

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิวัฒนาการทางธรณีวิทยาแปรสัณฐาน (Tectonic Evolution)

ประเทศไทยประกอบด้วยแผ่นเปลือกโลก (Terrane) ขนาดเล็กซึ่งเป็นแนวรอยตะเข็บ (Suture) ที่เชื่อมต่อกัน 2 แผ่น คือ แผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย ซึ่งอยู่ทางด้านทิศตะวันตก และแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน ซึ่งอยู่ทางด้านทิศตะวันออก พื้นที่ของแผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย ครอบคลุมพื้นที่บริเวณตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันตก ภาคใต้ของประเทศไทย รวมถึงบริเวณประเทศมาเลเซีย และบริเวณตอนเหนือของเกาะสุมาตรา ด้วยพื้นที่ของแผ่นเปลือกโลกอินโดจีนครอบคลุมบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออกของประเทศไทย บริเวณประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว บริเวณประเทศกัมพูชา รวมถึงบางส่วนของประเทศเวียดนาม ด้วยพื้นที่ประเทศไทยที่อยู่ในส่วนของแผ่นเปลือกโลกซัน-ไทย มีประวัติว่าเคยแยกตัวออกจากแผ่นเปลือกโลกก่อนตัวมา หรือประเทศออสเตรเลียในปัจจุบัน (ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2550) และผลการศึกษาวิวัฒนาการทางธรณีวิทยาแปรสัณฐานของประเทศไทย ในบริเวณพื้นที่ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันออก ตามเส้นทางที่คาดว่าจะเกิดจากการชนกันของจุลทวีป และบรรพสมุทรต่าง ๆ ของประเทศไทยในอดีต ที่มุ่งเน้นการสำรวจทางด้านธรณีวิทยา รายละเอียดลำดับชั้นหิน โดยเฉพาะการแผ่กระจายของหินยุคไทรแอสซิก ธรณีโครงสร้างหลัก ศิลาพรรณนา และธรณีเคมี (โดยเฉพาะ โครเมียม สปีเนล) เพื่อกำหนดแนวและขอบเขตที่ชัดเจนของรอยต่อที่เกิดจากการชนกันของแผ่นเปลือกโลก หินตะกอนยุคไทรแอสซิกมีความสำคัญทางธรณีวิทยาของประเทศไทยนับตั้งแต่ Bunopas (1981) ได้เคยวิเคราะห์ว่าแผ่นจุลทวีปที่สำคัญของประเทศไทย มี 2 แผ่น คือ จุลทวีปซันไทย และจุลทวีปอินโดจีน เกิดการชนกันในช่วงยุคไทรแอสซิก บริเวณที่เรียกว่า ตะเข็บธรณีนาน แต่ต่อมาความเชื่อว่าแผ่นจุลทวีปทั้งสองถูกคั่นด้วยแผ่นมหาสมุทรที่ชื่อ โบราณ ที่เชื่อว่าแผ่นลำปาง-เชียงราย และแผ่นนครไทย ที่มีอายุประมาณกลางถึงปลายมหายุคพาเลโอโซอิก มีการเคลื่อนที่ชนกันและเชื่อมต่อกันในยุคไทรแอสซิกตอนปลาย ก่อนที่จะเป็นรูปร่างประเทศไทยในปัจจุบัน (ปัญญา จารุศิริ และคณะ, 2552)

กระบวนการทางธรณี

ทฤษฎีการแปรสัณฐานแบบแผ่น (Plate Tectonic Theory) ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมเอาทฤษฎีทวีปเลื่อน (Continental Drift) ที่เชื่อว่าในยุคแรก ๆ ของโลกเราทวีปอยู่ติดกันเป็นแผ่นเดียว

ต่อมาเกิดการแยกและเคลื่อนตัวออกจากกัน และทฤษฎีการแผ่ขยายพื้นทะเล (Seafloor Spreading) ที่ได้พบว่าพื้นมหาสมุทรแยกตัวออกจากกันในแนวก่อให้เกิดภูเขาไฟใต้ทะเลที่ยาวต่อเนื่องกัน (ปัญญา จารุศิริ และคณะ, 2543) พื้นพิภพเราได้ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่กำเนิดของโลก พื้นผิวโลกที่พบเห็นในวันนี้ย่อมไม่เหมือนกับวันวานและวันหน้า ทั้งนี้เพราะกระบวนการทางธรณีวิทยา (Geological Process) ด้วยพื้นผิวโลกประกอบด้วยแผ่นเปลือกโลก (Plates) หลาย ๆ แผ่น แต่ละแผ่นของเปลือกโลกมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา โดยเฉลี่ยประมาณ 4-8 เซนติเมตรต่อปี ที่ขอบของแผ่นเปลือกโลกแต่ละแผ่นอาจจะมีการชนกัน (Collision) การดึงแยกจากกัน (Pull Apart) หรือการมุดตัว (Subduction) ด้วยเหตุของการเคลื่อนตัวชนกันของแผ่นเปลือกโลก จึงทำให้พบแนวชนกันจนเป็นเทือกเขาสูงและจะยังคงสูงต่อไปเรื่อย ๆ หากไม่มีสาเหตุอื่นส่งผลให้ทิศทางการชนเปลี่ยