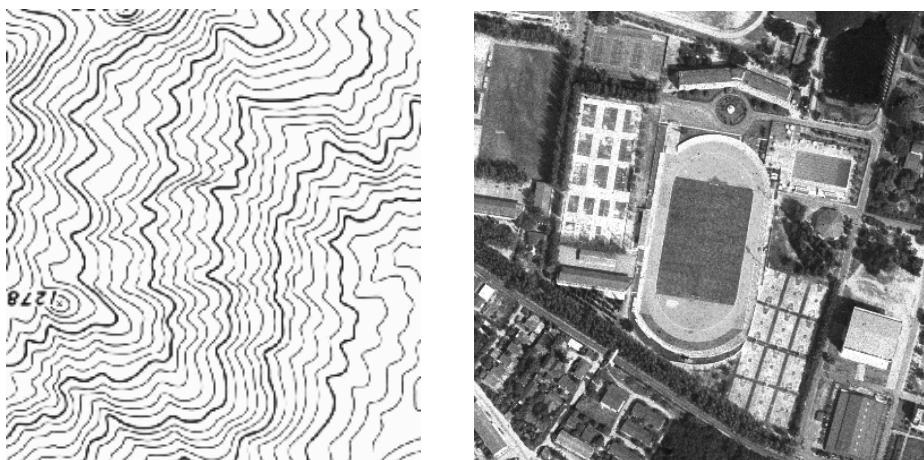
รูปภาพ 7-6 ภาพสองระดับสี

ในอีกแนวคิดหนึ่ง เนื่องจากหน่วยความจำระดับไบต์สามารถจัดการบริหารได้ง่าย ในบางซอฟแวร์จึงนิยมที่จะเข้ารหัสของสัญญาณสองระดับด้วย ค่า “0” หรือ “255” ซึ่งทำให้หน่วยความจำหนึ่งไบต์สามารถบันทึกรหัสสีจุดภาพได้หนึ่งจุดภาพ

ภาพสีสองระดับส่วนใหญ่ไม่ได้จากการบันทึกจากช่วงเวลาต่างๆ โดยตรง ภาพสีสองระดับมักได้จากการประมวลผลภาพในชั้นกลาง เพื่อนำไปประมวลผลต่อ ตัวอย่างหนึ่งของภาพสีสองระดับได้แก่ภาพของเส้นชั้นความสูง ที่ได้จากการกระบวนการการทำให้เป็นสอง (Binarization)

7.2.2 ภาพระดับสีเทา (Grey-level Image)

ภาพระดับสีเทาคือภาพที่แต่ละจุดภาพมีค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการควบคุมได้ตามระดับความแรงของสัญญาณ ในการแสดงผลมักจะให้ค่าระดับสัญญาณแทนด้วยระดับของสีเทา โดยมักจะยึดในหลักการว่า เมื่อระดับความแรงสัญญาณค่อยๆ จะแสดงด้วยสีเทาอ่อน เมื่อสัญญาณแรงขึ้น ก็จะแสดงด้วยสีเทาที่สว่างขึ้น โดยที่สัญญาณที่เบาที่สุดจะให้เป็น 0 และสัญญาณที่แรงที่สุดจะให้รหัสเป็น 255 ซึ่งระดับของสัญญาณจะมีทั้งสิ้น 256 ระดับ ระดับสัญญาณ 256 สามารถจัดเก็บในหน่วยความจำได้อย่างเหมาะสมและสามารถใช้ในการประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การที่มีระดับสัญญาณเป็น 256 ระดับที่สามารถแทนด้วยหน่วยความจำขนาด 8 บิต อาจเรียกได้ว่ามีภาพมีความลึกเรดิโอมิตริก (Radiometric Depth) เป็น 8 บิต ซึ่งเป็นคุณลักษณะของภาพระดับสีเทาส่วนใหญ่ เมื่อไม่ได้ระบุเป็นอย่างอื่นภาพระดับสีเทามักจะหมายถึงภาพระดับสีเทาที่มีความลึกเรดิโอมิตริก 8 บิต



รูปภาพ 7-7 ตัวอย่างภาพระดับสีเทา

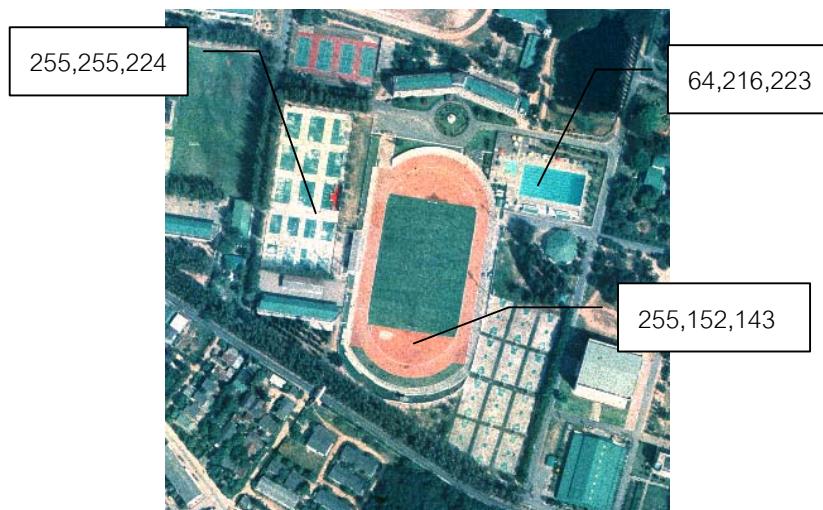
ในปัจจุบัน การควบคุมได้ระดับสัญญาณ 256 ระดับดูเหมือนว่าจะน้อยเกินไป โดยเฉพาะเหตุผลของความต้องในการบันทึกภาพในงานสำรวจวัสดุรู้จำเพื่อการสำรวจทรัพยากร ซึ่งความสามารถของเครื่องรับรู้ที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการคำนวณและจัดเก็บมากขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการแปลงภาพและการประมวลผลที่ซับซ้อนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีการบันทึกภาพระดับสีเทามากกว่า 256 ระดับ โดยการเพิ่มจำนวนบิตของการควบคุมได้และจัดเก็บในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ ดังจะเห็นได้จากในตารางต่อไปนี้

ความลึกของเรดิโอมิเตอร์ (Radiometric Depth)	ระดับสัญญาณ
8 บิต	256
9 บิต	512
10 บิต	1024
11 บิต	2048
12 บิต	4096

ตาราง 7-1 ความลึกเรดิโอมิเตอริกและระดับสัญญาณที่สามารถเข้ารหัสได้

7.2.3 ภาพสีจริง (True-Color Image)

ภาพสีจริงหมายถึงภาพที่มีจุดภาพแต่ละจุดภาพแสดงสีด้วยรหัสที่สามารถแทนสีที่ใกล้เคียงกับสีที่คุณต้องได้ใกล้เคียงที่สุด ในแต่ละจุดภาพจากภาพสีจริงจะแทนด้วยรหัสที่เป็นองค์ประกอบของสีพื้นฐานทั้งสามคือสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่เรียกว่าสี RGB โดยที่แต่ละองค์ประกอบสีจะทำการรวมตัว 256 ระดับที่มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 255 จากการผนวกรวมระดับ 256 ระดับสีขององค์ประกอบพื้นฐานทำให้ได้สีต่างๆ 16,777,216 ระดับ เมื่อนับจำนวนบิตของแต่ละจุดภาพจะได้เป็น 24 บิต ดังนั้นจึงเรียกภาพสีชนิดนี้ว่าภาพสี 24 บิต จำนวนสี 16,777,216 ระดับที่สามารถเข้ารหัสได้ด้วย 24 บิตหรือ 3 ไบต์ถือได้ว่าสามารถแทนสีต่างๆ ในธรรมชาติเท่าที่ตามนูนซึ่งสามารถแยกแยะได้ทั้งหมด



รูปภาพ 7-8 ภาพสีจริงและการเข้ารหัสจุดภาพ

ในทางปฏิบัติการคุณตัวเองและการจัดเก็บสีแต่ละจุดภาพจะแทนด้วยรหัสแต่ละองค์ประกอบสีด้วยหนึ่งไบต์ ดังนั้นจุดภาพสีแต่ละจุดภาพจะประกอบด้วยข้อมูล 3 ไบต์ขององค์ประกอบสีพื้นฐานทั้งสามสี

7.2.4 ภาพสีด้วยน้ำสี (Index-Color Image)

ภาพสีด้วยน้ำสีคือภาพสีที่แต่ละสีในแต่ละจุดภาพจะแทนด้วยดัชนีสี ดัชนีสีสามารถค้นคืนรหัสสีจาก “ตารางสี” (Color Palette) Color Palette คือตารางแสดงความสมมูลที่บอกร่องดัชนีสีและรหัสของสีที่เป็นสีองค์ประกอบทั้งสาม

ดัชนี	สีแดง	สีเขียว	สีน้ำเงิน
0	255	0	0
1	0	255	0
2	0	0	255
3	255	128	128
...

ตาราง 7-2 ตัวอย่างカラ์เพลท (Color Palette)

เนื่องจากการที่จำนวนสี 16,777,216 สีที่เกิดจากความเป็นไปได้ของการสลับเปลี่ยนรหัส 24 บิตมีจำนวนมาก ใน การประยุกต์ใช้งานสำหรับบางวัตถุประสงค์ที่ต้องการคุณภาพไม่สูงนักและต้องการความประหยัดในการจัดเก็บ มักจะทำการลดจำนวนสีให้น้อยลงโดยมีหลักการที่ว่าสายตาสามารถแยกแยะสีได้จำกัดที่ระดับหนึ่ง และจำนวนบิตที่ใช้เข้ารหัสสำหรับแต่ละจุดภาพก็จะมีจำนวนน้อยกว่า 24 บิตมาก เช่น 8 บิต

ในตารางข้างล่างแสดงจำนวนดัชนีสีที่มีได้สูงสุดสำหรับแต่ละความกว้างของบิตสำหรับดัชนีสี แต่ละดัชนีสีอาจจะมีการแบ่งจำนวนบิตเพื่อใช้ในการทดแทนสีองค์ประกอบพื้นฐาน แดง เขียว น้ำเงิน จำนวนบิตสำหรับแต่ละองค์ประกอบสีอาจไม่เท่ากันก็ได้ เช่น ดัชนีกัวง 8 บิต จำนวนบิตสำหรับสีทั้งสามอาจเป็น 3-2-2 เป็นต้น

ความกว้างของบิตสำหรับดัชนีสี (บิต)	จำนวนสีที่มีได้
8	256
12	4096
15	32768
16	65536
18	262144

ตาราง 7-3 ตัวอย่างแสดงความกว้างของบิตสำหรับดัชนีและจำนวนสีที่มีได้

ในภาพถัดไปแสดงคุณภาพของภาพสีด้วยน้ำสีเทียบกับภาพสีจริง โดยมีภาพ ก) เป็นภาพชนิด 8 บิตกับภาพสีจริง 24 บิตที่ได้จากการควบคุมการควบคุมไทร์ลดจำนวนสีจริงให้เหลือเพียง 256 ระดับ (ส่วนภาพ ข) ทำการควบคุมไทร์สีเหลือเพียง 64 สี ในภาพ ค) เหลือสีเพียง 16 สี และในภาพ ง) เหลือเพียง 8 สี ซึ่งจะเห็นได้ว่า “ความเสมือนจริง” ลดลงไปเรื่อยๆตามจำนวนสีที่เหลืออยู่



รูปภาพ 7-9 เปรียบเทียบภาพสีจริงที่ทำการ convolution ไคล์ล์ส์กับจำนวนสีลง

7.3 แหล่งที่มาของภาพดิจิทัล

ในการรังวัดด้วยภาพและการประมวลผลภาพเพื่อการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ อาจแบ่งชนิดของภาพดิจิทัลตามลักษณะวิธีที่ได้มาดังนี้

7.3.1 ภาพถ่ายทางอากาศ

ภาพถ่ายทางอากาศมักได้จากการสแกนโดยใช้สแกนเนอร์ที่มีความละเอียดสูงต้องสูง (Precise Photogrammetric Scanner) ผลลัพธ์ที่ได้จากสแกนเนอร์จะมีทั้งภาพที่เป็นภาพระดับเส้นทางและภาพสี เนื่องจากปัจจุบันกล้องถ่ายภาพทางอากาศนิยมเป็นดิจิทัลยังไม่แพร่หลาย ภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นดิจิทัลยังต้องได้จากการสแกนภาพ

ความละเอียดในการสแกนภาพถ่ายทางอากาศขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการบันทึกรายละเอียดของภาพถ่ายทางอากาศ ขีดความสามารถในการประมวลผลภาพ และวัตถุประสงค์เป็นสำคัญ โดยทั่วไปจะทำการสแกนภาพถ่ายสำหรับงานรังวัดด้วยภาพที่ความละเอียด 1 ถึง 30 ไมครอน

เนื่องจากแต่ละจุดภาพบนภาพถ่ายทางอากาศเกิดจากการที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแสงสว่าง จากดวงอาทิตย์ตกกระทบวัตถุแล้วสะท้อนไปสู่พิล์มนับที่ภาพ ทำให้เรียกว่ารหัสสีของแต่ละจุดภาพว่าเป็นความสว่างจุดภาพ (Pixel Brightness) หรือค่าของจุดภาพ (Pixel Value) ก็เรียก

7.3.2 ภาพถ่ายดิจิทัลจากการสำรวจระยะไกล

ในการสำรวจระยะไกลซึ่งเป็นการบันทึกค่าการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่หันจากวัตถุบนพื้นผิวโลกมายังตัวตรวจจับ ค่าที่วัดได้เมื่อมีการปรับแก้ที่ถูกต้อง จะได้ค่าทางกายภาพของวัตถุภาพให้สภาวะขณะที่บันทึกภาพ ตัวตรวจจับจะถูกออกแบบให้รับรู้ความถี่ในย่านต่างๆเพื่อใช้ในการจำแนก แต่เพื่อความสะดวกในทางเทคนิค ผลลัพธ์ที่ได้จากการสำรวจโลกในทางสำรวจระยะไกลจะเป็นลักษณะเป็น Array ที่เป็นการจัดเรียงเป็นแนวเป็นวงกลม เป็นระบบ สอดคล้องกับตำแหน่งของผืนแผ่นดิน (Ground Pad) บนพื้นผิวโลก ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่า “ข้อมูลภาพดาวเทียม” ข้อมูลภาพดาวเทียมแต่ละจุดภาพจะมีค่าของการตอบสนองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในและนิยมเรียกว่า Digital Number หรือ DN

7.3.3 ภาพดิจิทัลที่ได้จากการล้องถ่ายภาพดิจิทัล

ภาพถ่ายที่ได้จากการล้องถ่ายภาพดิจิทัลเป็นภาพที่สามารถบันทึกโดยใช้ในกระบวนการแพร่หลายของกล้องดิจิทัลที่มีข่ายในห้องทดลองอยู่ทั่วไป ภาพดิจิทัลเกิดจากเครื่องรับรู้ ชนิด Charge Couple Device (CCD) บันทึกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางจากวัตถุผ่านเลนส์รวมแสง ตอกกระทบระหว่างรับภาพ แล้วถูกบันทึกลงในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์

แม้ว่ากล้องถ่ายภาพโดยทั่วไปไม่ได้ออกแบบมาเพื่อให้ใช้ในการรังวัด แต่ด้วยกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ และหลักการรังวัดด้วยภาพ จะสามารถวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ขององค์ประกอบการจัดภาพภายในกล้องได้แม้ว่าองค์ประกอบการจัดภาพภายในของกล้องเหล่านี้จะไม่สูงมากนัก แต่ก็สามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้หลายประการ ความละเอียดถูกต้องที่ได้จากการล้องเหล่านี้อยู่ในเกณฑ์ 1:5,000 ถึง 1:30,000

7.3.4 ภาพดิจิทัลที่ได้จากการสแกน

ภาพดิจิทัลที่ได้จากการสแกน หมายถึงภาพดิจิทัลที่ได้จากสแกนเนอร์ที่เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่อ่านภาพในรูปของฮาร์ดก็อบปี้ (Hard-copy) สแกนเนอร์อย่างง่ายมักจะมีลักษณะเป็น flat-bed เนื่องจากสามารถใช้งานได้สะดวก ออกแบบและสร้างได้ง่าย พร้อมทั้งยังมีราคาถูกหากซื้อได้ทั่วไป

สื่อที่นำเปลี่ยนเป็นภาพดิจิทัลอาจเป็น ต้นร่างแผนที่ แผนที่พิมพ์บนแผ่นกระดาษ เพื่อเปลี่ยนไปเป็นภาพดิจิทัล จะได้นำไปประมวลผลทั้งเชิงรังสีและเชิงเวลาคณิตศาสตร์ได้

7.4 สแกนเนอร์

สแกนเนอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนภาพบนวัสดุหรือสิ่งพิมพ์ให้เป็นรูปแบบดิจิทัลที่สามารถนำไปจัดเก็บในคอมพิวเตอร์และอ่านออกมาเพื่อการประมวลผลได้ การจัดเก็บภาพในรูปแบบดิจิทัลทำให้เกิดแนวความคิดในการใช้งาน การจัดเก็บ การให้บริการที่สุดวาก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ

สแกนเนอร์สำหรับการใช้งานโดยทั่วไปและที่พบบ่อยอาจแบ่งเป็นกลุ่มได้ 3 กลุ่มตามวัตถุประสงค์ดังนี้

7.4.1 สแกนเนอร์สำหรับงานสิ่งพิมพ์

สแกนเนอร์สำหรับงานสิ่งพิมพ์ (Desktop Publishing Scanner หรือ DTP Scanner) เป็นสแกนเนอร์ที่แพร่หลายมากที่สุด เพราะราคาถูก ซื้อหาได้ในตลาดทั่วไป สแกนเนอร์นอกจากจะใช้งานในกิจกรรมสิ่งพิมพ์แล้ว ในงานอดิเรกและงานสำนักงานทั่วไป ก็สามารถนำมาใช้ในการเปลี่ยนเอกสารที่อยู่ในรูปข้าร์ดก็อบป์ให้เป็นภาพดิจิทัล ที่สามารถนำเข้าในคอมพิวเตอร์เพื่อไปใช้กับ Word Processor หรืองานสร้างเวปไซต์ การทำงานเอกสารต่างๆ

สแกนเนอร์ประเภทนี้มักจะมีขนาดเล็กขนาดเท่ากับกระดาษมาตรฐาน A4 คุณภาพแตกต่างกันไป ตามราคา มีรากตั้งแต่หลายพันบาทไปจนถึงหมื่นบาท ความถูกต้องทางด้านเรขาคณิตมักจะไม่มีการพิจารณา มากนัก ส่วนใหญ่ผู้ใช้สนใจค่อนข้างมากกับความเที่ยงตรงของสี หรือบางครั้งมีความสนใจที่ความสดใสของสี

ความละเอียดในการสแกนจะอยู่ระหว่าง 150 ถึง 300 dpi (Dot per Inch)

7.4.2 สแกนเนอร์สำหรับงานแผนที่และคอมพิวเตอร์ช่วยเขียนแบบ

สแกนเนอร์สำหรับงานแผนที่และคอมพิวเตอร์ช่วยเขียนแบบ เป็นสแกนเนอร์ที่มีขนาดใหญ่ที่สามารถสแกนต้นฉบับขนาด A3-A0 มีความละเอียดถูกต้องในระดับที่ใช้งานด้านช่วยเขียนแบบได้ นอกจากนั้นมักจะออกแบบให้ใช้กับงานสแกนแผนที่ได้ ความละเอียดถูกต้องด้านตำแหน่งจึงเป็นเรื่องที่สำคัญเนื่องจาก ภาพดิจิทัลที่ได้จะต้องถูกวัดบนภาพภายนอก โดยทั่วไปสแกนเนอร์ประเภทนี้จะมีความสามารถในการสแกนด้วยความละเอียด 300-700 dpi

เนื่องจากเป็นสแกนเนอร์ขนาดใหญ่เพื่อให้ประยุกต์เนื้อที่ในสำนักงาน จึงมักจะมีโครงสร้างเป็นชนิด Drum Type

7.4.3 สแกนเนอร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพ

สแกนเนอร์สำหรับงานรังวัดด้วยภาพเป็นสแกนเนอร์ที่มีความละเอียดถูกต้องสูง สแกนเนอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับการรังวัดด้วยภาพโดยเฉพาะ ดังนั้นสแกนเนอร์จะมีความเที่ยงตรงด้านตำแหน่งในระดับไมโครอน มีความสามารถในการสแกนด้วยความละเอียดตั้งแต่ 7 ถึง 30 ไมโครอน สแกนเนอร์จะถูกออกแบบให้สามารถรับภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐาน ความกว้างและยาว 9 นิ้วได้ แทนรับภาพจะเป็นชนิด แบบราบ (Flat-bed type) เท่านั้น เพื่อนำลีกเลี้ยงความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดภาพเนื่องจากความโค้งของฟิล์มขณะที่กำลังสแกน

7.5 การสแกนภาพถ่ายทางอากาศ

การสแกนภาพถ่ายทางอากาศเป็นกระบวนการเปลี่ยนภาพในรูป Hardcopy ให้เป็นข้อมูลดิจิทัลที่สามารถบันทึกลงสื่อจัดเก็บ เพื่อให้คอมพิวเตอร์นำไปประมวลผลได้ ผลของการสแกนจะต้องคงไว้ซึ่งความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดภาพ โหนสี โดยเฉพาะการสแกนภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นแนวภาพและได้อาพอธิคิพที่มีความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งระดับไมโครอน และมีความสามารถในการบันทึกรายละเอียดที่บรรยายด้วย resolving power ถึง 50 คู่เส้นต่อเมตร ซึ่งเมื่อเทียบเป็นระยะห่างของเส้นแทนความละเอียดเป็น 10 ไมครอน (ASPRS 2001)



ก) Z/I PhotoScan



ข) Leica DSW 500

รูปภาพ 7-10 ตัวอย่างของ Photogrammetric Scanner

ในปัจจุบันโดยเฉลี่ยเครื่องสแกนเนอร์สำหรับการรังวัดด้วยภาพควรมีขีดความสามารถในการสแกนที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายทอดข้อมูลจาก Hardcopy ให้เป็นดิจิทัลที่เที่ยงตรงตามความต้องการในการรังวัดด้วยภาพ ตามที่ปรากฏในตารางข้างล่างนี้ รายละเอียดจากการประเมินคุณภาพของสแกนเนอร์สำหรับการรังวัดด้วยภาพปรากฏใน Balavias 1998

ลักษณะทั่วไปของสแกนเนอร์	เป็นชนิด Flat-bed มีความแห้ง燥รองรับภาพกว้างพอสำหรับภาพถ่ายทางอากาศขนาดมาตรฐาน
ลักษณะของเซนเซอร์	เป็นชนิด Linear array CCD หรือ Frame array CCD ที่ตอบสนองต่อช่วงคลื่นในช่วง panchromatic หรือ ช่วงคลื่นสีแดง-เขียว-น้ำเงิน พร้อมกันทั้งสามสี
การสแกนภาพ	เป็นการภาตผ่านสามครั้งโดยแต่ละครั้งมีการใช้ฟิลเตอร์สำหรับช่วงคลื่นสีแดง-เขียว-น้ำเงิน โดยมีกลไกที่แม่นยำทำให้สีทั้งสามซ้อนทับกันสนิท หรือเป็นการภาตผ่านเพียงครั้งเดียวหากเซนเซอร์สามารถรับรู้สีทั้งสามสำหรับการภาตผ่านครั้งเดียว
ความละเอียดในการสแกนเชิงทัศน์ Optical scan resolution	ละเอียดตั้งแต่ 7 ไมครอนหรือละเอียดกว่า

ความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง Geometric resolution	ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร
ความละเอียดถูกต้องทางเรติโอมิเตอร์ Radiometric Accuracy	± 1 Digital Number หรือมากกว่า
ช่วงของเรติโอมิเตอร์ Radiometric Range	0.05 D ถึง 2.5 D
ความเร็วในการสแกน	ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดภาพและขนาดของ CCD ความละเอียดของจุดภาพที่ต้องการสแกน เทคโนโลยีการซีอัมต่อระหว่างสแกนเนอร์กับคอมพิวเตอร์ เทคโนโลยีไฮาร์ดดิส โดยเฉลี่ยอัตราเร็วในการสแกนเร็วกว่า 20 นาที
รูปแบบการจัดเก็บ	TIFF, GeoTIFF

ตาราง 7-4 แสดงคุณสมบัติโดยเฉลี่ยของสแกนเนอร์สำหรับการรังวัดด้วยภาพ

ข้อสังเกตประการหนึ่งจากตารางข้างต้น รูปแบบการจัดเก็บในสแกนเนอร์ส่วนใหญ่มักจะมีรูปแบบ TIFF และ GeoTIFF ให้เลือกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สะดวก ซอฟแวร์ประมาณส่วนใหญ่รู้จัก แต่ก็มีบางผู้ผลิตใช้รูปแบบการจัดเก็บที่กำหนดขึ้นเอง เช่น Zeiss Intergraph ที่เรียกว่า COT ไฟล์ซึ่งสามารถใช้ remote sensing software เช่น ENVI ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บที่ต้องการได้

สำหรับการสแกนที่ต้องการความรวดเร็วและอัตโนมัติ ผู้ใช้สามารถเลือกใช้เครื่องป้อนฟิล์มนิวน (Roll-film feeder) ซึ่งจะประกอบด้วยตัวป้อนฟิล์ม ตัวม้วนฟิล์ม และอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม ทำงานร่วมกับซอฟแวร์บนคอมพิวเตอร์ควบคุมการเลื่อนฟิล์มไปที่ลักษณะภาพแล้วทำการสแกนให้อัตโนมัติ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องป้อนฟิล์มนิวนจะใช้ได้เฉพาะกับฟิล์มเนกานาติฟเท่านั้น ซึ่งปกติจะไม่จำหน่ายหรือแยกจ่ายให้กับผู้ใช้ทั่วไป

รูปภาพ 7-11 Roll-film Feeder สำหรับการสแกนฟิล์มนิวน Z/I PhotoScan (<http://www.ziimaging.com>)

เนื่องจากราคาเครื่องสแกนเนอร์สำหรับการรังวัดด้วยภาพยังมีราคาสูงมากแม่ราคากำมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ แต่ก็ไม่廉便 ก็เนื่องจากเป็นตลาดเฉพาะและต้องใช้ความชำนาญการพิเศษในการออกแบบและ

สร้าง ดังนั้นการจัดหาเครื่องสแกนเนอร์สำหรับการรับวัดด้วยภาพสำหรับผู้ใช้ทั่วไปยังทำได้ยาก แต่ผู้ใช้สามารถขอรับบริการจากหน่วยงานราชการ เช่น กรมแผนที่ทหาร และเอกชนต่างๆ ได้หลายแห่ง

7.5.1 ขนาดของภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนแล้ว

ขนาดของภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนแล้วจะขึ้นอยู่กับชนิดของภาพที่จัดเก็บว่าเป็นภาพสีหรือขาวดำ ภาพขาวดำมักจะจัดเก็บเป็นชนิด grey-level โดยที่แต่ละจุดภาพจะจัดเก็บค่าความสว่างเป็น 256 ระดับโดยมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 255 ซึ่งจะมีขนาดและช่วงการจุดเก็บสอดคล้องกับหน่วยการจัดเก็บในคอมพิวเตอร์เป็น unsigned byte ซึ่งมีขนาด 1 ไบต์หรือ 8 บิตพอดี

กรณีเป็นภาพสีชนิด 24 บิต หรือชนิด True-color โดยเป็นการจัดเก็บองค์ประกอบสีพื้นฐานทั้งสามสีคือแดง-เขียว-น้ำเงิน โดยระดับสีแต่ละสีแทนค่าความเข้มสัญญาณด้วยรหัส 256 ระดับโดยมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 255 ซึ่งจะสามารถคาดคะเนได้ทั้งสิ้น 16,777,216 สี การเก็บภาพแบบนี้จะทำให้ภาพมีความเมื่อนกับต้นฉบับมากที่สุด ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังขึ้นกับวิธีการ convolution แล้ว resampling ที่เกิดขึ้นระหว่างการแปลงภาพให้เป็นดิจิทัล ดังนั้นหนึ่งจุดภาพต้องใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บ 3 ไบต์ หรือคิดเป็นสามเท่าของภาพขาวดำที่มีขนาดเดียวกัน

เมื่อกำหนดให้ขนาดภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐานมีขนาดกว้างและยาวเท่ากันเป็น 23 เซนติเมตร จะสามารถคำนวนปริมาณเนื้อที่ต้องการในการจัดเก็บภาพถ่ายทางอากาศ เมื่อสแกนภาพด้วยความละเอียด 12.5, 15, 22.5, 25, 30 ไมครอน ดังนี้

ความละเอียดที่สแกน (ไมครอน)	จำนวนจุดภาพ กว้าง X ยาว	ขนาดภาพขาวดำ (8bit) (MegaByte)	ขนาดภาพสี (24bit) (MegaByte)
12.5	18,400 x 18,400	339	1,016
15	15,333 x 15,333	235	705
22.5	10,222 x 10,222	104	313
25	9,200 x 9,200	85	254
30	7,667 x 7,667	59	176

ตาราง 7-5 ขนาดภาพที่ต้องจัดเก็บสำหรับภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐาน 23 ซม.

7.5.2 การใช้งานภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นดิจิทัล

หากอัตราค่าบริการสแกนภาพถ่ายทางอากาศสูงมากก็อาจมีส่วนผลักดันให้เกิดการใช้การรับวัดด้วยภาพดิจิทัลอย่างกว้างขวาง ในขณะนี้ความต้องการข้อมูลแผนที่ภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยในการสร้างและปรับปรุงฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับระบบประมวลผลสำหรับการสำรวจและปรับปรุงส่วนใหญ่มีโมดูลสำหรับผลิตแผนที่ภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์ที่มาพร้อมอยู่แล้ว ซอฟแวร์เหล่านี้แพรวน้อยและราคาถูก บางชนิดมีให้ใช้ฟรีดาวน์โหลดจากอินเทอร์เน็ต ผู้ใช้ส่วนใหญ่ยังคงขาดเพียงแต่ซอฟแวร์ที่ใช้ทำข้อมูลทาง

อากาศ ซอฟแวร์วัดแบบจำลองระดับ และซอฟแวร์วัดพิกัดวัตถุจากภาพคู่สามารถมิติเท่านั้น นอกจานี้การใช้งานภาพถ่ายทางอากาศดิจิทัล ผู้ใช้สามารถเลี่ยงการซื้อภาพในกระดาษใบไม้และพิล์มได้อา怕ชิฟฟ์ได้

โดยการทดสอบการใช้งานวัสดุภาพถ่ายทางอากาศด้วยภาพถ่ายทางอากาศดิจิทัลเพียงอย่างเดียวสามารถทำได้ ดังตารางข้างล่างนี้

วัสดุ	การใช้งานรังวัดด้วยภาพพิมพ์บนกระดาษ	การทดสอบงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัล
กระดาษใบไม้	-ตัดและไม่เศียรสำหรับงานวางแผนงาน จุดควบคุมภาพถ่าย -ใช้ออกสนำมเพื่อกำหนดจุดควบคุม	-ดิจิทัลไม่เศียรพิมพ์บนกระดาษ -ดาวน์โหลดลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์แบบ พกพา และคอมพิวเตอร์สนำม อาจใช้เทคนิค ^{การบีบอัดภาพด้วย}
พิล์มไดอาฟอชิฟ	-ใช้วัดด้วยความละเอียดถูกต้องสูงบน เครื่องเขียนแผนที่เชิงวิเคราะห์ สำหรับ การวัดข่ายสามเหลี่ยม การวัด แบบจำลองระดับและการวัดพิกัดวัตถุ	-ใช้งานบน Digital Photogrammetric Workstation เพื่อรังวัดเพื่อการสำรวจด้วย ภาพสำหรับทุกรอบวนการ

ตาราง 7-6 ลักษณะการใช้งานวัสดุภาพถ่ายทางอากาศและการทดสอบ

ปัจจุบันที่เทคโนโลยีการบีบอัดภาพที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น JPEG2000 ที่เป็นมาตรฐานสากล ISO , MrSID โดย Lizard Tech Inc. หรือ Enhanced Wavelet Compreression (ECW) โดย ErMapper Inc. สามารถลดขนาดภาพลงได้ไปได้มากเนื่องจากเป็นการบีบอัดชนิดสูญเสีย (Lossy Compression) แต่คุณภาพของภาพที่บีบอัดได้ไม่ต้อยลงไปมาก อัลกอริธึมการบีบอัดสามารถบีบอัดในอัตราการบีบอัดที่สูงมากตั้งแต่ 1:10 ไปจนถึง 1:100 การบีบอัดภาพทำให้ภาพสามารถนำไปใช้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีทรัพยากรำจัด ไปจนถึงคอมพิวเตอร์พกพาได้ ผลการบีบอัดภาพที่อัตราการบีบอัดสูงด้วย เช่น การบีบอัดภาพถ่ายทางอากาศสี สแกนที่ความละเอียด 22.5 ไมครอนที่คิดเป็นปริมาณข้อมูลสูงถึง 313 เมกะไบต์ต่อภาพ หากบีบอัดด้วยอัตราการบีบอัด 1:30 แล้วจะเหลือข้อมูลภาพเพียง 10 เมกะไบต์ โดยที่ผู้ใช้จะไม่สังเกตเห็นคุณภาพของภาพที่เปลี่ยนแปลง นอกจากหน่วยความจำสำหรับอุปกรณ์มือถือต่างๆ เช่น Secure Digital (SD), Multi Media Card (MMC), Microdrive, USB ThumbDrive ถูกพัฒนาให้มีสูงขึ้นไปเรื่อยจนระดับ 10 จิกะไบต์ ตัวอย่างเช่น หน่วยความจำขนาดความจุเพียง 1 จิกะไบต์ จะสามารถบรรจุภาพถ่ายทางอากาศสีข้างต้นที่บีบอัดด้วยอัตราการบีบอัดดังกล่าวได้ถึง 100 ภาพ ทำให้ภาพถ่ายทางอากาศจำนวนมากสามารถพกพาไปใช้งานในสนำมและสามารถเปิดดูด้วยอุปกรณ์ เช่น PocketPC เช่นการประยุกต์ใช้ในการจำแนกรายละเอียดในสนำมของการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (รุ่นไกร 2546) ดังแสดงให้เห็นในภาพ



ก) การใช้ Pocket PC ในสำหรับช่างงาน
จำแนกในนาม (รุ่นไกร 2546)



ข) ตัวอย่างของหน่วยความจำสำหรับ Pocket ในรูปแบบ Secure Digital (SD) , Compact Flash (CF) และ Multimedia Card (MMC) และ MicroDrive

การใช้งานภาพดิจิทัลทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการใช้งานฟิล์มไดอาพอชิติฟและกระดาษบอร์ไมเดที่ถือว่าเป็นวัสดุที่ลินเนปลึงมาก การใช้ภาพดิจิทัลทดแทนภาพพิมพ์บนฟิล์มไดอาพอชิติฟหรือกระดาษบอร์ไมเดทโดยทั่วไปจะทำให้ประหยัดค่าวัสดุที่ต้องจัดซื้อลงไปได้ 300 – 500 บาทสำหรับภาพขาวดำและภาพสีตามลำดับ สำหรับแต่ละภาพในบล็อกอาจประกอบด้วยภาพจำนวนมากหรือน้อยแตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็เมื่อผู้ใช้ต้องวางแผนการทำงานและมีระบบงานที่รองรับการประมวลผลภาพและรังวัดด้วยภาพดิจิทัลทั้งสิ้น ระบบงานเหล่านี้ได้แก่ คอมพิวเตอร์แบบพกพาพร้อมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เครื่องคอมพิวเตอร์สนามเร่น Pocket PC, Ultra-Mobile PC(UMPC), Table PC, ไปจนถึงคอมพิวเตอร์ Laptop การจัดเก็บภาพในหน่วยความจำ ตลอดเปลี่ยนได้ เช่น Secure Digital (SD), Multimedia Card (MMC), Compact Flash (CF), หรือ Microdrive หน่วยความจำขนาดเล็กสามารถมีความจุสูงถึงหลาย吉igate คอมพิวเตอร์สามารถอ่านสื่อดิจิทัลต่างๆที่หลากหลายเหล่านี้ได้โดยตรง นอกจากนั้นการแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่านการเข้ามาร่วมต่อผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ สำหรับโอนถ่ายข้อมูลอย่างรวดเร็วที่ทำได้หลายช่องทาง สำหรับการเข้ามาร่วมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์บอร์บันมีให้เลือกมากมายเช่น USB, FireWire, WiFi, Bluetooth, RS-232, Ethernet 10/100/1000 Mbit การสื่อสารช่องทางเหล่านี้มีความเร็วตั้งแต่ 1 เมกะบิทถึง 800 เมกะบิทต่อวินาที หากจำเป็นต้องใช้ Hard-Copy ของภาพถ่ายทางอากาศ อีกทางเลือกบอร์บันคือสามารถนำภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนแล้วไปพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ภาพ (Photo Printer) ได้ และโดยทั่วไปจะมีราคาค่าพิมพ์ถูกกว่าการผลิตภาพด้วยกระดาษบอร์ไมเดทถึง 10 เท่าเป็นอย่างน้อย

7.6 ชีสโตแกรม

ชีสโตแกรมคือการวิเคราะห์สถิติของของการกระจายของข้อมูลตัวอย่าง ชีสโตแกรมในการประมาณผลภาพคือการพิจารณาการกระจายของค่าประจุภาพ โดยที่จะเป็นภาพหมายถึงค่าความสว่างของจุดภาพ หรือค่าตัวเลขอื่นๆที่ได้จากการวิเคราะห์ในกรอบบันทึกภาพกล่าวได้แก่ เลขดิจิทัล (Digital Number : DN)

ในภาพแสดงภาพ แสดงตัวอย่างของส่วนหนึ่งของภาพ โดยการแสดงตำแหน่งของจุดภาพพร้อมค่าความสว่างจุดภาพกำกับ ณ ตำแหน่งนั้น ภาพขยายของภาพดิจิทัลนี้มีช่วงค่าความสว่างของจุดภาพเป็น 0 ถึง 7 ภาพมีขนาด 8×8 จุดภาพดังภาพ

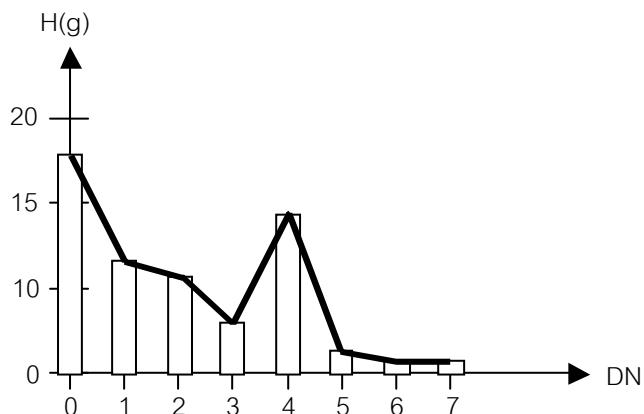
0	0	0	0	0	2	2	2
0	2	2	0	0	2	2	2
0	2	2	0	3	4	4	4
0	0	1	1	3	4	4	4
0	0	1	1	3	4	2	4
0	0	1	1	4	4	4	4
0	1	1	1	3	4	5	7
0	1	1	1	3	4	5	6

ตาราง 7-13 ตัวอย่างค่าของจุดภาพของภาพที่จะวิเคราะห์ให้ชีสโตแกรม

เมื่อทำการวิเคราะห์สถิติจะได้การกระจายของค่า DN ของภาพข้างต้นนี้ดังนี้

ค่าจุดภาพ	0	1	2	3	4	5	6	7
จำนวนจุด	18	12	11	5	14	2	1	1

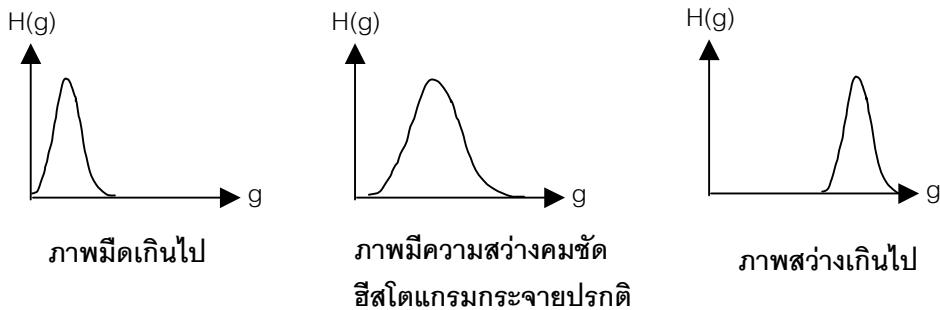
ซึ่งสามารถนำมาพล็อตตัวยกราฟแห่งห้องภาพเส้นเพื่อให้เห็นภาพของการกระจายดังนี้



รูปภาพ 7-14 แสดงชีส โทแกรมที่ได้จากการข้างตัน

การแสดงถึงการกระจายของชีส โทแกรมมีลักษณะเดียวกับกราฟแท่ง หรือ กราฟเส้นก็ได้ ถ้าเป็นกราฟแท่งก็จะมีแกนนอนเป็นแกนของค่า DN เริ่มตั้งแต่ 0 ไปจนถึงค่า DN สูงสุดที่ต้องการแสดงผล โดยทั่วไปค่า DN เป็นที่ที่เป็นจุดๆ ไม่ต่อเนื่อง (discrete) และส่วนมากมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ไปจนถึง 255 แกนตั้งจะเป็นจำนวนจุดภาพมีค่าตั้งแต่ 0 ไปจนถึงจำนวนจุดภาพสูงสุดสำหรับค่า DN ใดๆ ความสูงของกราฟแท่งแต่ละแท่งคือจำนวนจุดภาพที่มีค่า DN นั้นๆ

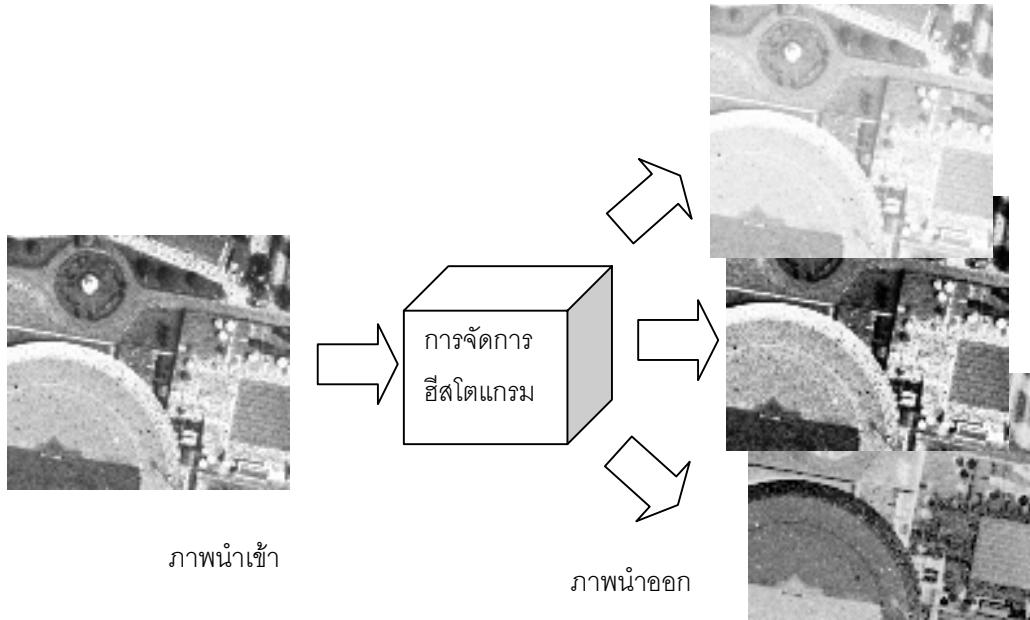
อีกรูปแบบหนึ่งในการแสดงชีส โทแกรมคือการใช้กราฟเส้น โดยมีแกนตั้งและแกนนอนเชื่อมเดียวกับการแสดงชีส โทแกรมด้วยกราฟแท่ง แต่ใช้เส้นตรงลากเชื่อมต่อระหว่างคุณลักษณะระหว่างค่า DN กับ จำนวนจุดภาพสำหรับแต่ละ DN ดังปรากฏในกราฟข้างต้น



รูปภาพ 7-15 แสดงชีส โทแกรมที่ต้องควบคุมขณะสแกนภาพ

7.7 การจัดการฮีสตอแกรม

เมื่อภาพถูกบันทึกมา ต่อในระหว่างการประมวลผลอาจมีคุณภาพที่ไม่เป็นที่สอดคล้องในการทำงาน เช่น การแปลงภาพ อันเนื่องมาจากกระบวนการกระจายฮีสตอแกรม ปัญหานี้ที่พบบ่อยคือความมืดและความสว่างของภาพ การจัดการเปลี่ยนแปลงฮีสตอแกรม ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงค่าของจุดภาพ ที่จะทำให้เกิดภาพดิจิทัลใหม่ที่มีคุณภาพที่สามารถใช้งานได้สะดวก มีประสิทธิภาพ



รูปภาพ 7-16 แสดงฮีสตอแกรมที่ต้องควบคุมขณะสแกนภาพ

ในภาพจะเห็นการจัดการฮีสตอแกรมเป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยภาพนำเข้า (Input Image) การจัดการฮีสตอแกรม และภาพผลลัพธ์ซึ่งในภาพคือ ภาพนำออก (Output Image)
การจัดการฮีสตอแกรมทำได้หลายวิธีดังนี้

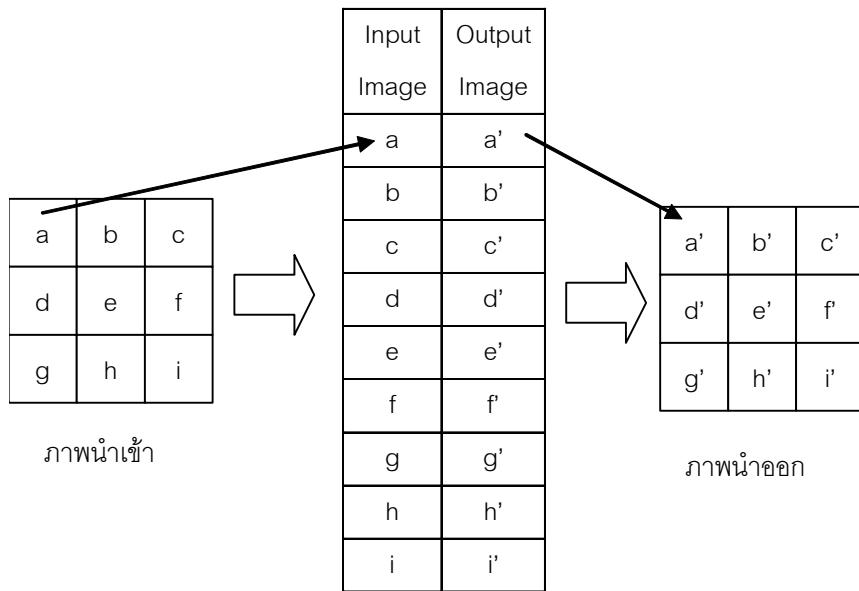
7.7.1 Look-Up Table

Look-Up Table คือตารางที่กำหนดความสัมพันธ์ของแต่ละจุดภาพว่าจุดภาพจากภาพนำเข้าและค่าที่จะเป็นสำหรับภาพผลลัพธ์

ดังในตัวอย่างคือลักษณะของ LUT

Input Image	Output Image
g_0	g'_0
g_1	g'_1
...	...
g_{n-1}	g'_m

เมื่อมีการกำหนด LUT ก็จะสามารถนำไปเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างจุดภาพของภาพที่ต้องการซึ่งจะส่งผลให้ฮีสตอแกรมเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการ



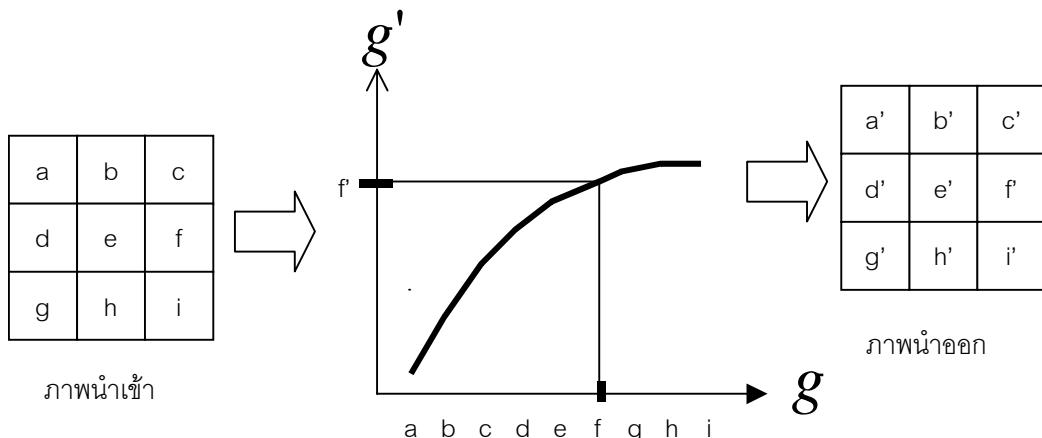
รูปภาพ 7-17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจุดภาพเมื่อใช้ Look-up Table

จากภาพจะเห็นว่า ภาพนำเข้ามีค่าของจุดภาพเป็น a,b,c, ... ตามลำดับ จาก LUT ที่กำหนดให้ เมื่อพิจารณาจุดภาพแรกที่พิกัด (0,0) ที่มีค่าเป็น a ค่าความสว่างจุดภาพในภาพผลลัพธ์หรือภาพนำออกจะเป็น a' ทำการพิจารณเป็นคร�ทุกจุดภาพ ก็จะสามารถสร้างภาพดิจิทัลใหม่ที่มีความสว่างจุดภาพ นิยามโดย LUT ที่กำหนดให้

7.7.2 การใช้กราฟ

การใช้กราฟคือวิธีการเปลี่ยนแปลงชีสติแกรมของภาพ โดยอาศัยการกำหนดค่าจุดภาพที่นำเข้าและออกโดยการพิจารณาจากกราฟเส้น ซึ่งจะเหมาะสมกับในการนิยามที่มีค่าของจุดภาพมีช่วงกว้าง และสามารถช่วยให้การเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ทำได้ง่ายขึ้น

ในตัวอย่าง เป็นการจัดการรีส์ติแกรมโดยใช้กราฟที่มีลักษณะดังรูป

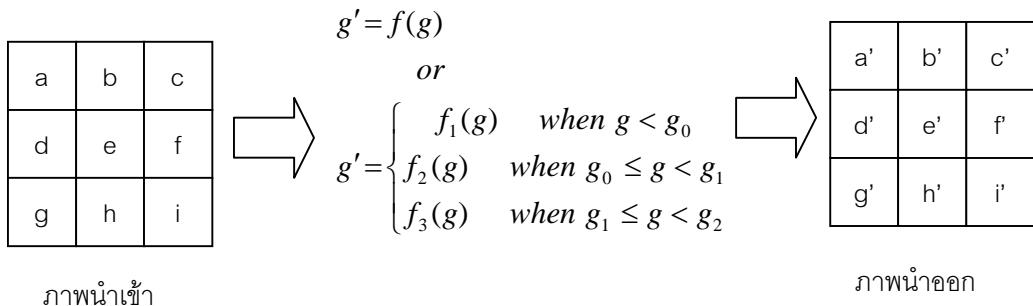


รูปภาพ 7-18 แสดงการเปลี่ยนแปลงของจุดภาพเมื่อใช้กราฟ ในภาพแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่า f ไปเป็น g

ในตัวอย่างเป็นการพิจารณาจุดพิกัด $(2,1)$ ที่ในภาพต้นฉบับมีค่าความสว่างจุดภาพเป็น f เมื่อพิจารณาค่า f จากกราฟที่กำหนดให้ที่แกน g คือความความสว่างของจุดภาพสำหรับภาพนำเข้า ค่าจากกราฟจะได้ค่าความสว่างจุดภาพของภาพนำออก ณ จุดพิกัดเดียวกันนี้ ซึ่งในกรณีนี้จะได้ค่าความสว่างจุดภาพเป็น f'

7.7.3 การใช้ฟังก์ชันการแปลง (Transformation Function)

การใช้ฟังก์ชันการแปลงคือการใช้สมการคณิตศาสตร์ในการจัดการรีสโตร์ในกราฟ สมการคณิตศาสตร์จะเป็นฟังก์ชันหนึ่งตัวแปร โดยที่ตัวแปรเป็นค่าความสว่างจุดภาพนำเข้า และตัวแปรตามจะเป็นค่าความสว่างจุดภาพของภาพนำออก



รูปภาพ 7-19 การใช้กรานสเฟอร์ฟังก์ชันในการจัดการรีสโตร์

เช่นเดียวกับการใช้กราฟในการเปลี่ยนแปลงรีสโตร์ในภาพ โดยอาศัยการกำหนดค่าจุดภาพที่นำเข้าและออกโดยการคำนวนจากฟังก์ชันการแปลง ฟังก์ชันการแปลงอาจเป็นฟังก์ชันที่ไม่ต่อเนื่องดังในตัวอย่างที่เป็น 3 ช่วง หรือมีจำนวนช่วงใดๆ ก็ได้

7.8 การทำภาพให้เป็นภาพสีกลับ

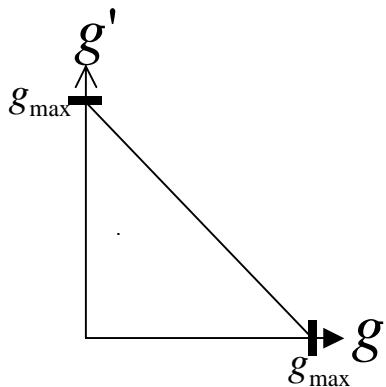
การทำภาพให้เป็นภาพสีกลับคือการจัดการความสว่างจุดภาพให้เป็นตรงข้ามกับภาพนำเข้า เช่นการทำให้จุดภาพที่เคยสว่างกลับมืด และจุดภาพที่เคยมืดกลับเป็นสว่างอย่างเป็นระบบ แนวทางหนึ่งที่ทำได้คือการนำเอาค่าความสว่างของจุดภาพของทุกจุดมาลบออกจากความสว่างของจุดภาพสูงสุด ในทางปฏิบัติเพื่อความง่ายก็จะนำค่าความสว่างจุดภาพสูงสุดที่มีได้เป็นตัวตั้ง ดังสามารถนิยามได้ดังนี้

$$g' = g_{\max} - g \quad \text{สมการ 7-1}$$

สำหรับภาพระดับสีเทา 8 บิต ที่มีระดับความเทา 256 ระดับ สมการฟังก์ชันการแปลงสำหรับทำภาพให้เป็นภาพสีกลับจะเขียนได้เป็น

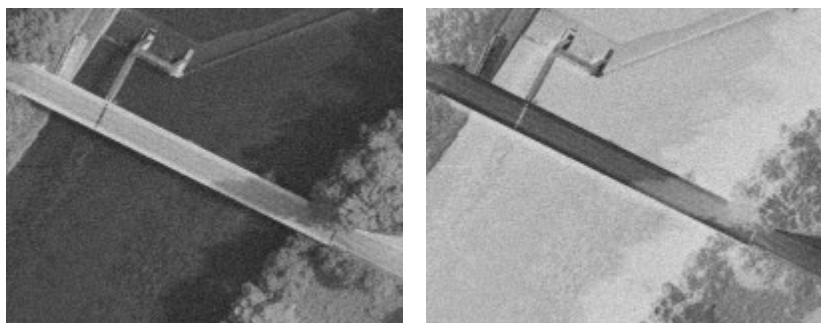
$$g' = 255 - g \quad \text{สมการ 7-2}$$

ถ้าเขียนเป็นฟังก์ชันการแปลงได้ดังนี้



รูปภาพ 7-20 แสดงกราฟฟอร์ฟังก์ชันสำหรับทำภาพให้เป็นสีกลับ

ในภาพข้างล่างเป็นตัวอย่างของการทำภาพให้เป็นสีกลับ



รูปภาพ 7-21 ภาพของสะพาน (ซ้าย) และ ภาพของสะพานที่เป็นสีกลับ (ขวา)

7.9 การทำภาพให้เป็นสอง

การทำภาพให้เป็นสอง (Binarization) คือกระบวนการที่ทำให้ภาพแบ่งออกเป็นส่วน (Segmentation) เพื่อการวิเคราะห์หาวัตถุ (Object) ที่สนใจบนภาพ ผลจากการแบ่งให้เป็นสองจะทำให้ได้ภาพใหม่ที่มีจุดภาพมีรักษารูปเป็นเพียงสองค่าเท่ากับ 0 และ 1 โดยทั่วไปจะให้ 0 แทนส่วนที่เป็นเบื้องหลังหรือส่วนของภาพที่ไม่ต้องการ และค่าจุดภาพที่แทนด้วย 1 คือวัตถุหรือส่วนของภาพที่กำลังสนใจ

การทำภาพให้เป็นสองต้องมีการหาค่าขีดจำกัด (Threshold) ที่เหมาะสม ค่าขีดจำกัดเพื่อจะให้วัตถุที่สนใจได้วรับ hass ที่ต้องการ จะเปลี่ยนไปตามคุณลักษณะของภาพ

ดังนั้นการทำภาพให้เป็นสองอาจเขียนด้วยฟังก์ชันการแปลงดังนี้

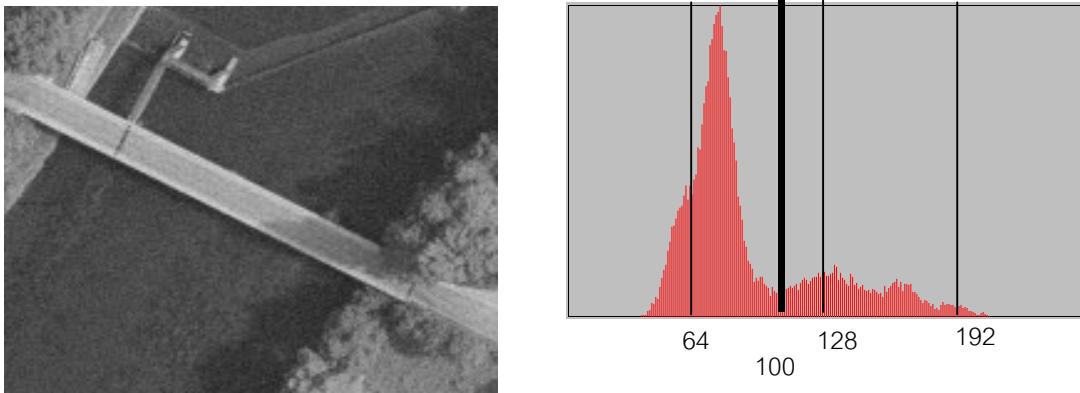
$$g' = \begin{cases} 0 & \text{when } g < \tau \\ 1 & \text{when } g \geq \tau \end{cases}$$

สมการ 7-3

เมื่อ g คือค่าของจุดภาพสำหรับภาพนำเข้า g' คือค่าของจุดภาพสำหรับภาพนำผลลัพธ์ และ τ คือค่าขีดจำกัดที่เลือกใช้

หากประยุกต์ใช้กับภาพของ “สะพาน” โดยที่ต้องการแยกส่วนของสะพานและพื้นดินออกจากพื้นน้ำ

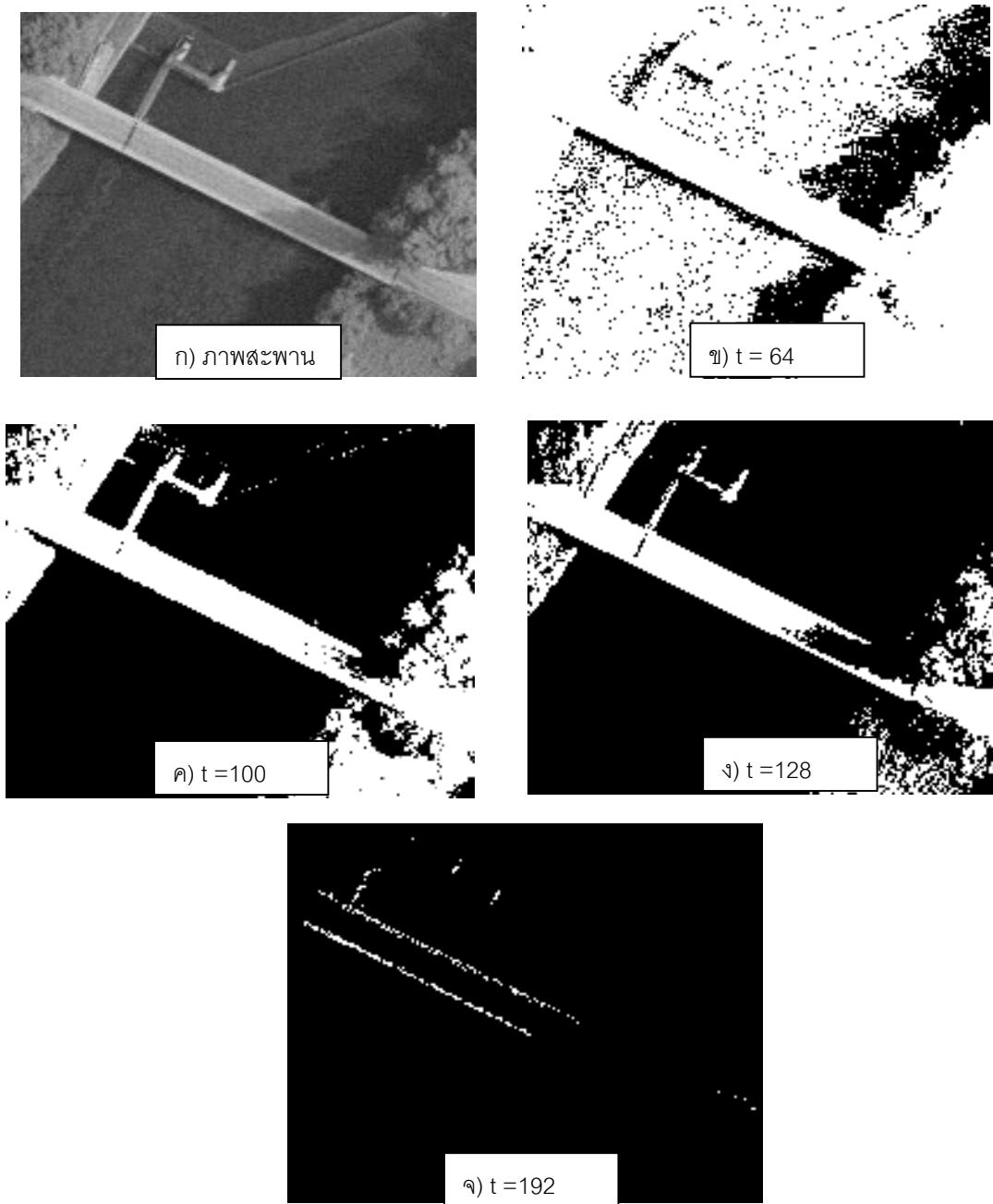
โดยการวิเคราะห์สีสโตแกรมจะได้ภาพดังนี้



รูปภาพ 7-22 ภาพของสะพาน (ซ้าย) และ ภาพของอีสโตแกรมของสะพาน (ขวา)

จะเห็นได้ว่าภาพสะพานเป็นภาพที่มีอีสโตแกรมที่มียอดแหลมเป็นสามกลุ่มใหญ่ อีสโตแกรมกลุ่มแรกอยู่ค่อนมาทางซ้ายมีจำนวนจุดภาพเป็นสัดส่วนจำนวนมากในภาพ เมื่อเทียบกับภาพ ก็อาจอนุมานได้ว่าคงจะเป็นอีสโตแกรมของพื้นน้ำ ส่วนอีกสองยอดทางขวามีอีกกระเจยตั้งแต่ค่าความสว่าง 100 ไปจนถึงประมาณ 200 เป็นส่วนของจุดภาพที่สว่างกว่า

ดังนั้นการหาค่าขีดจำกัดที่เหมาะสม (Optimal Threshold) ในกรณีจะได้ค่าเป็น 100 ในภาพต่อไปนี้แสดงให้เห็นถึงผลของการใช้ค่าขีดจำกัดที่ 64 100 128 และ 192



รูปภาพ 7-23 ก) ภาพของสะพาน ข) เมื่อค่า閾值ค่าขีดจำกัดเป็น 64 ค) เมื่อค่า閾值ค่าขีดจำกัดเป็น 100 ง) เมื่อค่า閾值ค่าขีดจำกัดเป็น 128 จ) เมื่อค่า閾值ค่าขีดจำกัดเป็น 192

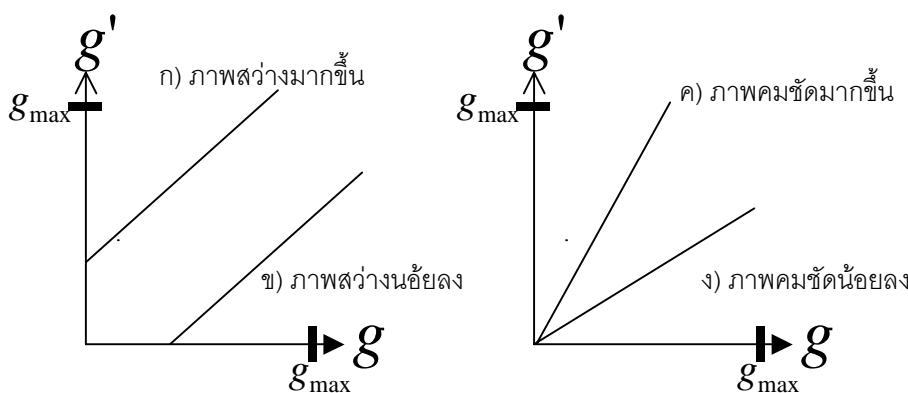
การหาค่าขีดจำกัดที่เหมาะสม (Optimal Threshold) เป็นเรื่องที่สำคัญต่อการแบ่งภาพเป็นส่วน (Segmentation) รายละเอียดสามารถค้นคว้าได้จากตำราการประมวลผลภาพ (Gonzalez 2002)

7.10 การปรับความคมชัดและความสว่างของภาพ

การปรับความคมชัด (Contrast) และความสว่าง (Brightness) สามารถจัดการด้วยฮีสติแกรม โดยการใช้ฟังก์ชันเส้นตรงเป็นสมการสำหรับฟังก์ชันการแปลง

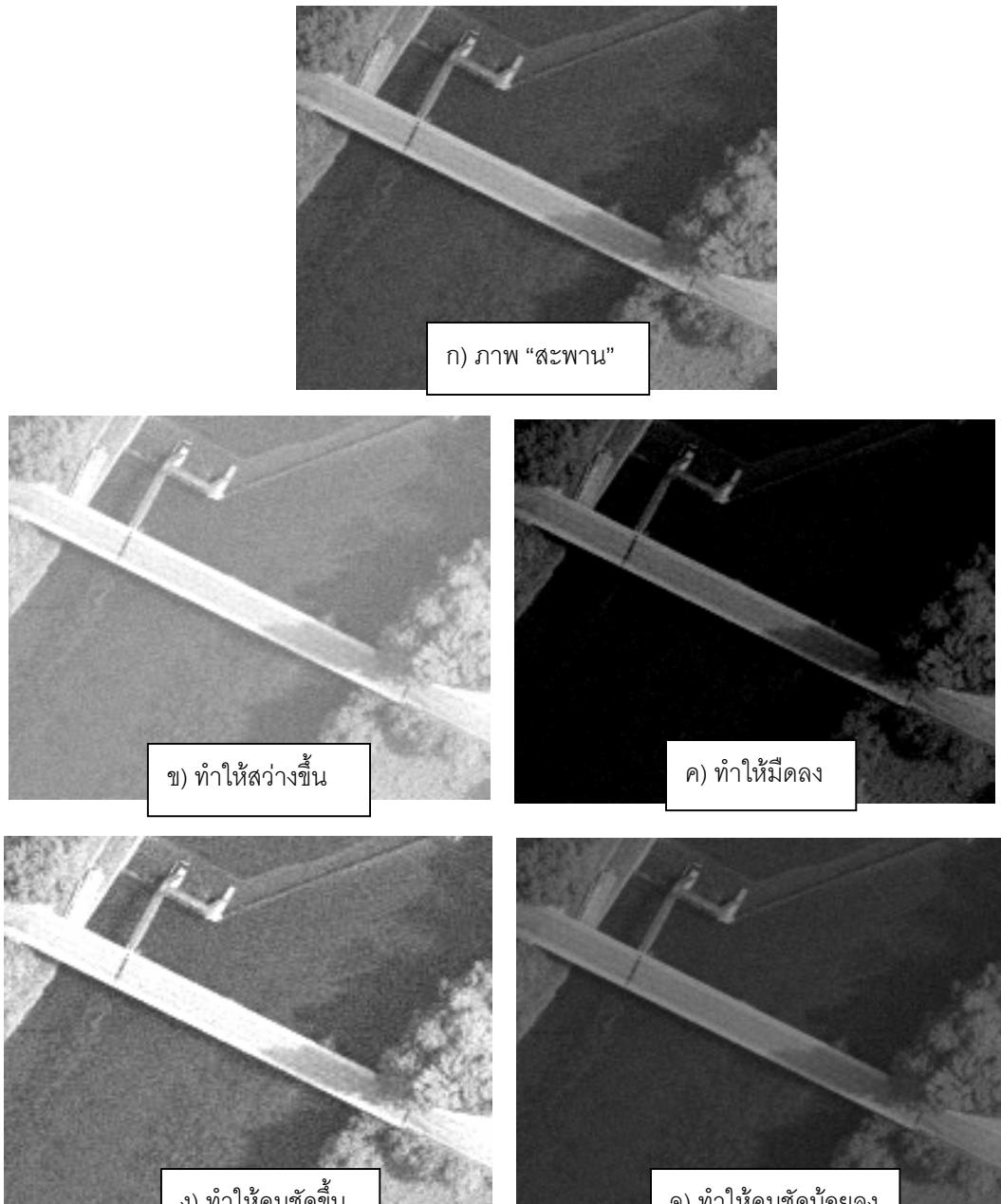
การปรับความคมชัดคือการแยกแยะระดับความต่างของสีของแต่ละจุดภาพ เมื่อใช้ฟังก์ชันการแปลงเป็นกราฟเส้นตรง การปรับความคมชัดจะสัมพันธ์กับค่าความชันของกราฟ

ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับจำนวนการกระจายของค่าความสว่างของจุดภาพว่ากระจายค่อนมาทางค่าความสว่างน้อยหรือค่าความสว่างมาก ดังนั้นความสว่างโดยรวมของภาพสามารถปรับให้มีดีหรือสว่างได้โดยยกระดับกราฟของฟังก์ชันการแปลงสามารถแสดงให้เห็นดังภาพ



รูปภาพ 7-24 แสดงกราฟสหเอฟเฟก์ฟังก์ชันสำหรับการเพิ่มลดความสว่างและความคมชัด

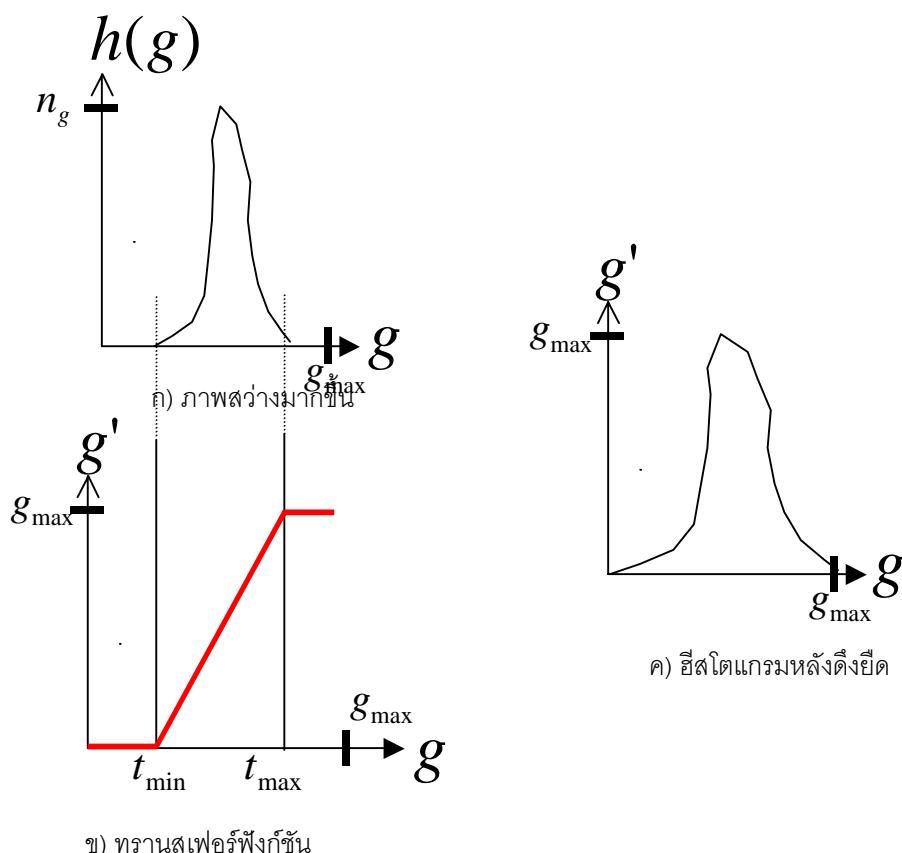
เมื่อประยุกต์ใช้กับภาพ “สะพาน” จะได้ผลลัพธ์ดังนี้



รูปภาพ 7-25 แสดงการเพิ่มลดความสว่างและความคมชัด

7.11 การปรับภาพด้วยวิธีดึงยืด

การปรับภาพเพื่อให้ภาพมีความคมชัดและความสว่างพร้อมๆ กัน สามารถทำได้ด้วยวิธีดึงยืด (Linear Stretching) กล่าวคือการที่ภาพมีความสว่างจุดภาพของกราฟจะรวมตัวอยู่ในช่วงของความสว่างเป็นช่วงแคบๆ หรืออาจเรียกว่าค่าพิสัยแคบหรือ Dynamic Range ต่ำ โดยการกำหนดค่าต่ำสุด t_{\min} และค่าสูงสุด t_{\max} ที่จะทำการ “ยืด” ให้เป็นค่าความสว่างจุดภาพ เช่น กรณีเป็นภาพระดับสีเทา 256 ระดับก็อาจยืดค่าความสว่าง “ต่ำสุด” ให้เป็น 0 ส่วน ค่าความสว่างของจุดภาพ “สูงสุด” เป็นค่า 255 ค่าอื่นๆ ระหว่างนั้นก็จะประมาณเป็นเส้นตรง และต้องยึดหลักที่ว่าจุดภาพที่มีความสว่างเท่ากันเมื่อได้รับการปรับเปลี่ยนเป็นค่าความสว่างจุดภาพใหม่ ทุกจุดภาพต้องปรับเปลี่ยนเช่นกัน อธิบายในภาพข้างล่างนี้



รูปภาพ 7-26 แสดงทรานส์ฟอร์มทั้งสามสำหรับการดึงยืดวิธีสโตแกรม

การพิจารณาค่าความสว่าง “สูงสุดและต่ำสุด” อาจไม่ได้พิจารณาจากค่าความสว่างภาพจากจุดภาพเท่านั้น เนื่องจากค่าความสว่างที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอาจมีจำนวนน้อยมากๆ และอาจมีค่าเป็น 0 และ 255 อยู่แล้ว ที่จะทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ กรณีนี้อาจพิจารณาค่า “สูงสุดและต่ำสุด” จากกลุ่มข้อมูลที่มีค่าห่างจากค่าเฉลี่ยของ DN ทั้งภาพ เช่น การใช้เกณฑ์สถิติ 1, 2 หรือ 3 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เรียกว่า 1σ , 2σ หรือ 3σ หรืออาจใช้การกำหนดเปอร์เซ็นต์ของจำนวนจุดภาพของกลุ่มที่มีความสว่างมากที่สุดและน้อยที่สุด เช่น 0.5% เป็นต้น วิธีนี้บางครั้งเรียกว่า “percentage trim” หรือเรียกกลุ่มจุดภาพเหล่านี้ว่าเป็นจุดภาพที่มี DN คือตัวแล้ว (saturated pixel)

7.12 การบีบอัดภาพ

การบีบอัดภาพคือการลดขนาดข้อมูลภาพลงเพื่อให้ปริมาณการจัดเก็บข้อมูลลดลง ทำให้การเก็บรักษาการนำไปใช้งาน การเรียกใช้ ทำได้สะดวกรวดเร็ว การบีบอัดภาพอาศัยหลักการการลดทอนข้อมูลภาพที่ “ซ้ำซาก” โดยอาศัยหลักการทางรหัสคอมพิวเตอร์ที่ทดแทนรหัสภาพซ้ำที่อาจมีความต่อเนื่องเป็นรหัสภาพยาวๆ แล้วแทนด้วยรหัสภาพที่สั้นกว่า

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณข้อมูลที่ได้หลังจากการบีบอัดแล้วกับปริมาณข้อมูลดังเดิมก่อนบีบอัด เรายินดีเรียกสัดส่วนของการลดลงของข้อมูลนี้ว่า อัตราการบีบอัด (Compression Ratio:) อัตราการบีบอัดสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{อัตราการบีบอัด} = \frac{\text{ปริมาณข้อมูลหลังการบีบอัด}}{\text{ปริมาณข้อมูลก่อนการบีบอัด}} = 1: \text{ส่วนกลับอัตราการบีบอัด}$$

การระบุอัตราการบีบอัดบ่อยครั้งที่จะคำนวนอัตราการบีบอัดเป็น 1: อัตราส่วนกลับของการบีบอัด เพื่อให้ทราบและง่ายต่อความเข้าใจว่าการบีบอัดมีการลดขนาดข้อมูลลงไปเท่าใด

การบีบอัดข้อมูลภาพสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ

1. การบีบอัดแบบไม่สูญเสีย (Lossless Compression) ซึ่งหมายถึงที่การบีบอัดลดขนาดข้อมูลภาพให้มีปริมาณการจัดเก็บลดลง แต่เมื่อคลายข้อมูลคืนแล้วจะได้ข้อมูลทุกบิตทุกไบต์เหมือนเดิมทุกประการ ตัวอย่างการบีบอัดประเภทนี้ได้แก่ GNU zip หรือ gzip ที่แพร่หลายในระบบปฏิบัติการยูนิกซ์ และในการสื่อสารผ่านโพรโทคอล http 1.1 หรือ Limpel-Zip-Welch (LZW) compression ที่รู้จักกันดีในกระบวนการบีบอัดซอฟแวร์สำหรับการแจกจ่ายบนระบบปฏิบัติการ Window ในนามของ zip
2. การบีบอัดแบบสูญเสีย (Lossy Compression) เป็นการบีบอัดข้อมูลที่ยอมให้ข้อมูลสูญหายไปแต่เมื่อคลายข้อมูลแล้วภาพที่ปรากฏแก่สายตาไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับต้นฉบับ ความแตกต่างนี้ขึ้นอยู่กับความพอดีของกระบวนการประยุกต์ใช้ หากต้องการให้ข้อมูลเล็กลงมาก ก็ต้องมีการบีบอัดด้วยอัตราการบีบอัดที่สูง ซึ่งจะให้ภาพที่คล้ายอกไม้มีความแตกต่างจากต้นฉบับมาก ตัวอย่างของการบีบอัดที่รู้จักกันแพร่หลายคือ jpeg สำหรับงานด้านสารสนเทศและการสื่อสารทั่วไป

สำหรับงานด้านภูมิสารสนเทศ ปัจจุบันมีการใช้อัลกอริธึมในการบีบอัดที่ชั้นนำมากขึ้นเพื่อให้จัดการกับภาพขนาดใหญ่ เช่น ขนาดใหญ่ระดับหลายร้อยเมกะไบต์ ได้ อัลกอริธึมดังกล่าวได้แก่ การบีบอัดชนิด Wavelet ตัวอย่างของซอฟแวร์บีบอัดภาพดังกล่าวได้แก่

- MrSID โดย Lizardtech Inc.
- ECW โดย ER Mapper Inc.

- Lossy JPEG2000 โดย ISO

JPEG2000 เป็นอัลกอริธึมที่มีทั้งชนิด Lossy และ Lossless แต่ที่นิยมใช้ในทางภูมิสารสนเทศเพื่อการบีบอัดที่มีประสิทธิภาพจะเลือกใช้ Lossy JPEG2000

เมื่อผู้ใช้ต้องการอ่านภาพลับมาแสดงผลผู้ใช้ต้องมีซอฟแวร์ในการคลายคืนไฟล์ภาพที่ได้บีบอัดไว้ ซึ่งปัจจุบันผู้ผลิตซอฟแวร์และอัลกอริธึมการบีบอัดขึ้นไม่ได้ตกลงกันเป็นมาตรฐาน ยกเว้น JPEG2000 ผู้ใช้จะต้องใช้ซอฟแวร์ที่ใช้สำหรับการคลายคืนภาพโดยเฉพาะ ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปผู้ใช้จะได้รับซอฟแวร์สำหรับโปรแกรมบีบอัดสำหรับการอ่านกลับเพื่อแสดงภาพได้ฟรี และมักจะอยู่ในรูปแบบของซอฟแวร์ไม่คุดอิสระ เช่น เป็น viewer หรือใช่วร์กบับซอฟแวร์สารสนเทศภูมิศาสตร์อื่นๆ เช่น ในรูปของ plugs-ins หรือ extension ต่างๆ

ตัวอย่างของ Plugs-ins หรือ extension ที่จะส่งมอบให้ได้สามารถใช้งานได้กับ MapInfo, ArcView, Arc/Info, AutoCAD14, AutoCAD2000, PCI, Erdas Imagine, Minnesota MapServer และอื่นๆ อีกมาก สำหรับเวลาในการคลายคืนภาพนั้นมักจะเร็วมาก เมื่อการอ่านข้อมูลจากสารคิสที่มักจะเป็นอุปสรรคต่อความเร็วในการประมวลผลนั้นคล่องไปมากเนื่องจากขนาดของข้อมูลที่เล็กลงไปหลายเท่า ดังนั้นประสิทธิภาพของการคลายภาพคืนจะขึ้นอยู่กับอัลกอริธึมที่ใช้และความเร็วของการประมวลเป็นสำคัญ

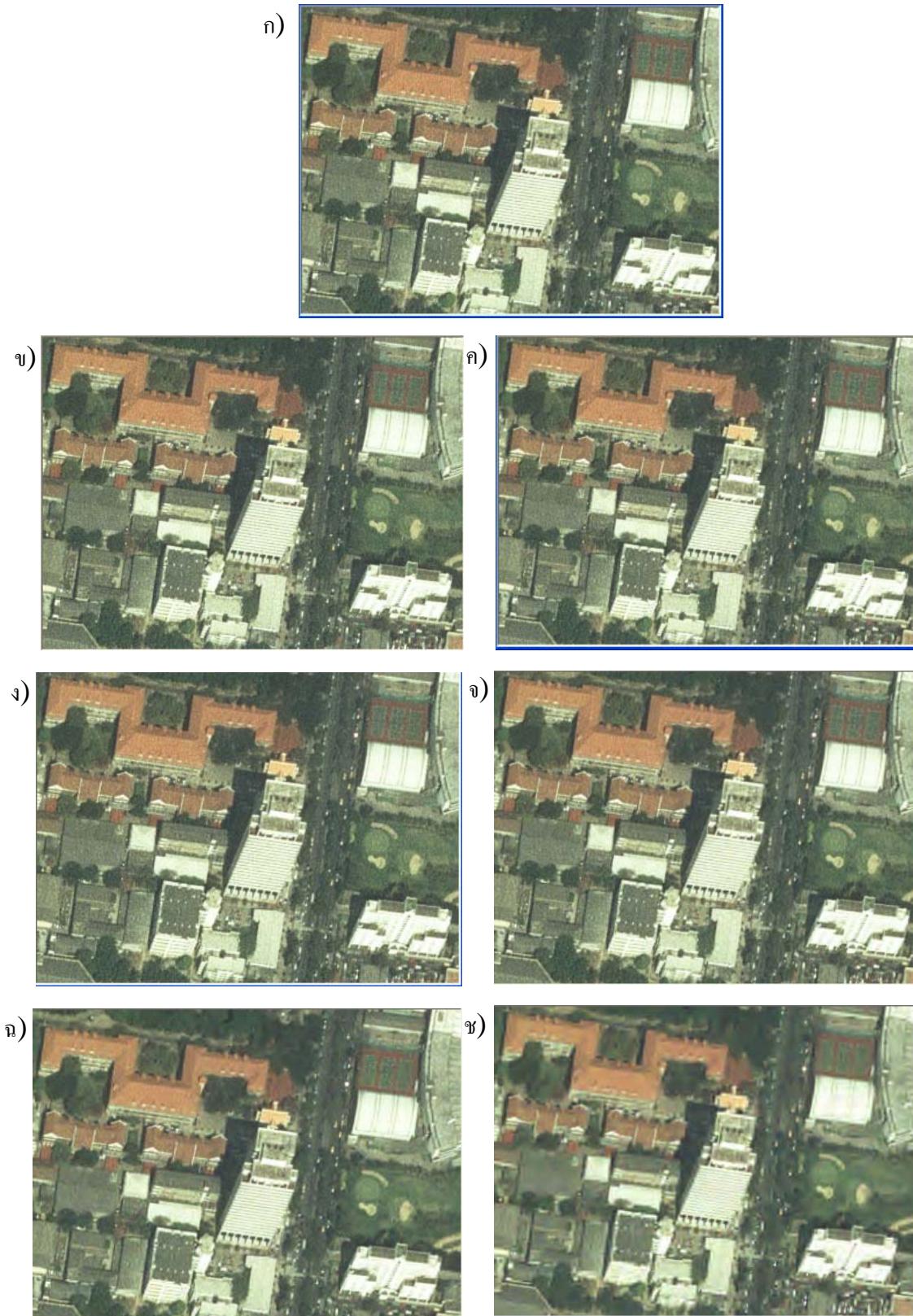
ในระบบหลักปีที่ผ่านมา ISO ได้พัฒนามาตรฐานการบีบอัด JPEG 2000 เสร็จล้วน JPEG2000 เป็น wavelet-based compressor อัลกอริธึมที่ทั้งชนิด lossless และ lossy สำหรับ lossy JPEG2000 มีความสามารถอยู่ในกลุ่มเดียวกับซอฟต์แวร์บีบอัดที่พัฒนาขึ้นและขายเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้มีกลุ่มต่างๆ โดยเฉพาะสถาบันการศึกษาได้พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อรองรับมาตรฐาน JPEG2000 และให้ใช้ได้ฟรีพร้อมรหัส เช่น JASPER, Kakadu ผู้ที่สนใจอาจนำชุดซอฟต์แวร์สำหรับสำหรับการประมวลผลด้านภูมิสารสนเทศ เช่น FWTools / gdal_translate (<http://www.maptools.org>) มาใช้เพื่อการบีบอัด การคลายคืน ตลอดจนการเปิดดูภาพได้ด้วยไม่คุด OpenEV

ในภาพต่อไปนี้แสดงผลการบีบอัดภาพถ่ายทางอากาศสี 24 บิตมาราส่วน 1:25,000 ทั้งรูป ด้วย Kakadu JPEG2000 ด้วยซอฟต์แวร์ gdal_translate ด้วยอัตราการบีบอัดต่างๆ โดยซอฟต์แวร์ gdal_translate พัฒนาบนพื้นฐานของชุดซอฟต์แวร์ GDAL (Geospatial Data Abstract Layer) และปรับเปลี่ยนอัตราการบีบอัดจากพารามิเตอร์ quality โดยคิดเทียบปริมาณข้อมูลหลังการบีบอัด กับจากทั้งหมดคือ 100% คือภาพไม่มีการบีบอัด หรือคุณภาพคงเดิม ผลปรากฏในตารางข้างล่างนี้

กรณี	Quality (q)	ปริมาณข้อมูล	อัตราการบีบอัด
ก)	ต้นฉบับ	438 MByte	1:1
ข)	q=50	214 MByte	1:2
ค)	q=25	110 MByte	1:4
ง)	q=10	44 MByte	1:10
จ)	q=5	22 MByte	1:20
ฉ)	q=2.5	11 MByte	1:40
ช)	q=1	4.4 MByte	1:100

ตาราง 7-1 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพ ปริมาณข้อมูล ที่อัตราการบีบอัดต่างๆ

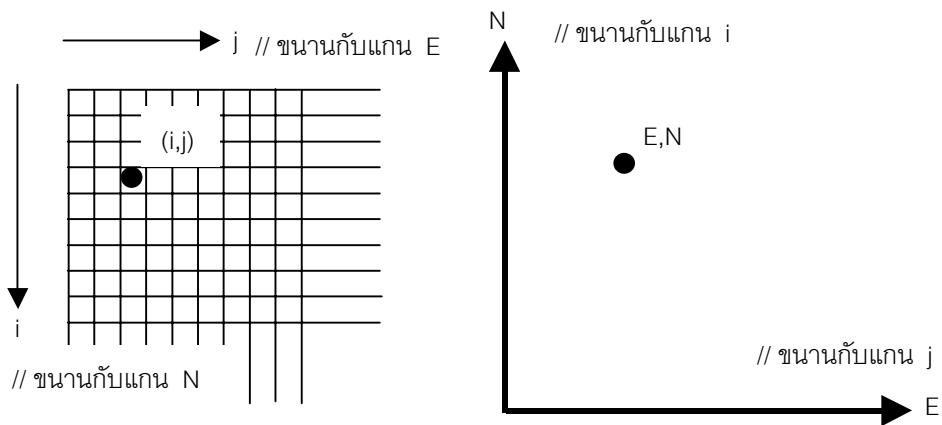
ผลการบีบอัดในแต่ละกรณีแสดงให้เห็นดังภาพต่อไปนี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าด้วยอัตราการบีบอัด 1:40 ที่ได้ภาพบีบอัดขนาดลดลงถึง 40 เท่า แต่เมื่อขยายภาพและดูด้วยตาเปล่าแล้ว เนื้อภาพมีรูปทรงเรขาคณิตและความคมชัดของฟีเจอร์ที่จะต้องรังวัดบนภาพโดยทั่วไปคงไม่ชัดรายละเอียดครบทั้งหมด สามารถใช้ทดสอบภาพถ่ายทางอากาศสีต้นฉบับได้



รูปภาพ 7-27 ผลการบีบอัดภาพด้วย JPEG2000 ด้วยอัตราการบีบอัด ก) ต้นฉบับ ข) อัตราการบีบอัด 1:2 ค) อัตราการบีบอัด 1:4
จ) อัตราการบีบอัด 1:10 ช) อัตราการบีบอัด 1:20 น) อัตราการบีบอัด 1:40 ช) อัตราการบีบอัด 1:100

7.13 การอ้างอิงค่าพิกัดโลก

การอ้างอิงค่าพิกัดโลก (Georeferencing) คือวิธีการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดบนภาพและสเตอร์ที่จุดใดๆ และค่าพิกัดของของจุดนั้นบนพื้นผิวโลก ซึ่งค่าพิกัดบนพื้นผิวโลกอาจจะเป็นระบบค่าพิกัดใดก็ได้ที่เลือกใช้ เนื่องจากข้อมูลภาพและสเตอร์จะมีการจัดเรียงเป็นแนวเส้น直ๆ แล้ว ประกอบกับการอ้างอิงค่าพิกัดโลกมักจะทำหลังจากการตัดแก้ภาพแล้ว นั่นคือกระบวนการที่ทำให้สามารถดัดตำแหน่ง ขนาดและรูปร่างบนภาพและสเตอร์ ในระดับความละเอียดที่กำหนดได้ ผลจากการตัดแก้ภาพจะได้ภาพและสเตอร์ที่มีการจัดเรียงจุดภาพสอดคล้องกันกับแกนระบบพิกัดโลก ดังรูป

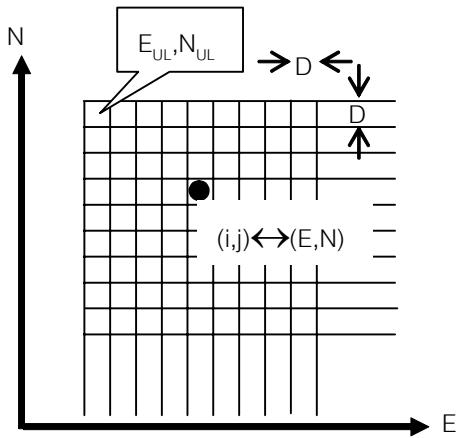


รูปภาพ 7-28 แสดงความสอดคล้องของระบบแกนภาพตัดแก้และสเตอร์และแกนพิกัดโลก

วิธีการกำหนดความสัมพันธ์เพื่อการอ้างอิงค่าพิกัดโลก โดยทั่วไปมักกำหนดความสัมพันธ์จากค่าพิกัดบนภาพแล้วนำไปคำนวนหาค่าพิกัดผิวโลก ดังนั้นอาจแบ่งวิธีการกำหนดความสัมพันธ์เป็น 3 ลักษณะ

7.12.1 การกำหนดค่าพิกัดจุดอ้างอิงหนึ่งจุดและความละเอียดจุดภาพ

มักจะเป็นการกำหนดค่าพิกัดโลกของจุดภาพด้านซ้ายบนสุดของภาพ (E_{UL}, N_{UL}) และกำหนดให้ความละเอียดของจุดภาพที่บนผิวโลกเป็น D ความละเอียดของจุดภาพที่บนพื้นผิวโลกนิยมเรียกว่า Ground Sampling Distance (GSD)



รูปภาพ 7-29 การกำหนดการอ้างอิงพิกัดโลกโดยการระบบจุดภาพข้างบนสุดและความละเอียดของจุดภาพ

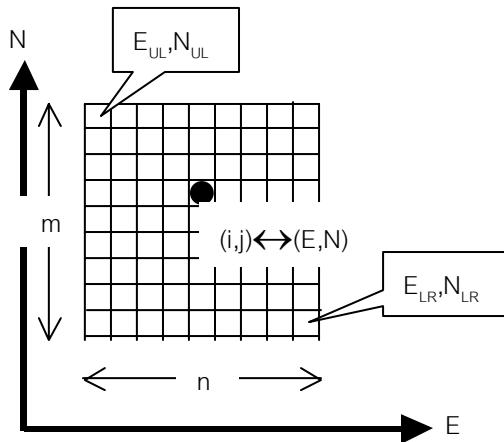
ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\begin{aligned} E &= E_{UL} + D \cdot j \\ N &= N_{UL} - D \cdot i \end{aligned} \quad \text{สมการ 7-4}$$

โดยที่ (E, N) คือค่าพิกัดโลกของจุดใดๆของจุดที่ปีกกระบวนการภาพและต่อไปเป็นค่าพิกัด (I, j)

7.12.2 การกำหนดค่าพิกัดจุดอ้างอิงสองจุดและขนาดของภาพ

เป็นการกำหนดค่าพิกัดโลกของจุดภาพด้านข้างบนสุดของภาพ(E_{UL}, N_{UL}) และค่าพิกัดโลกของจุดภาพด้านขวาล่างสุดของภาพ(E_{LR}, N_{LR}) พร้อมกับขนาดของภาพที่มีจำนวนจุดภาพ m แถวและ n คอลัมน์ดังภาพ



รูปภาพ 7-30 การกำหนดการอ้างอิงพิกัดโลกโดยกำหนดจุดภาพข้างบนสุดและจุดภาพขวาล่างสุด

ซึ่งสามารถคำนวณหาความละเมียดของจุดภาพที่บันผิวโลก (D) ได้ การคำนวนทำได้ทั้งจากแนวอนและแนวตั้ง โดยทั่วไปเรสเตอร์จะมีขั้นตอนดังภาพเท่ากัน นั้นคือ

$$D = \frac{(E_{UL} - E_{LR})}{n}$$

สมการ 7-5

$$D = \frac{(N_{UL} - N_{LR})}{m}$$

7.12.3 การใช้การแปลงค่าพิกัดชนิดแอฟไฟฟ์

การใช้การแปลงค่าพิกัดแอฟไฟฟ์เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ระบุความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพดิจิทัลกับพิกัดโลกได้ โดยที่การแปลงพิกัดชนิดแอฟไฟฟ์จะมีความมีส่วนร่วงในการกำหนดความสัมพันธ์ อย่าง คือ การเลื่อนศูนย์กำเนิด 2 พารามิเตอร์ การมีมาตราส่วนในทั้งสองแกน 2 พารามิเตอร์ การทำมุมหมุนต่อ กัน 1 พารามิเตอร์ และการบิดเบี้ยวเล็กน้อยของมุมพิกัดจาก อีก 1 พารามิเตอร์

แต่อย่างไรก็ตาม ใน การประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์แอฟไฟฟ์ จะใช้จำกัดใช้เฉพาะแต่ความสัมพันธ์ที่เป็นการกำหนดค่าพิกัดโลกของจุดภาพด้านข้างบนสุดของภาพ การเลื่อนศูนย์กำเนิด 2 พารามิเตอร์ การมีมาตราส่วนในทั้งสองแกน 2 พารามิเตอร์ เท่านั้น เนื่องจากการข้างอยู่พิกัดโลกมักจะทำหลังจากกระบวนการตัดแก้ภาพ แล้ว ซึ่งในกระบวนการตัดกล่าวจะมีขั้นตอนในการสูญเสีย เพื่อสร้างเรสเตอร์ขึ้นมาใหม่ โดยที่เรสเตอร์ที่ได้จะมีความสอดคล้องกับระบบพิกัดโลก กล่าวคือแกนทางด้านคล้มน์จะขนานไปกับแกน X หรือ ตะวันออก (Easting) และแกนด้านขวาจะสอดคล้องกับค่าพิกัดทางแกน Y หรือค่าพิกัดเหนือ (Northing) โดยที่ทิศทางการเพิ่มของค่าพิกัดจะตรงข้ามกัน เนื่องจากเป็นความต่างของระบบพิกัดภาพดิจิทัลกับระบบพิกัดทางคณิตศาสตร์

ความสัมพันธ์ชนิดแอฟไฟฟ์จะเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลที่มีชื่อเดียวกับภาพแต่มีนามสกุลที่เรียกว่าเป็น World File ด้วยอย่างเช่นในตารางข้างล่างนี้

มาตรฐานการจัดเก็บภาพเรสเตอร์	นามสกุลแฟ้มภาพ	นามสกุลของ World File
TIFF	.tif	.tfw
JPEG	.jpg	.jgw
Band Interleave by Line (raw)	.bil	.blw

ตาราง 7-7 แสดงนามสกุลของแฟ้มภาพและนามสกุลของ World File ที่พบบ่อย

ในภาพข้างล่างนี้เป็นตัวอย่างของการกำหนดความสัมพันธ์ชนิดแอกฟ์ไฟน์ของแฟ้มข้อมูลที่ชื่อ toporec.bil

<u>toporec.bilw :</u>
5
0.0
0.0
-5
728187.820000
1585853.890000

จากข้อมูลแอกฟ์ไฟน์ในแฟ้ม toporec.bilw อาจพิจารณาได้ว่าค่า GSD ของภาพมีขนาด 5 เมตร เนื่องจาก ปรากฏเลข “5” และ “-5” โดยภาพมีจุดกำหนดทางด้านแกนระบะตะวันออกเป็น 728187.820 เมตร และจุดกำหนด แกนระบะเหนือเป็น 1,585,853.890 เมตร

7.13 คำถ้ามท้ายบท

 ภาพถ่ายทางอากาศภาพหนึ่งถูกสแกนเป็นภาพระดับสีเทา 8 bit และปรากฏว่ามี Histogram ที่มีค่าสถิติ min=45 max=198

1. จงเสนอความคิดที่จะปรับปูรุคุณภาพโดยการใช้ linear histogram stretching
2. จงเขียน transformation function ในรูปของกราฟพิก
3. จงเขียนสมการคณิตศาสตร์สำหรับ transformation function
4. ทดลองจน LUT ของ function ดังกล่าว
5. ข้อมูลภาพที่ได้ทำการดัดแก้และทำการข้างอิงตำแหน่งบนผิวโลกแล้วประกอบแรสเตอร์ toporec.bil และเพิ่มประกอบ toporec.hdr และ toporec.bilw ดังภาพ โดยที่ toporec.hdr คือส่วนหัวที่บรรยายลักษณะภาพ ส่วน toporec.bilw คือ affine transformation parameter เพื่อใช้ในการข้างอิงตำแหน่ง
หมายเหตุ เป็นระบบพิกัด UTM ที่มีค่า False Easting คือ 500,000 เมตร ค่า False Northing เป็น 0 เมตร
จะแสดงวิธีหาค่าพิกัดโดยบนพื้นดิน โดยที่ตำแหน่งบนภาพดิจิทัลรัดได้ดังนี้ row = 455.98 จุดภาพ และ column = 105.54 จุดภาพ

toporec.hdr :

```
nrows 2019
ncols 2179
nbands 1
nbits 8
layout bil
skipbytes 0
```

toporec.bilw :

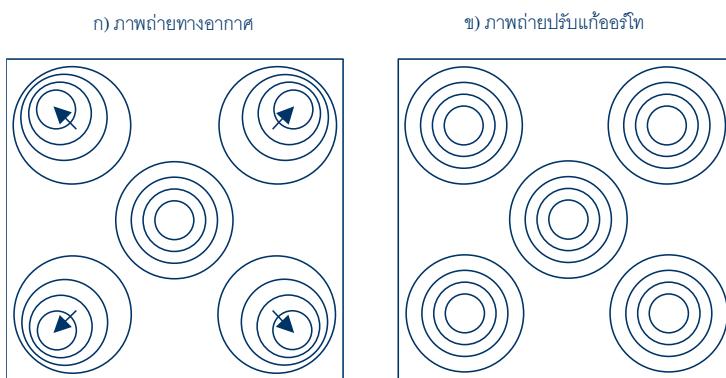
```
5
0.0
0.0
-5
728187.820000
1585853.890000
```

8 แผนที่ภาพออร์โท

8.1 ภาพดัดแก้ออร์โท

แผนที่ภาพเป็นรูปแบบหนึ่งของแผนที่มีการบันทึกกลักษณ์ถึงปัจจุบันภูมิประเทศ รายละเอียดต่างๆ ที่ได้จากการบันทึกภาพจะไม่ตรงกับความจริงในโลก แต่สามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับแผนที่ลายเส้นทั่วไปในการหาพิกัด วัดขนาด และรูปร่างของวัตถุ แผนที่ภาพสามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับแผนที่ลายเส้นทั่วไปในการหาพิกัด วัดขนาด และรูปร่างของวัตถุ แผนที่รูปถ่ายได้จากการโมเสค (Mosaic) รูปถ่ายทางอากาศที่ได้ทำการขัดความคลาดเคลื่อนและขยายตั้งจากลงบนพื้นผิว (Orthorectify) ภาพถ่ายทางอากาศที่ผ่านกระบวนการนี้เรียกว่าภาพดัดแก้ออร์โท (Orthorectified Photo หรือ Orthophoto)

ภาพถ่ายทางอากาศมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดภาพ (relief displacement) เนื่องมาจากการที่บันทึกได้จากการถ่ายภาพทางอากาศเป็นการฉายขนาดผ่านศูนย์ (perspective projection) ประกอบกับการวางตัวของกล้อง (camera orientation) และความสูงต่ำของพื้นผิวภูมิประเทศ (topography relief) ความคลาดเคลื่อนนี้สามารถจำลองแบบได้หากทราบพารามิเตอร์ทั้งที่เป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนโดยเฉพาะความสูงต่ำของภูมิประเทศจะสามารถนำมาใช้ในการคำนวนปรับแก้ได้ในรูปแบบของแบบจำลองระดับสูง (Digital Elevation Model)

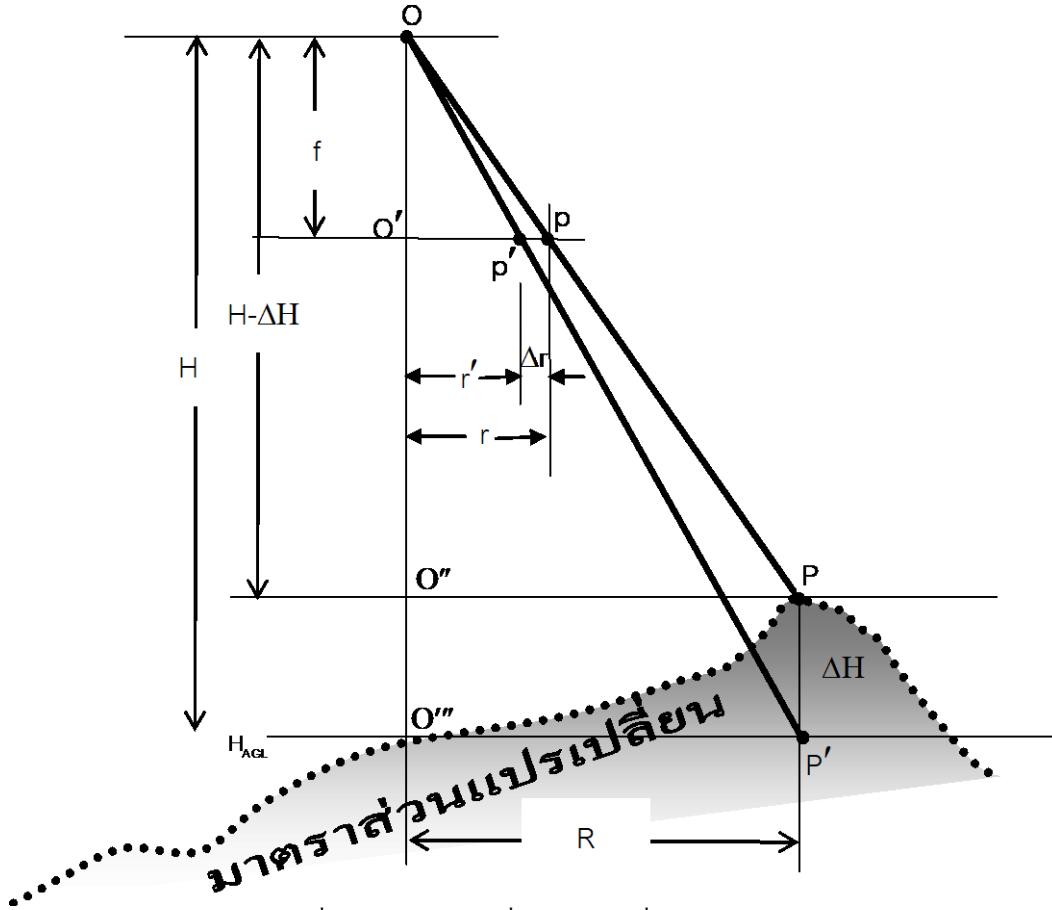


รูปภาพ 8-1 ก) แสดงภูมิประเทศ “ภูเขา” และความคลาดเคลื่อนที่ปรากฏ ข) ผลจากการตัดแก้ออร์โท

ขนาดของความคลาดเคลื่อนของจุดภาพเนื่องจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดภาพที่พิจารณาในระยะห่างจากศูนย์กลางภาพ และสัดส่วนของความสูงต่ำไปจากความสูงภูมิประเทศโดยเฉลี่ย ดังความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้แล้ว

$$\Delta r = \frac{r \cdot \Delta H}{(H - \Delta H)} \quad \text{สมการ 8-1}$$

ภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกเมื่อพิจารณาส่วนย่ออย่างบันภาพ จะเห็นได้ว่าอาจมีมาตราส่วนที่เปลี่ยนไป ความคลาดเคลื่อนและมาตราส่วนจะมีขนาดเปลี่ยนไปตามกัน ขึ้นเนื่องมาจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ ดังภาพ



รูปภาพ 8-2 การเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน เนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศ

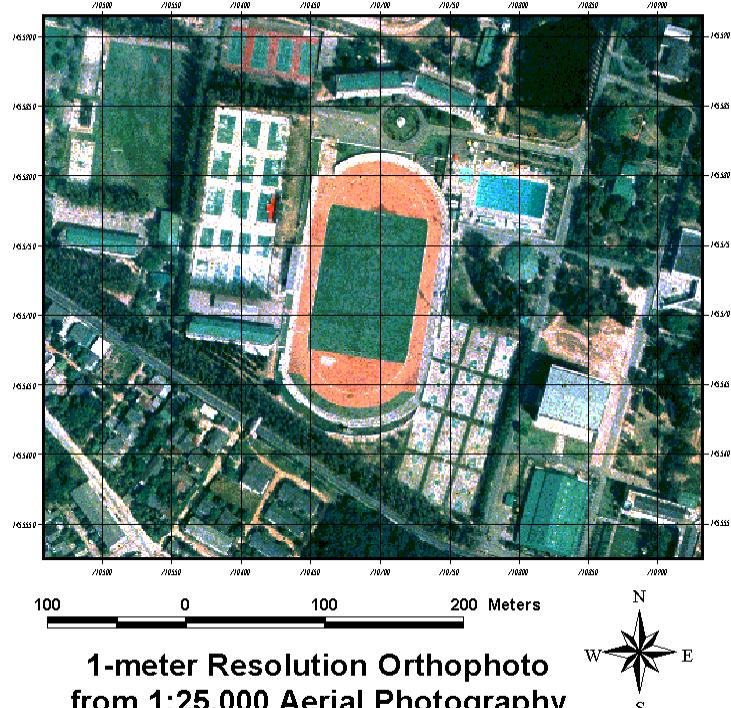
การขยายกลับที่ทำให้ภาพที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นภาพที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนนี้เรียกว่า การดัดแก้ภาพออร์ทิค (Orthorectification) ซึ่งทำให้ตำแหน่ง ขนาดรูปและรูปร่างของวัตถุและภูมิประเทศที่ปรากฏบนภาพที่ดัดแก้ได้จะมีความถูกต้องเช่นเดียวกับแผนที่ที่ใช้งานทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามการที่จะได้แผนที่ภาพที่เที่ยงเท่าได้กับแผนที่ที่มาตราส่วนได้น้อยกว่าเดิม จำเป็นต้องมีขั้นตอนที่ต้องดำเนินการบันทึกรายละเอียดบนภาพไว้ จำกัด ความเที่ยงตรงของตำแหน่งจุดภาพของก็จำกัดเช่นกัน

ภาพถ่ายทางอากาศจะบันทึกสิ่งที่ปกคลุมผิวโลกทั้งหมดลงบนภาพ และภาพของสิ่งปกคลุมก็จะถูกถ่ายทอดลงบนภาพถ่ายดัดแก้ก่อนรีติและแทนที่ภาพในที่สุด ดังนั้นการผลิตแผนที่ภาพจะทำให้ได้ภาพของสภาพทางกายภาพของภูมิประเทศ ณ เวลาที่บินถ่ายภาพ ไม่จำเป็นต้องมีการแปลความหมายและดึงข้อมูลจุดลายเส้นหรือพื้นที่ออกจากภาพ ดังนั้นแผนที่จึงสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย ข้อเสียยังคงมีอยู่ก็คือการใช้เครื่องมือและวิธีที่มีหลักขั้นตอน แต่ในปัจจุบันสามารถใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพมาใช้ ซึ่งเรียกว่า Digital Photogrammetry หรือ Softcopy Photogrammetry

Digital Photogrammetry หรือ Softcopy Photogrammetry ซึ่งเป็นเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และภาษาประมวลผลสารสนเทศ การผลิตแผนที่ภาพจากภาพถ่ายออร์ทิคกลังได้รับความนิยมและแพร่หลายที่สุดในงานรังวดด้วยภาพถ่ายในปัจจุบัน ด้วยพัฒนาการความก้าวหน้าที่รวดเร็วข้างหน้าของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์จะส่งผล

ทำให้วิวัฒนาการการรังวัดด้วยภาพถ่ายดิจิทัลนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วทั้งเครื่องมือ ความเร็วในการประมวลผลและวิธีการ

ตัวอย่างของแผนที่ภาพ ในภาพข้างล่างนี้



รูปภาพ 8-3 แผนที่ภาพออร์โธฟิล์ม

8.1.1 ภาพออร์โทแท็จริง (True Orthophoto)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการดัดแก้ภาพเพื่อผลิตภาพออร์โททั้งเป็นการดัดแก้เฉพาะความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความสูงต่างของภูมิประเทศเท่านั้น ความคลาดเคลื่อนของสิ่งปลูกสร้าง อาคาร บ้านเรือนที่มีความสูงและ平坦เป็น “ภาพวัตถุเฉียง” จะยังไม่ได้รับการดัดแก้ใดๆ ดังนั้นสิ่งปลูกสร้างใดๆ ตึกรีวิวอาคารสูงที่ปรากฏบนภาพถ่ายทางอากาศและยังห่างออกไปจากศูนย์กลางภาพมาก จะยังมีโอกาสที่จะปรากฏภาพเป็น “ภาพของวัตถุเฉียง” มากขึ้น ภาพของวัตถุเฉียงจะไม่ได้รับการปรับแก้ใดๆ ดังตัวอย่าง บางครั้งเราเรียกภาพดัดแก้ออร์โทที่ได้แก้ไขความคลาดเคลื่อนของจุดภาพเนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศเพียงอย่างเดียวว่า “ภาพออร์โทที่ระดับพื้นดิน Ground Ortho”



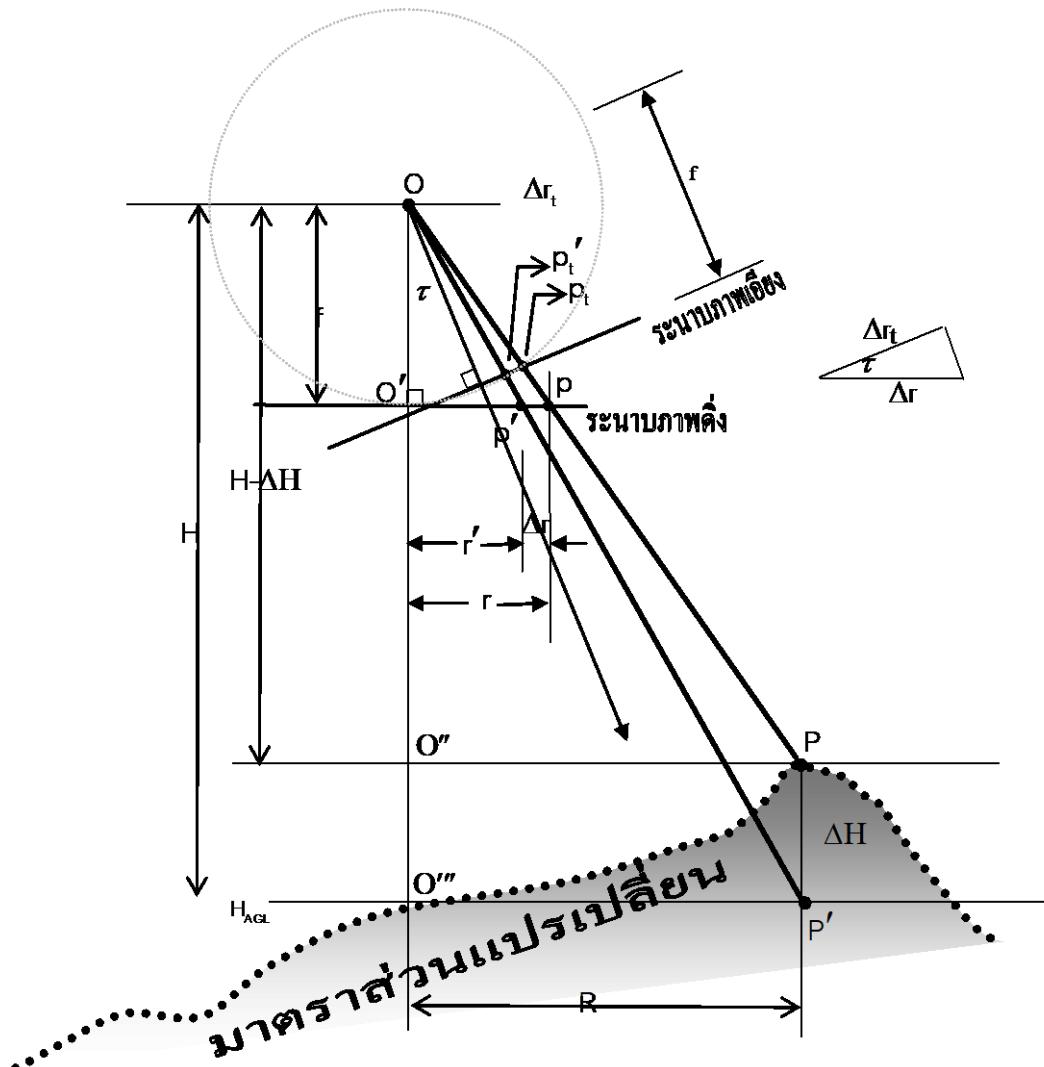
รูปภาพที่ 8-4 แสดงภาพอาคารสูงขึ้นแสดงเป็น “ภาพเดือน蛾” บนภาพดัดแก้ออร์โทระดับพื้นดิน (ซ้าย) และภาพของอาคารสูงที่ให้เห็นสภาพหลังคาที่เป็นตัวแทนรูปอาคารบนภาพดัดแก้ออร์โทแท็จริง (ขวา)

การที่จะปรับแก้ภาพของวัตถุหรืออาคารตึกสูงที่ยัง平坦มีความคลาดเคลื่อนอยู่ จะเป็นต้องมีข้อมูลแบบจำลองของตึก อาคารหรือวัตถุที่มีความสูง ข้อมูลที่จำเป็นดังกล่าวคือแบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) ของวัตถุนั้นๆ ปัจจุบัน DSM สามารถสร้างได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำจากเทคโนโลยีการรังวัดจุดระดับความหนาแน่นและความละเอียดถูกต้องสูงไลดา(radar) หรืออาจสร้างได้จากการรังวัดบนภาพถ่ายทางอากาศสเตอริโอด้วยใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการจับคู่ภาพ (Image Matching) นอกจากนี้หากทราบแบบจำลองพื้นผิวของตึกแล้วเมื่อตัดแก้ไปแล้วจะเห็นว่าในภาพในส่วนที่ “ภาพเฉียง” ของตึกอาจบดบังอยู่ส่วนของภาพวัตถุอื่นๆอยู่ ดังนั้นจะต้องหาภาพที่ถูกบังจากภาพในมุมอื่นๆมาทดแทน เช่น ส่วนของภาพจากภาพก่อนหรือหลังในแนวบินเดียวกัน หรือ การนำภาพมาจากการซ้อนในแนวบินถัดไป ในระบบการบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลในบางลักษณะ มีการบินบันทึกภาพชนิด In-track Stereo แบบ Push-broom พร้อมกันถึง 3 กล้องในมุมเอียงต่างๆกัน เช่น กล้องถ่ายภาพทางอากาศดิจิทัลของ Leica ADS-40 จะมีการบันทึกภาพ “ไปข้างหลัง-ดึง-ไปข้างหน้า” ในแนวบินที่บินผ่านที่เรียกว่าภาพ aft-nadir-fore ผลที่ได้จะทำให้ได้ข้อมูลภาพมีส่วนซ้อน 100% และได้ภาพส่วนซ้อนในแนวมุมต่างๆมากขึ้น ที่สามารถนำมาใช้ในรังวัดแบบจำลองพื้นผิวดูดตามการดัดแก้ภาพตลอดจนซ้อมแซมส่วนภาพที่ขาดหายไปได้ ภาพดัดแก้ออร์โทที่คำนึงถึงแบบจำลองพื้นผิวของอาคารสิ่งปลูกสร้างและเป็นภาพการฉายของภูมิประเทศโดยสมมูลนี้เรียกว่า ภาพออร์โทแท็จริง (True Orthophoto)

8.1.2 ความคลาดเคลื่อนของภาพถ่ายเอียง

ในความเป็นจริงภาพถ่ายทางอากาศจะมีการเอียงอยู่บ้างเล็กน้อย รวมถึงภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายในแนวเฉียงที่เรียกว่าภาพเอียง (tilted photographs) และว่าภาพถ่ายเอียงสำหรับภาพถ่ายทางอากาศจะมีที่ใช้น้อยแต่ในปัจจุบันการทำแผนที่จากอากาศ (Mapping from Space) มีการใช้มากขึ้น เช่น ภาพจากดาวเทียม Terra/ASTER, SPOT-5, ALOS/Prism รวมทั้งภาพจากดาวเทียม Theos ของประเทศไทย ที่มีความสามารถบันทึกภาพในรูปแบบคู่ภาพสามมิติ (stereo mode) ระบบการบันทึกภาพจากดาวเทียมเหล่านี้อาจมีการเอียงกล้องเพื่อบันทึกเบ้าหมายเพื่อให้ได้ภาพตามวัณเวลาที่ต้องการ หากดาวเทียมยังไม่สามารถโคจรผ่านหนึ่งเดือน เบ้าหมายโดยตรงได้ หรือในบางระบบดาวเทียมก็ติดตั้งกล้องไว้พร้อมกันที่เดียวมากกว่า 2 กล้องในมุมมองสูงเบ้าหมายเพื่อกันที่แตกต่างกันสำหรับการบันทึกภาพ stereovision โดยเฉพาะ

ได้กรณีของภาพถ่ายเอียง แสดงให้เห็นในภาพต่อไปนี้ ความคลาดเคลื่อนของจุดภาพบนภาพถ่ายเอียง ที่เกิดจากความสูงต่างในภาพคือ ระยะ $p_1 p'_1$ หรือระยะ Δr_t เมื่อเทียบกับ ความคลาดเคลื่อนของจุดภาพบนภาพถ่ายดิจิทัลที่อาจได้จากการล้องเดียวกันเป็นระยะ pp' หรือระยะ Δr



รูปภาพ 8-5 การเปลี่ยนแปลงมาตราส่วน เนื่องจากความสูงต่างของภูมิประเทศ

เมื่อพิจารณาประกอบกับเรขาคณิตกรวยที่เป็นกรวยผ่านศูนย์ เมื่อกล้องเอียงเป็นมุม τ ที่ส่งผลทำให้ความคลาดเคลื่อนจุดภาพจาก Δr เปลี่ยนไปเป็น Δr_t

ดังนั้นจะเห็นว่าการที่กล้องเอียงอาจทำให้ความคลาดเคลื่อน Δr ลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุมเอียง τ ของกล้อง จากที่ได้ว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเอียงกล้อง Δr_t คำนวนจากความคลาดเคลื่อนเมื่อภาพถ่ายในแนวตั้ง Δr

8.1.3 การผลิตภาพดัดแก้ของร่องจากภาพถ่ายทางอากาศ

การที่จะพิจารณาว่าภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วนใดสามารถใช้ทำแผนที่ได้ในมาตราส่วนใด นอกจากจะพิจารณาความละเอียดถูกต้องด้านตำแหน่งทางราบและทางดิ่งที่สามารถศึกษาบนภาพได้แล้ว ยังต้องอาศัยประสบการณ์ในทางปฏิบัติด้วยว่าจะสามารถทำได้จริงหรือไม่ เนื่องจากการสร้างแผนที่ภาพจากภาพถ่ายทางอากาศเป็นกระบวนการรายขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้ล้วนมีผลต่อความละเอียดถูกต้องของแผนที่ภาพทั้งสิ้น

-ต้นฉบับฟิล์มเนกานาตีฟหรือไดอะพอซิติฟบันทึกภาพมามีความคมชัด ฟิล์มนี้คุณสมบัติทางเรขาคณิตที่ดีที่สุด

-การวัดสองกล้องมีความสมบูรณ์

-กระบวนการรังวัดและคำนวนการวัดวางแผนภายใน (Interior Orientation) ทำอย่างประณีต

-กระบวนการรังวัดและคำนวนเพื่อสร้างค่ากราดวางแผนภายนอก (Exterior Orientation) โดยการใช้เทคนิคทำข่ายสามเหลี่ยมทำอย่างถูกต้อง มีจำนวนจุดผ่าน จุดโดยยึด จุดควบคุมภาคพื้นดินอย่างพอเพียง ค่าสังเกตต่างๆ ได้ทำการรังวัดให้มีความละเอียดถูกต้อง

-การวัดแบบจำลองระดับทำได้อย่างหนาแน่นและแม่นยำ จุดระดับทั้งหมดปราศจากรอยบุบพื้นผิวภูมิประเทศแท้จริง

หากว่าต้องการแผนที่ภาพมาตราส่วนใหญ่ที่สุดเท่าที่เป็นได้ทางทฤษฎีก็ต้องรักษาความผิดพลาดในแต่ละขั้นตอนให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ความถูกต้องของภาพถ่ายของร่องทางตำแหน่งกำหนดไว้ที่ 0.1 หรือ 0.2 มิลลิเมตร ที่มาตราส่วนของผลลัพธ์ท้ายที่สุด

สำหรับในทางปฏิบัติในปัจจุบันเราที่พบบ่อยคือการทำแผนที่ภาพมาตราส่วน 1:1,000 จากภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:6,000 และการทำแผนที่ภาพมาตราส่วน 1:4,000 จากภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:15,000 ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นแผนที่มีความถูกต้อง เช่นเดียวกันกับแผนที่มาตราส่วนนั้น

8.2 สถานีงานรังวัดด้วยภาพดิจิทัล

สถานีรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetric Workstation) หรือนิยมเรียกย่อๆว่า DPW คือระบบคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง ที่สามารถตอบสนองต่อภารกิจ การสำรวจด้วยภาพดิจิทัล เพื่อให้ได้มาซึ่งตำแหน่ง ขนาด รูปร่าง ตลอดจนพื้นผิว (texture) ของวัตถุ เพื่อนำมาจัดเก็บ นำไปประมวลผลร่วมกับระบบทำแผนที่ ระบบภูมิสารสนเทศ หรือระบบสารสนเทศอื่นๆ

DPW อาจประกอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางความเร็วสูง หน่วยความจำขนาดใหญ่ เช่นอาจจะมีขนาดใหญ่กว่า 1 吉ไบต์ หน่วยจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่หรือเข้ามารอง托กับหน่วยจัดเก็บข้อมูลผ่านเครือข่าย ระบบมีกราฟฟิกส์การ์ดสมรรถนะสูงโดยสามารถแสดงภาพด้วย Refresh Rate ตั้งแต่ 100 Hz ขึ้นไป จอกาหนดความคมชัดและแสดงสีธรรมชาติได้ครบถ้วน ระบบการมองเห็นจะต้องมีขีดความสามารถในการแสดงภาพสามมิติด้วยวิธีสลับภาพด้วยเทคนิคต่างๆที่กล่าวมาแล้วโดยการใช้อุปกรณ์ช่วยในการสร้างภาพและมองเห็นสามมิติ

นอกจากนี้ DPW ยังต้องมีซอฟต์แวร์สำหรับงาน Digital Photogrammetry หรือ Softcopy Photogrammetry กล่าวคือเป็นซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่ชั้นประกอบด้วยโมดูลย่อยที่สามารถช่วยดูภาพและรังวัดจุดต่างๆเพื่อพิจารณาการรังวัดองค์ประกอบการจัดภาพภายใน (Interior Orientation) โมดูลช่วยดูหดยาวภาพที่มีส่วนซ้อนกันเพื่อการรังวัดจุดภาพและการรังวัดขยายสามเหลี่ยม ไปจนถึงการคำนวณปรับแก้ขยายสามเหลี่ยมเพื่อหาการจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation) ซอฟต์แวร์ช่วยสร้างและแสดงแบบจำลองสามมิติจากคู่ภาพสำหรับการรังวัดพิกัดบนแบบจำลองสามมิติทั้งชนิดใช้มือและรังวัดพิกัดในสามมิติในมิติ การมองเห็นสามมิติอาจใช้เครื่องช่วยมองสามมิติได้แก่ แว่น Shuttle-Glasses หรือ Polarized Screen นอกจากนี้บางระบบยังมีซอฟต์แวร์โมดูลช่วยสร้างแบบจำลองระดับแบบอัตโนมัติและซอฟต์แวร์ช่วยการตรวจสอบคุณภาพและแก้ไขแบบจำลองระดับ อีกโมดูลหนึ่งที่สำคัญขาดเสียไม่ได้คือ ซอฟต์แวร์รังวัดภาพถ่าย ซอฟต์แวร์โมดูลใช้ต่อภาพไม่เสียภาพให้ภาพถ่ายทางอากาศเป็นผืนใหญ่และอาจตัดให้เป็นร่องรอยตามที่ผู้ใช้ต้องการ การรังวัดเพื่อทำแผนที่จาก DPW ก็อาจจะมีซอฟต์แวร์โมดูลที่ทำหน้าติดต่อกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์หรือคอมพิวเตอร์ช่วยงานเขียนแบบต่างๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเขียนแผนที่สามมิติจากแบบจำลองสามมิติแล้วให้ผลลัพธ์เวกเตอร์ในสามมิติเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์หรือคอมพิวเตอร์ช่วยงานเขียนแบบที่คุ้นเคยได้โดยตรง



ก) ImageStation

โดย Z/I Imaging

<http://www.ziimaging.com>

ข) Delta Photogrammetric Workstation

State Scientific Production Enterprise «GeoSystem»

<http://www.vingeo.com>

รูปภาพ 8-6 ตัวอย่าง Digital Photogrammetric Workstation หรือ DPW

นอกจากนี้เครื่องมือที่เป็นองค์ประกอบหลักสำคัญที่จะทำให้ได้มาซึ่งภาพถ่ายทางอากาศดิจิทัลสำหรับสถานีงานรังวัดด้วยภาพคือ เครื่องสแกนภาพถ่ายสำหรับงานสำรวจด้วยภาพ (Photogrammetric Scanner) และอย่างไรก็ตามสแกนเนอร์ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงไม่จำเป็นต้องมีประจำทุกสถานีงาน

8.3 การผลิตแผนที่ภาคถ่ายօร์บีตในต่างประเทศ

ในต่างประเทศซึ่งมีภูมิประเทศและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไป โดยเฉพาะข้อจำกัดด้านงบประมาณและเวลาในการผลิต โดยทั่วไปการผลิตแผนที่ภาคจากภาคถ่ายทางอากาศที่มีมาตราส่วนเล็กกว่าจะทำให้ประหยัดงบประมาณและใช้เวลาในการผลิตสั้นลง ทั้งนี้เนื่องจากภาคถ่ายทางอากาศมาตราส่วนเล็กจะครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างขวางกว่า ซึ่งจะทำให้จำนวนภาพลดลงอีกด้วย

Ackermann แห่ง University of Stuttgart กล่าวว่า โดยทั่วไปการขยายภาคถ่ายทางอากาศให้อยู่ในระนาบภาคตัดแก้ อีกหนึ่งจุดอยู่เพียงสามถึงสี่เท่า (สูงสุดไม่เกิน 6 เท่า) เมื่อภาคตัดแก้ของอีกหนึ่งที่พิจารณาอยู่ในช่วงมาตราส่วน 1:1,000 ถึง 1:10,000(Ackermann 1976)

ขณะที่ Hobbie ได้ศึกษาการผลิตแผนที่ภาคօร์บีตจากภาคถ่ายทางอากาศที่มาตราส่วนต่างๆ และได้สรุปให้เห็นถึงมาตราส่วนของแผนที่ภาคที่อาจผลิตได้จากการใช้ภาคถ่ายทางอากาศมาตราส่วนต่างๆ ดังปรากฏ ในตารางด้านล่าง (Hobtie 1974)

มาตราส่วนภาคถ่ายօร์บีต	มาตราส่วนภาคถ่ายทางอากาศ
1,000	3,700 to 4,300
2,500	7,200 to 1,0500
5,000	13,000 to 18,000
10,000	23,000 to 30,000
25,000	52,000 to 65,000
50,000	100,000 to 130,000
100,000	200,000 to 250,000

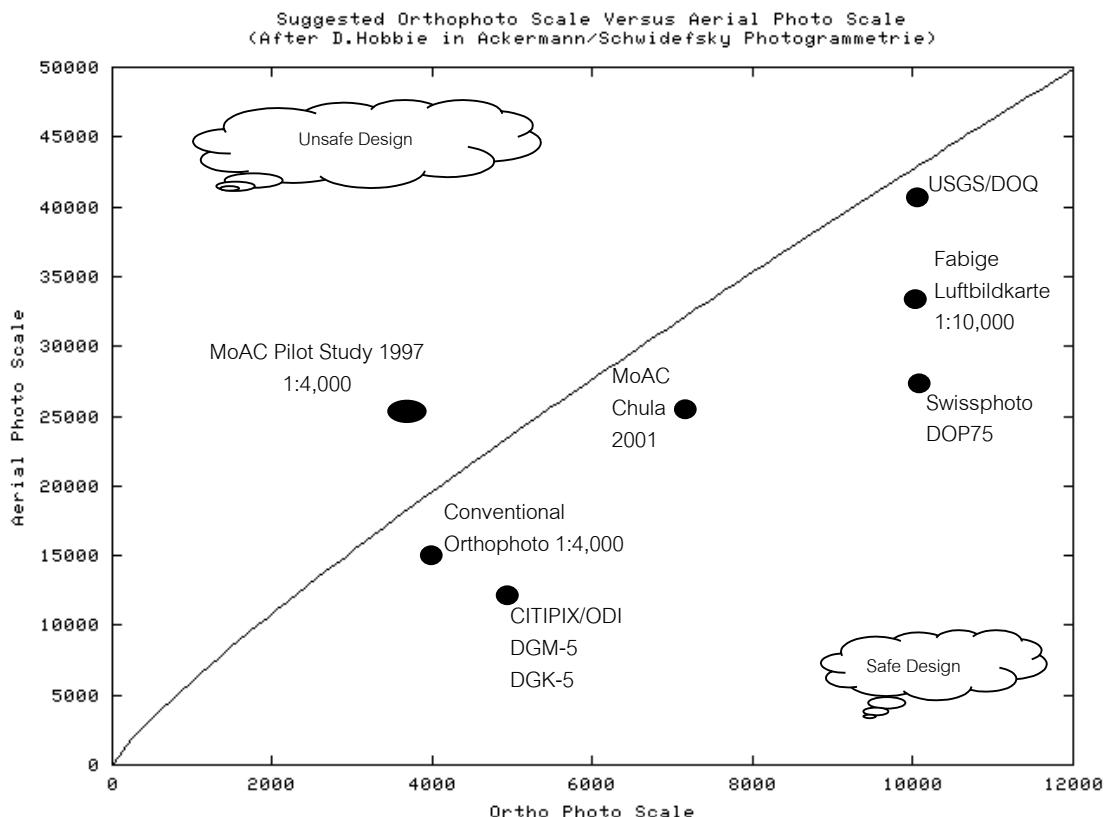
ตาราง 8-1 แสดงความสัมพันธ์ มาตราส่วนภาคถ่ายօร์บีตที่ผลิตได้จากภาคถ่ายทางอากาศที่มาตราส่วนต่างๆ

นอกจากนั้น Hobtie ยังได้พยายามหาค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ของมาตราส่วนระหว่างมาตราส่วนภาคถ่ายօร์บีตและมาตราส่วนภาคถ่ายทางอากาศ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$m_B = 17 m_K^{0.85} \quad \text{สมการ 8-2}$$

โดยที่ m_B คือมาตราส่วนเฉลี่ยของภาคถ่ายทางอากาศที่ต้องใช้ และ m_K คือมาตราส่วนของแผนที่เฉลี่ยที่ควรจะผลิตได้

จากการรวมโครงการต่างๆ และผลิตภัณฑ์แผนที่ภาคจากหน่วยงานแผนที่แห่งชาติจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก การผลิตแผนที่ภาคօร์บีตที่รวมรวมมาทั้งหมดนี้ เป็นการผลิตด้วยกรรมวิธีทาง digital photogrammetry ทั้งสิ้น จากตารางข้างล่างนี้ สามารถประมาณนำเข้าภาคถ่ายทางอากาศและผลผลิตที่ได้ดังปรากฏในภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนของภาคถ่ายทางอากาศและมาตราส่วนของแผนที่ที่ควรจะผลิตได้ พิริ่งกับการซ้อนทับของภาพความสัมพันธ์เฉลี่ยในลักษณะเดียวกันนี้ตามที่ Hobtie ได้ศึกษาไว้จริงและรวมไว้



รูปภาพ 8-7 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศที่ต้องใช้และมาตราส่วนของแผนที่ที่ควรจะผลิตได้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศที่ต้องใช้และมาตราส่วนของแผนที่ภาพօร์โธที่ควรจะผลิตได้ จะเห็นได้ว่าหากประสบการณ์จากต่างประเทศส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะทำแผนที่ภาพถ่ายօร์โธจากภาพถ่ายทางอากาศที่มีมาตราส่วนใหญ่กว่าค่าเฉลี่ย ซึ่งแสดงด้วยจุดที่อยู่เหนือเส้นที่ตั้งไว้ ซึ่งจะสามารถให้ผลลัพธ์ในเรื่องความถูกต้องทางตำแหน่งและความคมชัดอยู่ในเกณฑ์สามารถทำได้ง่ายในทางปฏิบัติ

สำหรับการทำแผนที่ภาพถ่ายօร์โธจากภาพถ่ายทางอากาศที่มีมาตราส่วนเล็กกว่าค่าเฉลี่ย แสดงด้วยจุดที่อยู่เหนือกราฟค่าเฉลี่ยของ D.Hobbie ขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการใช้งานที่เกินขอบเขตความสามารถของภาพถ่ายทางอากาศที่พึงจะทำได้ การที่ทำเช่นทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะได้ภาพถ่ายօร์โธที่ได้ความละเอียดถูกต้องมากกว่าเกินเกณฑ์ หรือภาพไม่คมชัดพอที่จะใช้เป็นชี้วัดทุกหรือสิงบกคลุบบนแผนที่ได้

ตัวอักษรย่อที่กำกับแต่ละจุดแสดงมาตราส่วนภาพถ่ายทางอากาศที่ใช้ในโครงการและผลิตภัณฑ์แผนที่ภาพที่ผลิตได้ในประเทศนั้นๆ กับมาตราส่วนของแผนที่ที่ผลิตได้ อักษรย่อที่มีคำอธิบายดังนี้

ชื่อย่อโครงการ	รายละเอียด
CITIPIX/ODI	เป็นโครงการของบริษัทเอกชน KODAK / CITIPIX ที่ทำการผลิต Orthorectified Digital Image (ODI) ที่ให้ความละเอียดจุดภาพถ่ายօร์บิทเป็น 1 เมตร ใน การบินมีการใช้เครื่องนำหนาความละเอียดสูงต้องสูง Applanix POS/DG GPS/IMU พร้อมกล้องถ่ายภาพทางอากาศ RC-30 บินถ่ายภาพทางอากาศที่มาตราส่วน 1:12,000. [CITIPIX 2001]
DGM-5	เป็นแผนที่ฐานของประเทศไทยพันธรัฐเยอรมันนี เป็นแบบจำลองระดับสูงที่ผลิตจากการรังวัดด้วยภาพและเสริมด้วยการรังวัดด้วยกล้องบางพื้นที่วัดบนภาพไม่ได้ ผลิตภัณฑ์มีชื่อว่า DGM-5 หรือ Digitale Gelaende Modelle เทียบเท่ากับแผนที่มาตราส่วน 1:5,000
DGK-5	เป็นแผนที่ฐานของประเทศไทยพันธรัฐเยอรมันนี ปกติเป็นแผนที่ลายเส้น ประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานสำหรับการใช้งานในเมืองและบริหารจัดการทั่วไป ผลิตภัณฑ์เรียกว่า DGM หรือ Digitale Grund Karte ผลิตที่มาตราส่วน 1:5,000 ผลิตจากงานรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศเป็นหลัก ภาพถ่ายทางอากาศที่นำมาตราส่วน 1:12,000 แต่ในบางพื้นที่ที่จำเป็นเร่งด่วนหรืออยู่ในช่วงครึ่งเวลาของกรอบปัจจุบันมากกว่า 5 ปี จะมีการผลิตเป็นแผนที่ภาพօร์บิทเสริม
MoAC/Pilot 1997	เป็นโครงการนำร่องของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์เมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยบินถ่ายด้วยภาพสีที่มาตราส่วน 1:25,000 และผลิตให้เป็นแผนที่ภาพօร์บิทสีที่มาตราส่วน 1:4,000.
MoAC/Chula 2001	โครงการแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยความร่วมมือของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการออกแบบให้บินถ่ายที่มาตราส่วน 1:25,000 เพื่อผลิตแผนที่ภาพօร์บิทสีที่มีความละเอียดสูงต้องเทียบเท่ากับแผนที่ที่มีความละเอียดสูงต้องทางตำแหน่งสำหรับทางราบเป็น 1 เมตร และความละเอียดสูงต้องทางตำแหน่งทางดิ่งเป็น 2 เมตร
USGS/DOQ	เป็นผลิตภัณฑ์มาตราฐานของ U.S. Geological Survey โดยจะเป็นแผนที่ภาพ Digital Orthophoto Quadrangle (DOQ) โดยมีความละเอียดจุดภาพเป็น 1 เมตร สร้างมาจากภาพถ่ายทางอากาศข้ามจากชุดภาพที่เรียกว่า National Aerial Photography Program (NAPP) ที่บินถ่ายที่มาตราส่วน 1:40,000.
Farbige Luftbildkarte 1:10,000	Color Aerial Photomap เป็นแผนที่ภาพօร์บิทมาตราส่วน 1:10,000 ผลิตจากภาพถ่ายทางอากาศที่บินถ่ายที่มาตราส่วน 1:34,000.

Swissphoto เป็นผลิตภัณฑ์แผนที่ภาคօร์โธสีเชิงพาณิชย์โดยเฉพาะในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ บริษัท SwissPhoto AG เป็นเจ้าของโครงการและดำเนินการทั้งหมด การบินถ่ายทำอยู่ ในระหว่างปีค.ศ. 1996 ถึง 1998 ภาคถ่ายทางอากาศบินถ่ายที่มาตราส่วนแตกต่างกันไปตามภูมิประเทศที่ค่อนข้างซับซ้อน แต่มาตราส่วนเฉลี่ยอยู่ที่ 1:27,000 และสแกนด้วยความละเอียด 25 ไมครอนเพื่อผลิตแผนที่ภาคถ่ายօร์โธที่มีจุดภาพที่มีความละเอียด 0.75 เมตร แผนที่ภาคօร์โธที่ได้มีค่าเฉลี่ยของความถูกต้องอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 เมตร (Kersten 1999a, 1999b, 2000)

8.2.1 กรณีศึกษาของ Cartographic Institute of Catalunya, Spain

อีกตัวอย่างหนึ่งของความพยายามที่จะนำ digital photogrammetry มาใช้ในการผลิตแผนที่ภาคօร์โธ โดยที่หน่วยงานนี้มีผลิตแผนที่ภาคหลายมาตราส่วนตามความต้องการของประเทศเป็น Cartographic Institute of Catalunya คือสถาบันแผนที่ที่เป็นทางราชการของ Spain ได้ทำการวิจัยคุณลักษณะของเครื่องสแกนเนอร์ Zeiss PS1 ซึ่งในขณะนั้นอยู่ในช่วงการเริ่มน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิต Romeu (Romeu1996) ได้สรุปผลผลิตที่ได้เข้ามาในการผลิตแผนที่ด้วยระบบ digital photogrammetry โดยการสแกนภาพด้วยสแกนเนอร์ Zeiss PS1 โดยในปี 1995 ได้ทำการใช้ Zeiss PS1 สแกนภาพไปทั้งสิ้น 4581 ภาพ เพื่อทำการผลิตแผนที่ดังนี้

มาตราส่วน	พิล์ม	ภาพสี	ความละเอียด (ไมครอน)	จำนวนภาพ	โครงการ
1:32,000	Neg.	B/N	15	438	1:5,000 Catalunya
1:,60,000	Pos.	RGB	30	150	1:25,000 Catalunya
1:,60,000	Neg.	Clear	15	540	1:20,000 MEDEA
1:,60,000	Neg.	B/N	30	202	1:20,000 MEDEA
1:,20,000	Pos.	RGB	22.5	354	1:5,000 Barcelona
1:,60,000	Pos.	Clear	15	163	1:25,000 Asturias
1:,5,000	Pos.	RGB	30	933	1:2,000 AMB
1:,5,000	Pos.	B/N	15	1300	1:2,000 REGSA
1:,15,000	Neg.	B/N	15	500	1:5,000 MTN

ตาราง 8-2 ผลิตผลของภาคถ่ายทางอากาศที่สแกนที่ Cartographic Institute of Catalunya ในปี 1995

8.4 มาตรฐานความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่

เมื่อพิจารณามาตรฐานความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลบริภูมิโลก จาก Geospatial Positioning Accuracy Standards (FGDC-STD-007-1998) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ the National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) NSSDA ถูกพัฒนาขึ้นโดย FGDC ad hoc working group on spatial data accuracy โดยที่มุ่งหวังจะปรับปรุงและพัฒนาจากมาตรฐานเดิมที่มีอยู่ได้แก่

- the United States National Map Accuracy Standard (NMAS) (U.S. Bureau of the Budget 1974).
- The ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps (ASPRS Specifications and Standards Committee, 1990),
- The National Standards for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ซึ่งเป็นส่วนเพิ่มเติมจาก the ASPRS Accuracy Standards to map scales smaller than 1:20,000 (FGDC 1988)

โดยสรุป ค่า RMSE ที่กำหนดไว้ใน NSSDA ที่ได้คือตารางของความละเอียดถูกต้องสำหรับแผนที่มาตรฐานที่มีมาตราส่วนใหญ่ดังในตารางข้างล่างนี้

Class 1 Planimetric Accuracy Limiting RMSE (meters)	Map Scale
0.0125	1:50
0.025	1:100
0.050	1:200
0.125	1:500
0.25	1:1,000
0.50	1:2,000
1.00	1:4,000
1.25	1:5,000
2.50	1:10,000
5.00	1:20,000

ตาราง 8-3 ค่าปีกจำกัดความถูกต้องทางราบ (RMSE) สำหรับแผนที่มาตรฐานที่มีมาตราส่วนใหญ่ตามมาตรฐานของ ASPRS

ดังนั้นเมื่อใช้มาตรฐาน FGDC Geospatial Positioning Accuracy Standards จึงอาจกล่าวได้ว่า ความถูกต้องเชิงตำแหน่งสำหรับทางราบเป็น 1 เมตรสามารถใช้ทำแผนที่ที่มาตราส่วน 1:4,000

ตามมาตรฐาน ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งทางราบ RMSE ที่ 1 เมตร เป็นความคลาดเคลื่อน สำหรับแผนที่ 1:4,000 ขึ้นไป โดยในภาษาอังกฤษ จะระบุเป็น

"THIS MAP WAS COMPILED TO MEET THE ASPRS STANDARD FOR CLASS 1 MAP ACCURACY"

ชี้งสภาพหลังจากการตรวจสอบในนามสำหรับจุดที่เห็นเด่นชัดแล้วยืนยันความละเอียดถูกต้องที่ได้แผนที่จะได้รับการระบุเป็น

"THIS MAP WAS CHECKED AND FOUND TO CONFORM THE ASPRS STANDARD FOR CLASS 1 MAP ACCURACY"

8.3.1 ความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ

ความละเอียดถูกต้องของการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศในทางทฤษฎีสามารถคำนวณได้จากหลักการแพร์ของความไม่แน่นอนประกอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวัดบนภาพคู่สามมิติ โดยสมการค่าสังเกตที่ใช้คือสมการสภาวะร่วมเส้น (Coliearity Equation)

แต่ในเบื้องต้นเพื่อความเข้าใจที่ง่าย และสมมุติฐานที่ว่าภาพถ่ายทางอากาศเป็นภาพถ่ายดิจิทัลในอุดมคติ ซึ่งผลการคิดคำนวนนี้อาจถือได้ว่าเป็นค่าประมาณของแบบจำลองของการวัดบนภาพคู่สามมิติ ซึ่งจะมีผลในทางปฏิบัติเพียงพอสำหรับการขอแบบการผลิตแบบจำลองระดับและการผลิตแผนที่ภาพอร์โน

ในกรณีของการบินถ่ายภาพที่มาตราส่วน 1:25,000 โดยที่ใช้กล้องถ่ายภาพทางอากาศที่มีความยาวโฟกัสเป็น 153 มิลลิเมตร จะสามารถคำนวนพารามิเตอร์ต่างๆ จากเรขาคณิตของการวัดพิกัดบนภาพคู่สามมิติได้ดังนี้

Focal length (mm)	Coverage (kmxkm)	Baselength (m)	Flying H. (m)	Theor.H.Acc. (m)	Theor. Vt.Acc.(m)	Prac Vt.Acc. (m)
153	5.75 x 5.75	2300	3800	0.25	0.58	0.57

ตาราง 8-4 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการบินถ่ายภาพทางอากาศตามมาตราส่วนที่กำหนด

หากต้องการผลิตแผนที่ภาพจะต้องพิจารณาความละเอียดถูกต้อง เมื่อพิจารณาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในการวัดบนภาพจะได้เป็น 0.25 เมตร

-หากสแกนภาพด้วยความละเอียด 22.5 ไมครอน จะได้ขนาดจุดภาพบนพื้นดินเป็น 0.56 เมตรซึ่งในทางปฏิบัติสามารถวัดลงไปในระดับละเอียดกว่าจุดภาพ (Subpixel) ถึงหนึ่งในสามจุดภาพหรือ 0.19 เมตร

-ในขณะเดียวกันความสามารถของฟิล์มในการบันทึกรายละเอียดบนภาพ โดยทั่วไปคิดเป็น 40 lp/mm (ASPRS 2000) เมื่อเป็นภาพถ่ายทางอากาศมาตราส่วน 1:25,000 ความละเอียดนี้เทียบเป็นระยะทางบนพื้นดินเป็น 0.25 เมตร

ในการผลิตแผนที่ภาพถ่ายอร์โนนิยมที่จะสร้างจุดภาพบนภาพด้วยแก็อกอร์โนใหม่โดยการ Resampling ให้จุดภาพมีขอบเขตครอบคลุมส่วนของพื้นดิน (Ground Pad) เป็นเลขจำนวนเต็มที่ลงตัวง่ายๆ เช่น 1, 10, 30 เมตร ในกรณีที่เป็นมาตราส่วนใหญ่ก็อาจใช้เป็น เดซิเมตร โดยที่ขนาดของ Ground Sampling Distance (GSD) จะเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดจุดภาพเดิม เพื่อรักษาไว้ซึ่งปริมาณข้อมูลบนภาพ

ตั้งนั้นออกจากล่าไห้ๆ เมื่อบินถ่ายที่มาตราส่วน 1:25,000 สแกนด้วยความละเอียด 22.5 ไมครอน แล้วทำการตัดแก้ภาพถ่ายอร์โน ทำการ Resampling ให้จุดภาพใหญ่ขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อยเพื่อให้การผลิตและการนำร่องรักษาสามารถทำได้รวดเร็วและสะดวกขึ้น จึงเลือกขนาดจุดภาพเป็น 0.75 เมตร ซึ่งโดยรวมแล้วจะสามารถผลิตแผนที่ที่มีความละเอียดถูกต้องทางราบดีกว่า 1 เมตรได้

8.3.2 การประเมินความละเอียดถูกต้องของภาพดัดแก้้อร์โท

การประเมินความละเอียดถูกต้องของภาพดัดแก้้อร์โทอาจใช้มาตรฐานของ Minnesota Planning Land Management Information Center แห่งมลรัฐมินเนสโซต้า ประเทศสหรัฐอเมริกา หน่วยงานดังกล่าวได้พัฒนา Positional Accuracy Handbook (LMIC 1999) ให้มีข้อแนะนำในการปฏิบัติการประเมินความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดแบบ เช่นพิกัดของจุดที่เห็นเด่นชัดและใช้เป็นจุดตรวจสอบภาพออร์โทที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่มีความละเอียดสูงกว่า เช่นอาจได้จากการรังวัดดาวเทียม ข้อแนะนำอย่างเป็นขั้นตอนและขั้นตอนทำเกิดความง่ายและเกิดความขัดเจนในกระบวนการปฏิบัติการตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองระดับ

ตัวอย่างหนึ่งของแนวปฏิบัติดังกล่าวที่ขัดเจนได้แก่ การกำหนดฐานแบบตารางที่ใช้ในการแสดงผลการเปรียบเทียบและขั้นตอนในการคิดคำนวณความละเอียดถูกต้องของจุดระดับ ทำให้สามารถประเมินค่าความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดทางด้านตะวันออก RMSE_x และด้านเหนือ RMSE_y หรือโดยรวมเป็น RMSE_r และ NSSDA

A Point number	B Point description	C x (inde- pendent)	D x (test)	E diff in x	F (diff in x) ²	G y (inde- pendent)	H y (test)	I diff in y	J (diff in y) ²	K (diff in x) ² + (diff in y) ²	
Column	Title	Content									sum
A	Point number	Designator of test point									average
B	Point description	Description of test point									RMSE _r
C	x (independent)	x coordinate of point from independent data set									NSSDA
D	x (test)	x coordinate of point from test data set									
E	diff in x	$x_{\text{independent}} - x_{\text{test}}$									
F	(diff in x) ²	$(x_{\text{independent}} - x_{\text{test}})^2$									
G	y (independent)	y coordinate of point from independent data set									
H	y (test)	y coordinate of point from test data set									
I	diff in y	$y_{\text{independent}} - y_{\text{test}}$									
J	(diff in y) ²	$(y_{\text{independent}} - y_{\text{test}})^2$									
K	(diff in x) ² + (diff in y) ²	$(x_{\text{independent}} - x_{\text{test}})^2 + (y_{\text{independent}} - y_{\text{test}})^2$ = (error radius) ² $\sum [(diff in x)^2 + (diff in y)^2]$ sum / number of points Root Mean Square Error (radial) = average ^{1/2} National Standard for Spatial Data Accuracy statistic = 1.7308 * RMSE _r									

รูปภาพ 8-8 ตารางสำหรับการประเมินความละเอียดถูกต้องของพิกัดทราบ (LMIC 1999)

8.3.3 ความละเอียดถูกต้องภาพดัดแก้ขอร์โทในทางปฏิบัติ

ในการดำเนินงานการสำรวจและออกแบบแบบละเอียดภายในได้ โครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้ (สมุทรสาคร-แหลมผักเบี้ย-ยะอ่าม) โดยคณะกรรมการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2547-2548 ได้มีการใช้ภาพถ่ายทางอากาศสีมาตรฐาน 1:15,000 และ 1:25,000 มาจัดทำแผนที่เส้นทางเพื่อประกอบการออกแบบแบบละเอียด ในโครงการฯ ได้มีการผลิตแผนที่ภาพขอร์โทจากภาพดัดแก้ขอร์โทจำนวน 67 ชุด ในจำนวนนี้เป็น

- ภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐาน 1:15,000 จำนวน 18 ชุด
- ภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐาน 1:25,000 จำนวน 49 ชุด

ในการนำภาพถ่ายทางอากาศถูกสแกนด้วยสแกนเนอร์สำหรับภาพถ่ายทางอากาศที่ความละเอียด 20 ไมครอน และผ่านกระบวนการกรองรังวัดและคำนวนตามมาตรฐานสากล ผลที่ได้คือแผนที่ภาพขอร์โทที่ความละเอียดจุดภาพ 0.5 เมตร

ในการควบคุมคุณภาพได้มีการประเมินความละเอียดถูกต้องของการผลิตภาพขอร์โท ตามมาตรฐานของ FGDC โดยใช้แนวทางปฎิบัติตามคู่มือ Positional Accuracy Handbook (LMIC 1999) ตามที่กล่าวมาแล้ว

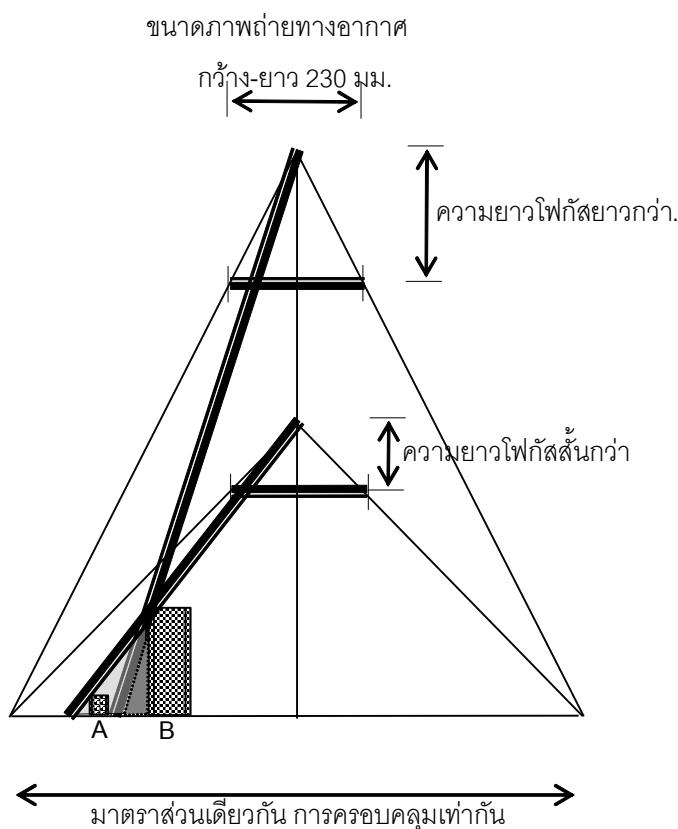
ผลการประเมินได้จุดที่เห็นเด่นชัดบนแผนที่ภาพขอร์โทจำนวน 54 จุดเปรียบเทียบค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดที่มีความละเอียดถูกต้องสูงกว่า ในตอนแรกพบว่ามีจุดที่มีความผิดปกติในเชิงสถิติ (Outlier) กล่าวคือมีขนาดความคลาดเคลื่อนเกินเกินกว่า 3 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จุดผิดปกติจำนวน 4 จุดจึงถูกตัดทิ้ง เสียก่อน จากนั้นจึงทำการประเมินความละเอียดถูกต้องจากจุดควบคุม 51 จุด แผนที่ภาพขอร์โทผลลัพธ์ที่ผลิตได้ในโครงการฯ พบร่วมกับค่า RMSE เป็น 0.9 เมตร หรือคิดเป็น ความละเอียดถูกต้อง NSSDA เป็น 1.6 เมตร

8.5 ข้อคิดคำนึงในการตัดแก้ภาพถ่ายทางอากาศ

ซอฟแวร์ที่ใช้ในการต่อภาพจะต้องมีความสามารถในการจัดการบริหารหน่วยความจำเป็นอย่างดี เพราะภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนมาบันทึกขนาดใหญ่หลายร้อยเมกะไบต์ แบบจำลองระดับก้อนกัน ซอฟแวร์ที่ใช้ในการตัดแก้ภาพถ่ายของอร์โทอส์รั่งภาพถ่ายของอร์โทอที่ทำการขัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเจ้าคืนนิตยนิดการขยายผ่ายศูนย์ (Perspective), ความเอียงของกล้องและความสูงต่ำของภูมิประเทศ โดยอาศัยข้อมูลการจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation Parameter) และ แบบจำลองความสูงที่ได้ก่อนหน้านี้ ความคลาดเคลื่อนของจุดภาพของบริเวณที่เป็นป่าทึบหรือมีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นอาจให้ผลลัพธ์ออกมากไม่เป็นไปตามที่ต้องการเนื่องจากแบบจำลองระดับเป็นตัวแทนของความสูงในภูมิประเทศเท่านั้น

8.5.1 ปรากฏการณ์การบดบังและความละเมียดถูกต้อง

ในการถ่ายภาพทางอากาศจะมีกล้องที่ความยาวโฟกัสต่างๆให้เลือก ภาพที่ได้จากการถ่ายที่มีความยาวโฟกัส (f) ต่างกัน จะให้ภาพที่ต่างกันโดยเฉพาะในเรื่องของการบดบังการมองเห็นวัตถุที่อยู่ใกล้กันและความสูงต่างกัน ตลอดจนความละเมียดถูกต้องที่ได้ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังภาพ



รูปภาพ 8-9 การบดบังการมองเห็นส่วนเดียวกันที่มีความยาวโฟกัสต่างกัน

เมื่อทำการเบริยบเทียบภาพถ่ายดิจิทัลสองภาพที่ได้จากการถ่ายภาพทางอากาศที่มีความยาวโฟกัส (f) ต่างกันและเป็นภาพมีมาตราส่วนเดียวกัน นั่นคือขนาดของภาพถ่ายทั้งสองเท่ากัน และครอบคลุมพื้นที่บนพื้นดินเท่ากัน ดังนั้นตำแหน่งของกล้องจะถูกกำหนดโดยภาพอยู่ที่ระดับความสูงต่างกัน

8.5.1.1 การบดบัง

เมื่อเปรียบเทียบการบดบังเนื่องจากวัตถุที่มีความสูงต่างกัน เช่น ตึก A ดังรูป กับวัตถุข้างเคียง เช่น ตึก B ที่มีความสูงมากกว่า จะเห็นได้ว่าภาพของตึก A ถูกบดบังโดยตึก B ในกรณีที่เป็นภาพที่ได้จากการล้องที่มีความยาวโฟกัสสั้นกว่า ดังนั้นในกรณีนี้กล้องความยาวโฟกัสยาวกว่าจะมีปัญหาการบดบังน้อยกว่า

เมื่อต้องการแก้ปัญหาการบดบังของอาคารสูงในการรังวัดด้วยภาพในพื้นที่ในเมือง อาจสามารถแก้ปัญหาโดยการบินบันทึกภาพด้วยส่วนซ้อนที่มากขึ้น เช่นเพิ่มส่วนซ้อนในแนวบินจาก 60% เป็น 80% ซึ่งจะส่งผลให้มีการใช้วัสดุในการบันทึก ล้างอัดภาพมากขึ้น การประมาณผลที่ต่อเนื่องมาต้องมีปริมาณข้อมูลนำเสนอระบบมากขึ้น

8.5.1.2 ความละเอียดถูกต้อง

ความละเอียดถูกต้องตามทฤษฎีคำนวณได้จากการลักแพร์ของความไม่แน่นอนโดยอาศัยเรขาคณิตของ การวัดบนภาพถ่ายเดี่ยวและการวัดในแบบจำลองสามมิติจะได้ว่า สำหรับพิกัดภาพของจุดจุดเดียวที่วัดด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดถูกต้องเท่ากัน จะได้ความละเอียดถูกต้องค่าพิกัดของวัตถุในทางราบท่าๆ กัน แต่ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งของพิกัดวัตถุจะแตกต่างกัน โดยความละเอียดถูกต้องทางดิ่งของพิกัดวัตถุที่ได้จากกล้องที่มี ดังตัวอย่างที่คำนวณได้จากการเปรียบเทียบภาพถ่ายที่มาตราส่วน 1:15000 ค่าพิกัดภาพมีความละเอียดถูกต้อง 10 มิลลิเมตร ถ้าเป็นการวัดบนภาพคู่สามมิติส่วนซ้อน 60% จะได้ความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดวัตถุโดยอาศัย "หลักการวิเคราะห์ความละเอียดถูกต้องของการวัดพิกัดวัตถุจากภาพคู่สามมิติ" ข้างต้นในตาราง ข้างล่างนี้

ความยาวโฟกัส (f)	ความคลาดเคลื่อนทางราบ	ความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง
153 มม.	0.15 ม.	0.35 ม
305 มม.	0.15 ม.	0.70 ม.

รูปภาพ 8-10 ความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งสำหรับกล้องมีความยาวโฟกัสต่างกัน

จะเห็นได้ว่ากล้องมีความยาวโฟกัสสั้นกว่าจะให้ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งของค่าพิกัดของวัตถุดีกว่า สูง ในกรณีที่มีปัญหาเรื่องการบัดบังการบันทึกการบันทึกของวัตถุที่อยู่ใกล้กันและมีความสูงต่างกัน ก็จะมีทางเลือกสองทางคือ

ถ้าต้องการทำงานที่ไม่คำนึงถึงความละเอียดถูกต้องทางดิ่งมากนักแต่ต้องการเห็นรายละเอียดบนพื้นดินให้มากที่สุด เช่นการผลิตแผนที่ภาพจากօร์โทไฟต์ การเขียนแผนที่ทางราบ เป็นต้น ก็ควรใช้ภาพจากกล้องที่มีความยาวโฟกัสยาวกว่า ซึ่งจะทำให้เห็นรายละเอียดครบถ้วนที่สุด

แต่ถ้าหากว่าต้องการวัดค่าพิกัดให้มีความละเอียดถูกต้องทางดิ่งของค่าพิกัดของวัตถุให้อยู่ในเกณฑ์ที่ที่สุด เช่นการวัดเพื่อสร้างแบบจำลองความสูง หรือการวัดเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิว ก็ควรใช้ภาพที่ได้จากการล้องที่มีความยาวโฟกัสสั้นกว่า เพื่อให้ความละเอียดถูกต้องทางดิ่งมีความถูกต้องมากที่สุด

แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเลือกใช้ความยาวโฟกัสได้แก่ ทศนวิสัยของอากาศที่มีโดยตรงต่อความคงทนภาพถ่ายที่บันทึกได้ การที่แสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางยาวกว่าอยู่มี

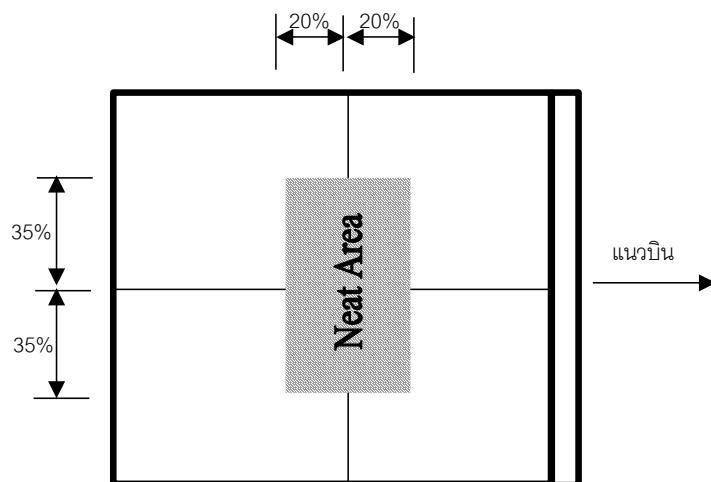
โอกาสที่ความคอมแพ็คจะน้อยกว่า นั่นคือความสูงบินที่มากจะได้ภาพที่มีความคอมแพ็คน้อยกว่าการบินถ่ายภาพที่ระดับต่ำกว่า

เช่นเดียวกันกับระดับความสูงของชั้นเมฆ การบินถ่ายภาพที่ระดับต่ำอาจสามารถหลีกเลี่ยงการบดบังของชั้นของเมฆได้

8.5.2 การเลือกส่วนของภาพที่มีความผิดเพี้ยนน้อย

ส่วนของภาพถ่ายทางอากาศที่ถูกตัดแก้และนำไปประกอบกันเป็นแผนที่ขนาดใหญ่นั้น ควรได้มาจากการส่วนกลางของภาพถ่ายทางอากาศ ส่วนกลางของภาพถ่ายทางอากาศควรครอบคลุมพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยระยะห่างจากศูนย์กลางภาพอยู่ 20 % ไปทั้งสองข้างตามแนวบิน และระยะห่างจากศูนย์กลางภาพอยู่ 35% ของความกว้างของภาพตามแนวตั้งจากกันแนวบิน พื้นที่บนภาพถ่ายทางอากาศนี้จะมีความความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความสูงต่างของภูมิประเทศ (relief displacement) น้อยที่สุด

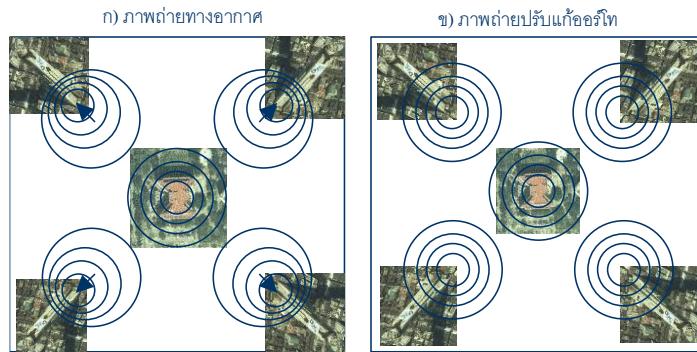
พื้นที่ในส่วนกลางภาพนี้บางครั้งเรียกว่า “Neat Area” อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของภาพที่มีเว้าคณิต ของความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก Relief Displacement น้อยกว่าบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางภาพ



รูปภาพ 8-11 ส่วนกลางของภาพถ่ายทางอากาศที่ควรนำมาผลิตภาพถ่ายดัดแก้อิอร์โกร์สำหรับภาพคู่ส่วนซ้อน 60%

นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของสิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณต้นไม้ ที่มีได้มีการวัดแบบจำลองระดับ ทำให้ภาพที่เคยฉายประกายภูมิประเทศบันดาลภาพถ่ายทางอากาศไม่สามารถปรับแก้ให้ถูกต้องได้ ตัวอย่างเช่น ภาพด้านข้างของต้นไม้ใหญ่ ภาพด้านข้างที่หอด้วยตาของเส้าไฟฟ้า ภาพด้านข้างของตึกสูง ดังภาพ

จากภาพข้างต้น จะเห็นได้ว่าในส่วนที่ใกล้กลางภาพเข้าไปมีปัญหาน้อยกว่า



รูปภาพ 12 ก) แสดงสิ่งปลูกสร้างที่ปรากฏบนภาพ ข) ผลจากการตัดแก้ออร์โท

ดังนั้นในทางปฏิบัติควรเลือกผลิตภาพตัดแก้ออร์โทจากส่วนกลางภาพ และหากต้องการคุณภาพมากขึ้น แต่ต้องมีปริมาณงานมากขึ้นตามไปด้วย ก็อาจเลือกบินบันทึกภาพที่ส่วนข้อนในแนวบินมากขึ้น เช่นการเพิ่มส่วนข้อนจากว้อยละ 60 เป็นร้อยละ 80 ก็ย่อมได้

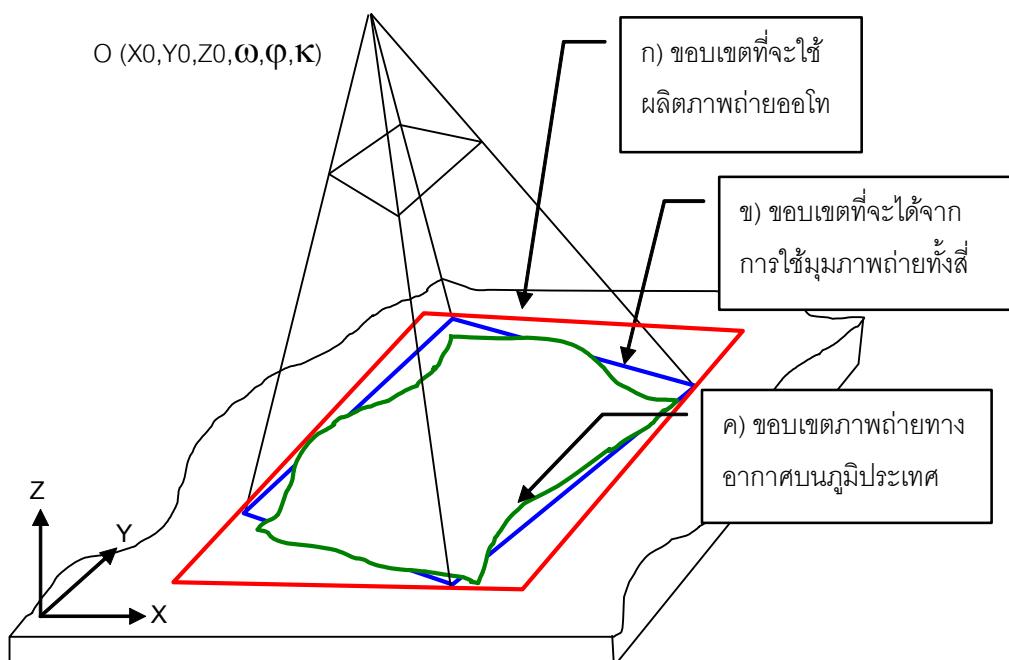
8.6 อัลกอริธึมในการผลิตภาพถ่ายด้วยดักแก้วอิเล็กทรอนิกส์

ขั้นตอนการผลิตนี้เป็นขั้นตอนในระบบประมวลผลภาพสำหรับการรังวัดด้วยภาพดิจิทัลทั่วไป จะทำได้โดยเริ่มจากการเตรียมข้อมูลไว้ก่อน เมื่อเริ่มต้นซอฟแวร์จะต้องเตรียมข้อมูลทั้งหมดดังนี้

- 1) ภาพถ่ายทางอากาศในรูปดิจิทัลที่ความละเอียดที่ต้องการ
- 2) พารามิเตอร์การจัดวางภาพภายใน (Interior Orientation) สมประสงค์ที่ใช้ในการแปลงค่าพิกัด a,b,c,d,e,f
- 3) พารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอก (Exterior Orientation) ในรูปของ $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$
- 4) แบบจำลองระดับ

8.6.1 การคำนวณขอบเขตภาพอิเล็กทรอนิกส์บีบองตัน

เมื่อเริ่มต้นซอฟแวร์จะทำการคำนวณขอบเขตที่ครอบคลุมของภาพถ่ายทางอากาศ โดยใช้ค่าพิกัดของมุมทั้งสี่ของภาพถ่ายทางอากาศเข่นกรณีภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐานที่มีขนาด 230 มิลลิเมตร \times 230 มิลลิเมตร



รูปภาพ 8-13 แสดงขอบเขตต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงระหว่างการผลิตภาพถ่ายอิเล็กทรอนิกส์

ค่าพิกัดภาพโดยประมาณของมุมภาพทั้งสี่ในระบบพิกัดภาพจะเป็น $(-115, 0, -115), (-115, 0, +115), (+115, 0, -115), (+115, 0, +115)$ หน่วยเป็นมิลลิเมตร เราสามารถคำนวณได้จากสมการร่วมเส้น จากพิกัดภาพถ่ายไปสู่พิกัดวัตถุบนพื้นดิน โดยที่อาจให้ความสูง Z ของทุกจุดคำนวณจากความสูงเฉลี่ยจาก \bar{Z} โดยคำนวณได้จาก

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^k Z_i}{k} \quad \text{สมการ 8-3}$$

เมื่อ Z_i คือความสูงของจุดควบคุมภาพถ่าย และ k คือจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่มีอยู่บนภาพที่กำลังพิจารณา

หรือความสูงเฉลี่ย \bar{Z} คำนวนได้จาก

$$\bar{Z} = Z_0 - f \cdot S \quad \text{สมการ 8-4}$$

เมื่อ S คือมาตราส่วนภาพถ่ายเฉลี่ย

ดังนั้นจะได้ค่าพิกัดพื้นดินสี่ค่าที่เป็นพิกัดของขอบภาพถ่ายทางอากาศที่ปรากฏบนพื้นดิน ดังปรากฏในภาพ “(x) ขอบเขตที่ได้จากการใช้มุมภาพทั้งสี่” ซึ่งในเนื่องมาจาก การจัดวางภาพภายนอกของกล้องและระดับของภูมิประเทศ ขอบเขตนี้อาจเหลือมีลักษณะ “ก” ขอบเขตภาพถ่ายทางอากาศบนภูมิประเทศ” บ้าง

เมื่อพิจารณา ขอบเขตที่ได้จากการใช้มุมภาพทั้งสี่ ทำการหา “ขอบเขตที่จะใช้ผลิตภาพถ่ายอุปกรณ์” ดังในภาพ ก) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$X_{\min} = \min(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad \text{สมการ 8-5}$$

$$X_{\max} = \max(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad \text{สมการ 8-6}$$

$$Y_{\min} = \min(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) \quad \text{สมการ 8-7}$$

$$Y_{\max} = \max(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4) \quad \text{สมการ 8-8}$$

โดยที่ ค่าพิกัด (X_1, Y_1) ถึง (X_4, Y_4) เป็นพิกัดของภาพข้างต้น “(x) ขอบเขตที่ได้จากการใช้มุมภาพทั้งสี่”

8.6.2 การกำหนดความละเอียดของภาพถ่ายอุปกรณ์

ความละเอียดของภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ขึ้นอยู่กับความต้องการของความละเอียดถูกต้องของการผลิตแผนที่ ความละเอียดของจุดภาพที่เพียงพอที่จะตรวจพบวัตถุ (Detectability) ที่ต้องการในแผนที่ภาพ โดยที่ในขั้นนี้มีสมมุติฐานว่ากระบวนการบินถ่ายภาพ บันทึกภาพ การสแกน การทำข่ายสามเหลี่ยม การรังวัดจุดควบคุมภาพถ่าย ได้ทำไปอย่างมีมาตรฐาน

ความละเอียดของภาพถ่ายอุปกรณ์ที่จะระบุเป็นความละเอียดบนพื้นโลกหรือความละเอียดส่วนภาคพื้นดิน (Ground Resolution หรือ Ground Sampling Distance : GSD) โดยที่จะสามารถพิจารณาจากความละเอียดที่สแกนมาโดยการใช้

$$G = r \cdot S \quad \text{สมการ 8-9}$$

โดย G คือความละเอียดบนพื้นโลก และ r คือความละเอียดในการสแกนภาพถ่าย S คือมาตราส่วนของภาพถ่ายทางอากาศ

การเลือกความละเอียดของภาพถ่ายอุปกรณ์ผลลัพธ์จะคำนึงถึงประสิทธิภาพของภาพดิจิทัลต้นฉบับ เป็นหลัก แล้วจะเลือกใช้ความละเอียดของภาพถ่ายอุปกรณ์ผลลัพธ์เป็นตัวเลขจำนวนที่ลงตัว เช่น 0.25, 0.50 หรือ 1 เมตรเป็นต้น และค่าความละเอียดควรจะให้ใกล้เคียงกับความละเอียดของภาพดิจิทัลต้นฉบับ การทำซ้ำนี้ก็เพื่อให้ข้อมูลบนภาพถ่ายถ่ายทอดไปสู่ภาพผลลัพธ์ให้ครบถ้วนมากที่สุด โดยที่จะไม่มีความต้องการเนื้อที่ในกราฟิกเก็บเพิ่มขึ้น

ตัวอย่าง

ทำการสแกนภาพถ่ายทางอากาศด้วยความละเอียดของจุดภาพเป็น 15 ไมครอน และในระหว่างการผลิตภาพด้วยแก็ขอร์โทิจะต้องมีการระบุความละเอียดจุดภาพในหน่วยความยาวบันทึกนิ่ง ความละเอียดจุดภาพในหน่วยความยาวบันทึกนิ่งคำนวณได้จาก

$$\text{ความละเอียดจุดภาพของภาพด้วยแก็ขอร์โทิ} = 15 \mu\text{m} \cdot 25,000 \approx 0.38 \text{ เมตร}$$

ในขั้นตอนการผลิตภาพด้วยแก็ขอร์โทิก็อาจเลือกใช้ความละเอียดจุดภาพของภาพด้วยแก็ขอร์โทิที่จะสร้างขึ้นให้มีความละเอียดเท่าเดิมคือ 0.38 เมตร เพื่อรักษาคุณสมบัติด้านเรติโนเมตรีและเรขาคณิตของภาพ อันได้แก่ ความคงข้อและความละเอียดของเนื้อภาพ ให้คงเดิมที่ได้ทำการวัดด้วย Photogrammetric Scanner ให้ได้มากที่สุด

ดังนั้นท้ายที่สุด ควรผลิตภาพของอร์โทิเพื่อทำแผนที่ของอร์ทั่ยความละเอียดจุดภาคเป็น 0.4 เมตร ตอบ

จาก ความละเอียดของภาพถ่ายของอร์โทิผลลัพธ์ G มีหน่วยเป็นการวัดบนพื้นโลกและขอบเขตที่จะผลิตภาพถ่ายของอร์โทิบนพื้นโลกเข่นกัน ทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนจุดภาพที่จะต้องผลิตและจัดเก็บดังนี้

จำนวนจุดภาพตามแนวแกน X

$$m = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{G} \quad \text{สมการ 8-10}$$

จำนวนจุดภาพตามแนวแกน Y

$$n = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{G} \quad \text{สมการ 8-11}$$

8.6.3 การย้อนรอยรังสี

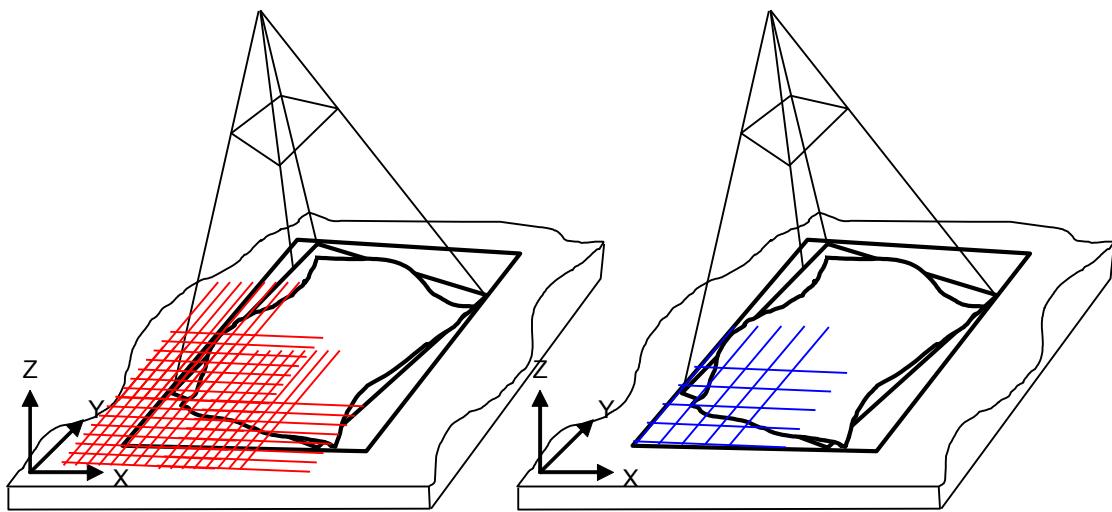
การตามย้อนรอยรังสีเป็นกระบวนการสร้างกลับ โดยอาศัยวิธีการแปลงภาพที่เป็นประกาย Indirect โดยการเริ่มพิจารณาขอบเขตบนพื้นดินที่จะทำการผลิตภาพด้วยแก็ขอร์โทิที่จุดภาพแรก ซึ่งอาจเป็นมุมขี้มายล่างสุดให้เป็น X_0, Y_0 และจุดต่อไปจากตะวันออกไปตะวันตกและจากใต้ไปเหนือ ต่อ X_1, Y_1 ไปจนถึงจุดสุดท้ายที่มุมของขอบเขตที่พิกัด X_{m-1}, Y_{n-1} ค่าพิกัดของสองจุดที่ติดกันคำนวณได้จากการคำนวณความละเอียดของภาพถ่ายของอร์โทิ G

ตัวอย่างเช่น

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + G \\ Y_{j+1} &= Y_j + G \end{aligned} \quad \text{สมการ 8-12}$$

แล้วทำการวนซ้ำโดยการนำค่าพิกัด X_i, Y_i ที่ได้ขณะนี้ไปหาค่าความสูงจากแบบจำลองระดับที่ใช้ซอฟแวร์ที่รองรับในส่วนนี้ต้องรับค่า X_i, Y_i เข้ามาแล้วทำการค้นหาค่าความสูงจากแบบจำลองระดับถ้าไม่มีความสูง ณ ค่าพิกัดที่ร้องขอนี้ ซึ่งจะเป็นชื่นนี้ส่วนใหญ่ ซอฟแวร์จะต้องทำการประมาณค่าความสูงออกให้ในที่นี่สมมุติให้เป็น Z_i

ในอีกแนวคิดหนึ่งในการจัดการแบบจำลองระดับคือการประมาณผลแบบจำลองระดับไว้รอลงหน้าโดยทำการประมาณสร้างแบบจำลองระดับใหม่โดยให้มีระยะห่างของจุดความสูงเป็นระยะทางเท่ากันเป็นระยะทาง G และมีขอบเขตของแบบจำลองระดับใหม่เท่ากับขอบเขตของพื้นที่ที่จะผลิตภาพถ่ายของอร์โทิ ดังในรูปข้างล่างนี้



ก) แบบจำลองระดับขอบเขตเดิมกว้าง
กว่าและมีระยะห่างไม่เท่ากับที่ต้องการ

ข) แบบจำลองระดับใหม่มีขอบเขตกว้าง
และระยะห่างที่ต้องการพอดี

รูปภาพ 8-14 การเตรียมแบบจำลองระดับ

ค่าพิกัดวัตถุที่ได้ X_i, Y_i, Z_i จะสามารถนำกลับไปคำนวณค่าพิกัดบนภาพถ่าย โดยใช้สมการร่วมเส้นดังนี้

$$x_i = -f \frac{[a_{11}(X_i - X_0) + a_{12}(Y_i - Y_0) + a_{13}(Z_i - Z_0)]}{[a_{31}(X_i - X_0) + a_{32}(Y_i - Y_0) + a_{33}(Z_i - Z_0)]} \quad \text{สมการ 8-13}$$

$$y_i = -f \frac{[a_{21}(X_i - X_0) + a_{22}(Y_i - Y_0) + a_{23}(Z_i - Z_0)]}{[a_{31}(X_i - X_0) + a_{32}(Y_i - Y_0) + a_{33}(Z_i - Z_0)]} \quad \text{สมการ 8-14}$$

8.6.4 การหาค่าพิกัดภาพดิจิทัล

ดังนั้นจะได้ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดที่กำลังพิจารณาเป็น (x_i, y_i) ซึ่งสามารถคำนวณกลับไปหาตำแหน่งบนภาพดิจิทัล โดยอาศัยพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใต้ (a, b, c, d, e, f)

$$\begin{aligned} \xi_i &= a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \\ \eta_i &= d \cdot x_i + e \cdot y_i + f \end{aligned} \quad \text{สมการ 8-15}$$

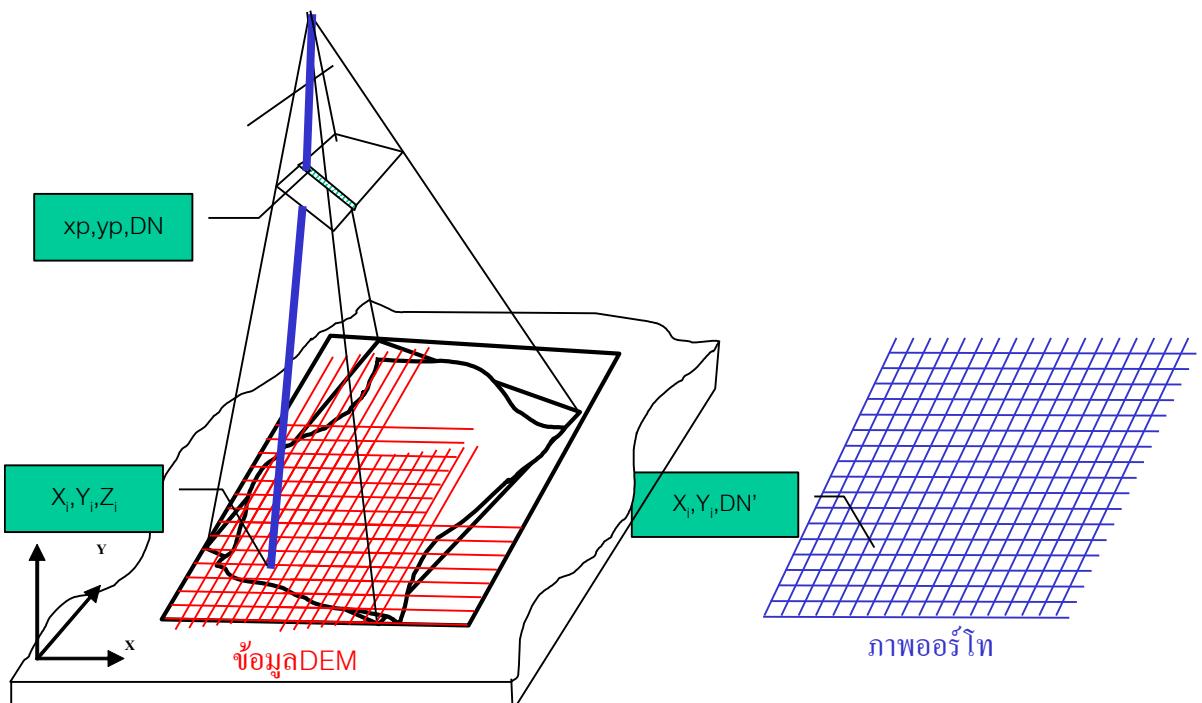
โดยในที่นี่ ξ_i, η_i จะเป็นค่าพิกัดของเครื่องมือวัดซึ่งในที่นี่เป็นภาพดิจิทัลซึ่งมีหน่วยเป็น จุดภาพ

8.6.5 การหาค่าความส่วนจุดภาพหรือสีของจุดภาพ

ค่าพิกัดภาพถ่ายดิจิทัล \tilde{x}_i, \tilde{y}_i จะถูกนำไปใช้ในการหาค่าความส่วนจุดภาพในกรณีที่เป็นภาพถ่ายขาวดำหรือสีในกรณีที่เป็นภาพสี โดยหลักการประมาณค่าเดิมอิมิตรี ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้จากวิธี bi-linear หรือ bi-cubic interpolation ขึ้นอยู่กับความต้องการคุณภาพของภาพและทรัพยากรคอมพิวเตอร์

8.6.6 การให้กำเนิดจุดภาพที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนแล้ว

ในขั้นตอนสุดท้ายนี้จะเป็นการให้กำเนิดจุดภาพด้วยการเขียนค่าความส่วนจุดภาพหรือสีของจุดภาพ ณ ตำแหน่ง (x_i, y_i) นั่งไปในหน่วยความจำหรือเพิ่มข้อมูลโดยตรงในคอมพิวเตอร์



ก) การค้นหาค่าสี (DN) จากภาพ

ข) DN' ได้จากการประมาณค่าสี จาก
จุดเพื่อบ้านโดยรอบ

รูปภาพ 8-15 การสร้างภาพออร์โท

ค่าตำแหน่ง (x_i, y_i) นั้นไม่จำเป็นต้องจัดเก็บลงไป เนื่องจากภาพดัดแก้ของร็อทที่ได้เป็นแรสเตอร์ซึ่งโดยทั่วไปจะมีระยะห่างแรสเตอร์เท่ากัน การเรียงจะขานกับแกนพิกัดพื้นโลกในทางแกน X และ Y จำนวนจุดภาพตามแนววันออก-ตะวันตก และตามแนวเหนือ-ใต้ทราบแน่นอน ดังนั้นโดยหลักการเมื่อบันทึกเพียงค่าพิกัดที่มุ่งสองมุมทแยงกันของภาพแรสเตอร์ในลักษณะนี้กำกับไปกับแรสเตอร์ ก็จะสามารถคำนวณค่าพิกัดจุดภาพได้หากต้องการ หรืออาจจะเลือกใช้วิธีอื่นในการกำหนดพิกัดโลกสำหรับภาพดัดแก้ของร็อท ที่เรียกว่า การอ้างอิงพิกัด (Georeferencing)

8.6.7 การวนช้ำ

การประมวลผลตั้งแต่ 8.6.3 การย้อนรอยรังสี จนถึง 8.6.6 การให้กำเนิดจุดภาพที่แก้ไขความคลาดเคลื่อนแล้ว ทำเช่นนี้จนครบทุกจุดภาพบนภาคพื้นดินที่ต้องการ ก็จะได้ภาพถ่ายด้วยเครื่องมือ

ผลที่ได้นี้จะเป็นภาพถ่ายของร็อทดัดแก้ที่ความละเอียดที่ต้องการ ภาพถ่ายดัดแก้ของร็อทจะครอบคลุมพื้นที่เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องทำการผลิตภาพถ่ายดัดแก้ของร็อทที่ต้องการทั้งบล็อก และเลือกเอาเฉพาะส่วนที่ “ดี” มาใช้ในการผลิตแผนที่ภาพ โดยการนำมาตัดติดต่อเข้าด้วยกัน แล้วตัดเป็นรัวๆ แผนที่มาตรฐานต่อไป

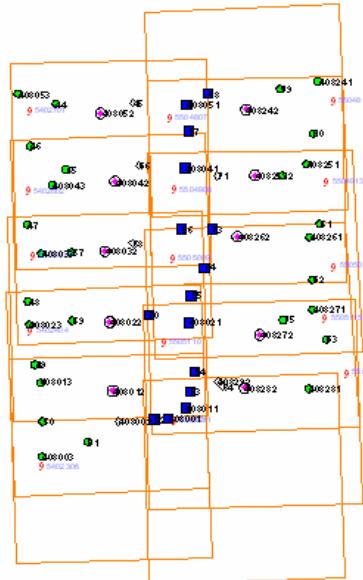
8.7 การไม่เศคภาพ

การไม่เศคภาพคือการนำภาพถ่ายด้ตดแก้ที่มีการข้างอิงค่าพิกัดเป็นระบบเดียวกันมาต่อชั้นกัน ซอฟแวร์ที่ใช้ในการไม่เศคจะต้องมีความสามารถในการจัดการบริหารหน่วยความจำเป็นอย่างดี เพราะภาพตัดแก้อาจมีขนาดใหญ่กว่าไฟล์ที่ต้องถูกนำเข้ามาแสดงบนจอภาพพร้อมๆกัน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลือกบริเวณรายต่อแบบโต้ตอบไปมา กับเครื่องได้ ภาพตัดแก้ของซอฟแวร์จะมีขนาดหลายร้อยเมกะไบต์ หากเป็นภาพสีจะมีขนาดใหญ่เป็นสามเท่า เมื่อผู้ใช้ได้ตัดสินใจเลือกบริเวณรายต่อแล้ว ซอฟแวร์จะให้กำเนิดภาพใหม่และเขียนผลลัพธ์ลงบนหน่วยความจำต่อไป

ภาพถ่ายด้ตดแก้ของซอฟจากแต่ละภาพจะถูกนำมาประกอบเป็นภาพต่อเนื่องกันชนิดไม่เห็นรอยต่อ (seamless mosaic) โดยที่การตัดส่วนซ้อนระหว่างภาพโดยที่แนวที่ตัดต้องเป็นรอยต่อชนระหว่างภาพต้องเป็นแนวที่สังเกตเห็นไม่ชัดเจนตามภูมิประเทศ ระหว่างรอยต่อชนนั้นมีการเกลี่ยความสว่างภาพที่ติดกันให้ดูกลมกลืน ดังนั้นกระบวนการการไม่เศคภาพอาจกล่าวได้ว่าเกี่ยวข้องกับ 3 กระบวนการคือ

- 1) การไม่เศคทางเรขาคณิต ได้แก่ การต่อชั้นของภาพให้สนิท การเลือกส่วนของภาพที่จะใช้เป็นภาพไม่เศค หากว่าเนื้อภาพมีการซ้ำซ้อนกัน
- 2) การไม่เศคทางรังสี ได้แก่การปั๊บโนนสี หรือความสว่างให้มีความต่อเนื่องกัน
- 3) การสร้างภาพใหม่ที่เป็นภาพไม่เศคแล้ว โดยการ resample ส่วนของภาพเหล่านั้น แล้วสร้างภาพใหม่ให้มีความต่อเนื่องเป็นผืนเดียวกัน

ภาพต่อไปนี้แสดงให้เห็นกระบวนการไม่เศคภาพอย่างประกายด โดยที่ภาพที่อยู่ในแนวบินเดียวกัน ปกติจะมีส่วนซ้อน 60% แต่ว่าเพื่อความประกายดมีการไม่เศคชนิด “ภาพเว้นภาพ” ซึ่งในทางปฏิบัติควรจะใช้ทุกภาพมาพิจารณาเพื่อการไม่เศค โดยเฉพาะส่วนของกลางภาพที่มีคุณภาพดี จะถูกเลือกเป็นส่วนของภาพที่จะนำไปประกอบเป็นภาพไม่เศคใหม่



รูปภาพ 8-16 กระบวนการโมเมสคภาพ

8.7.1 การโมโนเสคทางเรขาคณิต

ซอฟแวร์ที่ใช้ในการโมโนเสคจะต้องมีความสามารถในการจัดการบริหารหน่วยความจำเป็นอย่างดี เพราะภาพดักแก้ก่อร์โทจะต้องถูกนำเข้ามาแสดงบนจอภาพร้อนๆ กัน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเลือกบริเวณรอบต่อแบบได้ต่อนไปมา กับเครื่องໄட້ แนวต่อระห่วงภาพที่ตัดต้องเป็นรอยต่อชนระหว่างภาพต้องเป็นแนวที่ลังเกตเห็นไม่ชัดเจนตามภูมิประเทศ

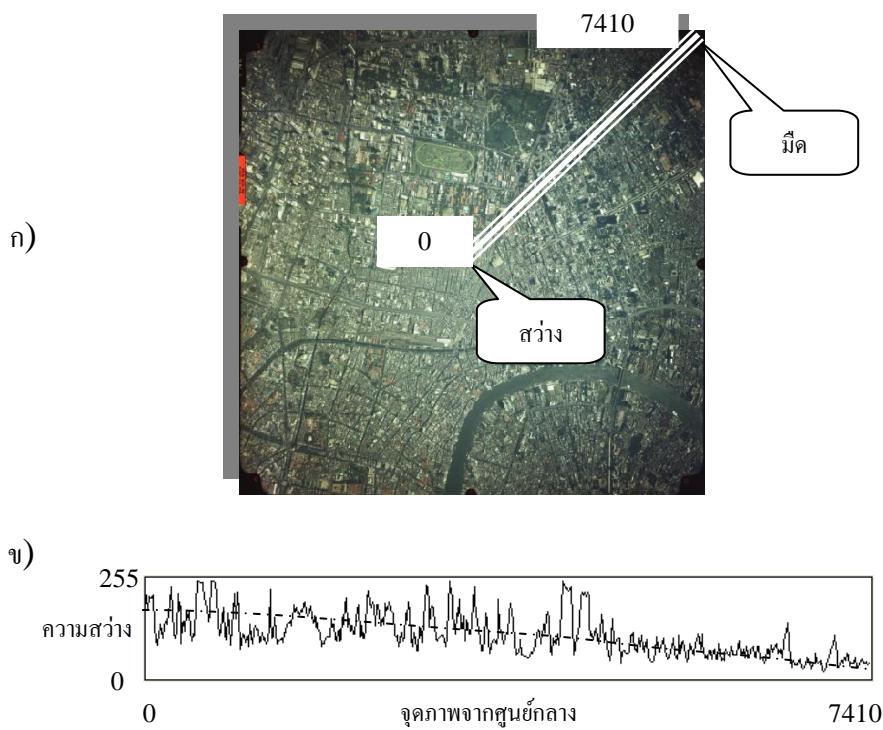


รูป 8-17 ซอฟแวร์ OrthoVista กำลังโมโนเสคภาพ (www.orthovista.com)

ในกรณีที่ไม่ต้องการคุณภาพสูงนัก และต้องการความรวดเร็ว ซอฟต์แวร์โมโนเสคภาพมักจะมีวิธีการเลือกรอยต่อของอัตโนมัติ เช่น การแบ่งพื้นที่เท่าๆ กันในพื้นที่ที่ภาพซ้อนทับกัน แล้วเลือกเอาเนื้อภาพของภาพใดภาพหนึ่งมาใช้ในการโมโนเสคเข้าหากัน

8.7.2 การโมโนเสคทางรังสีหรือโทนสี

ในระหว่างการผนวกต่อชนภาพดักแก้ที่อยู่ติดกันเข้าด้วยกัน จะมีการปรับโทนสีให้คล้ายคลึงกัน โดยเทคนิค “Color balancing” การทำ Color Balancing จำเป็นเมื่อภาพที่ถ่ายมา มีความสว่างภาพไม่สม่ำเสมอ เช่น ภาพจากกล้องที่ไม่การปรับความสว่างที่ดี ที่บริเวณขอบภาพมักจะมีเด�始กว่าบริเวณกลางภาพ หรือ ภาพถ่ายทางอากาศที่มีโทนสีด้านหนึ่งของภาพสว่างกว่าอีกด้านหนึ่งของภาพ เป็นต้น

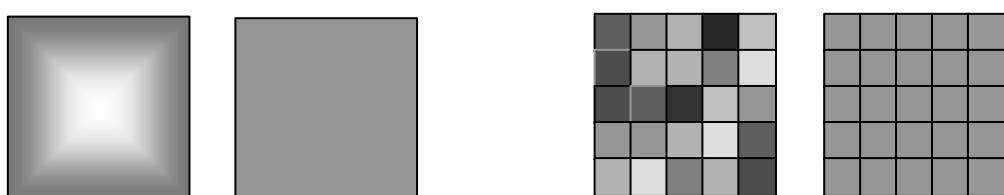


รูป 8-18 แสดงแนวโน้มโถนสีที่แตกต่างกันจากจุดศูนย์กลางภาพไปสู่ขอบภาพ

ก) แนวภาพตัดของโถนสีที่พิจารณา ข) แนวโน้มของความสว่างของโถนสีที่ลดลง

ในกรณีนี้ซอฟต์แวร์โม่เสคมักจะมีเครื่องมือช่วยในการจำลองแบบค่าเฉลี่ยของโถนสีที่มีแนวโน้มจะสว่างกว่าที่กลางภาพและความสว่างลดลงในแนวศูนย์กลางภาพไปสู่ขอบภาพ แล้วประยุกต์แบบจำลองค่าเฉลี่ยโถนสี ปรับสีให้สม่ำเสมอสว่างเท่ากันทั่วทั้งภาพ

อีกเทคนิคทางเลือกคือการแบ่งพื้นที่บนภาพเป็นพื้นที่สีเดียวกันที่มีความสว่างต่างกัน แล้วพิจารณาค่าเฉลี่ยความสว่างในส่วนของภาพอยู่ทั้งหมด จากนั้นทำการปรับโถนสีของแต่ละส่วนอยู่ของภาพให้สว่างกลมกลืนกัน เทคนิคนี้เรียกว่า Image Dodging



ข) ก่อนทำ Color Balancing (ซ้าย)
และหลังการทำ Color Balancing (ขวา)

ก) ก่อนทำ Image Dodging (ซ้าย)
และหลังการทำ Image Dodging (ขวา)

รูป 8-19 แสดงหลักการปรับทางรังสีเพื่อเตรียมก่อนโม่เสค

ระหว่างในแนวเป็นพื้นที่แคบๆ ก้าวไปจากแนวของรอยต่อชน อาจจะมีการเกลี่ยโทนสีหรือความสว่างภาพในพื้นที่ใกล้แนวต่อชนให้ดูกลมกลืน การเกลี่ยสีบิเวณรอยต่อชนบางครั้งเรียกว่า **Featuring**

8.7.3 การสร้างภาพใหม่ที่เป็นภาพโมเสคแล้ว

เมื่อผู้ใช้ได้ตัดสินใจเลือกบิเวณรอยต่อแล้ว ซอฟแวร์จะให้กำเนิดภาพใหม่และเขียนผลลัพธ์ลงบนหน่วยความจำหรือสื่อบันทึกข้อมูล ในระหว่างการอ่านข้อมูลจุดภาพจากส่วนของภาพที่ต้องการใช้งาน ก็จะมีการประยุกต์ค่าแก้ทางรังสีตามเทคนิคต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วก่อนที่จะนำไปเปลี่ยนลงในข้อมูลภาพใหม่ ภาพโมเสคที่ได้จะมีความต่อเนื่องและสามารถนำไปใช้งานเพื่อการผลิตแผนที่ให้สมบูรณ์ต่อไป

ในขั้นตอนการโมเสคนี้จะต้องมีการให้กำเนิดภาพใหม่โดยการ **Resampling** ค่าความสว่างจุดภาพหรือโทนสีจากภาพถ่ายทางอากาศต้นฉบับ การเลือกวิธีการ Resampling โดยทั่วไปผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้หลายวิธี โดยที่แต่ละวิธีจะต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์และการคำนวนที่แตกต่างกันและจะให้เนื้อภาพผลลัพธ์มีคุณภาพในแบบของความคล้ายคลึงกับต้นฉบับแทบทั้งหมด จะเลือกใช้วิธี Bi-cubic Resampling เนื่องจากจะให้ปริมาณข้อมูลที่ถ่ายทอดออกมามีความใกล้เคียงกับต้นฉบับมาก ดังจะเห็นได้จากทฤษฎีของการ Resampling ว่าวิธีการ Bi-cubic จะมีการสูญเสียข้อมูลน้อยที่สุด ดังตาราง

วิธีการ Resampling	จำนวนจุดภาพที่ต้องใช้	คุณภาพของข้อมูลที่สูญเสีย
Nearest Neighbourhood	1 x 1	15 %
Bi-linear	2 x 2	4%
Bicubic	4 x 4	<1%

ตาราง 8-5 แสดงเทคนิคการ Resampling

ภาพօร์โทที่ตอกันเป็นผืนใหญ่จากการนำภาพมา mosaic กันแล้วให้ตัดภาพถ่ายให้เป็นรูปประจำแผนที่ รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส พร้อมกับทำการ resampling ให้ภาพมีความละเอียดเทียบเท่ากับระยะทางบนพื้นดิน (GSD) ตามที่กำหนดไว้ ซอฟแวร์จะจัดเก็บในรูปแบบของเรสตอร์พร้อมข้อมูลอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ (georeferencing) แผนที่ภาพถ่ายօร์โทแต่ละวางแผนควรจะมีค่าพิกัดเริ่มต้นของมุมบนสุดของวางแผนเป็นค่าพิกัดที่ลงตัวในระบบพิกัดจากที่เลือกใช้ ถ้าไม่มีความต้องการเป็นอย่างอื่น ควรจะให้ระวังมีข้อบข้อเสียที่ตรงกับวางแผนที่มาตั้งฐาน เช่น

- กรณีการผลิตแผนที่ภาพօร์โทมาตราส่วนเล็ก ควรเลือกขนาดวางแผนให้เท่ากับวางแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร
- กรณีการผลิตแผนที่ภาพօร์โทมาตราส่วนใหญ่ ควรเลือกขนาดวางแผนให้เท่ากับวางแผนที่แปลงที่ดินของกรมที่ดิน สำหรับมาตราส่วน 1:4,000 , 1:2,000, 1:1,000 และ 1:500 (กรมที่ดิน 2547)

8.8 การจัดเก็บ

แผนที่ภาพօอร์โทที่ได้ควรจะอยู่ในรูปแบบการจัดเก็บมีประสิทธิภาพในรูปแบบที่ได้มาตรฐาน คุณภาพรวมมีการคำนึงถึงประสิทธิภาพในการสืบค้นคืน โดยเฉพาะข้อมูลแผนที่ภาพที่ทำการผลิตเป็นผลลัพธ์สุดท้ายหากมีข้าดาทยร้อยเมกะไบต์ ซึ่งบ่อยครั้งจะต้องการทรัพยากรสูงเกินกว่าคอมพิวเตอร์โดยเฉลี่ย ดังนั้นจึงควรทำการสร้าง "ปีรามิดข้อมูล" ให้กับข้อมูลเหล่านั้นด้วย การสร้างปีรามิดข้อมูลคือการลดขนาดข้อมูลลงที่ละครึ่งไปเรื่อยๆ โดยการ Resampling ข้อมูลภาพดิจิตอลจากเดิมให้เป็นภาพดิจิตอลใหม่ที่เล็กลง นั่นคือ ข้อมูลภาพใหม่จะลดลงหรือ 25% ของปริมาณของมูลในลำดับก่อนหน้านี้ การสร้างปีรามิดแม้จะทำให้ข้อมูลภาพใหญ่ขึ้นแต่โดยรวมแล้วก็จะใหญ่ขึ้นสูงสุดเพียง 33% จากข้อมูลภาพเริ่มต้นเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เรียกดูแผนที่มักจะต้องขยายออกหรือย่อเข้า ปอยครึ่งจะเกินขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์ที่มีใช้งานอยู่ทั่วไป ทำให้การเรียกดูข้อมูลช้าหรือใช้การไม่ได้ การสร้าง "ปีรามิดข้อมูล" ทำให้การเรียกดูบนคอมพิวเตอร์ที่มีทรัพยากรจำกัดสามารถเรียกดูได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปแบบของการจัดเก็บควรจัดเก็บอยู่ในรูปแบบที่มาตรฐานได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางใน คุณภาพรวมผู้ผลิตซอฟแวร์สารสนเทศภูมิศาสตร์ เพราะจะทำให้ใช้งานได้สะดวกและสามารถนำไปใช้ในอนาคตยังสามารถใช้ซอฟแวร์อ่านกลับออกมารายงานได้

รูปแบบมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับจากนานาชาติ ISO TC-211 Gridded and Imagery Data และมาตรฐานจากกลุ่ม OpenGIS Consortium (OGC) ตัวอย่างของรูปแบบนี้ได้แก่ USGS SDTS with Raster Profile, USGS/GeoTIFF, GeoTIFF, NIMA/NITF เป็นต้น

8.8.1 ขนาดของแผนที่ภาพօอร์โท

ปริมาณของข้อมูลที่ต้องใช้ในการจัดเก็บแผนที่ภาพถ่ายօอร์โทขึ้นอยู่กับขนาดระหว่างของแผนที่ภาพ ความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน(Ground Sampling Distance: GSD) และชนิดของข้อมูล (data type) สำหรับแต่ละจุดภาพ กรณีที่เป็นแผนที่ขาวดำข้อมูลสำหรับแต่ละจุดภาพก็จะเป็น 1 ไบต์หรือ 8 บิต แต่ถ้าเป็นภาพสีและต้องการคุณภาพสูงสุดแต่ละจุดภาพก็จะเป็น 3 ไบต์หรือ 24 บิต

8.8.1.1 แผนที่ภาพօอร์โทมาตรฐานเล็ก

กรณีการผลิตแผนที่ภาพօอร์โทมาตรฐานส่วนเล็ก ควรเลือกขนาดระหว่างให้เท่ากับระหว่างแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ระหว่างแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหารมาตรฐาน 1:50,000 จะมีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมเกือบจตุรัสขนาดตามแนวเหนือ ใต้ และตะวันออกจรดตะวันตก $\psi = 30'$ แล้วยังแบ่งออกเป็นจตุภาค แต่ละจตุภาคมีขนาดกว้างยาวเท่ากันคือ $\psi = 15'$ สมมุติให้ระหว่างแผนที่ครอบคลุมพื้นที่อยู่ที่ เส้นลองติจูด $\varphi = 14^\circ$ เหนือ และสมมุติให้โลกเป็นทรงกลมมีรัศมี $R = 6371km$

ความกว้างระหว่างแผนที่ตามแนวตะวันออกไปตะวันตกได้จาก

$$W = (R \cdot \cos(\varphi))\psi = (6371 * \cos(14^\circ)) \cdot \left(\frac{15 \cdot \pi}{60 \cdot 180} \right) = 26.97 km \quad \text{สมการ 8-16}$$

เช่นเดียวกันจะได้ความกว้างแผนที่ตามแนวเหนือ-ใต้จาก

$$H = R \cdot \psi = 6371 \cdot \left(\frac{15 \cdot \pi}{60 \cdot 180} \right) = 27.80 \text{ km}$$

สมการ 8-17

ดังนั้นเพื่อความง่ายสมมุติให้ระหว่างแผนที่มาตราฐานให้มีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัส 28 กม. x 28 กม. เมื่อทำการผลิตแผนที่ภาพօร์โธที่ความละเอียดบนพื้นดิน GSD เป็นค่าต่างๆ กันดังนี้

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน GSD (เมตร)	ขนาดของแผนที่ภาพօร์โธข้าวคำ 8 บิท (GByte)	ขนาดของแผนที่ภาพօร์โธสี่เหลี่ยมจตุรัส 24 บิท (GByte)
0.25	12.5	37.6
0.5	3.1	9.4
0.75	1.3	4.2
1	0.78	2.35
10	7.8 MByte	23 MByte
30	0.87 MByte	2.6 MByte

ตาราง 8-6 เปรียบเทียบความต้องการเนื้อที่ในหน่วยความจำสำหรับแผนที่ภาพสีและข่าวคำที่ความละเอียดจุดภาพต่างๆ

การเรียกชื่อระหว่างก็ควรเรียกชื่อตามที่กำหนดในแผนที่ภูมิประเทคโนโลยามาตราส่วน 1:50,000 เพื่อให้เป็นมาตราฐานเดียวกัน และผู้ใช้มีความสะดวกเรียกใช้ได้ด้วยชื่อดิบ

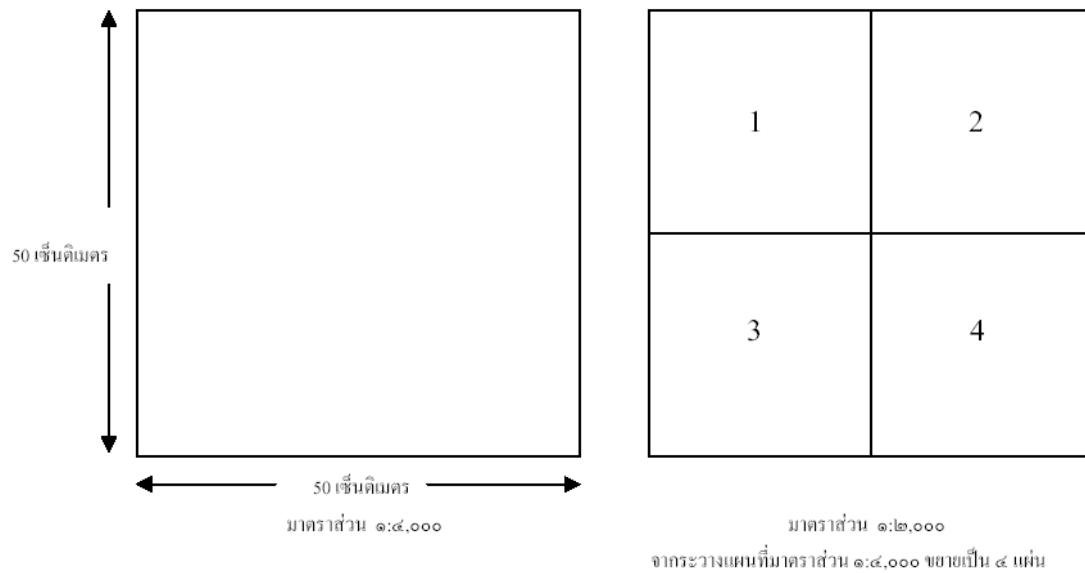
8.8.1.2 แผนที่ภาพօร์โธมาตราส่วนใหญ่

กรณีการผลิตแผนที่ภาพօร์โธมาตราส่วนใหญ่ ควรเลือกขนาดระหว่างให้เท่ากับระหว่างแผนที่ แปลงที่ดิน ของกรมที่ดิน สำหรับมาตราส่วน 1:4,000, 1:2,000, 1:1,000 และ 1:500 (กรมที่ดิน 2547) ระหว่างแผนที่ที่ดิน ของกรมที่ดินจะเป็นระบบการฉายแผนที่yuที่เอ็ม และมีขนาดระหว่างกว้างและยาวเท่ากันเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 50 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ 2 x 2 ตร.กม. สำหรับมาตราส่วน 1:4,000

การเรียกชื่อระหว่างแผนที่ที่ดิน .ให้นำหมายเลขอปะจำแผนที่ภูมิประเทคโนโลยามาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7018 (เดิมใช้ลำดับชุด L7017) และหมายเลขอปะนั้นที่มีค่าพิกัดมุมล่างด้านซ้ายระหว่างแผนที่นั้นปรากฏอยู่ แล้ว ตามด้วยค่าพิกัดราบทหลักลิบและหลักหน่วยของกิโลเมตรที่เป็นเลขคู่ และค่าพิกัดตั้งหลักลิบและหลักหน่วยของ กิโลเมตรที่เป็นเลขคู่ของมุมล่างซ้ายของระหว่างแผนที่ระบบพิกัดจากyuที่เอ็ม มาตราส่วน 1:4,000

กรณี มาตราส่วนอื่นๆ กำหนดให้เริ่มนับต้นด้วยชื่อระหว่างแผนที่ระบบพิกัดจากyuที่เอ็ม มาตราส่วน 1:4,000 แล้วตามด้วย “-” หมายเลขอปะนั้น และมาตราส่วน ตามลำดับ เช่น 5638 || 2606 -5 (1:1,1000)

การกำหนดชื่อแผนที่ระหว่างแผนที่กรมที่ดิน ปรากฏดังภาพด่อไปนี้



1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48
49	50	51	52	53	54	55	56
57	58	59	60	61	62	63	64

มาตราส่วน ๑:๔,๐๐๐
จากราวงแผนที่มาตราส่วน ๑:๔,๐๐๐ ขยายเป็น ๔ เท่า

มาตราส่วน ๑:๕๐
จากราวงแผนที่มาตราส่วน ๑:๔,๐๐๐ ขยายเป็น ๖๔ เท่า

8-20 แสดงการใช้หมายเลขแผ่นระหว่างแผนที่

จะเห็นได้ว่าแผนที่ภาพคอร์ฟที่มีความละเอียดของจุดภาพมากๆ เช่นที่ความละเอียดจุดภาพลดลงเมื่อเดินทางกว่า 1 เมตร ($GSD < 1.0$ เมตร) แผนที่ภาพคอร์ฟที่ได้จะมีขนาดภาพต้องการเนื้อที่ในการจัดเก็บลงบนคอมพิวเตอร์สูงในระดับบิตต์ หากต้องการจัดเก็บไว้ตัวรักษาก็อาจจะเลือกใช้สื่อในการจัดเก็บที่แพรว่าย เช่น สื่อจัดเก็บความจุสูงที่มีราคาถูกลงเรื่อยๆ

สื่อจัดเก็บ (media)	ความจุ
Compact Disk (CD)	650-700 MB
Digital Versatile Disc (DVD)	4.7 GB (single-layer) / 8.5 GB (dual-layer)
High-Density DVD (HD-DVD)	15 GB (single-layer) / 30 GB (dual-layer)
Blu-Ray Disc (BD)	25 GB (single-layer) / 50 GB (dual-layer)

ตาราง 8-7 สื่อความจุสูงสำหรับการจัดเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ในการจัดเก็บและแจกจ่าย ตลอดจนด้วยสถานะปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีหน่วยความจำในระดับร้อยเมกะบิตต์เท่านั้น บ่อยครั้งที่ระหว่างแผนที่มาตราฐานจะถูกแบ่งเป็นระหว่างแผนที่ย่อยลงไปอีก โดยแบ่งต่อไปเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ของระหว่างแผนที่มาตราฐาน ที่นิยมเรียกในภาษาอังกฤษว่า “Quad-Sheet” หรือ “Quarter-quadrangle” ซึ่งหนึ่งระหว่างแผนที่จะสามารถแบ่งต่อไปอีกเป็นสี่ระหว่างยอด

เช่นเดียวกับแผนที่ภาพคอร์ฟที่มีขนาดของจุดภาพที่ความละเอียดขยายกว่า 10 เมตร ขนาดระหว่างจะเล็กกว่าระดับร้อยเมกะบิตต์ ตั้งนั้นก็อาจมีการขอแบบระหว่างให้ใหม่เข้า โดยจะเป็นจำนวนเท่าของขนาดระหว่างมาตราฐานเช่น 4 หรือ 16 เท่า เพื่อให้จำนวนระหว่างแผนที่มีจำนวนน้อยลง แต่ขณะเดียวกันขนาดของระหว่างไม่ใหญ่เกินกว่าที่จะใช้งานได้สะดวก

8.9 การประยุกต์ใช้การบีบอัดข้อมูล

การบีบอัดข้อมูลภาพสำหรับการผลิตภาพถ่ายօร์โทສามารถทำได้ดี เนื่องจากแผนที่ภาพօร์โทเป็นผลิตภัณฑ์ปลายทาง (down-stream) การบีบอัดข้อมูลทำได้โดยการพิจารณาลดข้อมูลภาพใน Frequency Domain โดยมีการเลือกส่วนของภาพที่มีช่วงคลื่นความถี่ที่คล้ายกันแทนด้วยรหัสข้อมูลเดียวกัน และในการจัดเก็บประมวลผลก็จะมีการใช้เทคนิค โครงสร้างข้อมูลชนิดピรามิด (Image Pyramid) รวมกับการแบ่งข้อมูลเป็นส่วน ร่วม (Image Tiling) ด้วย

ภาพถ่ายօร์โทอาจนำไปใช้ในงานผลิตแผนที่หรือผนวกเข้ากับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ประลิทมิกภาพของการบีบอัดข้อมูลมักจะกล่าวถึงในรูปแบบของอัตราส่วนของปริมาณข้อมูลหลังจากการบีบอัดหารด้วยปริมาณข้อมูลก่อนทำการบีบอัด โดยทั่วไปยิ่งทำการบีบอัดด้วยอัตราการบีบอัดสูง ความแตกต่างระหว่างภาพต้นฉบับก่อนบีบอัดและภาพผลลัพธ์หลังบีบอัดยิ่งเห็นได้ชัดเจนขึ้นเรื่อยๆ

ภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นดิจิทัลและผลผลิต เช่น ภาพօร์โท หรือ แผนที่ภาพօร์โท หากทำการบีบอัดด้วยการบีบอัดชนิดสูญเสียข้อมูล (Lossy Compression) เช่น JPEG, MrSID, ECW และ lossy JPEG2000 เป็นที่ยอมรับกันว่าการบีบอัดชนิดสูญเสียพัฒนาบนพื้นฐาน Discrete Cosine Transform (DCT) เช่น JPEG จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการบีบอัดที่พัฒนาบนพื้นฐานการแปลงชนิด Wavelet เช่น MrSID, ECW และ lossy JPEG2000

โดยทั่วไปเมื่อทำการบีบอัดด้วยการบีบอัดชนิดสูญเสียที่พัฒนาบนพื้นฐาน Discrete Cosine Transform (DCT) เช่น JPEG จะได้อัตราการบีบอัดที่น้อยกว่าการบีบอัดด้วย การบีบอัดที่พัฒนาบนพื้นฐานการแปลงชนิด Wavelet เช่น MrSID, ECW และ Lossy JPEG2000 นอกจากนั้นการบีบอัดภาพสีจะได้อัตราการบีบอัดภาพที่สูงกว่าการบีบอัดภาพขาวดำ (8 บิต) ทั้งนี้เนื่องจากความซ้ำซ้อนของข้อมูลภาพในแต่ละภาพขององค์ประกอบของภาพสี (24 บิต) ที่ประกอบด้วย สัญญาณภาพแดง เขียว และน้ำเงิน ถือได้ว่ามีความใกล้เคียงกัน การบีบอัดด้วยอัตราการบีบอัดดังกล่าวจะทำให้ความแตกต่างของภาพก่อนและหลังการบีบอัดเมื่อดูด้วยตาไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงได้มากนัก

อัลกอริธึมในการบีบอัดภาพ	DCT-based	Wavelet-based
ภาพขาว-ดำ 8บิต	1:5	1:10
ภาพสี 24 บิต	1:10	1:30

ตาราง 8-8 อัตราการบีบอัดที่คาดว่าจะทำได้สำหรับการบีบอัดภาพถ่ายทางอากาศชนิดสูญเสีย

อัตราบีบอัดที่ประมาณการในตารางข้างต้นนี้เป็นประมาณการเบื้องต้นเท่านั้น ปัจจัยสำหรับสำหรับอัตราการบีบอัดชนิดสูญเสียที่แตกต่างกันนี้อยู่ปัจจัยสำคัญดังนี้

- 1) ความซ้ำซ้อนของเนื้อภาพ
- 2) คุณภาพของภาพผลลัพธ์ว่ามีความชัดใกล้เคียงกับต้นฉบับ

โปรแกรมบีบอัดข้อมูลภาพ MrSID และ ECW เป็นอัลกอริธึมที่ทางบริษัทผู้ผลิตต่างกำลังแข่งขันกันเพื่อให้เกิดมาตรฐานและความแพร่หลาย ทำให้ผู้ใช้ที่ต้องการบีบอัดแฟ้มข้อมูลขนาดเล็ก (น้อยกว่า 500 เมกะ

ไปที่) สามารถนำโปรแกรมแบบให้เปล่าที่บริษัทผู้ผลิตให้ดาวน์โหลดจากอินเตอร์เน็ตได้ เองมาใช้งานได้ แต่ ปัจจุบันหน่วยงานมาตรฐานนานาชาติ ISO ได้พัฒนามาตรฐาน JPEG2000 ที่ใช้อัลกอริธึม wavelet เช่นกัน JPEG2000 เป็นมาตรฐานเปิด ที่สามารถบีบอัดภาพได้ทั้งชนิดสูญเสีย (lossy) และไม่สูญเสีย (lossless) ปัจจุบันได้รับการยอมรับจากผู้ผลิตซอฟต์แวร์รวมทั้งนักพัฒนาซอฟต์แวร์ทั่วไป

การใช้การบีบอัดข้อมูลนอกจากจะทำให้ข้อมูลเด็กลงไปมาก ยังได้ประโยชน์จากการใช้การจัดรูปแบบ โครงสร้างข้อมูลเรสเทอร์โดยใช้เทคนิค pyramid และ tiling ซึ่งจะทำให้การใช้งานภาพเรสเทอร์บันคอมพิวเตอร์ ที่มีทรัพยากรจำกัด ได้สัดส่วนลดของงานการส่งผ่านข้อมูลผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ทำให้สัดส่วนลดเร็วขึ้นมาก

ประสิทธิภาพของโปรแกรมบีบอัดข้อมูลสามารถได้จากอัตราการบีบอัดที่ทำให้ภาพเมื่อดูด้วยตาแล้วมีรูปลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อย ประสิทธิภาพยังต้องพิจารณาถึงขนาดแฟ้มข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้รับเปลี่ยนไปอย่างไร นอกจากระยะเวลาในขณะที่ทำการบีบอัดข้อมูลก็สำคัญมากเนื่องจากแฟ้มข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมีขนาดใหญ่

เมื่อผู้ใช้ต้องการอ่านภาพลับมาแสดงผลผู้ใช้ต้องมีซอฟแวร์ในการคลายคืนแฟ้มภาพที่ได้บีบอัดไว้ ซึ่ง ปัจจุบันผู้ผลิตซอฟแวร์บีบอัดยังไม่ได้ตอกลังกันเป็นมาตรฐาน ผู้ใช้จะต้องใช้ซอฟแวร์ที่ใช้สำหรับการคลายคืนภาพ โดยเฉพาะ ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปผู้ใช้จะได้รับซอฟแวร์สำหรับโปรแกรมบีบอัดสำหรับการอ่านกลับเพื่อแสดง ภาพได้พร้อมกับซอฟแวร์ไมโครสافتชื่อ viewer หรือ viewer ที่มีร่วมกับซอฟแวร์สารสนเทศ ภูมิศาสตร์เช่น ในรูปของ plugs-ins หรือ extension ต่างๆ สำหรับเวลาในการคลายคืนภาพนั้นมักจะเร็วมาก เนื่องจากการอ่านข้อมูลจาก硬盘ที่มักจะเป็นคุณสมบัติความเร็วในการประมวลผลนั้นลดลงไปมากเนื่องจากขนาดของข้อมูลที่เล็กลงไปหลายเท่า ดังนั้นประสิทธิภาพของการคลายภาพคืนจะขึ้นอยู่กับอัลกอริธึมที่ใช้และ ความเร็วของการประมวลผลเป็นสำคัญ

8.10 การประยุกต์ใช้งานแผนที่ภาคด้วยเครื่องมือ

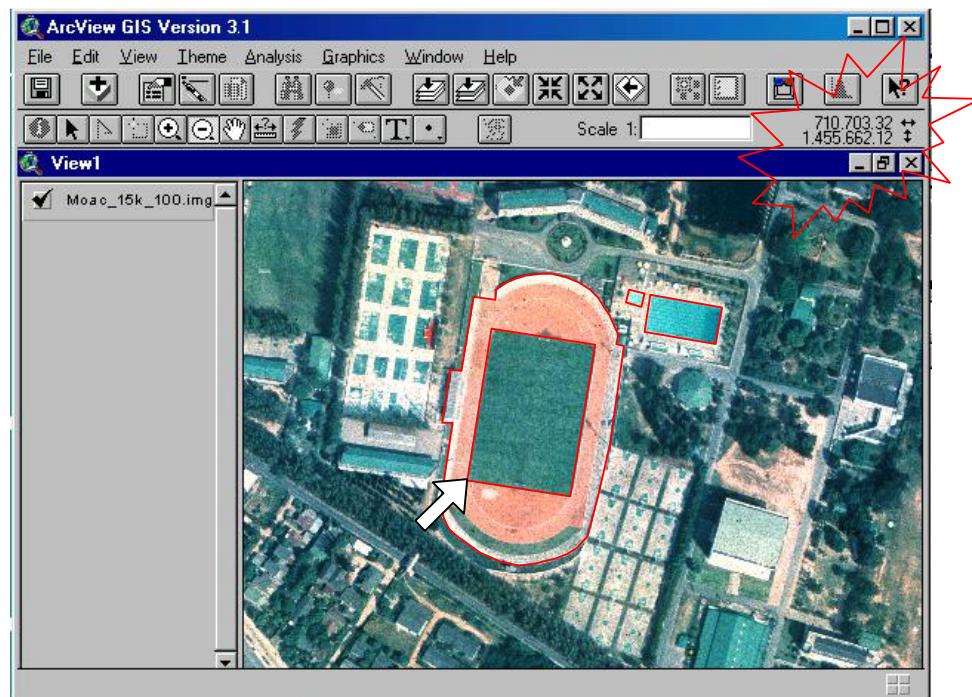
การผลิตภาพถ่ายด้ดแก้校อิร์โธเรคติฟฟ์ฟอท (Digital Orthorectified Photograph) เป็นกระบวนการให้กำเนิดภาพใหม่จากภาพถ่ายไดๆ การผลิตภาพถ่ายด้ดแก้校อิร์โนนิยมใช้มากในการทำแผนที่ เพราะสามารถทำได้รวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้จะยังคงไว้ซึ่งข้อมูลภาพทั้งหมดที่ปรากฏบนภาพ บริมาณข้อมูลบนภาพเมื่อเทียบกับข้อมูลแผนที่ลายเส้นที่ทำขึ้นจากภาพถ่ายนั้นจะมากกว่ามาก ภาพถ่ายด้ดแก้校อิร์ที่ได้สามารถนำไปประกอบกันเป็นผืนใหญ่ขึ้นโดยเทคนิค “การโมเสกภาพ (Mosaic)” ซึ่งจะทำให้ได้ภาพที่ต่อเนื่องกัน สามารถนำไปตัดเป็นระหว่างแผนที่มาตรฐานต่อไปได้ ภาพถ่ายด้ดแก้校อิร์โนกจากจะนำไปใช้โดยตรงโดยการนำไปใช้ในการผลิตแผนที่ภาพพิมพ์ลงบนhaar์ดคอปป์แล้วตอบแต่งด้วยองค์ประกอบทางแผนที่ต่างๆ ซึ่งทำให้ได้แผนที่อย่างรวดเร็ว ประหยัดในเวลุ่นและคงเดิมแล้ว ยังมีการนำเข้าไปใช้ในรูปแบบดิจิทัลโดยตรงอีกด้วย ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

ปัจจุบันเนื่องจากความแพร่หลายทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ การผลิตภาพถ่ายด้ดแก้校อิร์ดิจิทัลสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลหนึ่งได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะผู้ประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มักจะขาดแคลงแผนที่ฐานที่ทันสมัย จึงสามารถนำแผนที่ภาพถ่ายอิร์ทที่ผลิตขึ้นจากภาพถ่ายทางอากาศอย่างรวดเร็ว และมีบริมาณข้อมูลบนภาพอยู่มากมาย ที่ผู้ใช้สามารถดึงออกนำไปเป็นข้อมูลต่างๆโดยการวิเคราะห์และแปลงภาพได้เป็นอย่างดี

นอกจากนั้นในทางวิศวกรรม การก่อสร้างสาธารณูปโภค การพัฒนาพื้นที่ การวางแผนเมือง ที่ต้องการแผนที่ที่ทันสมัยและมีความถูกต้องสูงในระยะเวลาอันสั้น แผนที่ภาพถ่ายอิร์ทสามารถตอบสนองต่อความต้องการนี้ได้เป็นอย่างดี แผนที่ภาพถ่ายอิร์ทสามารถนำแนวเข้ากับระบบช่วยเชื่อมแบบ (CAD) เพื่อช่วยการวิเคราะห์ การวางแผน ต่างๆได้

- ตัวอย่างการใช้งานกับระบบภูมิสารสนเทศ

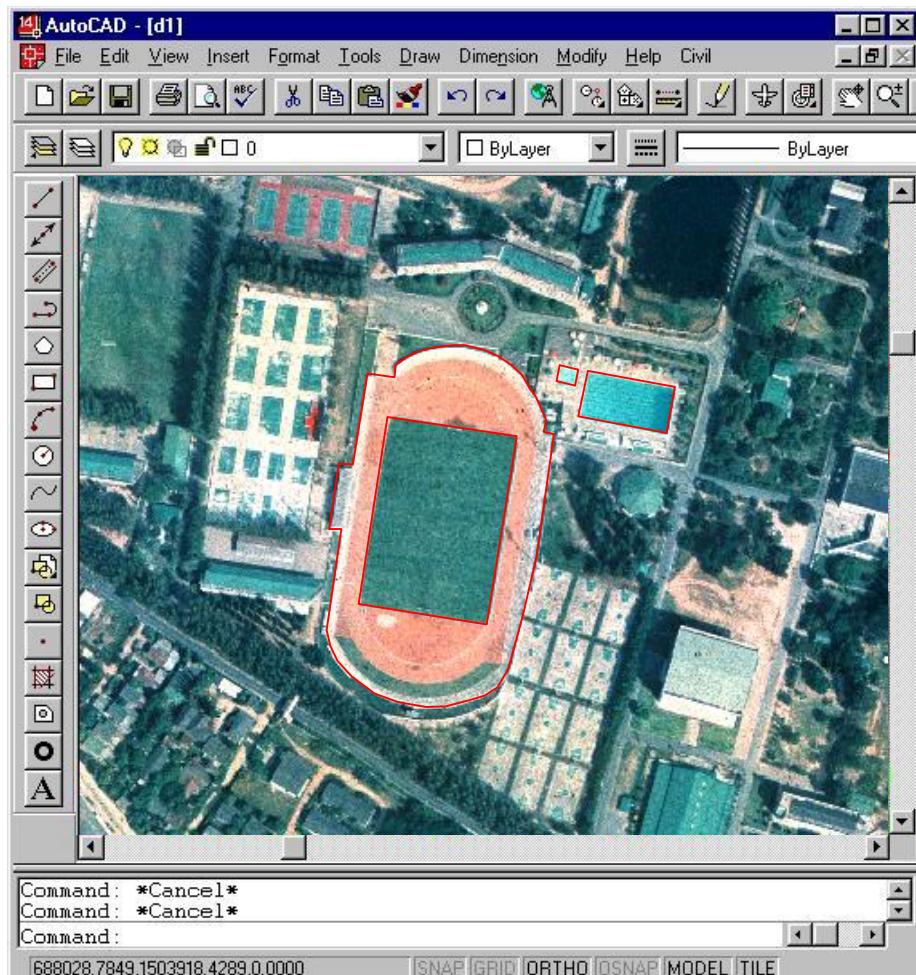
ในภาพข้างล่างแสดงการนำเอาแผนที่ภาพถ่ายօร์บิตไปใช้งานกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ จะเห็นว่าเราสามารถสร้างชั้นข้อมูลให้กับระบบเพื่อการอ้างอิงตำแหน่งได้โดยง่าย หากว่าต้องการสร้างชั้นข้อมูลเวกเตอร์จากแผนที่ภาพเบื้องหลัง เช่น การปรับปรุงข้อมูลเวกเตอร์ในพื้นที่บริเวณสนามกีฬา ก็สามารถทำได้ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าสามารถวัดพื้นที่ขนาด รูปว่าง ได้โดยตรงบนภาพได้ทันที เช่นเดียวกับแผนที่ ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



รูปภาพ 8-21 การใช้งานแผนที่ภาพօร์บิตกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcView (<http://www.esri.com>)

- ตัวอย่างการใช้งานกับระบบคอมพิวเตอร์ช่วยเขียนแบบ

ในรูปถัดไปเป็นการใช้งานแผนที่ภาพถ่ายกับระบบช่วยเขียนแบบ (CAD) ที่แพร่หลายทั่วไป โดยการนำแผนที่ภาพมาซ่อนเป็นภาพเบื้องหลัง

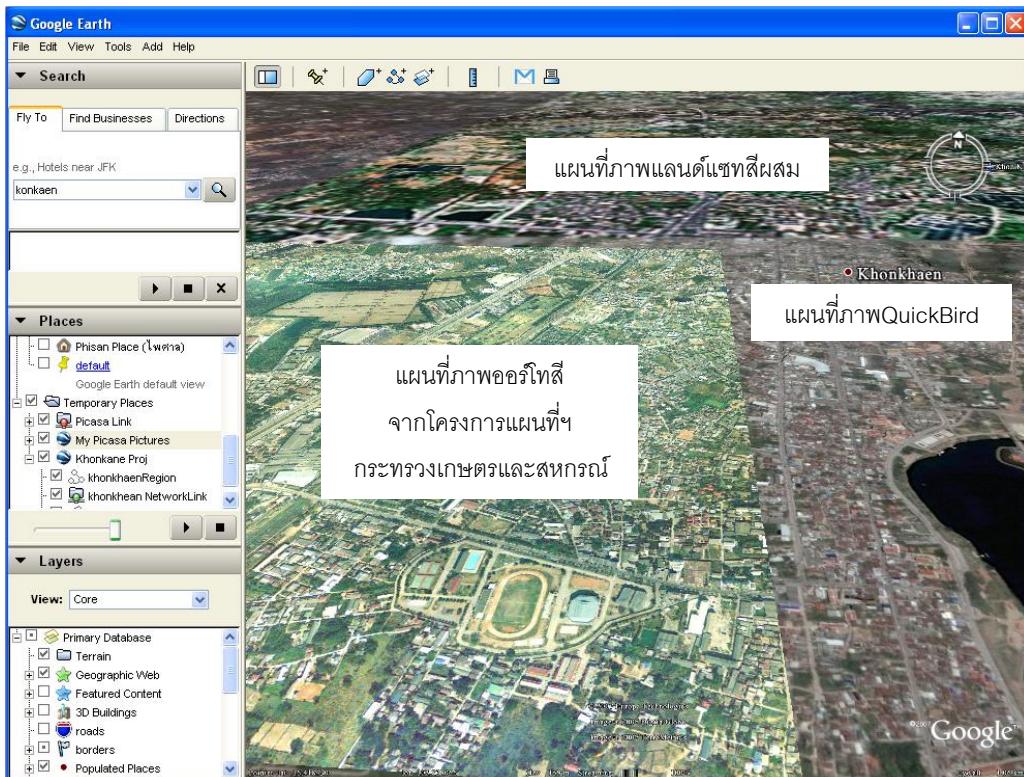


รูปภาพ 8-22 การใช้งานแผนที่ภาพออร์โทกมบ์บนช่วยเขียนแบบ AutoCAD (<http://www.autocad.com>)

- ตัวอย่างการใช้งานกับระบบ 3D-Geobrowser

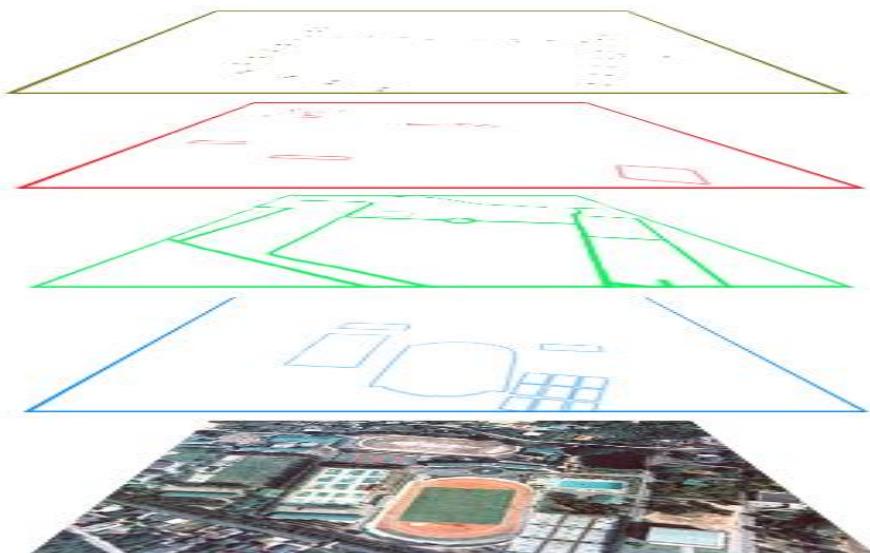
การทดสอบระหว่างแผนที่ภาพของประเทศไทยที่มีค่าพิกัดกำกับหรือ Georeferencing กับระบบ 3-D Geobrowser “Google Earth”. Google Earth เป็นที่นิยมแพร่หลายด้วยเหตุผลที่มีแผนที่ภาพที่มีจุดภาพให้เห็นละเอียดถึง “เมตร” แต่อย่างไรก็ตามแผนที่ภาพรายละเอียดสูงมีได้มีให้ใช้ทุกพื้นที่ และอาจเป็นภาพในห้วงเวลาที่ต้องการได้ บ่อยครั้งที่ผู้ใช้มีความต้องการในการนำแผนที่ภาพออก ข้อมูลฟีเจอร์แผนที่ที่ตนต้องการนั้นความเข้าไป

ในภาพแสดงการปูทับแผนที่ภาพของประเทศไทยสืบจากโครงการแผนที่ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ แผนที่ภาพของไทยมีขนาดระหว่าง 3×3 ตร.กม. ถูกปูเต็มไปบริเวณจังหวัดขอนแก่นเพื่อ ทดสอบแผนที่ภาพดาวเทียมรายละเอียดสูง QuickBird ที่ได้จาก Map Service Google Earth ที่ไม่สมบูรณ์ และทดสอบแผนที่ภาพดาวเทียมแลนด์เชาฟ์ฟลีฟ์สมที่มีขนาดจุดภาพ 15 เมตร ที่แสดงรายละเอียดให้เห็นน้อยกว่ามาก



รูปภาพ 8-23 การใช้งานแผนที่ภาพดัดแก้กับ 3D-GeoBrowser Google Earth

เมื่อมีการแปลงวิเคราะห์ภาพ อาจมีการนำข้อมูลเพิ่มเติมเข้ามา เช่น แผนที่ที่มีอยู่เดิม การออกแบบทางถนนเพิ่มเติม ความรู้ความชำนาญของผู้แปลงภาพ ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลเฉพาะในแต่ละลักษณะ เช่น เส้นทางคมนาคม การใช้ที่ดิน อาคารและสิ่งปลูกสร้าง ที่ตั้งของสาธารณูปโภค ดังตัวอย่างในภาพ



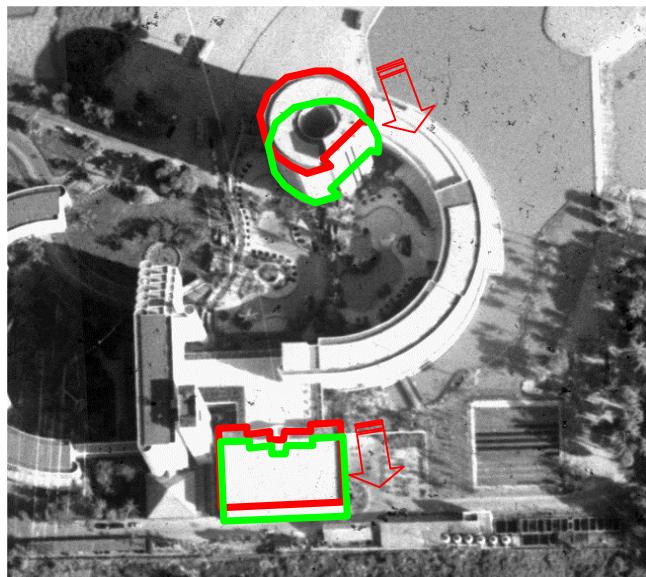
รูปภาพ 8-24 การวิเคราะห์และสร้างข้อมูลชั้นต่างๆ จากแผนที่ภาพออร์โท

8.10.1 การคัดลอกลายเส้นบนภาพถ่ายดัดแก้กอร์ติ

การคัดลอกลาย (delineation) เป็นกระบวนการสร้างสกัดข้อมูลจากภาพโดยการสังเกต วัตถุหรือสิ่งที่ปรากฏให้เห็นบนภาพแล้วคัดลอกรูป่างตัวแทน การคัดลอกลายมักจะใช้ระบบคอมพิวเตอร์ภูมิศาสตร์สนับสนุนหรือระบบคอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบ โดยเฉพาะการใช้ภาพดัดแก้กอร์ติเป็นภาพเบื้องหลัง (background) ภาพถ่ายทางอากาศที่ผ่านกระบวนการคัดแยกเป็นแผนที่ดิจิตอลที่ได้จะมีความถูกต้องทางตำแหน่งและใช้งานได้เช่นเดียวกับแผนที่ลายเส้นมาตรฐาน โดยจะมีข้อมูลสิ่งต่างๆ ปรากฏบนภาพตามที่บันทึกไว้ได้ในขณะบินถ่ายภาพ แต่มีข้อควรระวังคือ ความสูงในแบบจำลองระดับที่บันทึกและนำมาใช้ในกระบวนการคัดแก้เป็นตัวแทนความสูงของภูมิประเทศเท่านั้น กล่าวคือภาพดัดแก้กอร์ติที่ผลิตได้ในปัจจุบันโดยมากหมายถึงภาพ "Ground Orthophoto" ในกระบวนการคัดแก้จะไม่ได้มีการคำนึงถึงความสูงของสิ่งปลูกสร้าง เช่น บ้าน อาคาร ตลอดจน ต้นไม้ ฟุ่มไม้

ดังนั้นเมื่อต้องการคัดลอกลาย เช่นการนำเข้าข้อมูลไปสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ การติดจีตตี้วัตถุหรือสิ่งต่างๆ ที่ปรากฏบนภาพบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่นการรังวัดตำแหน่ง ขนาด และรูป่าง การคัดลอกลายเส้นสำหรับวัตถุที่มีความสูงและยังมีร่องรอยของความคลาดเคลื่อนที่ยังไม่ได้ดัดแก้ เช่น อาคารสูง มักจะทำที่ขอบด้านบนสุดของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูง เนื่องจากเห็นได้ชัดและมีรูปร่างคงที่ แต่ตำแหน่งของวัตถุที่มีความสูงนั้นจะมิใช่ตำแหน่งจริงในภูมิประเทศ ซึ่งจะปรากฏให้เห็นชัดในแผนที่มาตราส่วนขนาดใหญ่ นี้

พื้นที่เป็นเพระในกระบวนการการดัดแก้օร์โทเพื่อแก้ความผิดพลาดที่เกิดจาก relief displacement นั้น ความสูงที่ให้เป็นความสูงในภูมิประเทศที่ผิดนิ บนภาพถ่ายดัดแก้օร์โทจะปรากฏของหลังคาตึกสูงและฐานของตึกพร้อมๆกัน โดยที่ตำแหน่งที่ฐานตึกคือตำแหน่งข้างลงที่ถูกต้อง ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถใช้เส้นรอบรูปของตึกที่ได้จากการดิจิตาร์化ของตึกด้านบนที่ปรากฏเป็นรูปของที่สมบูรณ์ได้ แต่จะต้องเลื่อนภาพดูนั้นไปยังตำแหน่งที่ถูกต้องซึ่งอยู่ที่ฐานของตึก และที่ฐานของตึกจะใช้ในการกำหนดตำแหน่งที่ถูกต้อง นอกจากนี้หากฐานตึกที่ปรากฏเห็นได้มากกว่า 2 จุดก็สามารถที่จะใช้จุดเหล่านั้นในการกำหนดขนาดที่ถูกต้องของสิ่งปลูกสร้างได้อีกด้วย



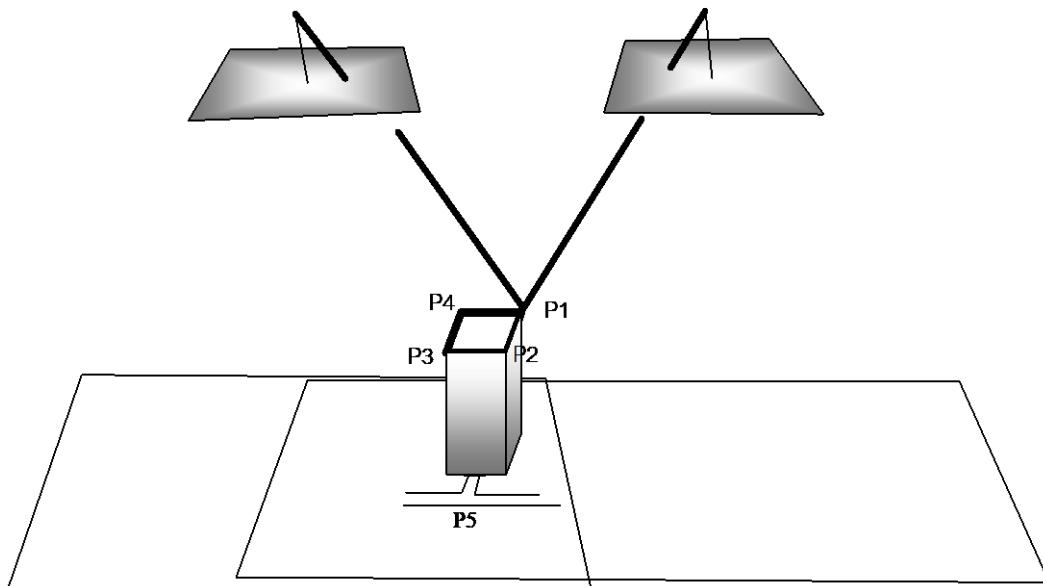
รูปภาพ 8-25 เส้นรอบอาคารสูงและตำแหน่งที่ถูกต้องบนภาพถ่ายօร์โทจากภาพถ่ายทางอากาศ

ผลจากการคำนึงถึงความต่างของภูมิประเทศที่ใช้เป็นแบบจำลองระดับในการคำนวนดัดแก้และความสูงของสิ่งปลูกสร้าง จะทำให้สิ่งปลูกสร้างที่มีความสูงแตกต่างจากภูมิประเทศที่รังวัดที่ห่างออกไปจากศูนย์กลางของภาพถ่ายทางอากาศ เช่นอาคารสูง ได้รับการรังวัดและแก้ไขให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง สามารถจัดเก็บค่าพิกัดลงในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มีความถูกต้องสูงสุด

แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการรังวัดค่าพิกัดของจุดใดพร้อมค่าระดับให้มีความละเอียดถูกต้องสูงควรรังวัดบนภาพคู่สามมิติ ความมองเห็นสามมิติทำให้ผู้รังวัดเห็นรูปร่างสามมิติของภูมิประเทศโดยการแปลงภาพคุณลักษณะเด่นของการมองเห็นสามมิติในงานรังวัดภาพถ่ายทางอากาศยังทำให้เห็นความต่างด้านความสูงอย่างชัดเจนขึ้นเนื่องมาจากการรังวัดแนวตั้ง (Vertical Exaggeration)

ดังตัวอย่างในภาพต่อไปนี้ แสดงหลักการรังวัดฐานแบบจำลองสามมิติ ผู้รังวัดนิยมทำรังวัดฐานอาคารที่ระดับหลังคาที่อาจเรียกว่า เส้นรอบรูปหลังคา (Roof-Line) การรังวัดเส้นรอบรูปหลังคาทำได้สะดวกเนื่องจากจะไม่มีการบดบังน้อยจากสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ และพื้นพื้นที่ต้นไม้สูง เส้นรอบรูปหลังคาเป็นตัวแทนรูปอาคารที่มีความสมบูรณ์ที่สุด แต่ผู้รังวัดควรคำนึงว่า ฐานของอาคารที่รังวัดได้บนแบบจำลองสเตอเรโอะจะมีความครบถ้วนสมบูรณ์ได้พิกัดเป็นพิกัดทั้งทางราบและทางตั้ง เช่นในภาพคือจุด P1,P2,P3 และ P4 ค่าระดับที่ได้มา

เป็นค่าระดับที่หลังคา หากต้องการทราบความสูงอาคาร หรือระดับที่ฐานอาคาร การรังวัดอาคารนี้ต้องมีการรังวัดเพิ่มเติม เช่นการรังวัดจุดระดับใดๆที่เด่นชัดใกล้กับอาคาร เช่นจุดตัดทางเดินเข้าอาคารที่ใกล้เดียบ จุด P5 ในภาพ หรือการใช้ความสามารถในการนำจุดที่เป็นตัวแทนการรังวัดพิกัดสามมิติหรือ ที่เรียกว่า จุดลอย “ແຕະ” ที่พื้นใกล้กับอาคาร เพื่อให้ได้ค่าระดับที่ฐานของอาคาร



รูปภาพ 8-26 การรังวัดพิกัดวัสดุของรูปร่างอาคารบนข้อมูลสามมิติที่ได้จากภาพคู่สามมิติ

จะเห็นการรังวัดบนภาพคู่สามมิติพร้อมการมองเห็นสามมิติจะต้องใช้ความชำนาญ จำเป็นต้องใช้เครื่องช่วยมองเห็นสามมิติพร้อมซอฟต์แวร์สำหรับการแสดงผลแบบสามมิติและการรังวัด ในการนี้อาจเป็นข้อจำกัดสำหรับบางลักษณะงานที่ต้องการความประยศ ความรวดเร็ว และการนำภาพดัดแก้ขอร์โนไปใช้ดิจิตาร์พร้อมๆกันในหลายสถานีทำงาน เพื่อสกัดข้อมูลเวกเตอร์หรือไฟล์เจอร์

8.11 แผนที่ภาพสืօอร์ทโดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ในช่วงปี พ.ศ. 2543-2549 กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้ดำเนินการโครงการจัดทำแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยการบินถ่ายรูปทางอากาศสี มาตราส่วน 1 : 25,000 ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ ภาพที่ได้ถูกนำมาสแกนด้วยสแกนเนอร์ความละเอียดสูง (Precise Scanner) ด้วยความละเอียดจุดภาพ 15 เมตรอนหรือคิดเป็นความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.375 เมตร ภาพถ่ายทางอากาศดิจิทัลที่ได้เป็นจำนวนภาพกว่า 70,000 ภาพ ภาพดิจิทัลที่ได้ถูกนำมาจัดทำแผนที่รูปถ่ายอร์ทสี จะได้ผลิตผลเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่พื้นฐานในรูปแบบที่ทันสมัย มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ในการจัดทำแผนที่ทรัพย์สินที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ นอกจากนี้ผลิตผลที่ได้ยังพร้อมที่จะนำไปสังเคราะห์เป็นแผนที่ใหม่ (derived map) หรือสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม (value-added products) เช่น ข้อมูลระดับของภูมิประเทศทั่วประเทศที่ทุก ๆ ระยะห่าง 10 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ และจัดเก็บในรูปแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขหลายรูปแบบ สามารถนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในมิติที่สามของภูมิประเทศในระดับดำเนินการ ซึ่งไม่เคยมีมาก่อนในกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ความละเอียดของแผนที่รูปถ่ายอร์ทสีใหม่ที่มาตราส่วน 1:4,000 ที่ผลิตได้จะมีความละเอียดจุดภาพคิดเป็นเป็น $25,000 \times 15$ เมตรอนซึ่งเท่ากับ 0.375 เมตร ความละเอียดจุดภาพดังกล่าวทำให้เห็นรายละเอียดดังภาพที่ปรากฏต่อไปนี้



รูปภาพ 8-27 ตัวอย่างภาพแผนที่จากโครงการแผนที่ฯของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ก) ระหว่างหมายเลข 554116616 ครอบคลุมพื้นที่ 3×3 ตารางกิโลเมตร

ข) รายละเอียดบนภาพที่มีความละเอียดจุดภาพ 0.375 เมตรที่สามารถตรวจสอบได้

ตารางข้างล่างแสดงปริมาณข้อมูลหลักของระบบคิดจากปริมาณข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่สแกนแล้ว และข้อมูลแพนที่ภาพ และข้อมูลแบบจำลองระดับ นอกเหนือนี้ ในตารางเดียวกันยังแสดงปริมาณข้อมูลถ้ามีการใช้เทคโนโลยีการบีบอัดที่อัตรา 1:30 ซึ่งถือว่าเป็นการบีบอัดที่ทำให้ปริมาณข้อมูลภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญแต่ยังคงให้รายละเอียดของภาพแทบทะมุนเปลี่ยนแปลงเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า

ตารางต่อไปนี้แสดงประมาณของปริมาณข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศสีและแพนที่ภาพอิเล็กทรอนิกส์จากการบีบอัดที่ต้องการจัดการ ภาพถ่ายทางอากาศสแกนด้วยความละเอียดจุดภาพ 15 เมตร ในครอง และแพนที่ภาพอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตมีความละเอียดจุดภาพ 0.4 เมตร ในตารางต่อไปนี้มีการเปรียบเทียบระหว่างชุดภาพที่ไม่มีการบีบอัด และชุดภาพที่มีการบีบอัดด้วยอัตราการบีบอัด 1:30 เช่นการใช้ Lossy Wavelet-based Compressor เช่น JPEG2000 เป็นต้น

ชนิดข้อมูล	การจัดเก็บแบบไม่บีบอัด	การจัดเก็บบีบอัด 1:30
ภาพถ่ายทางอากาศ #15 ในครองจำนวนประมาณ 70,000 รูป	49.4 TB	1.6 TB
แพนที่ภาพอิเล็กทรอนิกส์ #0.4 เมตร	10.3 TB	0.3 TB
ปริมาณข้อมูลรวมทั้งสิ้น	59.7 TB	1.9 TB

ตาราง 8-9 ปริมาณข้อมูลหลักของภาพถ่ายทางอากาศและแพนที่ภาพอิเล็กทรอนิกส์ (TB = Terabyte)

8.12 คำถางท้ายบท

☞ ต้องการผลิตแผนที่ภาพจากภาพถ่ายด้วยแก๊สอิร์โธ โดยที่กำหนดให้ภาพถ่ายทางอากาศมาตรฐาน 1:15,000 ถูกสแกนที่ความละเอียดจุดภาพ 12.5 ไมครอน จงตอบคำถางต่อไปนี้ โดยเปรียบเทียบทั้งภาพขาวดำ 8 บิทและภาพสี 24 บิท

- 1) ภาพถ่ายทางอากาศแต่ละภาพต้องการเนื้อที่ในการจัดเก็บเท่าใด
- 2) จวิจารณ์ว่าการแสกนภาพที่ความละเอียดดังกล่าว จะมีผลอย่างไรต่อกระบวนการทำงาน เช่น การจัดเก็บ ความคมชัด เวลาในการประมวล
- 3) ภาพถ่ายด้วยแก๊สอิร์โธจะมีขนาดจุดภาพบนพื้นดินเป็นเท่าใด เพราะเหตุใด
- 4) หากต้องการให้ผลิตแผนที่ภาพให้เป็นรูปที่มีขนาดเดียวกับรูปที่มีความละเอียด 1:50,000 จะต้องใช้ภาพถ่ายอากาศกี่ภาพในการผลิต
- 5) จากข้อ 4) แผนที่ภาพขนาดรูปที่มีขนาดเดียวกับรูปที่มีความละเอียด 1:50,000 จะต้องใช้เวลาในการจัดเก็บเท่าใด
- 6) จากข้อ 4) แผนที่ภาพขนาดรูปที่มีขนาดเดียวกับรูปที่มีความละเอียด 1:50,000 จะต้องใช้เวลาในการจัดเก็บเท่าใด
- 7) ถ้ากำหนดให้ประเทศไทยมีเนื้อที่เป็น 515,559 ตร.กม. หากต้องการผลิตแผนที่ภาพครอบคลุมทั่วประเทศตาม ความละเอียดในข้อ 3) จะมีแผนที่ดังกล่าวกี่รูป
- 8) หากให้ขนาดจุดภาพบนพื้นดิน GSD=1.0 เมตร
- 9) จากข้อ 5) หากใช้เทคโนโลยีการบีบอัดภาพ ที่สามารถบีบอัดระดับที่พอกใจเป็น 1:10 สำหรับภาพขาวดำ และ 1:20 สำหรับภาพสี จงคำนวนขนาดภาพ

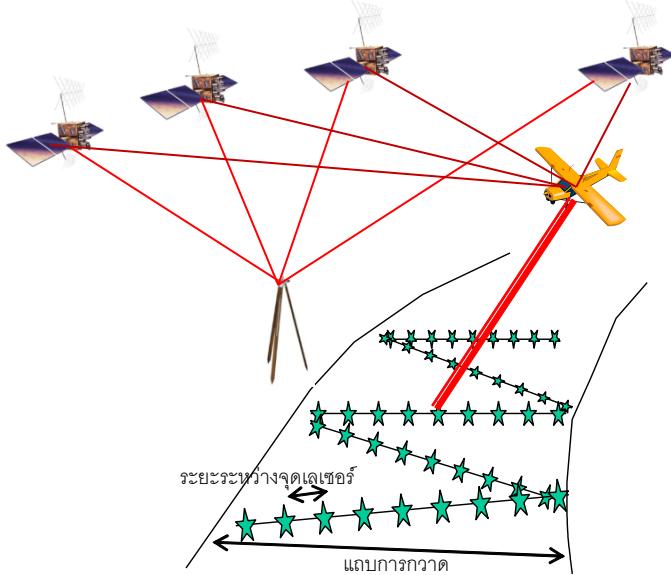
9. การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (Airborne Laser Scanning)

การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศมีวัตถุประสงค์หลักคือการได้มีซึ่งแบบจำลองระดับ (digital elevation model :DEM) ในพื้นที่ให้มีจุดระดับอย่างละเอียดหนาแน่นถึงมากกว่าหนึ่งจุดต่อตารางเมตร ค่าระดับที่ได้มีความละเอียดถูกต้องน่าเชื่อถือสูงถึงระดับเดซิเมตร ค่าระดับที่ได้ยังเป็นระดับของแบบจำลองพื้นผิว (digital surface model: DSM) อีกด้วย การสแกนใช้เครื่องวัดระยะทางที่เหมาะสมกับติดตั้งบนเครื่องบินและสามารถวัดระยะทางได้มากถึง 4 กิโลเมตร เครื่องมือดังกล่าวเรียกว่าระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศ (Airborne Laser Scanner: ALS) การรังวัดเครื่องเลเซอร์วัดระยะทางมีพื้นฐานมาจากเทคโนโลยีไลดาร์ (Light Detection and Ranging: Lidar) ไลดาร์ได้รับการพัฒนาจนมานับสิบปีในกลุ่มผู้พัฒนาเครื่องวัดระยะและระบบอิเล็กทรอนิกส์วัดระยะทาง แต่ได้พัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถรับมาใช้ในการรังวัดและสร้างแบบจำลองระดับอย่างกว้างขวางในช่วงเปลี่ยนศตวรรษ 2000 นี้

เทคโนโลยีการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ เป็นการใช้เครื่องวัดระยะทางระยะไกลที่ใช้แสงช่วงคลื่นเลเซอร์ด้วยความถี่สูง (high pulse repetition rate : PRF) วัดระยะทางจากอากาศยานไปสู่พื้นผืนภูมิประเทศ การวัดระยะทางเป็นไปอย่างต่อเนื่องออกไปในแนวตั้งจากกับแนวบินพร้อมๆ กับอากาศยานเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ระยะทางที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณให้เป็นค่าระดับจำนวนมากของจุดบนภูมิประเทศ ไลดาร์ในรุ่นแรก ๆ มีความถี่ในการปล่อยคลื่นเพื่อวัดระยะทางเริ่มต้นที่ประมาณ 5 KHz หรือ 5,000 ลูกคลื่นต่อวินาที พัฒนาการไลดาร์จนถึงปัจจุบันมีรุ่นมีความถี่การปล่อยคลื่นเลเซอร์สูงถึง 400 KHz หรือ 400,000 ลูกคลื่นต่อวินาที

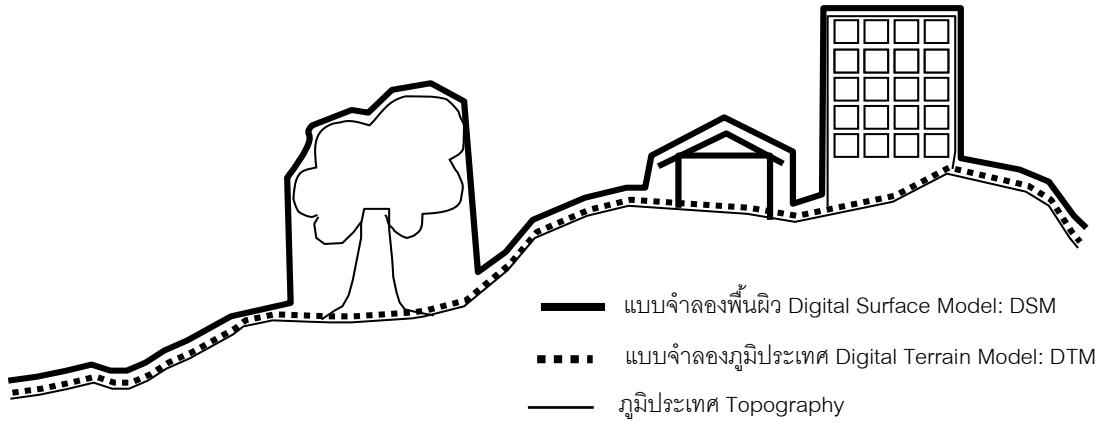
การรังวัดด้วยไลดาร์จัดเป็นการรังวัดโดยตรงจากอากาศยาน ความละเอียดถูกต้องสูง ค่าระดับที่รังวัดได้จากไลดาร์เนื่องจากแสงเลเซอร์มีความละเอียดถูกต้องสูงในช่วง 10 ถึง 30 ซม. ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดถูกต้องของการรังวัดระยะทางด้วยเลเซอร์เอง ประกอบกับตำแหน่งของอากาศยานที่สามารถตรวจจับด้วยความละเอียดถูกต้องสูงด้วยระบบอ้างอิงตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรอง (DG) ที่เป็นระบบบังคับตำแหน่งและการวางแผนตัวด้วยเทคโนโลยี Global Navigation Satellite System (GNSS) และ Inertial Motion Unit (IMU) การบูรณาการการรังวัดด้วยจีเอ็นเอสเอสไอเอ็มยูจะทำให้

ได้วิถีของอากาศยาน ในรูปแบบตำแหน่ง (position) ความเร็ว (velocity) และการเอียงตัว (attitude) ของอากาศยานและเซนเซอร์ท้ายที่สุด ดังนั้นระบบไลเดาร์จึงมีความยืดหยุ่นสามารถติดตั้งบนอากาศยานหลากหลายชนิด ทั้งชนิดปีกยึด (fixed wing type) และปีกหมุน (helicopter)



รูปที่ 9-1 แสดงหลักการการวัดเลเซอร์สแกนทางอากาศพร้อมรับสัญญาณ GNSS

แบบจำลองระดับจะเป็นตัวแทนของภูมิประเทศ บริเวณที่มีสิ่งปลูกสร้างหรือไม้ต้นไม้ ทึบหนาแน่นอาจเป็นอุปสรรคต่อการวัดระดับจากภาพถ่ายได้ ปัจจุบันเนื่องจากขีดความสามารถในการประมวลผลทางคอมพิวเตอร์กราฟิกส์และการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายขึ้น การวัดความสูงสิ่งปลูกสร้างและพื้นผิวไม่น่าสนใจและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เราเรียกแบบจำลองในลักษณะนี้ว่า แบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model: DSM) ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างสองแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังภาพ



รูปที่ 9-2 แบบจำลองระดับและแบบจำลองพื้นผิว

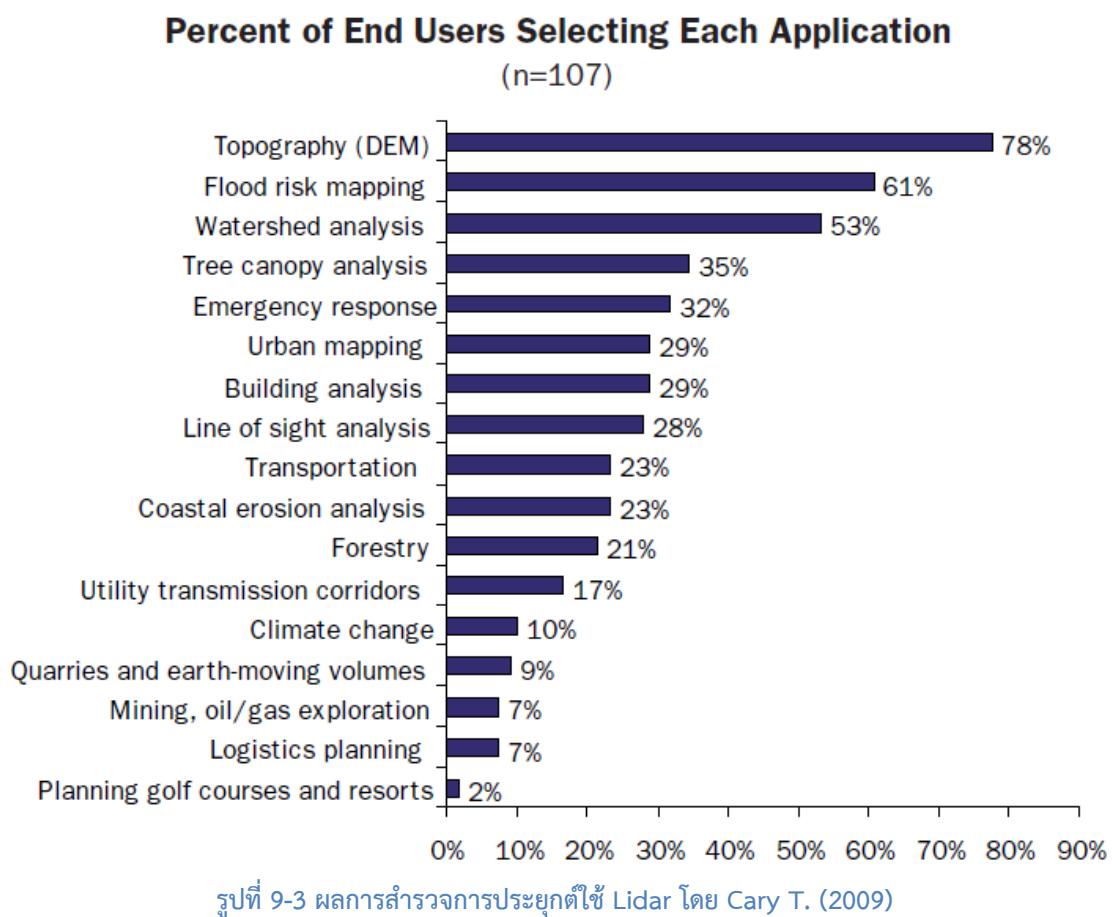
ปัจจุบัน DSM ถูกใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการนำไปใช้สร้างแบบจำลองของเมือง (City Modeling) และในระยะต่อไปยังจะมีการนำไปใช้ในการแก้ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งยอดของสิ่งปลูกสร้างที่ปัจจุบันยังถูกละเลยอยู่ ภาพดัดแก้ที่ปรับแก้ความเคลื่อนที่นำ DSM มาใช้อาจเรียกว่า “true orthophoto”

ไลดาร์มีความสามารถในการทะลุทะลวงยอดไม้และพืชที่ไม่หนาทึบมาก ในพื้นที่ป่าไม้และมีพืชพรรณปกคลุม เลเซอร์ความถี่สูงจากไลดาร์ยังมีโอกาสที่จะทะลุทะลวงซ่องว่างลงไปสัมผัสพื้นผิวภูมิประเทศและสะท้อนกลับมาอย่างเช่นเชอร์ ระบบไลดาร์ยังสามารถทำงานได้ค่อนข้างอิสระจากสภาพอากาศที่ไม่ดีนัก เมื่อเทียบกับเทคนิคการรังวัดด้วยภาพที่ต้องการสภาพอากาศที่โปร่งใส มีแสงอาทิตย์ส่องสว่างพื้นภูมิประเทศที่พอเหมาะสม มุ่งสูงดวงอาทิตย์ต้องไม่สร้างเงาของวัตถุบนภูมิประเทศที่หอด้วยตาให้เป็นอุปสรรคต่อการรังวัด เนื่องจากไลดาร์เป็นระบบที่มีพลังงานในตัวเองจึงไม่ต้องพึ่งพาแสงอาทิตย์ ดังนั้น การบันทึกข้อมูลสามารถทำได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงมุ่งสูงของดวงอาทิตย์และทำได้ทั้งกลางวันกลางคืน แบบจำลองระดับจากไลดาร์มีจุดระดับที่ถี่มาก ๆ เมื่อเทียบกับจุดระดับแบบเดิมที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพ และสามารถสร้างแบบจำลองได้ดีกว่างานรังวัดด้วยภาพ เช่น ในเมืองที่อาคารสูงมีการบดบังซึ่งกันและกัน

ปัจจุบันแนวโน้มการใช้งานไลดาร์เพื่อรังวัดแบบจำลองระดับของภูมิประเทศมีมากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเหตุผลของความละเอียดถูกต้อง ความสมบูรณ์ของแบบจำลองที่ได้ทั้งแบบจำลองพื้นผิวและแบบจำลองระดับ ความน่าเชื่อถือ ความเร็วของการสำรวจและการผลิต แบบจำลองระดับและ

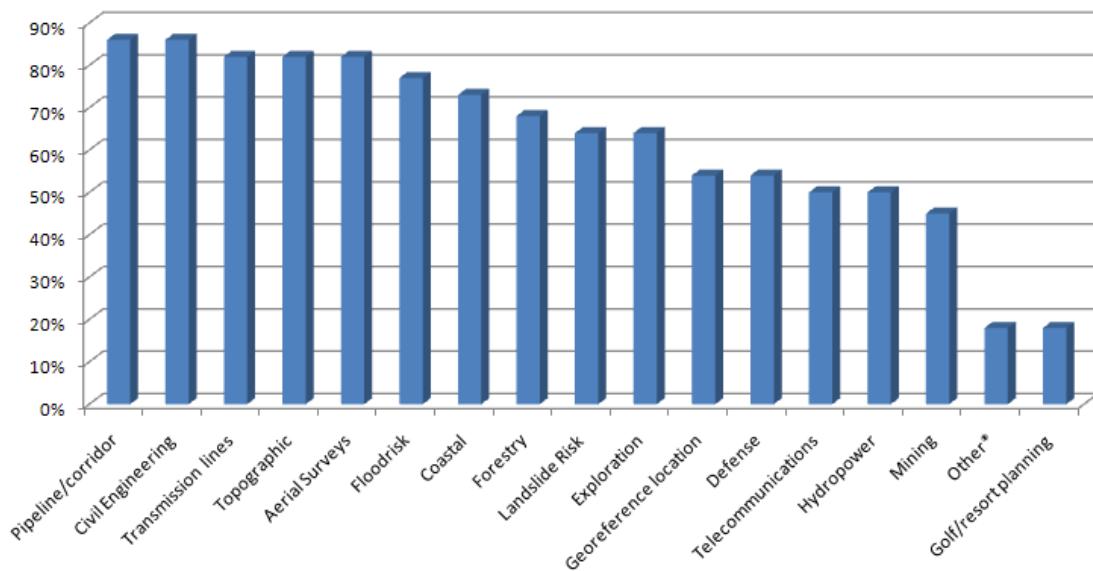
แบบจำลองพื้นผิวความลักษณะสูงทำให้เกิดความเป็นได้ในการสร้างผลิตภัณฑ์แผนที่ใหม่ ๆ เช่น การสร้างแบบจำลองของเมือง การตัดแก้ภาพออร์โทนิเดแท็จริง (true orthophoto) เป็นต้น

Cary T. (2009) ได้สำรวจสถานภาพตลาดของไลดาร์ทั่วโลกจากผู้ใช้ 268 กลุ่มใน 28 ประเทศ กว่า 80% มาจากทวีปอเมริกาเหนือ จากการสอบถามพบว่า การนำไปใช้ผลิตแบบจำลองระดับได้รับการยอมรับมากที่สุดร้อยละ 78 รองลงมาคือการประยุกต์ใช้ทำแผนที่เสียงภัยน้ำท่วมร้อยละ 61 การวิเคราะห์พื้นที่รับน้ำร้อยละ 53 และยังมีการประยุกต์ใช้อื่นๆอีกจำนวนมาก การประยุกต์ใช้อื่นๆแสดงไว้ในบาร์กราฟต่อไปนี้



รูปที่ 9-3 ผลการสำรวจการประยุกต์ใช้ Lidar โดย Cary T. (2009)

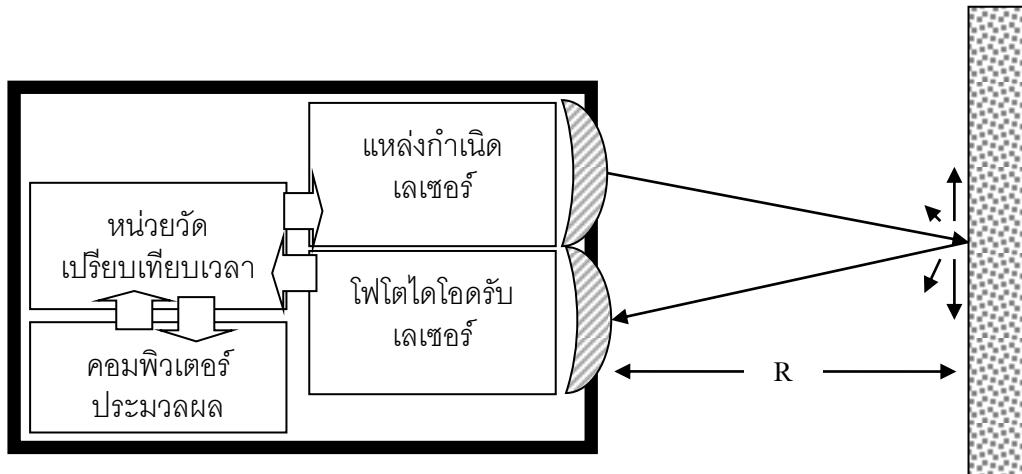
และผลการสำรวจโดย BC Carm (2009) ก็มีผลไปในทิศทางเดียวกัน การประยุกต์ใช้ลิเดาร์เน้นหนักไปทางการสำรวจในแนวเส้นทาง การประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรมโยธา การตรวจสอบสารส่งศักย์สูง การทำแผนที่ภูมิประเทศ การทำแผนที่ทางอากาศ การพิจารณาพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม เป็นต้น



รูปที่ 9-4 ผลการสำรวจการประยุกต์ใช้ Lidar โดย BC-CARMS (2006)

9.1 องค์ประกอบระบบเลเซอร์สแกนเนอร์

ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์มีเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ การรังวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้ประโยชน์จากการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังในการทะลุทะลวงและเป็นลำแสงควบคู่กัน เช่น แสงเซอร์ (laser) เครื่องวัดระยะทางจะกำหนดเลเซอร์และจับเวลาในการเดินทางด้วย “หน่วยวัดเปรียบเทียบเวลา” เมื่อแสงไปตกกระทบพื้นผิว แสงจะสะท้อนกลับ การสหอนกลับได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดพื้นผิวว่าเป็นของแข็ง เรียบหรือหยาบ แห้งหรือชื้น เมื่อแสงเดินทางกลับมาถึงเครื่องรับ จะมีการเปรียบเทียบเวลาอีกครั้ง



รูปที่ 9-5 หลักการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

เมื่อทราบเวลาคูณด้วยความเร็วแสงจะได้ระยะทางเป็น 2 เท่า ของระยะทางจากเครื่องวัดระยะไปยังพื้นผิว ดังความสัมพันธ์

$$R = \frac{v \cdot t}{2}$$

โดยที่ R คือระยะทางจากเครื่องวัดไปยังวัตถุ

v คือความเร็วการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

t คือระยะเวลาที่สัญญาณเดินทาง

ตัวอย่าง

ความเร็วของแสงกำหนดให้เป็น $v = 299,792,458$ เมตร ต่อ วินาที

หากระบบเลเซอร์ทำงานที่ระดับ $R = 1,000$ เมตร

$$t = \frac{2 \cdot R}{v}$$

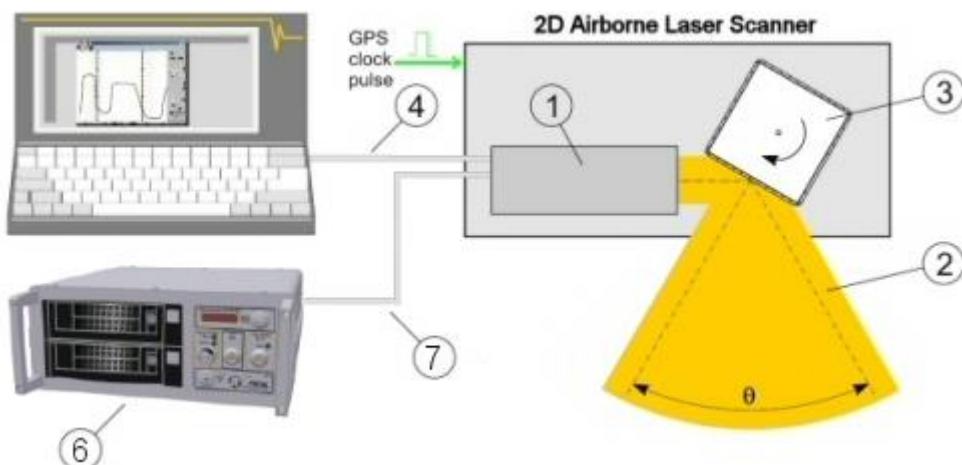
$$t = \frac{2 \cdot 1,000}{299,792,458} = 6.671 \mu\text{sec.}$$

จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่เลเซอร์เดินทางจากอากาศยานไปกระทบพื้นผิวภูมิประเทศและเดินทางกลับใช้เวลาเพียง 6.671 หน่วยในล้านวินาที

เพื่อให้เครื่องวัดระยะทางมีความสามารถวัดระยะไปบนพื้นผิวภูมิประเทศเป็นพื้นที่กว้าง จึงมีการปรับให้การส่งสัญญาณคลื่นวัดระยะทางให้มีการเบี่ยงเบนออกไปบริเวณกว้างได้ หากมีการนำเครื่องมือดังกล่าวติดตั้งบนอากาศยานหรือพาหนะที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง ก็จะทำให้วัดระยะทางจากจุดไปเป็นการกว้าง และจากการกว้างไปเป็นพื้นที่ในที่สุด

ในภาพแสดงหลักการทำงานของเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศยาน Riegl ในภาพรูปที่ 9-5

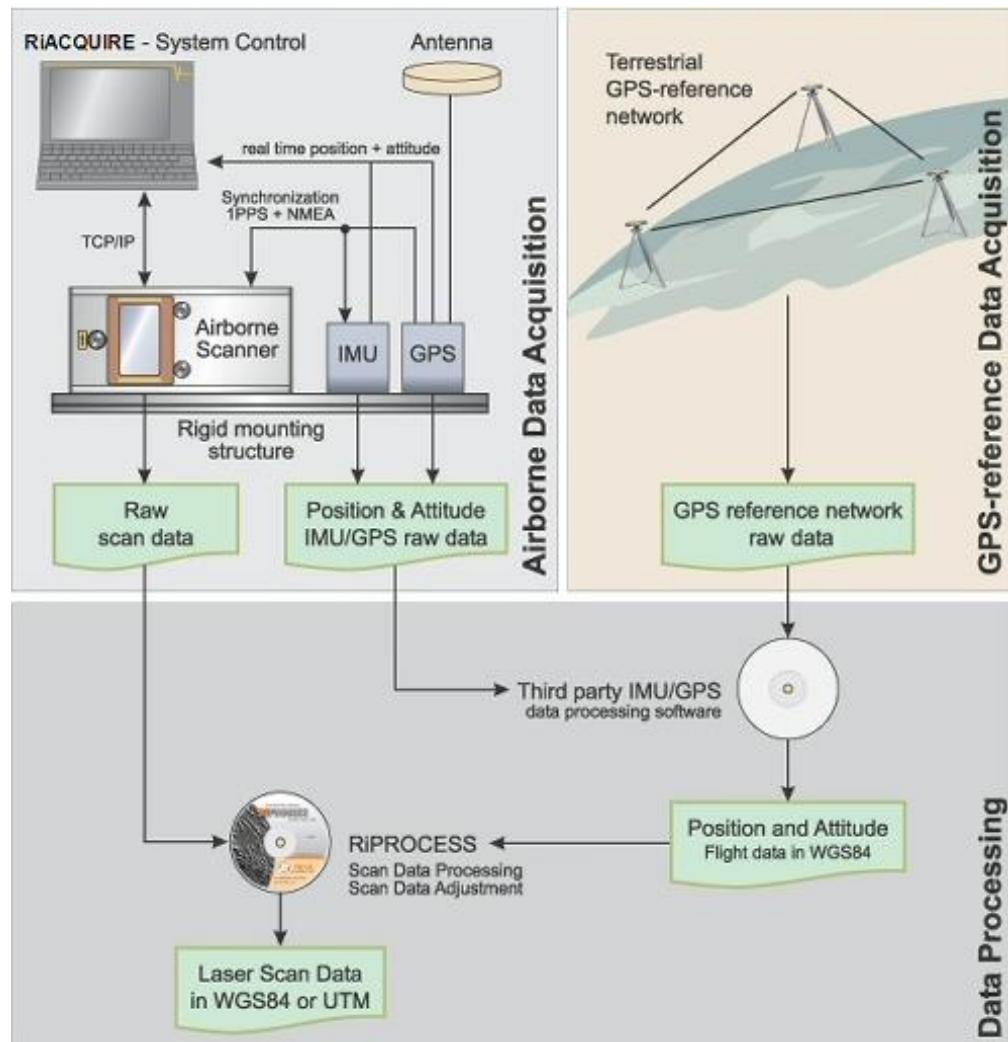
- ① แหล่งกำเนิดเลเซอร์และตัวรับ
- ② แสงเลเซอร์ที่ภาคออกไป
- ③ ปรีซึมสะท้อนหมุนออกแบบให้ส่วนหักเหแสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์มีการเคลื่อนไหวเพื่อเลเซอร์ถูกบังคับไปในทิศทางที่ต้องการ
- ④ คอมพิวเตอร์ควบคุมพร้อมสัญญาณจีพีเอสกำหนดเวลา (timing) เชื่อมต่อระบบด้วย Ethernet Interface (TCP/IP)
- ⑤ เครื่องวิเคราะห์รูปร่างคลื่น (waveform analysis)
- ⑥ คือหน่วยความจำบันทึกข้อมูล



รูปที่ 9-6 หลักการเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ (<http://www.riegl.com>)

ระบบสแกนเนอร์เลเซอร์ทางอากาศ (airborne Laser scanner: ALS) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

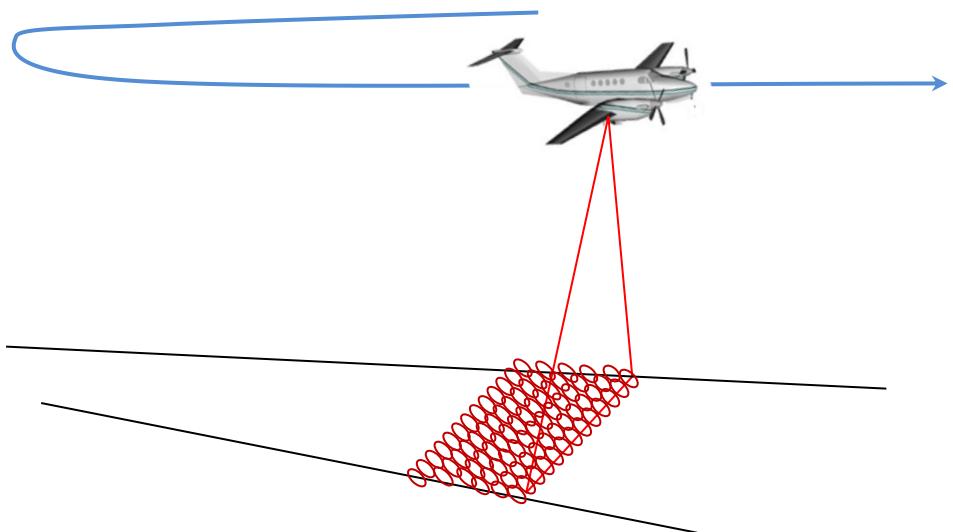
- 1) ส่วนบันทึกข้อมูล (airborne data acquisition) เป็นระบบที่ติดตั้งบนอากาศยานประกอบด้วยตัว laser scanner เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ควบคุม สัญญาณจะเข้าจังหวะกับนาฬิกาจีพีเอส ในอากาศยานยังมีระบบกำหนดตำแหน่งตรง GNSS/IMU ดังนั้นข้อมูลที่บันทึกได้จะมี 2 ส่วนหลัก คือ ข้อมูลค่าที่ได้จากการรังวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ซึ่งจะต้องมีค่ามุกวดของลำแสงเทียบกับระบบเลเซอร์ และอีกส่วนหนึ่งคือสัญญาณ GNSS และ IMU เพื่อนำมาประมวลผลภายหลัง ร่วมกับสัญญาณจีพีเอสบนภาคพื้นดิน
- 2) ส่วนสนับสนุนการกำหนดตำแหน่งตรง (GPS referece acquisition) เพื่อให้การกำหนดตำแหน่งมีความละเอียดถูกต้องน่าเชื่อถือสูง ในระหว่างการบันทึกเลเซอร์ จะมีการรับสัญญาณ GNSS พร้อมบันทึกสัญญาณ IMU บนภาคพื้นดินในรัศมี 30 ถึง 60 กิโลเมตร จะต้องมีการรับสัญญาณ GNSS ด้วยเครื่องรับสัญญาณ geodetic-grade เพื่อให้ได้สัญญาณมาประมวลผลภายหลังร่วมกับสัญญาณจากบนเครื่องบิน
- 3) ส่วนประมวลผล (data processing) เป็นการประมวลผลสัญญาณและข้อมูลต่างๆ ที่บันทึกได้บนอากาศยานและได้จากการรับสัญญาณ GNSS บนภาคพื้นดิน ในส่วนของการกำหนดตำแหน่งตรงมักจะเป็นการประมวลผล phase differential และคำนึงถึงความต่อเนื่องของ การรับสัญญาณที่เสากาศเคลื่อนที่ไปพร้อมอากาศยาน ดังนี้จึงเป็นจึงเรียกว่า post-processed kinematic differential และหากมีการใช้ IMU มาช่วย



รูปที่ 9-7 ส่วนประกอบระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศ (ที่มา <http://www.riegl.com/>)

9.2 การบินสำรวจไฟล์ด้วยเลเซอร์ (airborne laser profile)

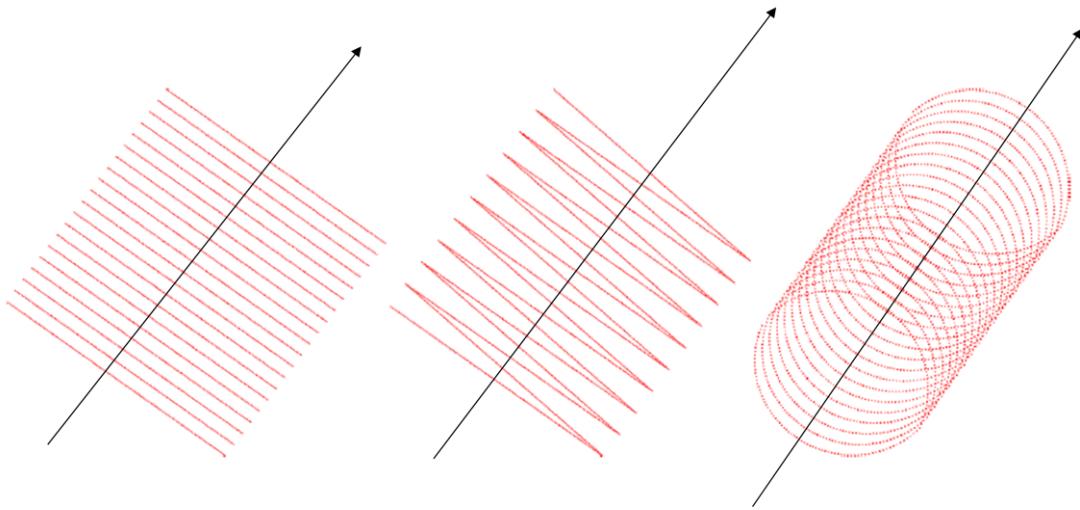
เมื่อมีเครื่องวัดระยะทางที่สามารถติดตั้งบนอากาศยานต่างๆได้แล้ว เมื่ออากาศยานเคลื่อนที่ไปข้างหน้า การกวาดจะเกิดขึ้นตลอดเวลา จึงทำให้ได้ข้อมูลเป็นพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่ต้องศึกษา หากพื้นที่ยังกว้างก็ต้องมีการบินหลายแนวบิน ดังภาพ



รูปที่ 9-8 การบินสำรวจไฟล์ด้วยเลเซอร์

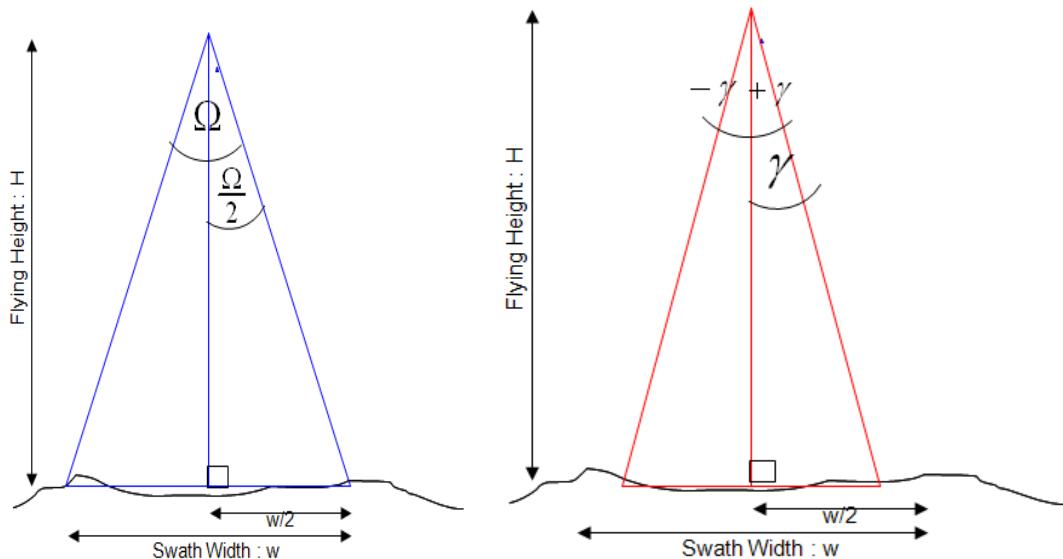
การออกแบบและด้วยคุณลักษณะของอาร์ดแวร์ทำให้ระบบการกวาดภาพมีรูปแบบการกวาดที่แตกต่างกัน ความสำคัญของรูปแบบการกวาดอาจไม่มีบทบาทมากนักสำหรับผู้นำไปประยุกต์ใช้ สิ่งผู้ใช้งานใจโดยหลักคือ ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ที่สามารถใช้งานได้บนพื้นผิวภูมิประเทศ

เครื่องเลเซอร์สแกนทางอากาศที่มีอยู่ในปัจจุบันทำการวัดอยู่ 3 รูปแบบใน รูปที่ 9-9 ซ้าย: เป็นเส้น line กลาง: ชิกแซก Oscillating ขวา: เป็นโคน Conic



รูปที่ 9-9 ซ้าย: เป็นเส้น line กalgo: ชิกแซก Oscillating ขวา: เป็นโคน Conic

พื้นที่การวัด (swath width) มีผลต่อความหนาแน่นจุดเลเซอร์และพื้นที่ที่จะรังวัดได้ในการนี้ ระบบกำหนดด้วยพารามิเตอร์ sanning angle (γ) ซึ่งถ้าเป็นมุมเปิดรับภาพกรณีกล้องถ่ายภาพทาง空気จะมีพื้นที่การวัดเป็น Field-of-View : FOV หรือ สัญลักษณ์ Ω ในภาพ จะเห็นว่า sanning angle จะเป็น ครึ่งหนึ่งของ FOV

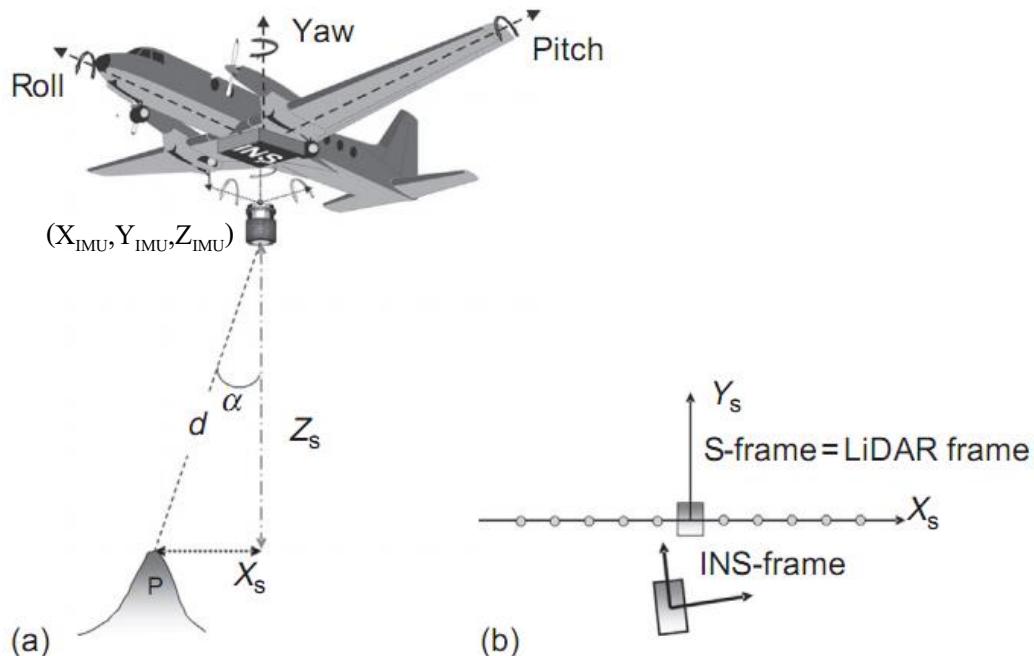


รูปที่ 9-10 นิยามของ scanning angle (γ) และ field-of-view (Ω)

9.3 การกำหนดตำแหน่งของเลเซอร์

การกำหนดตำแหน่งของเลเซอร์ที่เดินทางจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์ไปสู่เป้าหมายประเภท ซึ่งอาจจะเป็นพื้นดิน สิ่งปักคุณ เช่น บ้าน อาคาร สิ่งปลูกสร้าง รวมไปถึงพืชพรรณปักคุณ

ในหลักการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงโดยตรงที่ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนำหน้าและระบบตรวจจับความเรียบ หรือ GNSS/IMU ดังกล่าวมาแล้ว ตำแหน่งอ้างของระบบในที่นี้คือ IMU ในจังหวะที่มีการส่งคลื่นเลเซอร์ออกไป จะมีการกำหนดหมุนของเครื่องมือเลเซอร์ (S-frame) อ้างอิงกับแกนอ้างอิงของ IMU ในภาพในที่นี้ใช้ INS-frame



รูปที่ 9-11 นุ่มกว่าด้วยการวัดระยะทาง (Shan and Toth, 2008)

เมื่อทราบวิถีของอากาศยานโดยมีตัวแทน IMU ของระบบ GPS/IMU เป็นจุดตัวแทนศูนย์กลาง ค่าระยะทางที่วัดไปยังวัตถุ จึงสามารถคำนวณให้อ้างอิงไปที่ IMU ทำให้ได้ค่าพิกัดจุดใดของวัตถุที่บันทึกได้ ในภาพกำหนดให้ Z_s ผลต่างค่าระดับจุด P ระบบเลเซอร์สแกนกำลังกว้างออกไปจากแนวตั้งอิงเป็น α วัดระยะทางได้เป็น d และค่าความสูงของ IMU เป็น Z_{IMU} ดังนั้นค่าระดับของจุด P จะได้

$$Z_P = Z_{IMU} - Z_S$$

$$Z_P = Z_{IMU} - d \cdot \cos (\alpha)$$

แต่อย่างไรก็ตามวิธีของระบบที่จะเอียดถูกต้องจะได้มีการพิจารณาหลังจากที่ได้ข้อมูลการรับสัญญาณ GNSS บนเครื่องและสถานีฐาน นำมาประมวลผลร่วมกันภายหลังในรูปแบบ kinetics processing

9.4 ความสามารถในการสะท้อนกลับของวัสดุ

เมื่อเลเซอร์กระทบวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน การสะท้อนกลับได้ของเลเซอร์จะแตกต่างกันไป โดยจะให้ในรูปของสัดส่วนความแรงสัญญาณที่สะท้อนกลับเทียบกับวัตถุที่สะท้อนได้ให้เป็น 100% Wehr และ Lohr (1990) ได้ให้ความสามารถสะท้อนกลับ (reflectivity) สำหรับวัสดุต่างๆ ปรากฏในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 9-1 ความสามารถในการสะท้อนกลับ (reflectivity)

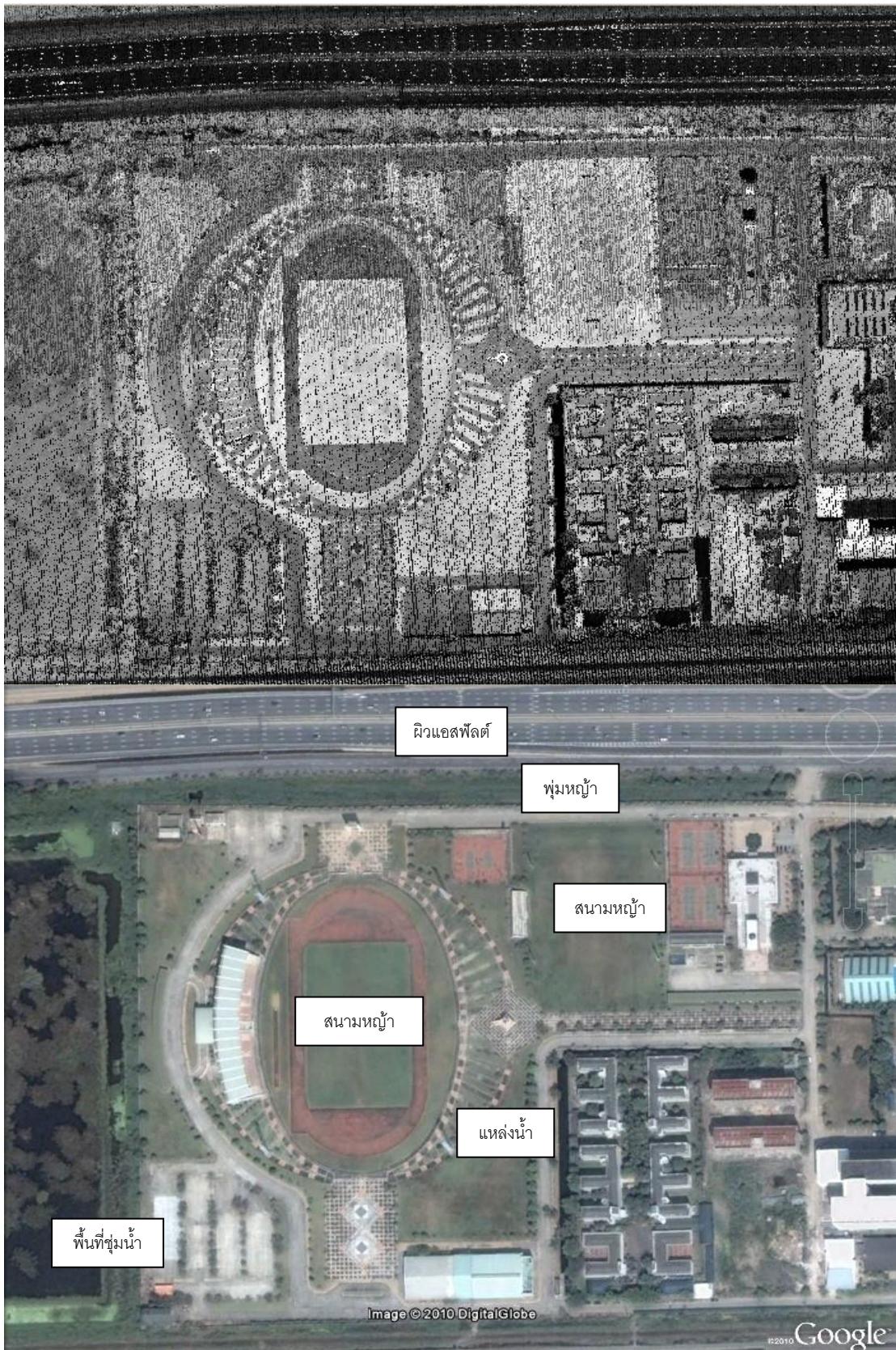
Typical Reflectivity of Various Reflecting Materials at a Wavelength of 900 nm

Material	Reflectivity (%)
Lumber (pine, clean, dry)	94
Snow	80–90
White masonry	85
Limestone, clay	Up to 75
Deciduous trees	Typ. 60
Coniferous trees	Typ. 30
Carbonate sand (dry)	57
Carbonate sand (wet)	41
Beach sand; bare areas in desert	Typ. 50
Rough wood pallet (clean)	25
Concrete, smooth	24
Asphalt with pebbles	17
Lava	8
Black neoprene (synthetic rubber)	5

Source: From Wehr, A. and Lohr, U., *ISPRS J. Photogram. Rem. Sens.*, 54, 68, 1990. With permission.

ในภาพตัวอย่างแสดงความสามารถในการสะท้อนกลับของไอลาร์บริเวณพื้นที่ชานเมืองบริเวณสถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประกอบด้วยสิ่งปักคลุมหลายชนิด เช่น พื้นผิว

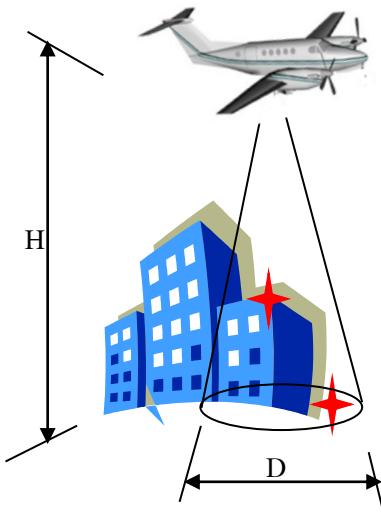
ค่อนกรีต พื้นผิวนนและฟลิต์ พื้นที่ปูคลุมด้วยตันไม้ไผ่ พื้นที่ปูคลุมด้วยหญ้าเตี้ย พื้นที่ชุ่มน้ำ พื้นที่แหล่งน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 9-12 ความสามารถในการสะท้อนกลับของเลเซอร์ บน:ภาพ Intensity ล่าง: ภาพถ่ายดาวเทียม เวลาเดียวกัน

9.5 การสะท้อนกลับของเลเซอร์ (laser returns)

เนื่องมาจากเลเซอร์เดินทางจากแหล่งกำเนิดออกไปเป็นระยะทางไกล โดยเฉพาะการบินสำรวจภูมิประเทศทางอากาศ ขณะที่เลเซอร์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะมีการกระจาย (disperse) จึงอาจทำให้ลำแสงเลเซอร์ที่ปลายทางขยายใหญ่ขึ้น (beam divergence)



รูปที่ 9-13 การสะท้อนสัญญาณที่ยอดตึกและพื้นดิน

ตัวอย่าง ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ Optech Orion มี beam divergence $\tau = 0.25 \text{ mrad}$ หากบินปฏิบัติงานที่ระดับเพดานบิน $H=1,000$ เมตร จากระดับพื้นผิวภูมิประเทศโดยเฉลี่ย สัญญาณเลเซอร์จะปลายทางออกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D เป็น

$$D = H \cdot \tau$$

$$D = 1000 \cdot \frac{0.25}{1000} = 0.25 \text{ เมตร}$$

สำหรับระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศอื่นๆ beam divergence จะอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 mrad หากทำการบินสำรวจด้วยเลเซอร์ที่เพดานบินเฉลี่ย 1,000 เมตร ดังนั้นเลเซอร์ที่กระทบพื้นผิวโดยเฉลี่ยจะมีขนาดสันผ่าศูนย์กลางเป็น 0.3 ถึง 0.5 เมตร

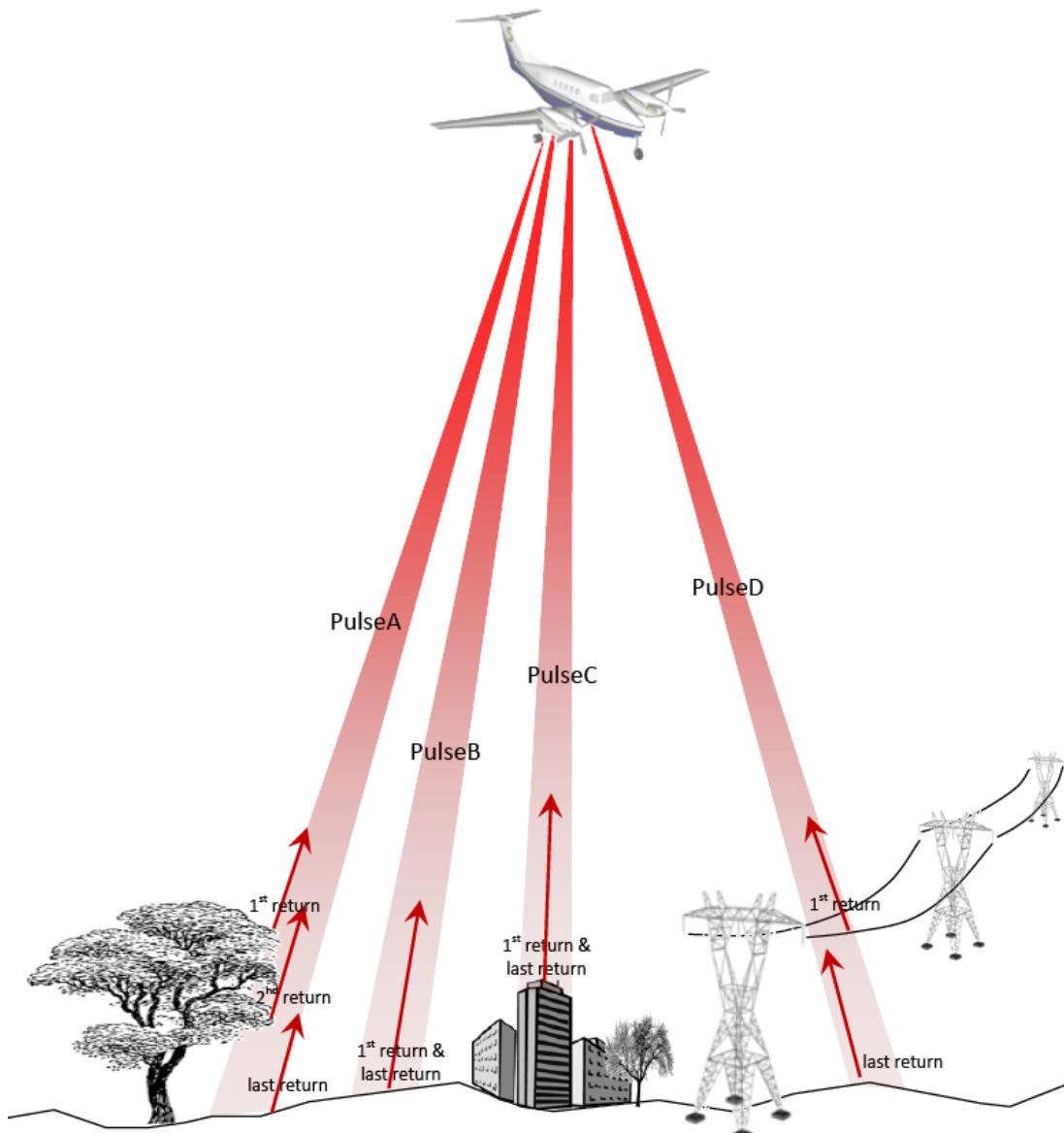
เมื่อสัญญาณสะท้อนกลับได้ดี สัญญาณที่ระบบจะบันทึกไว้จะปรากฏเป็นลูกคลื่นที่เรียกว่า multiple-returns ในกรณีที่คลื่นเลเซอร์เดิน

ทางผ่านพุ่มไม้ที่ปกคลุมพื้นผิวน้ำมีประโยชน์มาก หากพุ่มไม้หนาแน่นมากนัก คลื่นบางส่วนอาจตกรอบยอดไม้ บางส่วนอาจตกรอบกิ่งก้านสาขาของต้นไม้และส่วนอื่นๆในทรงพุ่ม (canopy) เลเซอร์ลูกคลื่นนั้นอาจเดินทางต่อไปตกรอบพื้นดิน หากระบบมีความสามารถการสะท้อนกลับของลูกคลื่นเหล่านี้ โดยการสังเกตเวลาที่ลูกคลื่นเดินทางไปแล้วกลับมา ข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการจำแนกสิ่งปลูกคุณของพืชพรรณเป็นอย่างมาก

การสังเกตุห่วงเวลาที่ลูกคลื่นเดินทาง สำหรับการเดินทางของลูกคลื่นไลดาร์ผ่านต้นไม้ ถ้าเป็นกรณีที่ใช้เวลาสั้นที่สุดซึ่งใน จะสัมภูติฐานว่าจะเป็นสัญญาณตกรอบพุ่ม แต่จะเรียกว่า “first return” และผลการบันทึกเวลาของลูกคลื่นที่เดินทางกลับมาช้าที่สุดจะเรียกว่า “last return” จากสมมุติฐานดังกล่าว จึงอนุมานว่า ลูกคลื่นเลเซอร์ได้ที่สะท้อนกลับหลายครั้ง (multiple returns) ลูกคลื่นที่เป็น “last return” น่าจะมาจาก การสะท้อนที่พื้นดินเป็นส่วนใหญ่ และลูกคลื่นที่สะท้อนกลับครั้งแรกจะบันทึกเป็น “first-return” ซึ่งน่าจะเป็นการสะท้อนที่ยอดทรงพุ่มของต้นไม้

สำหรับอาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง รวมทั้งพื้นผิวแข็งที่เลเซอร์ตกรอบเพียงครั้งเดียว ระบบจะทำการบันทึกว่าเป็น “single return” นั่นคือมี “first return” และไม่มีลูกคลื่นอื่นๆตามมา

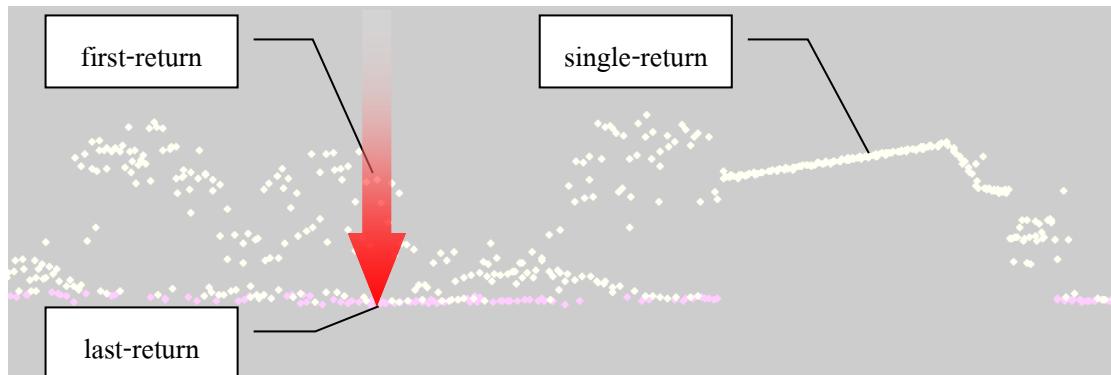
การสะท้อนกลับของลูกคลื่นเลเซอร์วัดระยะทางกวดเป็นพื้นที่ใบบานภูมิประเทศ ลูกคลื่นเชอร์ที่ตกรอบเป้าหมายบนภูมิประเทศลักษณะต่าง เช่น ลำแสง Pulse-A ที่ผ่านทรงพุ่มของต้นไม้และทะลุทะลวงไปจนถึงพื้นดิน Pulse B ที่ตกรอบบนพื้นดินแข็ง เปิดโล่ง Pulse-C ที่ตกรอบบนหลังคาสิ่งปลูกสร้าง และ Pulse-D ที่ตกรอบวัสดุแข็งที่เป็นผสมของสายสั่งศักย์สูง แล้วผ่านลงไปกรอบพื้นดินอยู่ใต้ลงไป พฤติกรรมการสะท้อนกลับและวิธีการนับจำนวนลูกคลื่นสะท้อนกลับ แสดงให้เห็นในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 9-14 พฤติกรรมการสะท้อนกลับของเลเซอร์บนเป้าต่างๆ ในภูมิประเทศ

ด้วยข้อเท็จจริงจริงทำให้เราสามารถจำแนกจุดบนพื้นดิน (ground) ออกจากรสุกที่ไม่ใช้ตกบนพื้นดิน (unclassified) ออกจากกันได้โดยง่ายและอย่างอัตโนมัติ โดยทั่วไปจะพบว่าจำนวนจุดบนพื้นดินจะมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนจุดยังไม่จำแนกเป็นสัดส่วน 2 ถึง 5 เท่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการปลูกคุณของพืชพรรณ ปริมาณพืชพรรณ

ในภาพแสดงภาพตัดของ การสะท้อนกลับของเลเซอร์ในภูมิประเทศจริงสำหรับ การบิน บันทึกข้อมูลไอลาร์ทที่ตั้งเป้าความหนาแน่นจุดเนลลี่ (nominal pulse spacing : NPS) เป็น 1 เมตร ต่อหนึ่งตารางเมตร



รูปที่ 9-15 ความหนาแน่นของการสะท้อนกลับของไลดาร์

ต่อมาเมื่อการพัฒนาอาร์ดแวร์มีความซับซ้อนมากขึ้น อีกทั้งความสามารถในการบันทึกข้อมูลได้เร็วขึ้นและมากขึ้น หน่วยความจำสามารถบันทึกข้อมูลปริมาณมาก ผู้ใช้ก็มีความสามารถในการประมวลผลเพิ่มขึ้นในเวลาเดียวกัน ผู้พัฒนาระบบจึงมีแนวคิดที่จะบันทึกข้อมูลเลเซอร์มีสะท้อนกลับมาหลายๆลูกคลื่น มาตรฐานปัจจุบันถือได้ว่าระบบส่วนใหญ่สามารถบันทึกคลื่นเลเซอร์ได้อย่างน้อย 2 returns คือ first-return และ last-return

หากระบบสามารถบันทึกลูกคลื่นที่เกิดจากการสะท้อนกลับได้เป็นจำนวนมาก ข้อมูลการสะท้อนกลับหลายครั้ง (multiple returns) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กว้างขวางขึ้นไปอีก เช่นการหาปริมาตรของป่าไม้ การวิเคราะห์ชนิดและคุณภาพของชีวมวล (biomass) ความสามารถในการบันทึกลูกคลื่นที่สะท้อนกลับหลายครั้งเพื่อให้ผู้ใช้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ภายหลัง ระบบนี้ว่า “Full-Waveform Digitizer” ในภาพแสดงการสะท้อนกลับของไลดาร์ที่ยอดไม้ ภายในทรงพุ่ม และที่ระดับผิวดิน

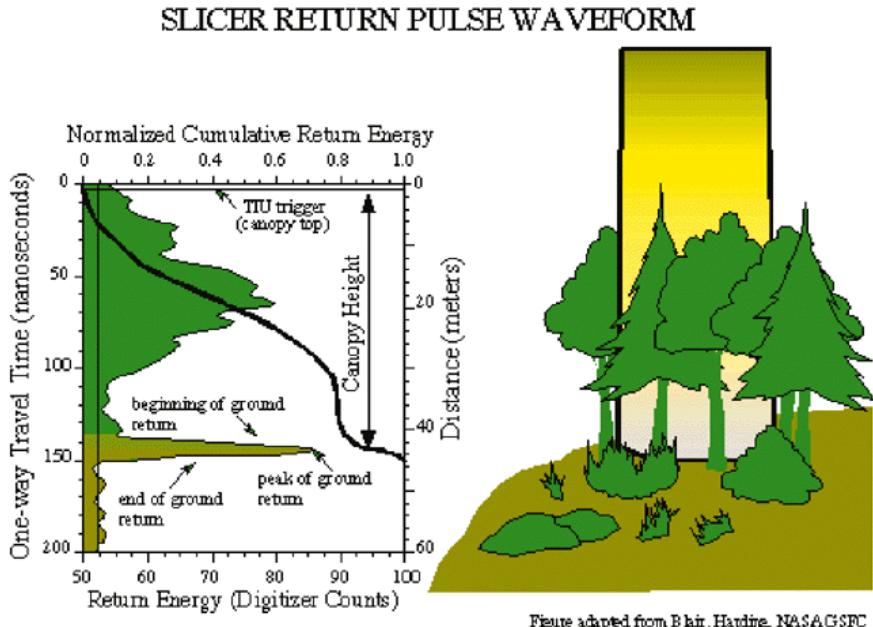


Figure adapted from Blair, Harding, NASA GSFC

รูปที่ 9-16 การสะท้อนกลับหลายครั้ง (ที่มา : The Vegetation Canopy Lidar Mission/NASA)

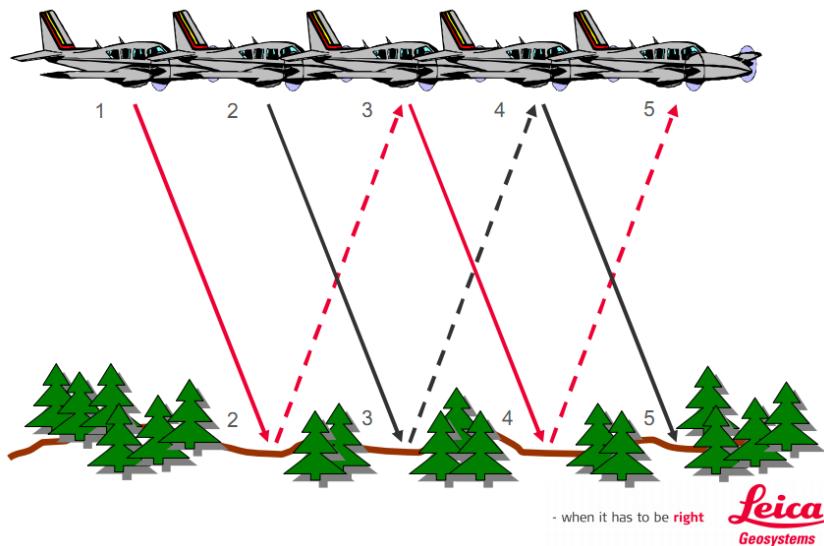
จากตัวอย่างที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางจากอากาศยานบินสูงระดับ 1000 เมตรกระทบพื้นดินสะท้อนกลับ จะเห็นว่าใช้เวลาประมาณ $6.6713 \mu\text{sec}$ หรือ ซึ่งหมายความว่าในหนึ่งวินาทีจะมีลูกคลื่นส่งออกไปและสีที่สะท้อนกลับได้ $1/6.6713 \mu\text{sec}$ ประมาณเท่ากับ 149,999 ลูกคลื่นหรือประมาณ 150 kHz นั่นคือข้อจำกัดของระบบหากสามารถส่งลูกคลื่นส่องออกไปที่ละลูกและรับกลับมาคำนวณแล้วระบบจะมี pulse repetition rate (PRF) ไม่เกิน 150 kHz

ผู้พัฒนาระบบจึงมีแนวคิดในการส่งลูกคลื่นอย่างต่อเนื่อง แม้นว่าลูกคลื่นที่ส่องออกไปแล้วยังไม่กลับมาถึงเครื่องรับ วิธีนี้จะทำให้ระบบมีความถี่ในการส่งข้อมูลสูงขึ้นไปกว่า 150 kHz ผู้พัฒนาแนวคิดนี้สำหรับแต่ละผู้พัฒนาเรียกชื่อแตกต่างกันไป สรุปในตารางที่ 9-1

ตารางที่ 9-2 เทคโนโลยีเพิ่มความถี่ของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์

ผู้ผลิตและผู้พัฒนา	เทคโนโลยีเพิ่มความถี่สูงกว่า 150 kHz
Optech	Multipulse
Riegl LMS-Qxxx	Multiple Time Around (MTA)
Leica ALS	Multiple Pulse in-the-AIR (MPiA)

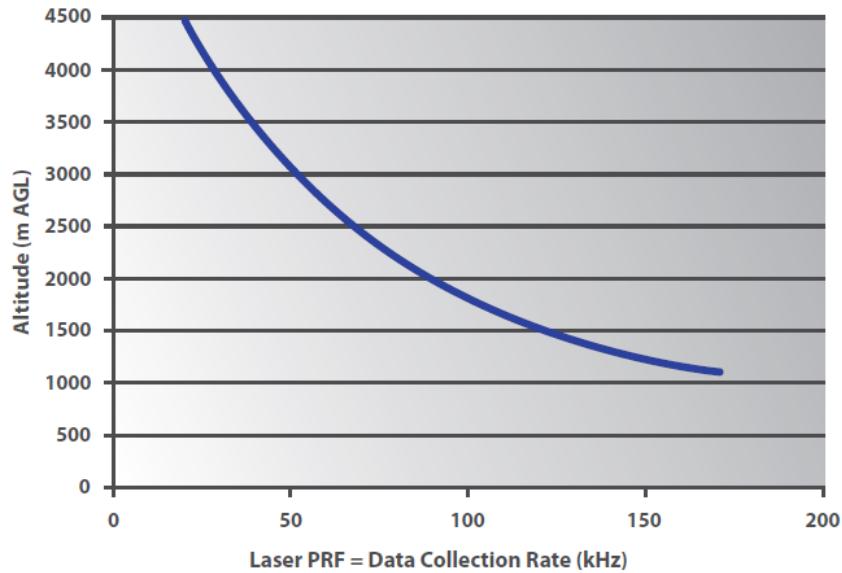
ผู้ผลิตระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ ALS60 ได้แสดงแนวคิดไว้ในรูป



รูปที่ 9-17 เทคนิค Multiple Pulse in the Air (MPIA) โดย Leica

แต่อย่างไรก็ตามหากคำนึงถึงความละเอียดถูกต้องป่าเชื่อถือ การส่งคลื่นความถี่สูงและการรับสัญญาณในระดับที่ห่างจากเป้าพื้นผิวภูมิประเทศจะทำให้เกิดความสามารถลดลงได้ ดังนั้นผู้ใช้งานระบบจึงต้องพิจารณา และต้องศึกษาคุณสมบัติของระบบด้วย ดังเช่นตัวอย่างระบบ ATLM Gemini ของ Optech แม้ว่าระบบจะมีความสามารถด้วยความถี่สูงสุดถึง 167 MHz และทำงานได้ที่ความสูงบินถึง 4,000 เมตร แต่ความถี่ที่ใช้งานได้จะขึ้นอยู่กับความความสูงบินอย่างมาก เช่น หากต้องการบินสำรวจด้วยความสูงบิน 4,000 เมตร เพื่อให้ได้แนวสำรวจกว้างมากๆ แต่ความถี่ไลเดาร์ที่สามารถทำงานได้ลดลงเหลือเพียง 40 kHz นั้นหมายความว่าความหนาแน่นจุดเลเซอร์จะเบาบางลงไปอย่างมาก ในขณะที่หากกำหนดให้บินสูง 1,000 เมตร ความถี่ไลเดาร์ที่สามารถทำงานได้อาจสูงถึง 160 kHz ได้ ประกอบกับแนวสำรวจจะแคบลงมาก ดังนั้นจะทำให้ได้แนวสำรวจที่มีจุดระดับที่มีความหนาแน่นสูงมากเป็นพิเศษ

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงบินเหนือภูมิประเทศและความถี่ของระบบเลเซอร์ที่สามารถทำได้สำหรับระบบ Gemini ของ Optech แสดงในภาพ

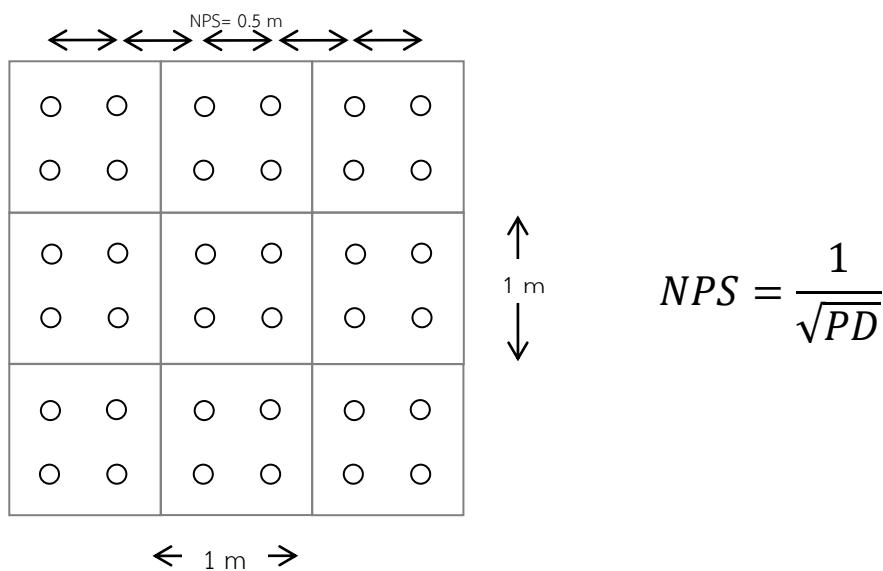


รูปที่ 9-18 ความสามารถบันทึกข้อมูลที่ระดับความสูงต่างๆ สำหรับ ATLM Gemini
<http://www.optech.ca>

9.6 ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเลเซอร์สแกนมีหลากหลาย พารามิเตอร์สำคัญอีกประการหนึ่งของเลเซอร์สแกนคือ ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ที่ตกลงพื้นผิวภูมิประเทศ เรียกว่า point density (PD) ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์มากหรือน้อยอย่างขึ้นอยู่กับความสามารถของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน พารามิเตอร์กำหนดให้ระบบทำงานทำงานโดยเฉพาะ Pulse Repetition Rate (PRF) มุมกว้างแบบกว้าง (Scanning Angle) และรูปแบบการกว้าง (scanning pattern) อันเนื่องมาจากผลการออกแบบเครื่องมือ นอกจากนั้นความลาดเอียง ความสูงต่ำและสิ่งปகคลุ่มภูมิประเทศ ยังมีผลต่อการสหอนกลับ และมีเรขาคณิตที่มีผลต่อรูปแบบการสแกนที่ pragmatically

การระบุความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ยังสามารถระบุด้วยระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ที่ปลดปล่อยลงมา (Pulse Spacing) ซึ่งตามมาตรฐานสากลกำหนดให้ใช้ “ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ปล่อยปกติ” หรือ Nominal Pulse Spacing (NPS)



รูปที่ 9-19 ความสัมพันธ์ความหนาแน่นจุดเลเซอร์ปล่อย (PD) และระยะห่างระหว่างจุด (NPS)

ในกรณีที่จุดเลเซอร์กระจายอย่างสม่ำเสมอ เราสามารถคำนวณสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของจุดเลเซอร์และระยะห่างระหว่างจุดได้โดยง่าย ตัวอย่างเช่น ความหนาแน่นจุดเลเซอร์เป็น 4 จุดต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์จะเป็น 0.5 เมตร เป็นต้น ตัวอย่างความสัมพันธ์ความหนาแน่นจุดเลเซอร์และระยะห่างจุดเลเซอร์ขนาดต่างๆ แสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 9-3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ความหนาแน่นจุดเลเซอร์ปล่อย (PD) และระยะห่างระหว่างจุด (NPS)

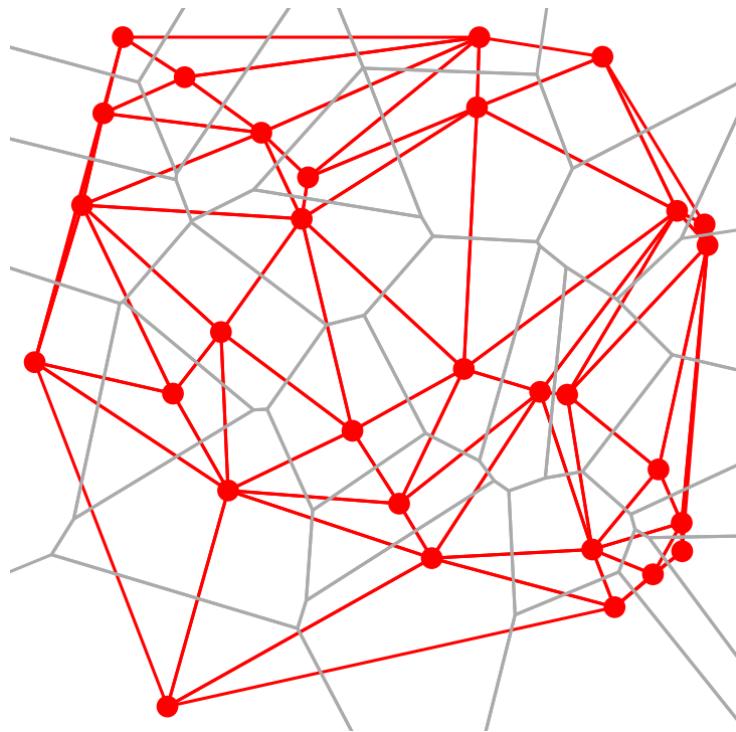
ความหนาแน่นจุดเลเซอร์ปล่อย (PD) จุดต่อตารางเมตร	ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ (NPS) เมตร
8	0.35
4	0.50
2	0.71
1	1
0.250	2
0.111	3
0.0625	4
0.040	5

เนื่องจากหลักการทำงานของไลดาร์มีการบันทึกและใช้ประโยชน์จากการสะท้อนกลับคล้ายครั้งของแต่ละลูกคลื่นเลเซอร์ ดังนั้นความแน่นของจุดเลเซอร์ปล่อยในที่นี่จะนับเฉพาะจำนวนลูกคลื่นที่ปลดปล่อยออกมายกระดับและบันทึกได้ เช่น การนับเอาเฉพาะ ลูกคลื่นในส่วนที่กลับลูกแรก (first-return) ดังนั้นคำว่า ระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ (Nominal Point Spacing) ที่เป็นการนับรวมจำนวนลูกคลื่นเลเซอร์แต่ละลูกคลื่นที่ส่งออกไปแล้วจะส่วนที่กลับคล้ายครั้งและนับรวมได้ทั้งหมด จึงเป็นคำนิยามที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับไลดาร์ที่มีการบันทึกข้อมูลส่วนที่กลับของเลเซอร์แบบคล้ายครั้ง (multiple-returns)

ในทางปฏิบัติ การกระจายของจุดเลเซอร์อาจไม่สม่ำเสมอตามอุดมคติ ที่เราต้องการ จุดสุ่มค่าระดับบนพื้นผิวภูมิประเทศ รูปแบบการกระจายของจุดเลเซอร์ที่ไม่สม่ำเสมออาจเกิดจากการคาดของเลเซอร์แพรผันจากแนวเดียวไปสูงสุดที่ มุมกว้างแอบกว้าง (Scanning Angle) ที่กำหนด รูปแบบการคาด (scanning pattern) เนื่องจากผลการออกแบบเครื่องมือ และความลาดเอียง ความสูงต่ำ ตลอดจนสิ่งปกคลุมภูมิประเทศ ล้วนแต่มีผลแต่รูปแบบการคาดที่ได้ ดังนั้นจึงมีผู้ที่พยายามหาวิธีการประเมิน ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ และ ระยะห่างของจุดเลเซอร์ ที่อาจจะมีรูปแบบไม่สม่ำเสมอ โดยมุ่งหวังให้ผลการคำนวณ ไม่มีความเออนเอียง มีความน่าเชื่อถือ สามารถทำซ้ำแล้วซ้ำไปผลเช่นเดิม วิธีการหนึ่งคือการใช้ประโยชน์จากทฤษฎี Computational Geometry ที่มีการเขียนซอฟต์แวร์องรับและนำมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้งานแล้วอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น

การคำนวณระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ (NPS) จะทำการสร้างข่ายรูปสามเหลี่ยม (tessellation) ที่มีขนาดรูปร่าง “ดี” โดยจุดยอดทั้งสามของสามเหลี่ยมคือจุดเลเซอร์ที่พิจารณา รูปสามเหลี่ยมจะเป็นไปตามทฤษฎี Delaunay Triangulation ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยการสร้าง รูปสามเหลี่ยมสำหรับกลุ่มของจุดสุ่มใดๆ ที่สามเหลี่ยมแต่ละรูปที่สร้างได้จะมีวงกลมที่ล้อมรอบ ตัวเองได้โดยที่จะไม่ครอบคลุมจุดสุ่มนอกราบเนื้อ ผลที่ได้คือสามเหลี่ยมส่วนมากจะไม่มีรูปร่าง “ลีบ” หรือมีมุมยอดมุ่งได้มุ่งหนึ่งเด็กมากต่างจากมุมยอดที่เหลือมากๆ รูปสามเหลี่ยมนี้จะสื่อว่า จุดสามจุดใดๆบนภูมิประเทศมีความต่อเนื่องกันในด้านการเปลี่ยนแปลงความสูง ดังนั้นอัลกอริธึม ในการคำนวณระยะห่างระหว่างจุด (NPS) จะทำการสร้าง Delaunay Triangulation ไปบนกลุ่ม จุดเลเซอร์ที่พิจารณา แล้วคำนวณระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ทั้งหมดที่ได้จากการด้านต่างของรูป สามเหลี่ยม จากนั้นนำระยะห่างระหว่างจุดเลเซอร์ใดๆ ซึ่งในที่นี้คือความยาวของด้านของรูป สามเหลี่ยมแต่ละรูป พิจารณาพร้อมกันทั้งหมด

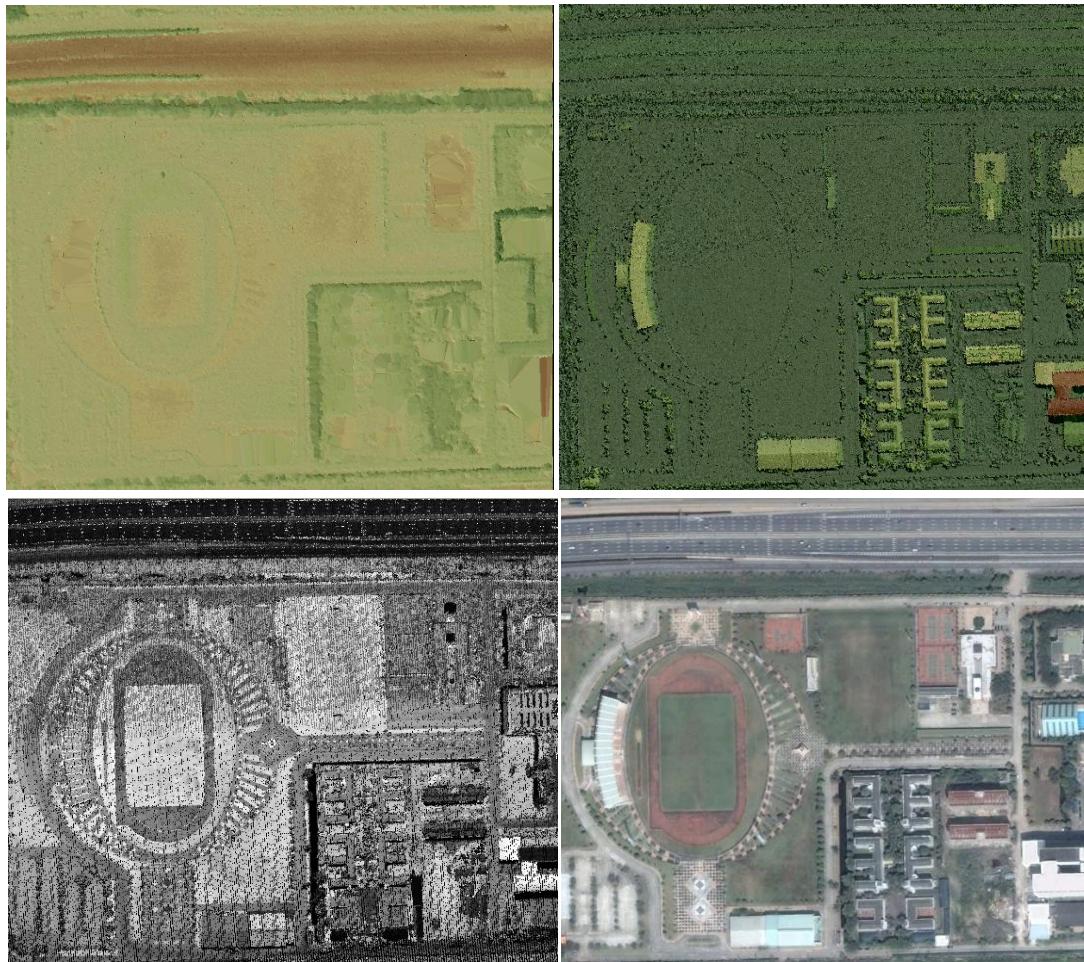
หรือในกรณีการคำนวณความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ (PD) ทำการสร้างรูปหลายเหลี่ยม voronoi diagram รูปหลายเหลี่ยม voronoi diagram เป็นสิ่งที่คู่กัน (duality) ของ Delaunay triangulation รูปหลายเหลี่ยมนี้จะครอบคลุมจุดเลเซอร์หนึ่งจุด รูปหลายเหลี่ยมเกิดจากเส้นแบ่ง ครึ่งด้านของรูปสามเหลี่ยม Delaunay ตัดกันทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยม (polygon) รูปหลายหนึ่ง รูปจะบรรจุจุดเลเซอร์หนึ่งจุด รูปหลายเหลี่ยมที่อยู่ขอบของกลุ่มจุดเลเซอร์อาจไม่สามารถแสดง ผลได้ที่เรียกว่า infinite polygon ก็จะไม่นำมาพิจารณา จากนั้นจะคำนวณพื้นที่รูปหลายเหลี่ยม ที่ล่ำรูปแล้วนำไปหาร 1 จะทำให้ได้ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์รายจุด หากนำความหนาแน่น จุดเลเซอร์มาพิจารณาร่วมกัน ก็จะทำให้ได้ความหนาแน่นของจุดเลเซอร์ในพื้นที่พิจารณาทั้งหมด



รูปที่ 9-20 ข่ายสามเหลี่ยม Delaunay (เส้นสีแดง) รูปหลายเหลี่ยม Voronoi (เส้นสีเทา) ที่สร้างขึ้นจาก
กลุ่มของจุดเลเซอร์ (จุดสีแดง)

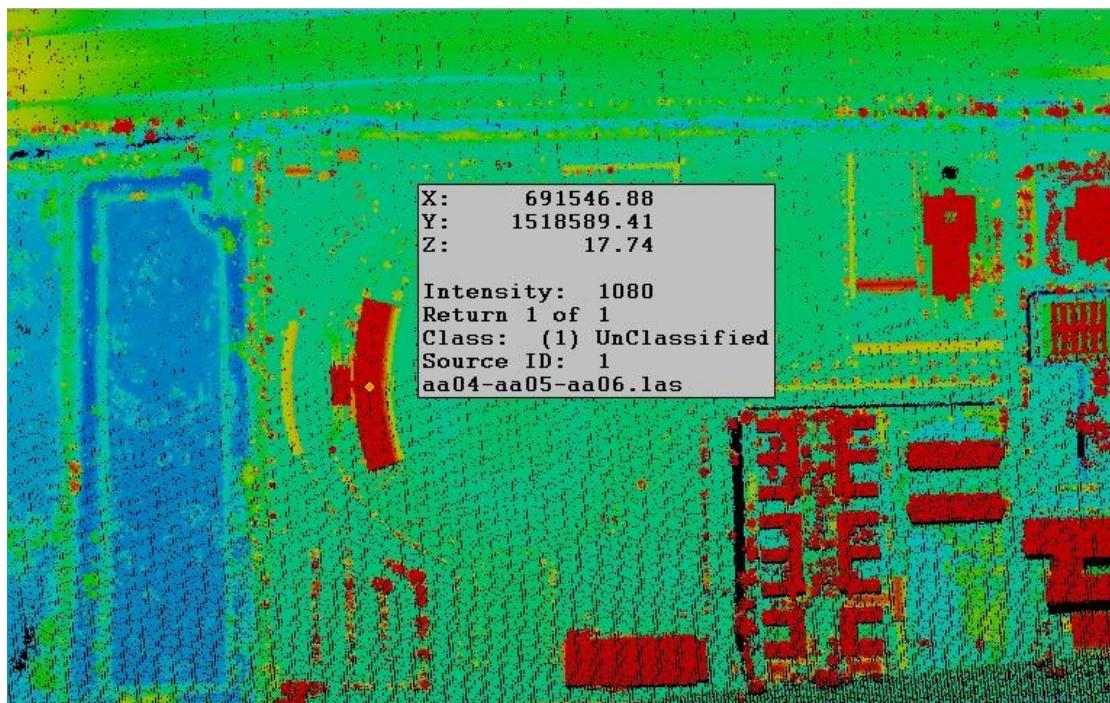
9.7 ผลผลิตเลเซอร์สแกนเนอร์

ผลการรังวัดด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ที่สำคัญคือข้อมูลกลุ่มจุดระดับหนาแน่นที่เรียกว่า point cloud จุดระดับที่ได้จะมีทั้งค่าพิกัดทางราบและค่าระดับ กลุ่มจุดระดับที่ได้จากการสะท้อนกลับของสัญญาณเลเซอร์ ที่อาจกระทบได้ทั้งต้นไม้ พืชพรรณป่าคลุม หลังคาของอาคารและสิ่งปลูกสร้าง ต่าง ๆ พื้นผิวน้ำ รวมทั้งจุดระดับบนภูมิประเทศ ผลการรังวัดที่สำคัญที่สุดก็คือ จุดระดับจำนวนมากที่สามารถใช้แสดงแบบจำลองพื้นผิว (DSM) ได้ทันที และด้วยคุณลักษณะของการสะท้อนกลับของลูกคลื่นสุดท้ายจากหอยลูกคลื่นทำให้ระบบสามารถจำแนกจุดบนพื้นดิน (Ground) ออกจากจุดอื่นๆ ซึ่งจะเรียกว่า “จุดไม่จำแนก (unclassified)” จุดบนพื้นดินนี้สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นแบบจำลองระดับ (DEM) แสดงแทนภูมิประเทศได้ และในอีกรูปแบบหนึ่งคือแสดงภาพของความเข้มของการสะท้อนสัญญาณเลเซอร์ (intensity map) ที่อาจนำมาใช้เป็นแผนที่ภาพออร์โทได้ หากแต่่ว่ามีความละเอียดจุดภาพและโหนดที่แตกต่างไปจากแผนที่ภาพออร์โทขาวดำที่ได้จากการถ่ายทางอากาศ



รูปที่ 9-21 ซ้ายบน: แบบจำลองระดับ ขวาบน: แบบจำลองพื้นผิว
ซ้ายล่าง: ภาพความเข้มสัญญาณ ขวาล่าง: ภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูง

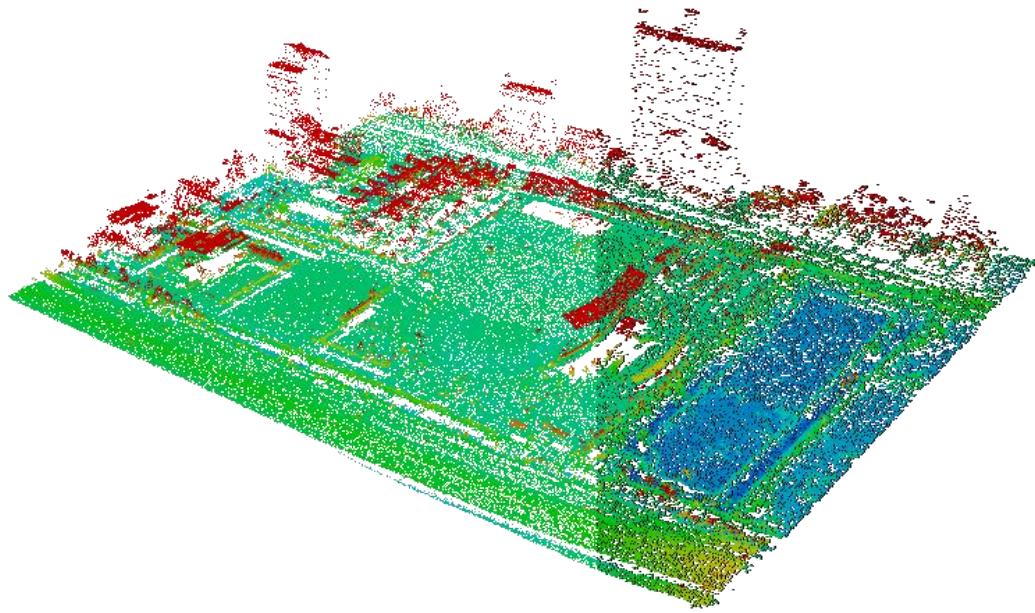
การนำเสนอโดยภาพจากไลเดาร์ เป็นการนำข้อมูลของแต่ละจุดภาพมาแสดงด้วยรหัสสี โดยพื้นฐานทุกๆจุดของข้อมูลเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศจะมีค่าพิกัดแผนที่ทางราบ (X,Y) อよyle และข้อมูลประจำจุดที่จะนำมาเสนอได้แก่ ค่าระดับ (Z) ความเข้มสัญญาณ (intensity) ครั้งที่สท้อนกลับ (number of returns) ชั้นการจำแนก (classification) เป็นต้น



รูปที่ 9-22 ข้อมูลกำกับจุดเลเซอร์ได้ฯ

9.7.1 การแสดงผลในสามมิติ (3D visualization)

ซอฟต์แวร์แสดงผลไลเดาร์จะต้องมีความสามารถในการอ่านจุดระดับหนาแน่นจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว ซอฟต์แวร์ต้องบริหารจัดการหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ได้ดี หลักเลี่ยงการคำนวนที่กินทรัพยากรามาก ๆ โดยไม่จำเป็น เช่น การเลือกอ่านจุดระดับจำนวนจำกัดให้เป็นตัวแทนของภูมิประเทศเท่านั้น การลดจำนวนจุดระดับจำนวนมากเพื่อใช้ในการแสดงผลระหว่างตอบโต้กับผู้ใช้ เช่น การหมุน การเลื่อน แบบจำลองระดับ เป็นต้น ซอฟต์แวร์สามารถที่จะแสดงจุดระดับเป็นแบบจำลองสามมิติ เนื่องจากทุกๆ จุดมีค่าพิกัดในสามมิติอยู่แล้ว



รูปที่ 9-23 การแสดงจุดระดับหนาแน่นเป็นภาพสามมิติ

9.7.2 มาตรฐานการจัดเก็บข้อมูลไลเดาร์

เนื่องจากจุดระดับมีเป็นจำนวนมาก ในการนี้จำเป็นต้องซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการอ่านข้อมูลจุดระดับความหนาแน่นสูง อีกทั้งมีระบบพัฒนาขึ้นจากหลายผู้พัฒนา ผู้ใช้มีความต้องการที่จะได้ข้อมูลที่มีคุณภาพแล้ว ยังต้องการข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน สามารถใช้งานกับซอฟต์แวร์แสดงผล วิเคราะห์ และนำเสนอ หรือผนวกรวมกับระบบภูมิสารสนเทศอื่น ๆ

สมาคมทางวิชาชีพ American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) ร่วมกับผู้ผลิตเครื่องมือเลเซอร์สแกนเนอร์ Z/I Imaging, EnerQuest, Optech, Leica GeoSystems และ the US Army Topographic Engineering Center ได้กำหนดมาตรฐานรูปแบบของการจัดเก็บข้อมูลระดับไลเดาร์ในรูปแบบใบナรี เรียกว่า LAS format pragkgv ใน

มาตรฐาน LIDAR Data Exchange Format Standard ปัจจุบันคือ รุ่น 1.3 to ASPRS LAS 1.3 Format Specification, July 14, 2009

มาตรฐาน ASPRS LAS ได้มีการพัฒนามาแล้วถึง 4 รุ่นที่ผ่านคือ

- (Proposed) ASPRS LAS 2.0 Format Standard, May 1, 2007
- Superseded ASPRS LAS 1.2 Format Specification, September 2, 2008
- Superseded ASPRS LAS 1.1 Format Standard, May 7, 2005
- Superseded ASPRS LAS 1.0 Format Standard, May 9, 2003

แต่รุ่นที่ส่งเสริมให้ใช้และแพร่หลายคือ LAS 1.3 สาระสำคัญของรูปแบบการจัดเก็บ LAS 1.3 คือ ความสามารถในการจัดเก็บ “pulse waveform” มีรูปแบบสำหรับข้อมูลจุดเดียว ถึง 5 รูปแบบคือ point data record format 1 จนถึง format 5 โครงสร้างไฟล์ LAS มีส่วนประกอบ 3 ส่วน หรือ 4 ส่วนกรณีมี waveform data

ตารางที่ 9-4 โครงสร้างไฟล์ LAS ข่าย: ไฟล์ไลดาร์ทั่วไป ขวา: ไลดาร์มี waveform

Table 4.2 – LAS Format Definition Containing Waveform Data

Table 4.1 – LAS Format Definition
PUBLIC HEADER BLOCK
VARIABLE LENGTH RECORDS
POINT DATA RECORDS

PUBLIC HEADER BLOCK
VARIABLE LENGTH RECORDS INCLUDING WAVEFORM PACKET DESCRIPTORS (up to 255)
POINT DATA RECORDS
EXTENDED VARIABLE LENGTH RECORD (WAVEFORM DATA PACKETS)

ค่าพิกัด x,y และค่าระดับ z จัดเก็บด้วย data type ‘long’ เรียกว่า $X_{record}, Y_{record}, Z_{record}$ ซึ่งเป็นจำนวนเต็ม 4 ไบต์ แต่ใน header จะระบุค่า offset และ scale ดังนั้นค่าพิกัดและค่าระดับจะถูกคำนวณให้เป็นค่า normalize ค่าพิกัดในสามมิติของไลดาร์ คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} X_{coordinate} &= (X_{record} * X_{scale}) + X_{offset} \\ Y_{coordinate} &= (Y_{record} * Y_{scale}) + Y_{offset} \\ Z_{coordinate} &= (Z_{record} * Z_{scale}) + Z_{offset} \end{aligned}$$

แต่ละจุดยังมีข้อมูลกำกับต่างๆ สำหรับ LAS format แต่ละรุ่นได้แก่

ตารางที่ 9-5 ข้อมูลกำกับสำหรับแต่ละจุดไลดาร์

ข้อมูลกำกับ	ความหมาย	FORMAT-1	FORMAT-2	FORMAT-3	FORMAT-4	FORMAT-5
Intensity	จำนวนเต็มแสดงความเข้มสัญญาณสหอนกลับ	✓	✓	✓	✓	✓
Return Number	จำนวนนับลูกคลื่นที่สหอนกลับ ลูกแรก:1 ลูกที่สอง:2 จนถึง 5	✓	✓	✓	✓	✓
Scan direction	ทิศทางการตรวจ 1: การตรวจเป็น+ทางซ้าย 0: การตรวจเป็น-ทางขวา ของแนวบิน	✓	✓	✓	✓	✓
Edge of Flight line	1: แนวบินที่ขอบ	✓	✓	✓	✓	✓
Classification	การจำแนกตามมาตรฐาน ASPRS อาจจำแนกภายหลังการบันทึกข้อมูลแล้ว	✓	✓	✓	✓	✓
Scan Angle Rank	ค่ามุมสแกน -90 ถึง +90 ยังไม่แก้ 'roll' ของอากาศยาน	✓	✓	✓	✓	✓
Point Source ID	ลำดับการประมวลผล 0 คือบันทึกครั้งแรกบนอากาศยาน 1 ถึง 65,535 เป็นลำดับต่อไปในการประมวลผล	✓	✓	✓	✓	✓

ข้อมูลกำกับ	ความหมาย	FORMAT-1	FORMAT-2	FORMAT-3	FORMAT-4	FORMAT-5
Red/Green/Blue	ลำดับการประมวลผล 0 คือบันทึกครั้งแรกบน อากาศยาน 1 ถึง 65,535 เป็นลำดับต่อไป ในการประมวลผล		✓	✓		✓
GPS Time	เวลาบันทึกข้อมูลจากจีพี เอส			✓	✓	✓
Wave Packet Descriptor Index	คำอธิบาย waveform data				✓	✓
Byte offset to waveform data	ตำแหน่งข้อมูล waveform data				✓	✓
Waveform packet size in byte	ขนาดของข้อมูล waveform data				✓	✓
Return Point Waveform Location	ค่า offset เวลาหน่วย pico second (10^{-12}) นับจาก				✓	✓
$X(t), Y(t), Z(t)$ โดยที่ $X = X_0 + X(t)$ $Y = Y_0 + Y(t)$ $Z = Z_0 + Z(t)$	สมการส่งพารามิเตอร์ สำหรับใช้ประมาณ รูปร่างของ Waveform				✓	✓

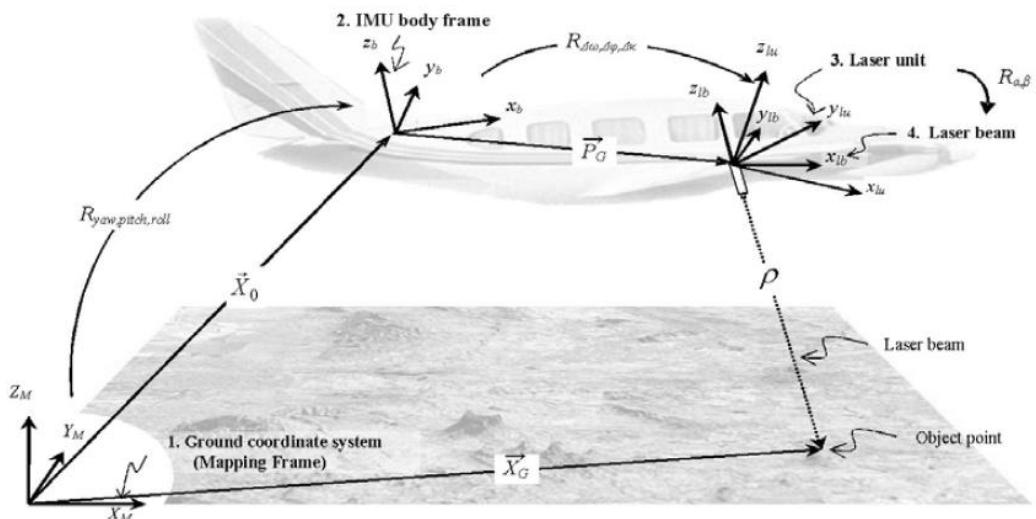
9.8 การประมวลผลข้อมูลเลเซอร์สแกนเนอร์

การประมวลผลการรังวัดด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ที่สำคัญคือข้อมูลกลุ่มจุดระดับหนาแน่นที่เรียกว่า point cloud ที่ได้จากการบินหลายๆ แนวบินมาร่วมกัน การประมวลผล point cloud จึงประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 ขั้นตอน

9.8.1 การประมวลผลทางเรขาคณิต (lidar geometric processing)

เมื่อได้ทำการบันทึกไอลาร์ครอบคลุมพื้นที่แล้ว พร้อมกันนั้นก็มีการบันทึกสัญญาณระบบกำหนดตำแหน่งต่างๆ ที่ประกอบด้วย GPS/IMU ในการระหว่างการบินบันทึกข้อมูล ก็มีการรับสัญญาณดาวเทียมนำพาบนพื้นดินที่ตำแหน่งสถานีฐานอีกด้วย ผลการรับสัญญาณจีพีเอสและไอเอ็มยูของระบบกำหนดตำแหน่งอ้างอิงพิกัดโดยตรง จะต้องทำการประมวลผลเป็นอันดับแรก เพื่อให้ได้รีซิของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ท่าอากาศ

ข้อมูลจุดเลเซอร์ที่คำนวณได้ในเบื้องต้นจะเป็นพิกัดอ้างอิงกับเครื่องมือและอากาศยานในเบื้องต้น หากมีความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือและระบบกำหนดตำแหน่งตรงที่มี IMU เป็นตัวแทนตำแหน่งและการวางแผน จะทำให้คำนวณค่าพิกัดเลเซอร์ทุกจุดได้ในที่สุด (Habib and Rens J.V., _____)

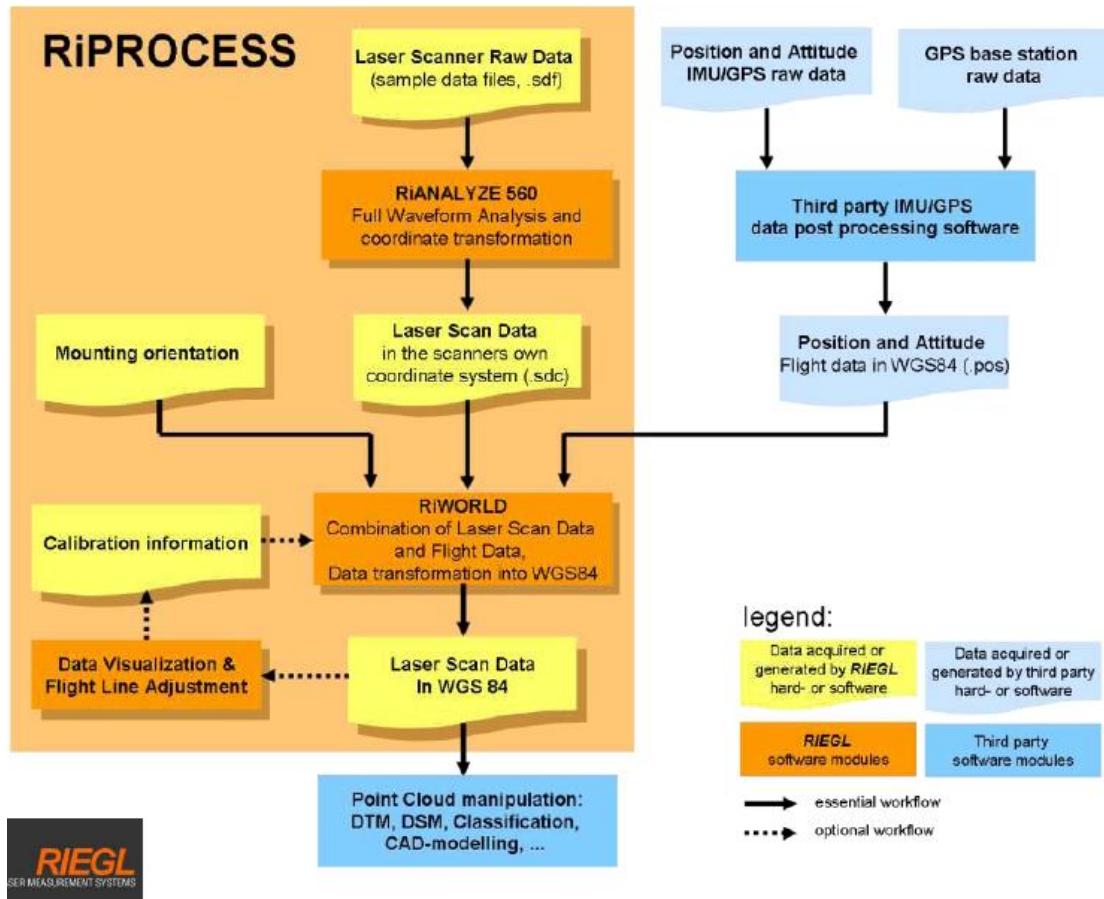


รูปที่ 9-24 ความสัมพันธ์วิถีอากาศยาน ระบบกำหนดตำแหน่งตรง ลำแสงเลเซอร์ และพิกัดบนพื้นผิว

จากภาพข้างต้น Habib และ Rens (_____) ได้บรรยายความสัมพันธ์ในสมการ

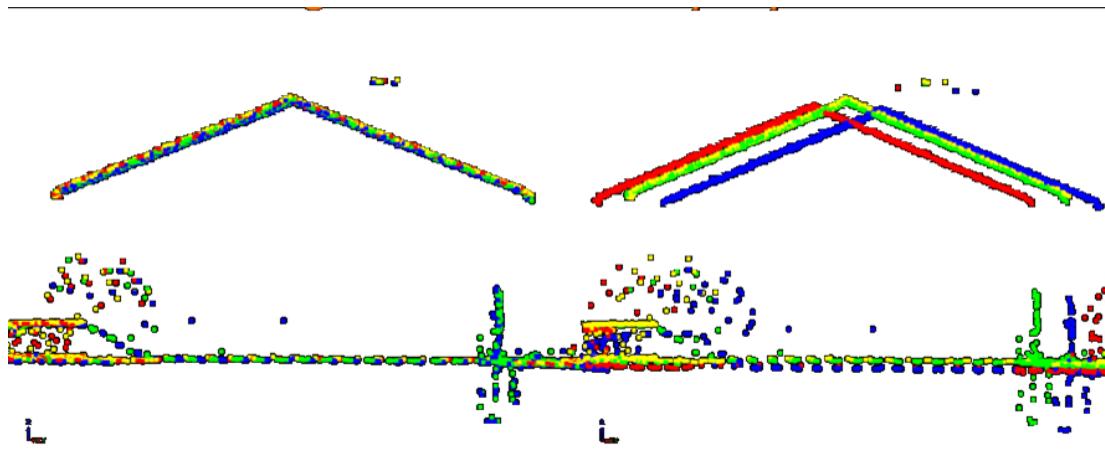
$$\vec{X}_G = \vec{X}_o + R_{yaw, pitch, roll} \vec{P}_G + R_{yaw, pitch, roll} R_{\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa} R_{\alpha, \beta} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix}$$

ในภาพต่อไปนี้แสดงกระบวนการประมวลโดยการใช้ซอฟต์แวร์ RiPROCESS ของ Riegl



รูปที่ 9-25 ตัวอย่างการประมวลผลข้อมูลเลเซอร์ด้วยซอฟต์แวร์ RiPROCESS ของ Riegl

ในการบันทึกเลเซอร์สแกนเนอร์เนื่องจากมีการบันทึกจากหลายแนวบิน เป็นไปได้ว่าผลการคำนวณค่าพิกัดของจุดเลเซอร์อาจมีความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบระหว่างแนวบิน จึงต้องมีการคำนวณปรับแก้ระหว่างแนวบินที่เรียกว่า strip adjustment ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างแนวบินแสดงให้เห็นในภาพ



รูปที่ 9-26 ความคลาดเคลื่อนระหว่างแนวบิน

ซ้าย: หลังปรับแก้แล้ว ขวา: หลังคำบัญเดียวกันที่คำนวณจากต่างแนวบิน

9.8.2 การจำแนกจุดไลดาร์ (lidar point classification)

เมื่อผู้ใช้ได้รับข้อมูลไลดาร์มาแล้ว ในครั้งแรกอาจเรียกได้ว่าเป็นข้อมูลดิบที่ยังไม่จำแนกใดๆ (created- never classified) ด้วยลักษณะการสะท้อนกลับหลายครั้งของไลดาร์ที่เดินทางผ่านสิ่งปัก clutter ภูมิประเทศ และการสะท้อนกลับเพียงครั้งเดียว ทำให้การผลิตข้อมูลไลดาร์ในขั้นต้นมีการจำแนกจุดบนพื้นดิน ground กับจุดอื่นๆ (unclassified) การจำแนกนี้จะมีการเข้ารหัสประจำจุดระดับนั้น เพื่อสะดวกต่อการเรียกใช้งาน การแสดงผล

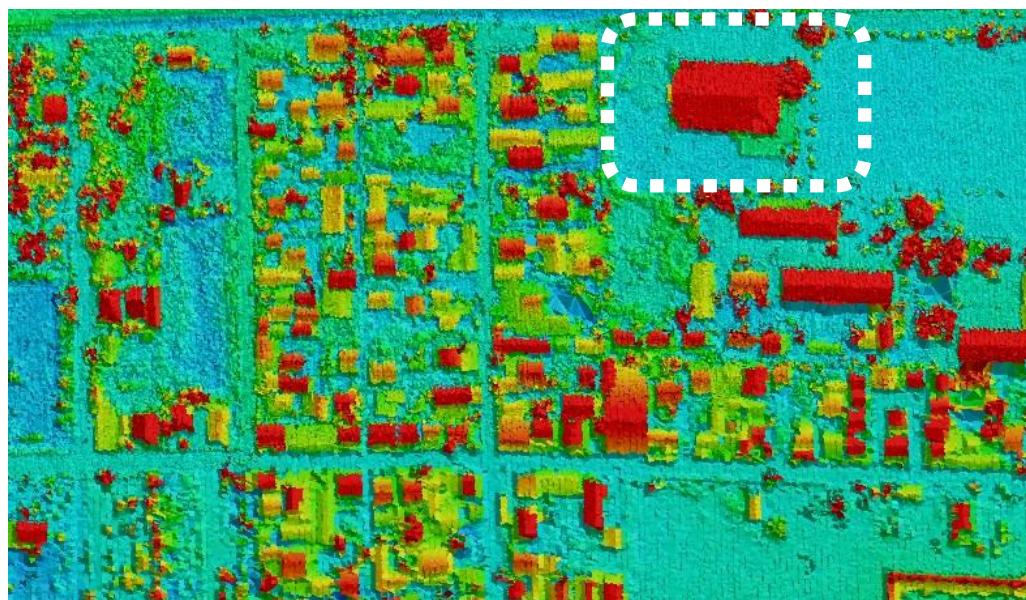
ASPRS ได้กำหนดมาตรฐานการจัดเก็บ LAS ภายใต้มาตรฐานนี้สำหรับจุดเลเซอร์แต่ละจุดจะมีคุณลักษณะต่างๆ กำกับ และคุณลักษณะขั้นหนึ่งคือการจำแนก (classification) โดยมีรหัสต่างๆ หมายเลข 0 ถึง 12 ปรากฏในตารางต่อไปนี้ จะเห็นได้ว่า รหัส 2-ground และ 1-unclassified สามารถทำได้ง่ายตามที่กล่าวมาแล้ว พื้นที่ปกคลุมอื่นๆ ต้องอาศัยซอฟต์แวร์ช่วงในการจำแนกด้วยสายตา และต้องการความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 9-6 รหัสการจำแนกตามมาตรฐาน ASPRS LAS

Classification Value (bits 0:4)	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified ¹
2	Ground
3	Low Vegetation
4	Medium Vegetation
5	High Vegetation
6	Building
7	Low Point (noise)
8	Model Key-point (mass point)
9	Water
10	Reserved for ASPRS Definition
11	Reserved for ASPRS Definition
12	Overlap Points ²
13-31	Reserved for ASPRS Definition

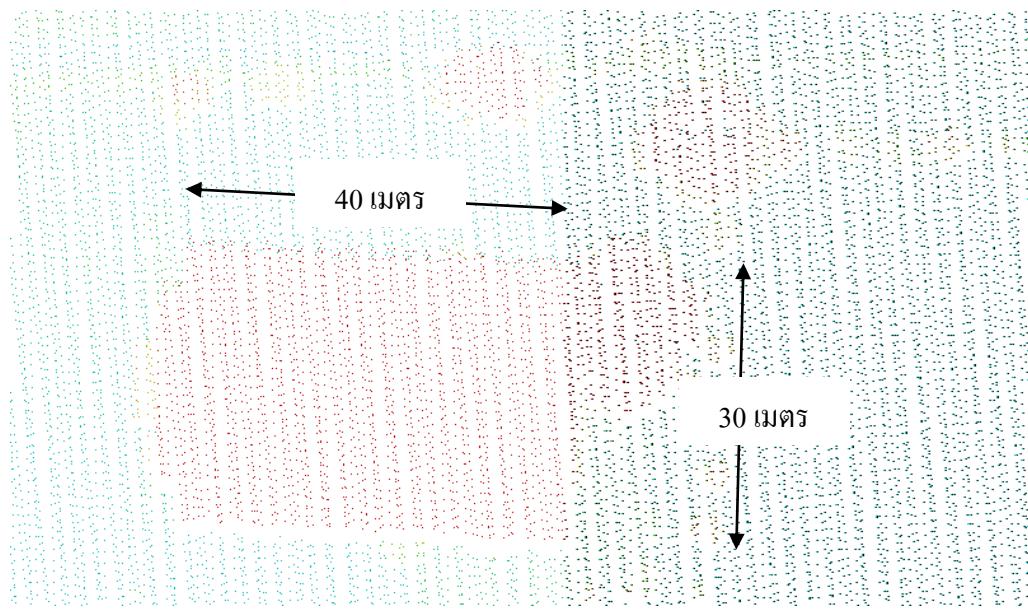
สำหรับการจำแนกในขั้นสูงขึ้นเช่น พื้นที่พร้อมเตี้ยๆ พื้นที่พร้อมความสูงปานกลาง พื้นที่พร้อมค่อนข้างสูง รูปอาคารและสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ (buildings) โดยเฉพาะรูปอาคารซึ่งเป็นที่ต้องการในการประยุกต์ใช้ภูมิสารสนเทศในด้านต่างๆ โดยเฉพาะในกรณีพื้นที่ในเมือง หากการประมวลผลต้องการจำแนกบ้านเพียงอย่างเดียว ผลการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์ได้แสดงให้เห็นว่าโอกาสในการจำแนกบ้านอัตโนมัติด้วยเทคนิคต่างๆ มีโอกาสสำเร็จได้รูปบ้านและกึ่งร้อยละ 90 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยความสำเร็จที่สูงนี้เนื่องมาจาก

- 1) จุดเลเซอร์ที่ตอกบนหลังคาบ้าน อาคาร สิ่งปลูกสร้างจะต้องเป็นชนิด single-return
- 2) หลังคาบ้านอาคาร จะสูงเด่นชัดเทียบกับพื้นดินที่ตั้งอยู่ เช่น บ้านหรืออาคารจะปรากฏความสูงอย่างน้อย มากกว่าความสูงฟ้าเพดานบ้านหรืออาคารซึ่งมีมาตรฐานกำหนดไว้
- 3) รูปบ้านเป็นลีส์เหลี่ยมผืนผ้าชัดเจน
- 4) บ่อยครั้งในเมืองมี “ข้อมูลผังเมือง” ในรูปแบบข้อมูล GIS ตั้งต้น เราสามารถที่จะนำกรอบบ้านมาครอบข้อมูลจุด ทำให้สามารถเลือกจุดไลเดาร์ที่ตอกบนหลังคาบ้านได้อย่างง่ายดาย
- 5) ปัจจุบันที่แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง สามารถหาได้ง่าย แผนที่ภาพก็สามารถช่วยในการจำแนกพื้นที่ที่เป็นพื้นที่อุดหนักได้ ด้วยความสามารถของการตอบสนองในช่วงคลื่นอินฟราเรดด้วยภาพใกล้อินฟรา เช่นกรณีประเทศไทยมีชุดภาพถ่ายด้วยกล้อง DMC ครอบคลุมทั้งประเทศ ก็มีภาพช่วงคลื่นอินฟราเรดให้ใช้ประโยชน์ในการจำแนกได้



รูปที่ 9-27 บ้านอาคารที่สามารถสังเกตได้ง่ายจากข้อมูลไลเดาร์

ความหนาแน่นของไลเดาร์ในเมืองมักจะจัดทำในระดับต่ำๆ 1 จุดต่อตารางเมตร ทำให้มีจุดเลเซอร์จำนวนมหาศาลนับพันอาคารและสิ่งปลูกสร้าง ในข้อมูลโครงการฯ พบร่วมกับจำนวนจุดเลเซอร์จำนวนมากจะทำให้จำลองแบบรูปหลังคาได้อีกด้วย



รูปที่ 9-28 บ้านอาคารที่สามารถสังเกตได้จากข้อมูลไลดาร์

9.8.3 ซอฟต์แวร์ประมวลผลไลเดาร์ (lidar software processing)

เมื่อได้ไลเดาร์มาใช้งาน ข้อมูลอาจจะมีการประมวลผลมาบ้างแล้ว ผู้ใช้สามารถใช้เครื่องมืออย่างง่ายในการ การวัดข้อมูลความสูงของวัตถุสิ่งปลูกสร้างและความสูงภูมิประเทศประกอบอยู่ในการสำรวจข้อมูลไลเดาร์ ซอฟต์แวร์ประมวลผลไลเดาร์มีหลายระดับมีขีดความสามารถแตกต่างกัน เช่น

- ซอฟต์แวร์สำหรับเรียกดูข้อมูล เช่น FugroViewer, PointVue ใช้เรียกดูข้อมูลและแสดงสีตามค่าระดับได้ และสามารถอ่านข้อมูลค่าระดับพร้อมพิกัด (query) สร้างรูปสามมิติหมุนได้ในมุมมองต่างๆได้ และสามารถตัดตามแนวที่ผู้ใช้กำหนดได้
- ซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลในลักษณะ batch processing เช่น UNC LASTools, PyLas
- ซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลเต็มรูปแบบในแบบ Interactive มีเครื่องมือในการจัดการ point cloud ตั้งแต่การแปลงพิกัด การปรับแก้ระดับอย่างเป็นระบบ การเลือกจุดจำแนก เป็นประเภทตามต้องการ การประมาณรูปทรงเรขาคณิตจากกลุ่มจุดระดับ ซอต์แวร์กลุ่มนี้ ได้แก่ TerraSolid, QtModeler, LidarAnalyst for ERDAS/ArcGIS

9.8.4 ระดับการประมวลผล (lidar processing level)

ในภาคอุตสาหกรรมการทำแผนที่ด้วยไลเดาร์ มีความต้องการมาตรฐานในการสื่อสารระหว่างผู้จ้างและผู้รับจ้างในการกำหนดมาตรฐานระดับของการประมวลผล Flood (2007) ได้เสนอแนวคิดในการเรียกระดับการประมวลดังตารางนี้

ตารางที่ 9-7 ระดับการประมวลผล โดย Martin Flood (2007)

ระดับ	ชื่อระดับ	คำอธิบาย
1	Basic / All points	ข้อมูลไลเดาร์อ้างอิงตำแหน่งบนพื้นผิวโลกแล้ว เหมาะสำหรับหน่วยงานที่ประมวลผลต่อได้ เป็นผลิตผลราคาถูกและเร็วที่สุด
2	Low-fidelity / First-pass	มีการจำแนกเป็น “bare earth” และ “non-ground” อัตโนมัติ เหมาะกับหน่วยงานที่สามารถประมวลผลต่อได้ มีราคาและใช้เวลาไม่ต่างกับ Basic/All Points
3	High-fidelity/ Cleaned	มีการวิเคราะห์จำแนกจุดบนพื้นผิวภูมิประเทศระดับ 99% ต้องมีผู้ชำนาญการจำแนกด้วยสายตา ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นปานกลาง

ระดับ	ชื่อระดับ	คำอธิบาย
4	Feature Layers	มีการจำแนกต่อไป โดยเฉพาะสิ่งที่ผู้ใช้งานใจจำเพาะ เช่น สายไฟฟ้า ขอบเขตอาคารและสิ่งปลูกสร้าง
5	Fused	การผนวกรวมข้อมูลไลดาร์กับข้อมูลจากเซนเซอร์อื่นๆ เช่น ภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูง ผลิตผลนี้มีข้อมูลเพิ่มเติมเข้ามา อีกมา และจะมีราคาค่าใช้จ่ายสูงสุด

9.9 ระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศ

ปัจจุบันระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศมีผู้ผลิตจำนวนจำกัดจำนวนหนึ่ง และเป็นที่น่าสังเกตว่า ผู้ผลิตเครื่องมือสำรวจวัด เช่นกล้องถ่ายภาพทางอากาศดังเดิม เพิ่งจะมีการเข้าสู่ธุรกิจนี้ภายหลัง โดยการไปนำเทคโนโลยีจากบริษัทที่มีการวิจัยพัฒนาและผลิตมาอยู่แล้ว นำเข้ามาเป็นผลิตภัณฑ์ บริษัท ในตารางต่อไปนี้แสดงชนิดเซนเซอร์รุ่นต่างๆ วิธีการกวาดภาพ (mode) ความถี่ในการกวาด (Scan Freq.) มุมการกวาด (Scanning Angle) ปลายبانของเลเซอร์ (beam diverg.) ความละเอียดระยะ (range resolution) และความยาวลูกคลื่น (pulse length)

Sensor	Mode	Scan Freq. [Hz]	Pulse Freq. [kHz]	Scanning Angle [°]	Beam Diverg. [mrad]	Pulse Energy [μJ]	Range Resolution [cm]	Pulse Length [ns]	Digitizer [ns]
Optech 2033	Oscillating	0-70	33	±20	0.2/1.0	N/A	1.0	8.0	N/A
Optech 3100	Oscillating	0-70	33-100	±25	0.3/0.8	<200	1.0	8.0	1
Optech Gemini	Oscillating	0-70	167	±25	0.15/0.25/0.8	<200	3.0	7.0	N/A
Optech Orion	Oscillating	0-100	167	±25	0.25	<200	2.0	7.0	N/A
TopEye MkII	Conic	35	5-50	14,20	1.0	N/A	<1.0	4.0	0.5
TopoSys I	Line	653	83	±7.15	1.0	N/A	6.0	5.0	N/A
TopoSys II Falcon	Line	653	83	±7.15	1.0	N/A	2.0	5.0	1
Trimble Harrier	Rotating polygon	160	160	±30	0.5	N/A	2.0	4.0	1
Leica ALS50	Oscillating	25-70	83	±37.5	0.33	N/A	N/A	10	N/A
Leica ALS50-II	Oscillating	35-90	150	±37.5	0.22	N/A	N/A	10	1
Leica ALS60	Oscillating	0-100	200	±37.5	0.22	N/A	3.0-4.0	5.0	1
Riegl LMS-Q560	Line	160	240	±30.0	0.3	8	2.0	4.0	1
Riegl LMS-Q680	Line	200	240	±30.0	0.4	8	2.0	4.0	1

ตารางที่ 9-8 เซนเซอร์ไลดาร์และคุณลักษณะที่สำคัญ (Toth, 2009)

จากตารางจะเห็นว่าระบบส่วนใหญ่มีความถี่การกวนอยู่กว่า 100 Hz. ยกเว้น TopoSys II Falcon ส่วนความถี่เลเซอร์สูงสุดเป็น 140 kHz มุมกวนสูงสุดไม่เกิน 37.5° ความละเอียดในการวัดระยะล้วนแต่ดีกว่า 3 ซม. ยกเว้น TopoSys I ที่ถูกต้องเพียง 6 ซม.

ตัวอย่างระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศที่ได้รับความนิยมและแพร่หลายมีหลายผู้พัฒนาและผู้ผลิต ในส่วนนี้จะมีรายชื่อสรุปของผู้ผลิตและพัฒนาระบบ ดังนี้

9.9.1 Optech

Optech เป็นผู้พัฒนาและผู้ผลิตระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ตั้งอยู่ในเมืองโตรอนโตประเทศแคนาดา ปัจจุบันถือได้ว่า Optech ประสบความสำเร็จทางตลาดมากที่สุดสำหรับระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศเรียกว่า Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM) Optech เริ่มขายระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศชื่อว่า ALTM 1020 เมื่อ คศ. 1993

ตัวอย่างในภาพเป็นรุ่น ATLM 2050 ซึ่งเป็นรุ่นหนึ่งที่เคยมีการใช้งานในประเทศไทย



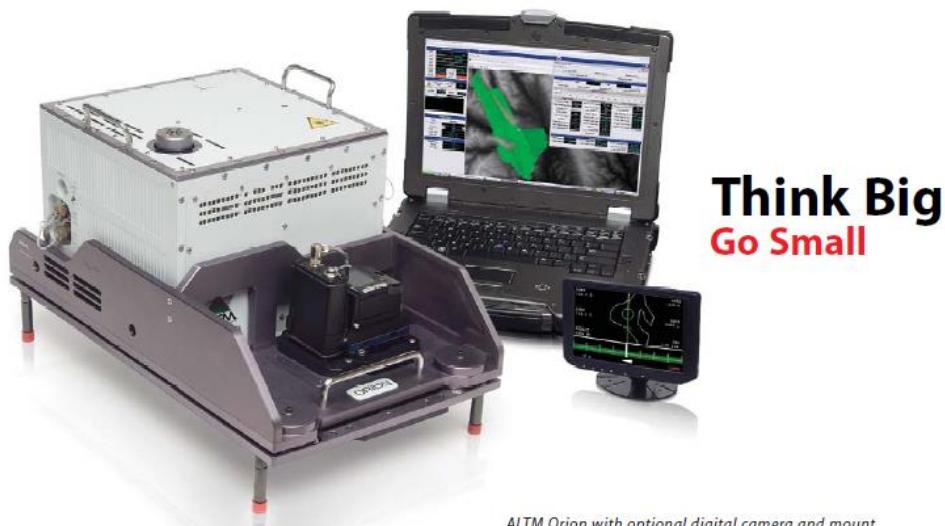
รูปที่ 9-29 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ ATLM 2050

Optech พัฒนาระบบที่ทันสมัยและตรงความต้องการของตลาดเรื่อยมาตามลำดับ ในรูปต่อไปนี้แสดงให้เห็นระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศรุ่นล่าสุด



รูปที่ 9-30 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศรุ่นล่าสุดของ Optech ซ้าย: Gemini ขวา: Pegasus

สำหรับการประยุกต์ใช้เฉพาะด้านการทำแผนที่ภูมิประเทศในพื้นที่แคบแต่ต้องความละเอียดถูกต้องสูง เช่นงานวิศวกรรม (engineering survey) การสำรวจเป็นแนว (corridor survey) ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ระบบเลเซอร์ที่บินระดับปากกลางถึงต่ำ Optech มีผลิตภัณฑ์เรียกว่า Orion-M และ Orion-C ระบบเหล่านี้ยังมีกล้องถ่ายภาพดิจิทัลขนาดกลาง (medium-format) ติดตั้งมาพร้อมกันด้วย แสดงในภาพ



ALTM Orion with optional digital camera and mount

รูปที่ 9-31 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศของ Optech ที่มีขนาดเล็กลงไปอีก

สำหรับระบบกำหนดตำแหน่งอ้างอิงตรงเพื่อระบบตำแหน่งและความละเอียดถูกต้องของเซนเซอร์ ณ เวลาใดๆ Optech เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ของ Applanix ความละเอียดถูกต้องของระบบ Applanix แสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 9-9 ความละเอียดถูกต้องสำหรับ POS AV 610 ของ Applanix

POS AV 610	SPS	DGPS	XP	Post-Processed
Position (m)	1.5-3.0	0.5-2.0	0.1-0.5	0.05-0.30
Velocity (m/s)	0.030	0.020	0.010	0.005
Roll/Pitch (deg)	0.005	0.005	0.005	0.0025
Heading (deg)	0.030	0.030	0.020	0.0050

ในตารางเป็นรูปแบบการรับสัญญาณและประมาณผลร่วมกัน GNSS และ IMU โดยที่ SPS คือการทำงานรับสัญญาณมาตรฐาน DGPS คือการรับที่มีการใช้ค่าแก้ pseudorange เช่น OmniSTAR XP คือค่าแก้สัญญาณจากกลุ่มสถานีเครือข่ายของผู้ให้บริการเช่น OmniSTAR และ Post-processed เป็นการประมวลผลภายหลังของสัญญาณที่รับบนอากาศยานพร้อมๆ กันสถานีฐาน

9.9.2 Leica Geosystems

Leica Geosystems เป็นผู้ผลิตระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศโดยการเลือกใช้เทคโนโลยีจากบริษัทที่มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เลเซอร์สแกนอยู่แล้วในปีค.ศ. 2001 ต่อมา Leica Geosystem จึงได้เปิดเผยผลิตภัณฑ์สู่ตลาดในชื่อว่า Airborne Laser Scanner (ALS-50) เพื่อขายคู่กับ Airborne Digital Sensor (ADS-40) ที่เป็นกล้องดิจิทัลถ่ายภาพทางอากาศผลิตภัณฑ์แรกของ Leica Geosystem แสดงในภาพ



รูปที่ 9-32 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์รุ่นแรกของ Leica รุ่น ADS-40

จากนั้น Leica ก็ได้พัฒนาต่อมาเป็นรุ่นใหม่กว่า และมีความกะทัดรัดมากขึ้น ในปี คศ. 2003 Leica ได้ผลิตภัณฑ์ระบบเลเซอร์สแกนทางอากาศสู่ตลาดเรียกว่า ALS-50 ภายหลังในปีคศ. 2006 ได้ปรับปรุงต่อเป็นรุ่นที่สอง เรียกว่า ALS50-II



รุ่นที่ 9-33 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ ALS50-II เป็นรุ่นที่ 2 ของ Leica

ปัจจุบัน Leica เสนอขายระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศรุ่นที่ 3 และเรียกว่า ALS60 มีจุดเด่นคือความสามารถในการส่งคลื่นซ้อนและตรวจวัดลูกคลื่นหลายลูกพร้อมกันเรียกว่า Multiple-pulse in Air (MPiA)



รูปที่ 9-34 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ ALS-60 เป็นรุ่นที่ 3 ของ Leica

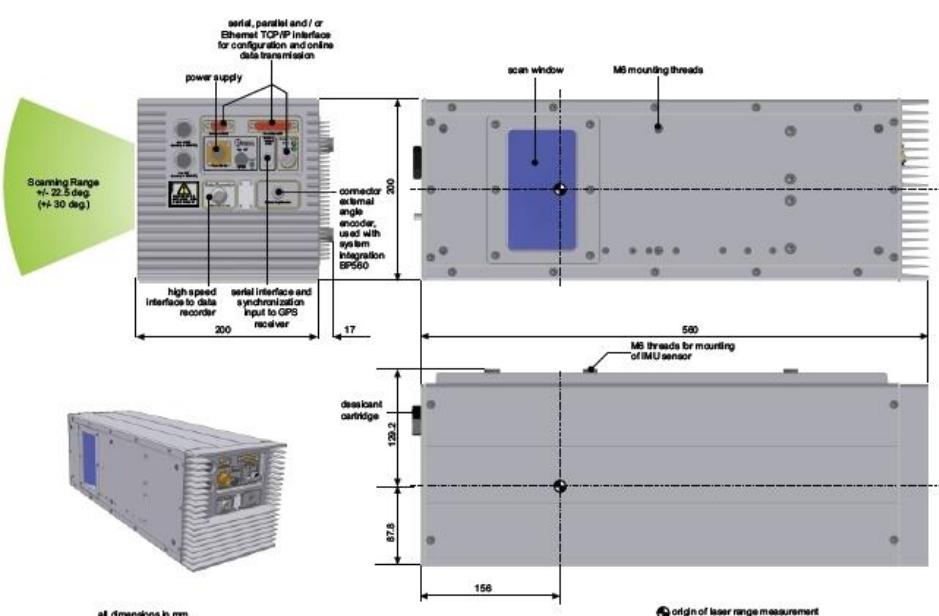
ปัจจุบัน Leica มีผลิตภัณฑ์ GPS/IMU เป็นของตนเองใช้ชื่อผลิตภัณฑ์ว่า IPAS อุปกรณ์กำหนดตำแหน่งตระหง่านหัวใจสำคัญของผลิตภัณฑ์กล้องถ่ายภาพทางอากาศชนิดกว้าง (ADS) และระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ (ALS) ปัจจุบัน Leica มีผลิตภัณฑ์ IPAS20 ให้เลือกใช้หลายโมดูล เรียกว่า NUS4 DUSS NUSS และ CUS6 โดยมีความแตกต่างประการสำคัญคือเทคโนโลยีและความละเอียดลูกต้องของ IMU สรุปในตาราง

ตารางที่ 9-10 ระบบกำหนดตำแหน่งต่างๆ ของ Leica IPAS20 (ที่มา <http://www.leica-geosystem.com>)

IMU model type		NUS4	DUS5	NUS5	CUS6
Absolute accuracy after post-processing (RMS)	Position	0.05 – 0.3 m	0.05 – 0.3 m	0.05 – 0.3 m	0.05 – 0.3 m
	Velocity	0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s
	Roll & Pitch	0.008 deg	0.005 deg	0.005 deg	0.0025 deg ¹
	Heading	0.015 deg	0.008 deg	0.008 deg	0.005 deg ¹
Relative accuracy	Angular random noise	<0.05 deg/sqrt(hour)	<0.01 deg/sqrt(hour)	<0.01 deg/sqrt(hour)	<0.01 deg/sqrt(hour)
	Drift	<0.5 deg/hour	<0.1 deg/hour	<0.1 deg/hour	<0.01 deg/hour
IMU	High-performance gyros	200Hz Fiber-optic Gyro	200Hz Fiber-optic Gyro	500Hz Dry-tuned Gyro	200Hz Ring-laser Gyro

9.9.3 Riegl

Riegl เป็นผู้พัฒนาระบบเลเซอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ด้านต่างๆ เช่น เครื่องวัดระยะทาง เครื่องวัดความเร็ว อุปกรณ์ป้องกันการชน ภายหลังได้นำประสบการณ์มาพัฒนาเป็นระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ภาคพื้นดินสำหรับการรังวัดสามมิติภาคพื้นดิน และต่อมา มีการพัฒนาระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ Riegle LiteMapper ไม่ได้ผลิตระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ภาคพื้นดินที่สมบูรณ์ในตัวเอง แต่มีการผลิตเป็น OEM สำหรับกลุ่มอื่นสามารถนำไปพัฒนาเป็นระบบสมบูรณ์แบบ เช่น IGI นำไปพัฒนาเป็น IGI LiteMapper



รูปที่ 9-35 ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ Riegl LQ-560

9.9.4 IGI

บริษัท IGI (Ingenieur-Gesellschaft für Intefaces mbH) เป็นผู้ผลิตระบบนำหน้าชั้นนำจากประเทศเยอรมัน โดยเฉพาะระบบ GNSS/IMU ที่เรียกว่า Computer Controlled Navigation System (CCNS), AEROcontrol IGI และกล้องขนาดกลาง DigiCAM IGI ใช้ชุดเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศจาก Riegl LMS-Q240i, LMS-Q560 หรือ LMS-Q560



รูปที่ 9-36 องค์ประกอบระบบ IGI LiteMapper

9.9.5 Trimble/TopoSys

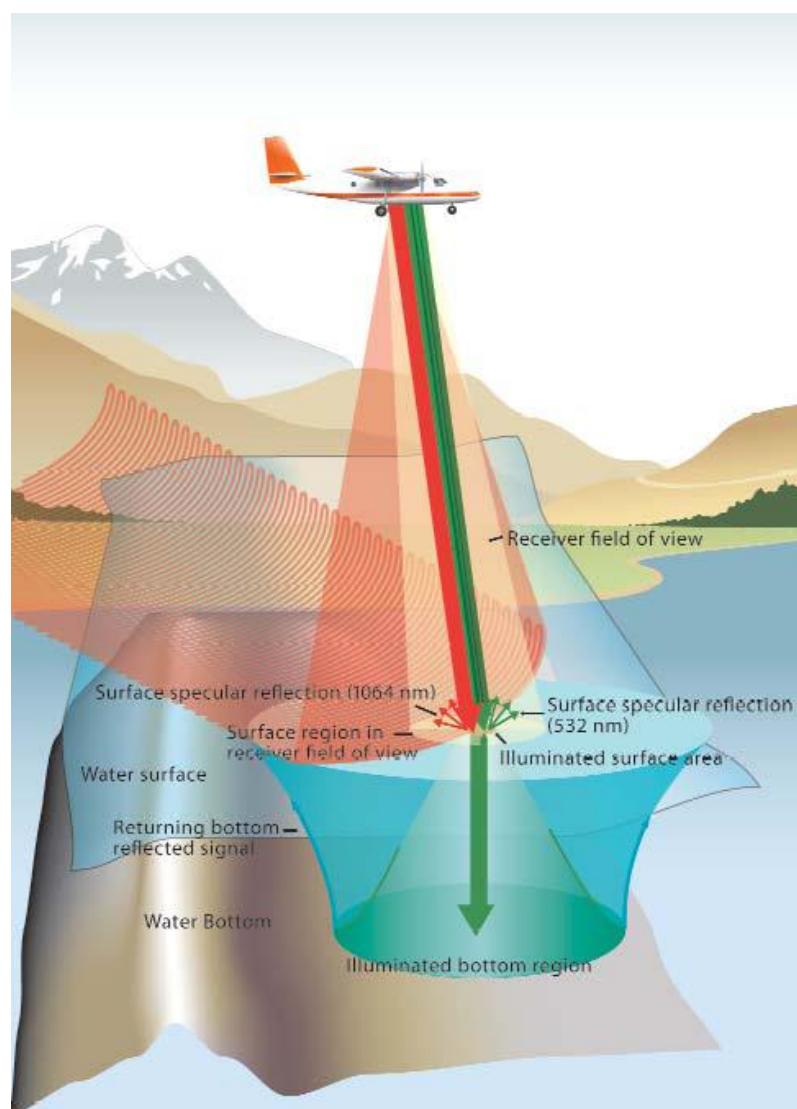
Trimble ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศล่าที่สุด และเป็นผลสืบเนื่องจากเนื่องจากมีการใช้ครอบคลองบริษัท TopoSys GmbH ในปี คศ. 2008 TopoSys เป็นผู้พัฒนาระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศในประเทศเยอรมันที่ยาวนานเริ่มจดทะเบียนตั้งแต่ คศ.1995 TopoSys พัฒนาเทคโนโลยีเลเซอร์สแกนเนอร์ใช้ไฟเบอร์ออฟติกซึ่งชื่อว่า “Falcon” แต่ต่อมา TopoSys ก็ใช้ OEM จาก Riegl LMS-Q560 และ LMS-Q680i สำหรับการพัฒนาระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศรุ่น Harrier 56 และ Harrier 68i



รูปที่ 9-37 ระบบ Trimble Harrier-68i

9.9.6 Optech SHOALS

ระบบ Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey : SHOALS เป็นระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศสำหรับการวัดความลึกของน้ำ (bathymeter) Optech พัฒนามาตั้งแต่ปี คศ. 1990 ระบบใช้เลเซอร์สองความถี่ คือย่างแสงอินฟราเรด ($\lambda=1064\text{nm}$) และย่างแสงสีเขียว Optech ($\lambda=532\text{ nm}$) โดยที่เลเซอร์ทั้งสองสีท่อนที่ผิวน้ำและที่ห้องน้ำตามลำดับ การวัดความลึกน้ำจำกัดที่ 30 – 50 เมตร



รูปที่ 9-38 หลักการทำงานของระบบสำหรับความลึกน้ำด้วยเลเซอร์ SHOAL-3000

ระบบมีอัลกอริธึมในการตรวจวัดความลึกน้ำตื้น สำหรับรุ่น SHOAL-3000 ล่าสุด ระบบสามารถวัดลึกน้ำได้ 3,000 จุดความลึก (spot-depth) ต่อวินาที ด้วยความละเอียดถูกต้องตามมาตรฐาน International Hydrography Organization IHO Order 1 โดยเฉลี่ยระบบสามารถสำรวจความลึกได้ 70 ตารางกิโลเมตรต่อชั่วโมง ระบบ SHOAL-3000 มีองค์ประกอบตามรูป



รูปที่ 9-39 ระบบ SHOAL-3000 โดย Optech

9.10 การประยุกต์ใช้เลدار์ในประเทศไทย

ประเทศไทยได้เริ่มมีการประยุกต์ใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศมาบ้างแล้ว ปัจจุบันภาครัฐยังไม่มีระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศไว้ใช้งาน แต่มีภาคเอกชนมีความพร้อมหลายรายสามารถให้บริการได้ ในส่วนนี้เป็นโครงการที่ใช้เลدار์มาแล้วในประเทศไทย

9.10.1 โครงการประยุกต์ใช้เลدار์สำหรับงานวิศวกรรม

การประยุกต์ใช้เลدار์ในประเทศไทยครั้งแรกของประเทศไทย ได้เริ่มเกิดขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2547 โดยความร่วมมือของกรมทางหลวง กรมแผนที่ทหาร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พร้อมกับการสนับสนุนจากประเทศแคนาดาโดยหน่วยงาน GPR Consultant Canada และ Canadian International Development Agency (CIDA) ในการดำเนินการโครงการศึกษาการประยุกต์ใช้เลدار์สำหรับงานวิศวกรรม (ไพบูล, 2550)

ในการศึกษาวิจัยในครั้งนั้นได้มีการทดสอบระบบในพื้นที่เป็นบริเวณกว้างทางด้านตะวันตกของสนามบินสุวรรณภูมิและตามแนวยาวของเส้นทางมอเตอร์เวย์กรุงเทพฯ - ชลบุรีรวมเป็นพื้นที่กว่า 250 ตร.กม. ในการบันทึกข้อมูลเมื่อเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2548 ได้ใช้เวลาอยกว่า 9 ชั่วโมงบิน ได้ผลการบันทึกข้อมูลและประมาณผลในระยะเวลาอันอยกว่าห้าวัน คือจุดระดับของภูมิประเทศ พืชพรรณ และสิ่งปลูกสร้างด้วยความละเอียดสูงจำนวนกว่า 281 ล้านจุด ความหนาแน่นของจุดระดับโดยเฉลี่ย 1.4 จุดต่อตารางเมตร ข้อมูลสำรวจที่ได้ได้นำไปศึกษาวิจัยและศึกษาการประยุกต์ใช้งาน ในการเรียน การสอน ในสถาบันอุดมศึกษา หน่วยงานวิจัย หน่วยงานทำแผนที่ และได้ยังมีการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้ส่วนราชการและเอกชนต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก



รูปที่ 9-40 พื้นที่โครงการศึกษา การประยุกต์ใช้ลิเดาร์สำหรับงานวิศวกรรม

ในโครงการศึกษา การประยุกต์ใช้ลิเดาร์สำหรับงานวิศวกรรม ได้ทำการติดตั้งระบบลิเดาร์บนเครื่องบินที่เดิมใช้งานบันทึกภาพถ่ายทางอากาศอยู่แล้ว การติดตั้งเครื่องมือในตำแหน่งเดิมที่เคยติดตั้งกล้องถ่ายภาพทางอากาศใช้เวลาประมาณครึ่งวัน ตามด้วยการรังวัดอффเซตจากศูนย์กลางเสาอากาศจีพีเอสไปยังจุดอ้างอิงบนกล่องปริซึมของระบบลิเดาร์ การรังวัดอффเซตนี้ใช้กล้องที่ติดตั้งบนรถบรรทุกและเป้าปริซึม ผลลัพธ์ของการกำหนดตำแหน่งวัตถุในสามมิติโดยการใช้โท波โลสเตรชันคาดว่าจะดีกว่า ระดับ ซม. หลังจากนั้น การติดตั้งระบบเป็นการบินทดสอบและปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบ



รูปที่ 9-41 การติดตั้งไลดาล์และการรังวัดօฟเซต

ในโครงการศึกษา มีการบันทึกข้อมูลในพื้นที่โดยรอบสนามบินสุวรรณภูมิและได้มีประมาณผลข้อมูลไลดาล์ โดยเฉพาะการสร้างแบบจำลองระดับรายละเอียดสูงโดยการใช้เครื่องไลดาล์ Optech ATLM 2050 เครื่องไลดาล์ที่ใช้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดเลเซอร์ คอมพิวเตอร์ควบคุมและบันทึกข้อมูล ระบบเลเซอร์พร้อมปริซึมเปลี่ยนเบนลำแสงเลเซอร์ให้ความถี่แสงเลเซอร์ครอบคลุมภูมิประเทศเป็นแคบกว้าง ระบบดังกล่าวแสดงให้เห็นดังภาพ



รูปที่ 9-42 Optech ATLM 2050 เชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์บังคับการการวัดเดลเซอร์ด้วยสายไฟเบอร์ออฟติก

ระบบไลดาร์ Optech ATLM 2050 ตามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต ระบบมีขีดความสามารถในการทำแผนที่โดยให้ความละเอียดถูกต้องในการทำแผนที่ที่สำคัญ ดังนี้

- ความละเอียดถูกต้องทางระดับเป็น 15 ซม. กรณีบินสูง 1,200 ม.
- ความละเอียดถูกต้องทางระดับเป็น 25 ซม. กรณีบินสูง 2,000 ม.

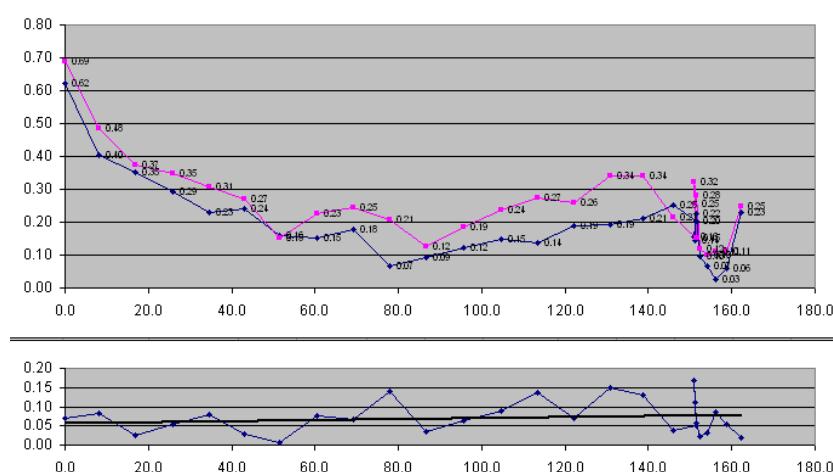
ความละเอียดถูกต้องทางราบคิดเป็น 1/2000 ของความสูงบิน เช่น บินสูง 1,000 ม. ความละเอียดถูกต้องทางราบคิดเป็น 0.5 ม.

ในการศึกษาได้มีการตรวจสอบค่าระดับที่ได้กับค่าระดับที่รังวัดด้วยกล้องโทเทลสเตชันที่ถือว่ามีความละเอียดถูกต้องสูงระดับ มม. ถึง ซม. รูปด้านล่าง มากกว่าสองแนวยาวประมาณ 100 - 200 ม. ได้ถูกจุดทำขึ้นในพื้นที่ที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันเพื่อใช้ตรวจสอบค่าระดับที่ได้จากไลดาร์ ค่าระดับของหมุดที่ตั้งของกล้องโทเทลสเตชันได้จากการระดับชั้น 3 ในตารางข้างล่างแสดงผลการเปรียบเทียบที่แนว profile B และ profile E

ตารางที่ 9-11 ความละเอียดถูกต้องของ Profile ทดสอบ

แนว รูปตัดตามยาว	ความยาว (ม.)	RMSE (ม.)	ความละเอียดถูกต้อง (LMIC1999: LE95%) (ม.)
profile B	162	0.08	0.16
profile E	118	0.05	0.10

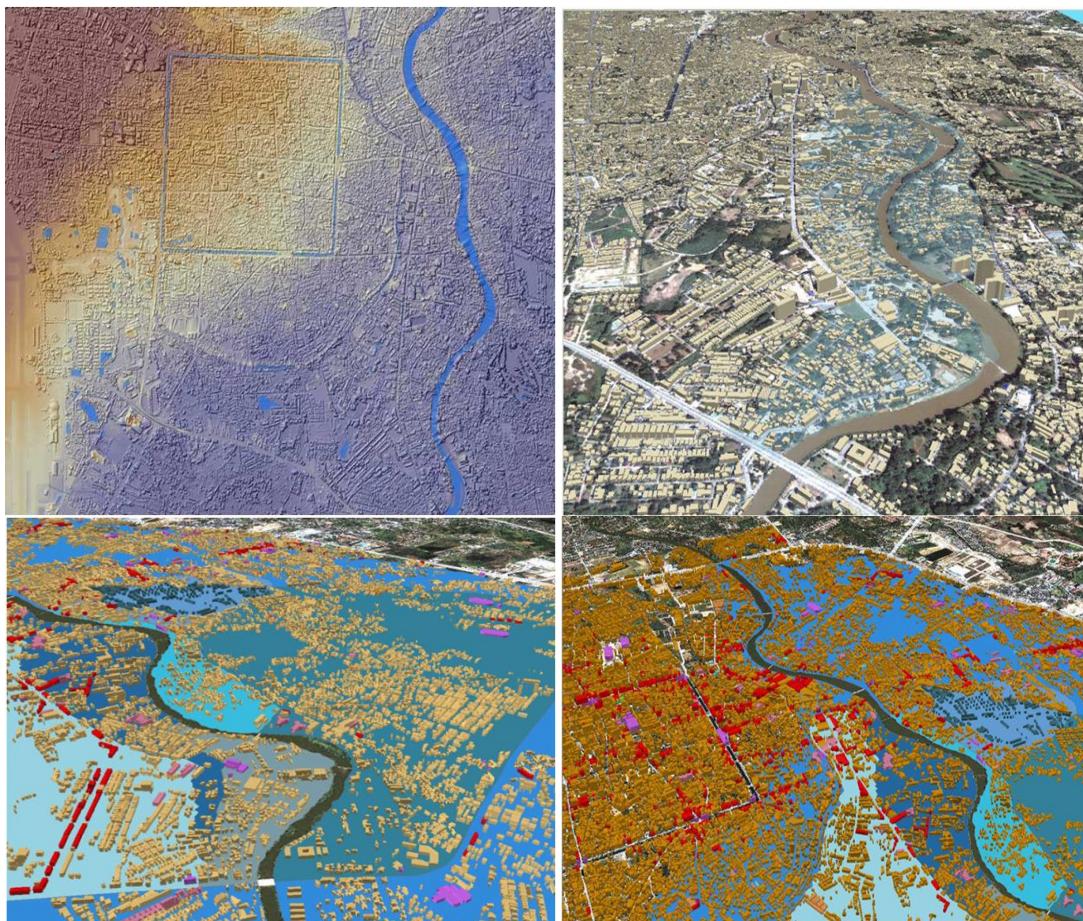
ในภาพต่อไปนี้ แสดงกราฟของ profile B และผลต่างค่าระดับที่ได้จากไลดาร์และการทำรูปตัดตามยาวด้วยกล้องโทเทลสเตชัน



รูปที่ 9-43 ระดับจากกล้องโทเทลสเตชันเทียบกับค่าระดับจากไลดาร์ (ล่าง) ค่าต่างของค่าระดับ

9.10.2 ระบบพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่เขตเมืองเชียงใหม่ (2550)

ภายใต้โครงการระบบพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมเขตเมืองเชียงใหม่ มีการศึกษาเมืองเชียงใหม่ตั้งอยู่ข้างสองริมฝั่งของแม่น้ำปิงและได้เกิดเหตุการณ์น้ำท่วมเป็นประจำ โดยในปีพ.ศ. 2548 ได้เกิดน้ำท่วมใหญ่ที่เป็นภัยพิบัติรุนแรงที่สร้างความเสียหายแก่ประชาชนเป็นอย่างมาก โครงการมีการพัฒนาและประยุกต์ระบบพยากรณ์และเตือนภัยน้ำท่วมพื้นที่เขตเมืองเชียงใหม่โดยหน่วยวิจัยภัยพิบัติทางธรรมชาติ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โครงการนี้ประกอบด้วยการจัดทำแผนที่ดิจิตอล 3 มิติจากระบบสแกนนิ่งไลดา (เลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ) การพยากรณ์น้ำท่วมล่วงหน้า การเตือนภัยน้ำท่วมทางระบบสื่อสาร การจัดทำหนังสือคู่มือรับสถานการณ์น้ำท่วมสำหรับประชาชน และการทำหลักแสดงระดับน้ำท่วมเพื่อการเตือนภัยในพื้นที่สำหรับการพยากรณ์น้ำท่วมล่วงหน้าได้ใช้แบบจำลองโครงข่ายไปรษณีย์ภาคโดยวิธีซับพอร์ทเวกเตอร์ เมโมรีซิ่งพัฒนาโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าและน้ำฝนของเหตุการณ์น้ำท่วมในอดีต ผลผลิตที่ได้จากโครงการและการพยากรณ์น้ำท่วมล่วงหน้าที่แสดงผลเป็นทั้งรูปกราฟและตารางจะถูกนำไปแจ้งให้ทราบระบบสื่อสารและทางเว็บไซด์เตือนภัยน้ำท่วมของโครงการ www.cendru.net

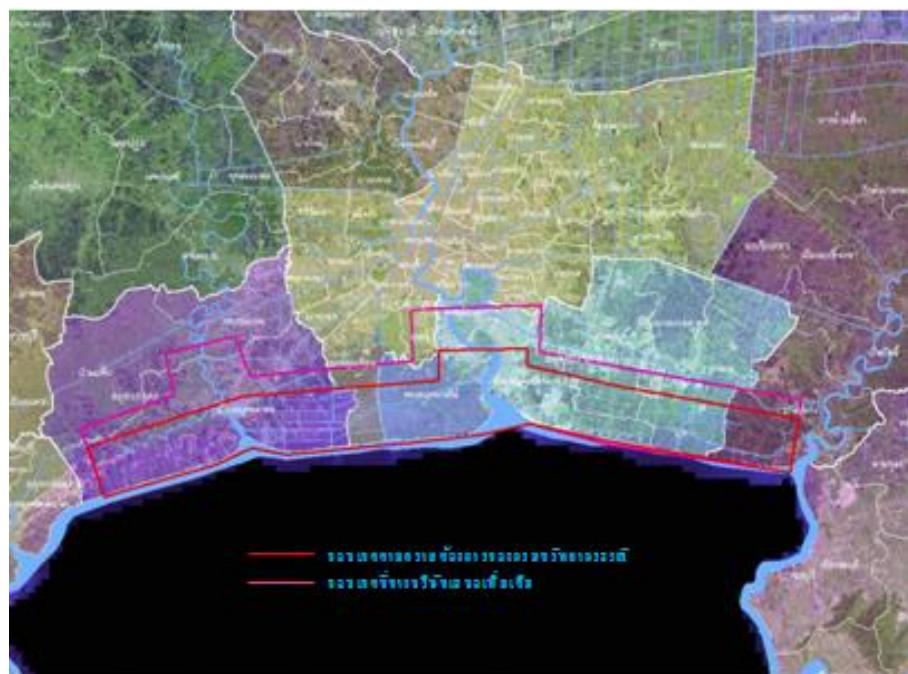


รูปที่ 9-44 การพยากรณ์น้ำท่วมเมืองเชียงใหม่ (ชูพงษ์ 2550)

9.10.3 โครงการสำรวจข้อมูลระดับความสูงด้วยระบบไลดาร์

โครงการสำรวจข้อมูลระดับความสูงด้วยระบบไลดาร์ของกรมทรัพยากรธรรมชาติในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีการรังวัดความสูงภูมิประเทศด้วยระบบเลเซอร์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถให้ข้อมูลลักษณะภูมิประเทศเชิงเลขที่มีความละเอียดและความถูกต้องสูง สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลในอนาคตได้

โครงการมีการประมาณผลและจัดทำข้อมูลภูมิ ข้อมูลไลดาร์มีความถูกต้องทางดิ่งไม่เกิน 0.50 เมตร ความหนาแน่นจุดเฉลี่ยอย่างน้อย 5 เมตร พร้อมรูปถ่ายทางอากาศสีอิฐโดยความละเอียด 0.20 เมตร ความถูกต้องทางราบ 1.5 เมตร



รูปที่ 9-45 พื้นที่โครงการสำรวจข้อมูลระดับความสูงด้วยระบบไลดาร์

9.10.4 การประยุกต์ใช้ไลดาร์ของกรมชลประทาน

กรมชลประทานมีการประยุกต์ใช้ไลดาร์ในการพัฒนาโครงการด้านชลประทานต่างๆ สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา กรมชลประทานได้จัดจ้างที่ปรึกษาจัดทำระบบการเก็บข้อมูลความสูงภูมิประเทคโนโลยจากอากาศยานด้วยระบบไลดาร์ โครงการฯ สำรวจภูมิประเทคโนโลยด้วยไลดาร์ โดยในปีงบประมาณ 2549-2553 กรมชลประทานมีได้ดำเนินการจัดทำหรืออยู่ระหว่างดำเนินการระบบข้อมูลไลดาร์ 5 โครงการงบประมาณรวม 52.6 ล้านบาท โดยมีรายละเอียดดังนี้ (สรุรณาระบบคณะ 2554)

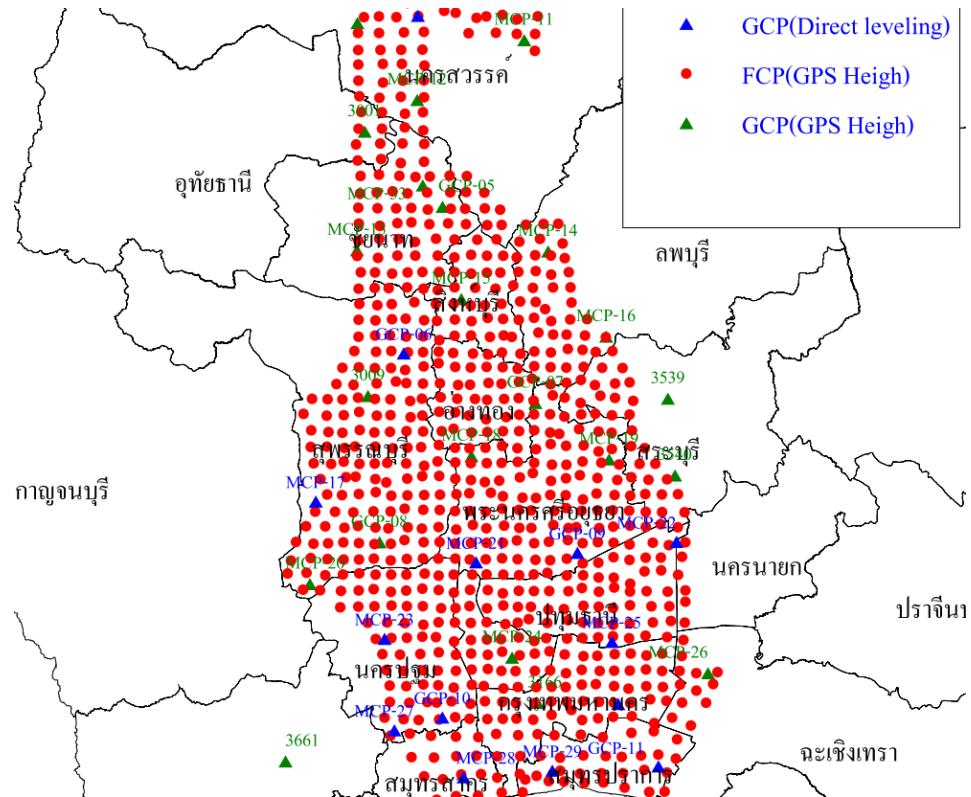
- โครงการจัดทำฐานข้อมูลภูมิประเทคโนโลยเชิงเลขรายละเอียดและความถูกต้องสูงด้วยระบบไลดาร์ บริเวณพื้นที่ฝ่ายราศีศีลป์พื้นที่ จังหวัดศรีสะเกษ สุรินทร์และร้อยเอ็ด ครอบคลุมพื้นที่ 390 ตารางกิโลเมตร งบประมาณ 6.3 ล้านบาท
- โครงการจ้างที่ปรึกษาโครงการสำรวจและจัดทำข้อมูลภูมิประเทคโนโลยเชิงเลขรายละเอียดและความถูกต้องสูงด้วยระบบไลดาร์ บริเวณพื้นที่บางบาล 1 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ครอบคลุมพื้นที่ 100 ตารางกิโลเมตร ผลผลิตไลดาร์มีระยะห่างจุดระดับ 1 เมตร ความถูกต้องทางดิ่ง (relative accuracy) 0.5 เมตร พื้นที่มีรูปถ่ายทางอากาศออร์โทสีความละเอียดจุดภาพ 0.20 เมตร ความถูกต้องทางราบ 1.5 เมตร (RMSE) งบประมาณ 1.6 ล้านบาท
- โครงการจัดทำฐานข้อมูลภูมิประเทคโนโลยเชิงเลขรายละเอียดและความถูกต้องสูงด้วยระบบไลดาร์ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนล่าง พื้นที่ 950 ตร.กม. ประกอบด้วยพื้นที่ 5 ตอนพุด-มหาราช พื้นที่ 7 ไซโຍ - บ้านแพrok พื้นที่ 4 บางบาล 2 และพื้นที่ในเขตโบราณสถานพระราชวังอยุธยาในเขต จังหวัดลพบุรี สระบุรี อาจทอง สิงหนุรีและพระนครศรีอยุธยา งบประมาณ 20 ล้านบาท
- โครงการสำรวจและจัดทำข้อมูลภูมิประเทคโนโลยเชิงเลขรายละเอียดและความถูกต้องสูงด้วยระบบไลดาร์ เพื่อบริหารจัดการน้ำพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนในเขตจังหวัดสุโขทัย และจังหวัดพิษณุโลก พื้นที่ 500 ตารางกิโลเมตร งบประมาณ 10.5 ล้านบาท
- โครงการสำรวจและจัดทำข้อมูลภูมิประเทคโนโลยเชิงเลขรายละเอียดและความถูกต้องสูงด้วยระบบไลดาร์ เพื่อบริหารจัดการน้ำพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา พื้นที่คัดเลือกตั้งแต่ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ ลงมาตาม แม่น้ำเจ้าพระยา จนถึง อ.พรหมบุรี จ.สิงหนุรี ครอบคลุมพื้นที่

ประมาณ 710 ตร.กม. ผลผลิตไลดาร์มีระยะห่างจุดระดับ 1 เมตร ความถูกต้องทางดิ่ง (relative accuracy) 0.2-0.3 เมตร พร้อมรูปถ่ายทางอากาศօกร์ฟิสีความละเอียดจุดภาพ 0.20 เมตร ความถูกต้องทางราบ 1.5 เมตร (RMSE) งบประมาณ 14.2 ล้านบาท

9.10.5 การประยุกต์ใช้ไลดาร์หลังเหตุการอุทกภัยครั้งใหญ่ ปลายปีพศ. 2554

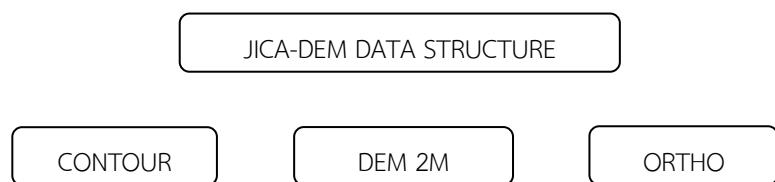
ผลกระทบจากเหตุการณ์อุทกภัยครั้งใหญ่ของประเทศไทย ปลายปีพศ. 2554 รัฐบาลญี่ปุ่นได้มีมาตรการหลายอย่างช่วยเหลือประเทศไทยด้านเทคนิคการป้องกันอุทกภัย และการบริหารจัดการน้ำ ส่วนหนึ่งของกิจกรรมคือ การสำรวจไลดาร์ขององค์กรความร่วมมือระหว่างประเทศไทยและประเทศญี่ปุ่น (Japanese International Cooperative Agency: JICA) ได้มีแผนงานช่วยเหลือรัฐบาลไทย โครงการศึกษาบทวนแผนแม่บทการป้องกันบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำเจ้าพระยา (A Comprehensive Flood Management Plan for the Chao Phraya River Basin) โดยเนื้องานสำคัญประการหนึ่งที่สำคัญคือ การบินสำรวจค่าระดับด้วยเทคโนโลยีไลดาร์ (Light Detection and Ranging: Lidar) ในพื้นที่ภาคกลางลุ่มน้ำเจ้าพระยาจากปีที่เสียหายจากการน้ำท่วมครั้งใหญ่เมื่อปลายปี พศ. 2554 ผลการสำรวจด้วยไลดาร์จะใช้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองระดับ (DEM) เป็นพื้นที่โดยประมาณ 25,000 ตร.กม. เรียกในที่นี้ว่า JICA DEM ปัจจุบันได้มีการส่งมอบข้อมูลแบบจำลองระดับความละเอียดสูงตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2556 แก่กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เป็นที่เสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว ส่วนราชการหรือโครงการใดที่เกี่ยวข้องและมีความจำเป็นสามารถทำหนังสือขอความอนุเคราะห์ได้จากราชบุรี โดยจะมีคณะกรรมการให้บริการข้อมูล กรมชลประทานเป็นผู้เก็บรักษา ให้บริการข้อมูล

ในการบินสำรวจด้วยไลดาร์ ได้มีการสร้างจุดควบภาพทางราบและจุดควบคุมภาพทางดิ่ง จุดควบคุมภาพทางดิ่งมีการรังวัดด้วยเส้นฐานจีพีเอสสมกับการเดินระดับงานชั้น 3 ออกจากโครงข่ายหมุดหลักฐานทางดิ่งของประเทศไทย ในภาพแสดงบางส่วนของหมุดบังคับทางดิ่งสำหรับการบินสำรวจแบบจำลองระดับด้วยไลดาร์ 2555



รูปที่ 9-46 แสดงที่ตั้งของจุดบังคับภาพที่ใช้ในระหว่างการสำรวจด้วยไลดาร์

ในชุดของการแจกจ่าย JICA LIDAR ประกอบด้วยผลผลิตแบบจำลองระดับในรูปแบบเส้นชั้นความสูง ชนิด Shape file , แบบจำลองระดับในรูปแบบ ASCII และแผนที่ภาพออร์โทในรูปแบบ GeoTiff



รูปที่ 9-47 โครงสร้าง JICA-DEM DATA STRUCTURE



รูปที่ 9-48 เลี้นชั้นความสูง ระยะห่างชั้น 1 เมตร สร้างจาก JICA Lidar DEM

ส่วน DEM2M เป็นแบบจำลองระดับจัดเก็บในรูปแบบ ASCII แต่ละบรรทัดประกอบด้วย หมายเลขลำดับ, ค่าระยะตัววันอogyทีเอ็ม, ค่าระยะเหนืออยุทีเอ็ม ค่าระดับเป็นจุดทศนิยมปัดเศษเป็น เดซิเมตรและรหัสข้อมูล (0,1) ตัวอย่าง DEM หมายเลขระหว่าง 503740876_2g.txt

1,608001.00,1577999.00,3.20,1
2,608003.00,1577999.00,3.20,1
3,608005.00,1577999.00,3.30,1
4,608007.00,1577999.00,3.20,1
5,608009.00,1577999.00,3.20,1
6,608011.00,1577999.00,3.10,1
7,608013.00,1577999.00,3.40,1
8,608015.00,1577999.00,3.70,1
9,608017.00,1577999.00,3.70,1
10,608019.00,1577999.00,3.70,1
11,608021.00,1577999.00,3.60,1
12,608023.00,1577999.00,3.50,1
13,608025.00,1577999.00,3.50,1

14,608027.00,1577999.00,3.60,1
15,608029.00,1577999.00,3.80,1
16,608031.00,1577999.00,3.80,0
17,608033.00,1577999.00,3.80,0
...
...
...

ผลการสำรวจบันทึกข้อมูลไลเดาร์และประมาณผล ข้อมูลไลเดาร์จะถูกผลิตออกเป็นชุด แต่ละชุดประกอบข้อมูลที่สำคัญคือ

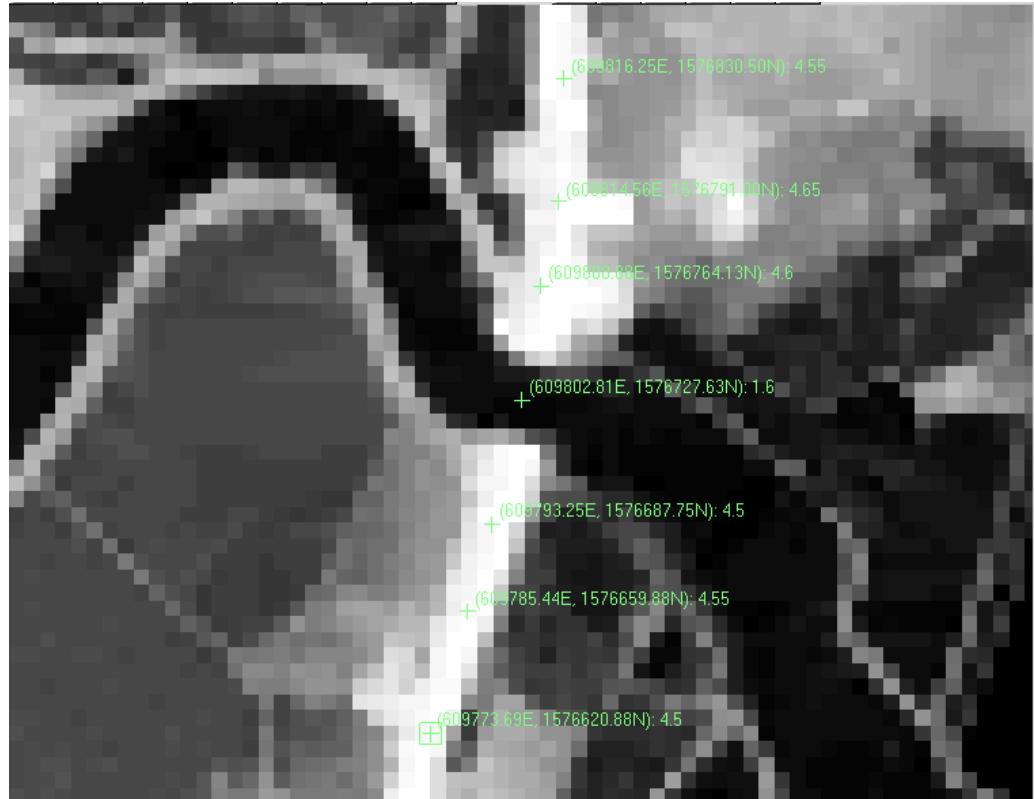
ตารางที่ 9-12 คุณลักษณะของข้อมูลไลเดาร์ JICA DEM

พารามิเตอร์	แบบจำลองระดับ DEM	แผนที่ภาพออร์โท
จำนวนจุดภาพ	401 × 401	4,000 × 4,000
ความละเอียดจุดภาพ (GSD) เมตร	2 เมตร	0.5 เมตร
ชนิดจุดภาพ	ค่าระดับเป็น เดซิเมตร	สี r-g-b
ประเภทข้อมูล	Floating point	24bit (3 bytes)

ผลผลิต DEM ที่ได้มีการจัดทำเป็น Hydrologically enforced DEM คือแบบจำลองระดับที่มีการตรวจแก้สิ่งปลูกสร้างหรือสิ่งปักคลุมเหนือพื้นน้ำ เช่น สะพานข้ามแม่น้ำคูคลองต่างๆ ได้ถูกจัดออกไป แล้วให้ค่าระดับพื้นผิวน้ำในบริเวณที่ใกล้เคียงมากใช้ทดแทน บริเวณพื้นผิวน้ำเองมีค่าระดับราบเรียบ ค่าระดับเหนือพื้นน้ำของแม่น้ำคูคลองที่มีการไหลจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำก็จะมีค่าระดับ ตัวอย่างแสดงให้เห็นในภาพต่อไปนี้



รูปที่ 9-49 แสดงค่าระดับของไลดาร์บนแผนที่ภาพออร์โทสี



รูปที่ 9-50 แสดงค่าระดับของถนนและสะพานที่มีการตรวจแก้ hydro-enforced

9.11 มาตรฐานการดำเนินการสำรวจด้วยไลเดาร์

หน่วยงานบริหารสถานการณ์ฉุกเฉินของสหพันธ์รัฐ (Federal Emergency Management Agency : FEMA) ของประเทศไทยและสหรัฐอเมริกา เล็งเห็นความสำคัญของการสำรวจค่าระดับของพื้นที่เมืองเพื่อการประเมินการเสี่ยงภัยน้ำท่วม โดยเฉพาะตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2010 (FY2010) FEMA ได้เริ่มโครงการ Risk Mapping, Assessment, and Planning (Risk MAP) ที่เป็นการใช้ข้อมูลที่มีคุณภาพเพื่อสร้างความตระหนักและนำไปสู่การบรรเทาภัยเพื่อลดภาวะเสี่ยงของชีวิตและทรัพย์สินในการนี้จึงได้มีการประกาศใช้ บันทึกช่วยจำวิธีการปฏิบัติงานหมายเลข 61 – มาตรฐานสำหรับไลเดาร์ และข้อมูลภูมิประเทคโนโลยีเลขคุณภาพสูง Procedure Memorandum No. 61 – Standards for Lidar and Other High Quality Digital Topography (FEMA, 2010) เป้าหมายสำคัญของ Risk MAP ที่สำคัญคือ

- ให้ข้อมูลและผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เสริมสร้างความตระหนักในความเสี่ยงและส่งเสริมการเตรียมการบรรเทาภัยซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของปฏิบัติบรรเทาภัยภัยบัติ
- เพิ่มประสิทธิภาพการบรรเทาภัยและการเตรียมการสำหรับ “แผนที่อัตราประกันภัยน้ำท่วม (Flood Insurance Rate Maps: FIRMS)” และส่งเสริมประสิทธิภาพของ “งานศึกษาการประกันภัยน้ำท่วม (Flood Insurance Studies: FISs)”

เอกสาร บันทึกช่วยจำวิธีการปฏิบัติงานหมายเลข 61 – มาตรฐานสำหรับไลเดาร์และข้อมูลภูมิประเทคโนโลยีเลขคุณภาพสูง (FEMA, 2010) ประกอบด้วย สิ่งที่แนบมาด้วย 4 ส่วนคือ

สิ่งที่แนบมาด้วย 1 – นิยาม

สิ่งที่แนบมาด้วย 2 – ความสอดคล้องกับ เอกสารมาตรฐานก่อนหน้านี้ (FEMA Appendix A to USGS Lidar Guidelines and Base Specification v.13)

สิ่งที่แนบมาด้วย 3 – Topographic Breakline and Hydro-Enforcement Specification

สิ่งที่แนบมาด้วย 4 – Topographic Data Quality Review Process

9.12 การเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่นๆ

หากเปรียบเทียบเทคนิคการรังวัดเพื่อสร้างแบบจำลองระดับ ระหว่างการรังวัดจากภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้ภาพคู่สามมิติ และ การรังวัดค่าระดับโดยตรงจากอากาศยานด้วยเลเซอร์วัดระยะทาง จะสามารถสรุปได้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 9-13 เปรียบเทียบการสำรวจวัดด้วยภาพกับการสำรวจวัดด้วยไลดาร์

การสำรวจวัดด้วยภาพ	การสำรวจวัดด้วยไลดาร์
<ul style="list-style-type: none"> เทคโนโลยีมีใช้งานมานานแล้วและปัจจุบัน เป็นระบบดิจิทัลที่มีความหลากหลายพอสมควร เครื่องบินต้องมีเสถียรภาพสูง อาศัยการส่องสว่างจากดวงอาทิตย์และ ต้องการมุมสูงของดวงอาทิตย์ที่พอดีเพื่อให้แสงเงาที่ทอดยาวบนรูป การรังวัดมีขั้นการซับซ้อน ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติที่มีความรู้ความชำนาญ ผลลัพธ์ที่ได้มีความหลากหลาย ทั้ง แบบจำลองระดับ แผนที่ภาพออร์โทความละเอียดสูง แบบจำลองสเตอริโ/osam มิติ 	<ul style="list-style-type: none"> ระบบประกอบด้วย เครื่องกำเนิดเลเซอร์ GPS/IMU ซึ่งค่อนข้างซับซ้อนและมีราคาแพง อากาศยานที่ติดตั้งไลดาร์ไม่ต้องมีเสถียรภาพมากนัก เช่น เครื่องบินใบพัดเดียว หรือ เครื่องบินปีกหมุน การทำงานสามารถทำได้ทั้งกลางวันกลางคืน และในสภาวะอากาศไม่อำนวยสำหรับการถ่ายภาพทางอากาศ เนื่องจากเลเซอร์มีพลังงานในตนเอง การรังวัดโดยตรงจากภูมิประเทศ ทำให้ได้จุดระดับความละเอียดถูกต้องสูง และมีจุดระดับความหนาแน่นมาก กรณีเป็นป่าไม้หรือพืชพรรณปกคลุมหนาทึบ หากไลดาร์ที่ประกอบจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์มีความถี่สูง ยังมีโอกาสบ้างที่จะรังวัดได้ค่าระดับความสูงของพื้นผิวภูมิประเทศบ้าง เนื่องจากเลเซอร์บางส่วนยังตกลงไปบนพื้นภูมิประเทศได้ รังวัดได้ทั้งกลุ่มจุดระดับของพื้นผิวสิ่งปลูกสร้าง พืชพรรณ พื้นผิวภูมิประเทศ และภาพความเข้มสัญญาณ รอบการทำงานเพื่อผลิตแบบจำลองระดับเร็ว กว่างานรังวัดด้วยภาพ การผลิตแบบจำลองระดับจากไลดาร์ที่คุณภาพสูงกว่าและเร็วกว่า 2-5 เท่า การบินบันทึกข้อมูล 1 วัน การประมวลผลสมบูรณ์ใช้เวลาประมาณ 1 เดือน (ไพร์ส, 2550)

การทำแบบจำลองระดับความละเอียดสูงในพื้นที่จำกัด อาจเลือกใช้การสำรวจภาคพื้นดินด้วยกล้องสำรวจทางอากาศซึ่ง เช่น การสำรวจรูปทำแผนที่ภูมิประเทศเพื่อพัฒนาเป็นแผนที่เสียงภัยน้ำท่วม (Flood Risk Map) ตามลำน้ำ จำเป็นต้องมีรูปตัดตามยาวและตามขวางตามแนวลำน้ำ หรือในเทคนิคสมัยใหม่จะต้องมี Digital Terrain Model (DTM) ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองระดับสูงที่เป็นจุดระดับที่เป็นตัวแทนของพื้นพิภูมิประเทศหรือพื้นผิดนินที่ และอาจมีแบบจำลองระดับของวัตถุสิ่งปลูกสร้างต่างๆที่จำเป็นต่อการสร้างแผนที่เสียงภัยน้ำท่วม เช่น เขื่อน ฝาย คันบังคับน้ำ ตลอดจนบ้านเรือน อาคาร ริมแม่น้ำ เทคโนโลยีการรังวัดด้วยเลเซอร์สแกนจากอากาศ (Airborne Laser Scanner: ALS) หรือ ไลดา(r) (Lidar) มีความสามารถที่จะใช้ผลิตเป็นข้อมูลเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี ข้อมูลที่ได้จะมีความละเอียดถูกต้องสูง มีจุดระดับให้เชื่อมต่อและจัดเรียงตามแนวลำน้ำอย่างหนาแน่น ข้อมูลไลดา(r) เป็นจุดระดับที่หนาแน่น ที่เรียกว่า point cloud

ในตารางต่อไปนี้แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของการสำรวจด้วยกล้องรังวัดเทียบกับการสำรวจด้วยไลดา(r)ทางอากาศ

ตารางที่ 9-14 เปรียบเทียบการสำรวจด้วยกล้องรังวัดเทียบกับการสำรวจด้วยไลดา(r)ทางอากาศ

คุณลักษณะ	การสำรวจด้วยกล้องรังวัด	การสำรวจด้วยไลดา(r)ทางอากาศ
เครื่องมือ	ระบบรังวัดจีพีเอส กล้องสถานีรวม และ/หรือ กล้องระดับ	ระบบรังวัดจีพีเอส อากาศยานชนิดปีกหมุน หรือ ชนิดปีกยึด ระบบไลดา(r) หรือ เลเซอร์สแกนเนอร์ ระบบนำหน้า GPS/IMU
การเข้าถึงจุดระดับ	สะเดาะเนินพื้นที่สาธารณะและต้องไม่เป็นพื้นที่รกร ภูมิประเทศต้องไม่สูงชัน พื้นที่เอกสารทำได้ยากในระหว่างการสำรวจ รูปตัดขวางทำได้จำกัดน้อยกว่า ออกไปข้างแนวด้านละไม่เกิน 50-300 เมตร	เข้าถึงในตึ้งแต่ริมแม่น้ำที่สูงชัน แสดงจุดบนยอดไม้และพุ่มไม้ได้ด้วย รูปตัดขวางทำได้เป็นแบบกว้างออกไปจากแนวตั้งถึง 1 กิโลเมตร
การกระจายจุดระดับ	เป็นแนวๆ ของรูปตัดตามขวาง จดระดับห่าง 5-10 เมตรในรูปตัดขวาง หากน้ำไม่ลึกมากสามารถรังวัดระดับห้องลำน้ำได้โดยตรง	กระจายทุกๆตารางเมตรบนแนวลำน้ำ เช่น 1 จุดต่อตร.ม. ยกเว้นระดับใต้ลำน้ำพื้นน้ำ อาจต้องสำรวจเพิ่มเติมแล้ว interpolate หรือใช้รูปตัดที่รังวัดเพิ่มเติม

คุณลักษณะ	การสำรวจด้วยกล้องรังวัด	การสำรวจด้วยไลดาเร่อทางอากาศ
ความละเอียด ถูกต้อง	ความถูกต้องจุดระดับทางดิ่ง +/- 10-50 ซม ความละเอียดถูกต้องทางราบ 50 ซม	ความถูกต้องจุดระดับทางดิ่ง +/- 30 ซม (สม่ำเสมอ) ความละเอียดถูกต้องทางราบ 50 ซม
ผลผลิตโดยตรง	Spot-Heights รูปตัดตามยาว @ 25-100 เมตร รูปตัดตามขวาง @ 5 เมตร	Point-cloud จุดระดับในสามมิติกระจาย สม่ำเสมอ จุดระดับหนาแน่น 1 จุดต่อตารางเมตร ตลอดความกว้าง 1,000 ถึง 1,500 เมตร
ผลผลิตต่อเนื่อง	เส้นชั้นความสูง @ 0.25 เมตร แบบจำลองระดับ # 25...100 เมตร เส้นชั้นความสูง @ 0.25 เมตร	สร้างรูปตัดตามยาวและตามขวางภายหลัง ตามความต้องการที่ระยะ 1..100 เมตรได้ ง่าย เส้นชั้นความสูง @ 0.15 เมตร แผนที่ภาพออร์โท ขาว-ดำ (Intensity Map) แผนที่ภาพออร์โทสีจากกล้องดิจิทัล (ถ้ามี) ข้อมูลปริมาณป่า ทรงพุ่มต้นไม้ ข้อมูลความสูงสิ่งปลูกสร้าง สะพาน แนว ท่อข้ามลำน้ำ บ้านเรือนอาคาร เรือแพ ลอยน้ำ
ความเร็วในการ ทำงาน	ระยะทาง 1 กิโลเมตรใช้เวลา 1 สัปดาห์	บินสำรวจ 40 กิโลเมตรใช้เวลา 2 ชั่วโมง ประมาณผลลัพธ์ 1 สัปดาห์ (เร็วกว่า 40 เท่า)

ปัจจุบัน เทคโนโลยีไลดาเร่อเป็นที่ยอมรับในหน่วยงานทำแผนที่ในทวีปอเมริกาเหนือ ยุโรป และญี่ปุ่น ว่ามีจีดความสามารถเทียบเท่าการสำรวจด้วยภาพถ่ายด้วยเดิม การประยุกต์จะถูกเน้นใช้ในการสร้างแบบจำลองของระดับความละเอียดสูงสำหรับแผนที่มาตราส่วน ส่วนใหญ่การสร้างแบบจำลอง ระดับ ด้วยงานสำรวจรังวัด ด้วยภาพถือได้ว่าเป็นงานที่ใช้เวลา แรงงาน และ ความชำนาญมาก หน่วยงานทำแผนที่ในนานาประเทศ เช่น USGS, FEMA/USA, Ordnance Surveys, Baden Wuertemburg State Mapping Office/Germany ต่างก็ยอมรับและมีการนำไปใช้

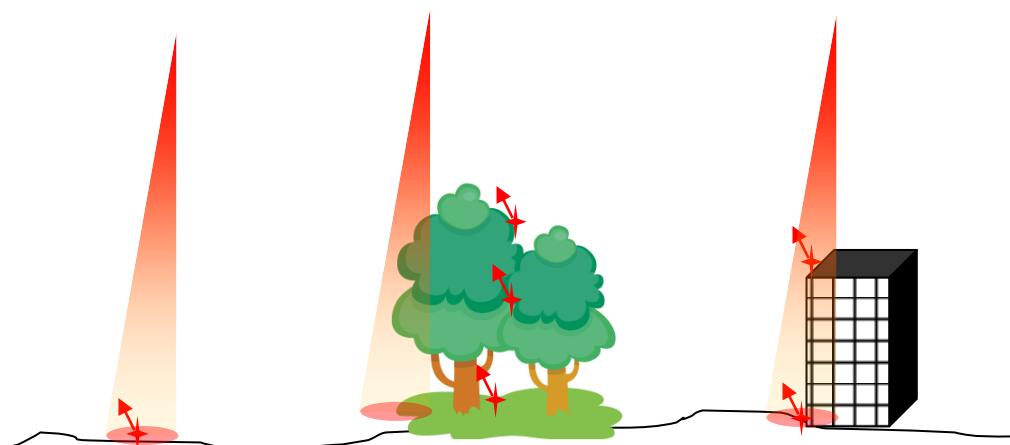
ควรมาใช้ในงานปฏิบัติปกติเพื่อเสริมงานสำรวจด้วยภาพถ่ายอย่างได้ผล แบบจำลองระดับที่ได้จากไล่ดำเนินออกจากการผลิตแผนที่ภูมิประเทศแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการกิจใหม่อื่น ๆ เช่น การสำรวจออกแบบเส้นทางอย่างรวดเร็วเพื่อการสร้างถนนและแนวติดตั้งสาธารณูปโภค การป้องกันน้ำท่วมในระดับท้องถิ่น การสร้างแบบจำลองเมือง การบำรุงรักษาสายส่งศักย์สูง การทำแผนที่ชายผิ่ง การหาปริมาตรป่าไม้ เป็นต้น โดยเฉพาะการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจากน้ำท่วม สามารถสร้างการประยุกต์ใช้งานด้านธุรกิจ เช่น กรณีของหน่วยงานบรรเทาสาธารณภัยของสหรัฐอเมริกา (Federal Emergency Management Agency: FEMA) ได้จัดทำมาตรฐานแผนที่อัตราการประกันภัยสำหรับความเสียหาย Digital Flood Insurance Rate Map: DFIRM ในโปรแกรมมีการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยน้ำท่วม (FEMA 2000)

9.13 คำถมท้ายบท

- 1) ในการสำรวจทำแผนที่แบบจำลองระดับด้วย ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ Optech ATLM 2050 ระบบมีการตรวจเป็นแบบ Oscillating ในการบินเพื่อบันทึกข้อมูลครั้งนี้กำหนดให้มีความเร็วในการบินเป็น 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพดานบินเฉลี่ยจากพื้นผิวภูมิประเทศเป็น 1,000 เมตร ส่วนช้อนระหว่างแนวบิน $q = 30\%$ การเลี้ยวกลับของเครื่องใช้เวลา 6 นาที กำหนดพารามิเตอร์ของ ATLM 2050 ดังนี้
 - ความถี่การกำเนิดลูกคลื่น (pulse repetition rate) 50,000 Hz.
 - Scanning rate 28 Hz ที่มุ่งกว้างการตรวจ Scanner Angle +/- 20 องศา

จากข้อมูลข้างต้น หากต้องการทำแผนที่ครอบคลุมพื้นที่ประมาณเท่ากันจะได้โดยสมมุติให้เกามีความกว้าง 25 กิโลเมตรและยาว 50 กิโลเมตร และการบินบันทึกข้อมูลด้วยเลดาเรียมีแนวบินนานาไปกับแนวยาวของเกาะ จงคำนวณหา

 - a) ระยะห่างระหว่างแนวบิน q'
 - b) จำนวนแนวบินที่ต้องใช้
 - c) ระยะเวลาที่ต้องใช้ทั้งหมดในการบินบันทึกข้อมูล การเลี้ยวกลับแต่ละครั้งใช้ 6 นาที
 - d) ระยะเวลาที่ต้องใช้การดำเนินการโครงการ หาก ใน 1 วันสามารถบินบันทึกข้อมูลได้ 4 ชั่วโมง
- 2) จงอธิบายหลักการจำแนก ground point และ non-ground points สำหรับ point cloud ที่บันทึกได้จากระบบที่รองรับ multiple returns โดยให้อธิบายแยกถึงคุณลักษณะของ laser point ที่ตอบสนองที่ ก) พื้นที่เปิดโล่งไม่มีสิ่งปักดูด ข) พื้นที่ปักดูดด้วยต้นไม้ใหญ่ ต่างๆ ค) พื้นที่มีอาคารและสิ่งปลูกสร้าง

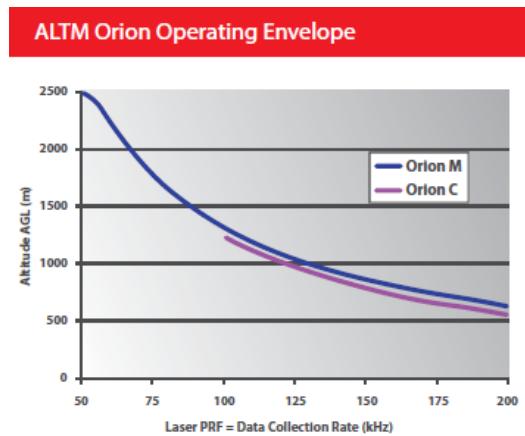


รูปที่ 9-51 การสะท้อนสัญญาณ ซ้าย: ปิดโล่ง กลาง: ต้นไม้ปักดูด ขวา: สิ่งปลูกสร้าง

- 3) จงสุมค่าความแรงสัญญาณจากพื้นที่ต่างๆที่ตรวจพบในพื้นที่บันรูปที่ 9-12 ความสามารถในการสะท้อนกลับของเลเซอร์ บน:ภาพ Intensity ล่าง: ภาพถ่ายดาวเทียม เวลาเดียวกัน เช่น พื้นผิวคอนกรีต พื้นผิวนนและฟล็อต พื้นที่ป่าคลุมด้วยต้นไม้ใหญ่ พื้นที่ป่าคลุมด้วยหญ้าเตี้ย พื้นที่ชั่มน้ำ พื้นที่แหล่งน้ำ เป็นต้น ให้สุมค่าความเข้มสัญญาณอ่านจากไฟล์ข้อมูล aa04-aa05-aa06.las ในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงในภาพ ให้บันทึกข้อมูล 5 ค่าสำหรับแต่ละพื้นที่หาค่าเฉลี่ยและแสดงกราฟแห่งเบรี่ยบเทียบ

พื้นที่	ความเข้มสัญญาณ (Intensity)						หมายเหตุ
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	
ถนนผิวแอสฟัลต์							
พื้นผิวคอนกรีต							
หลังคาบ้านกระเบื้อง							
ต้นไม้ใหญ่ป่าคลุม							
ต้นไม้พุ่มเตี้ยๆ							
พื้นดินอัดแน่นโล่ง							
พื้นที่ชั่มน้ำ							
พื้นที่แหล่งน้ำ							

- 4) จงอภิปรายเปรียบเทียบการใช้งานระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ทางอากาศ Optech ORION M200 และ C200 หากต้องการทำแผนที่มาตรฐานส่วน 1,1000 เพื่อกำกับป้องกันน้ำท่วม ควรจะต้องบินบันทึกข้อมูลด้วยระบบความสูงบินเท่าใด เพราะเหตุใด และหากกำหนด scan width (FOV) เป็น 45° จะประมาณ scan width ที่จะได้จากการบินในแต่ละแนวบิน



Parameter	M 200	C 200
Operational envelope ^{1,2}	200 - 2500 m AGL, nominal	50 - 1000 m AGL, nominal
Laser wavelength ³	1064 nm	1541 nm
Horizontal accuracy ²	1/5, 500 x altitude	1/3, 000 x altitude
Elevation accuracy ²	< 5-15 cm; 1σ	< 5-10 cm; 1σ
Effective laser repetition rate	50 - 200 kHz	100 - 200 kHz
Position and orientation system	POS AV™ 510 (OEM) GPS/GNSS/L-Band receiver	POS AV™ 410 (OEM) GPS/GNSS/L-Band receiver
Scan width (FOV)	Programmable; 50° max.	
Scan frequency	Programmable; 70 Hz max.	
Roll compensation	Programmable; 10° min.	
Minimum target separation distance	< 0.7 m	
Range capture	Up to 4 range measurements for each pulse, including last	
Beam divergence	0.25 mrad ($1/e$)	
Intensity capture	12-bit dynamic measurement and data range	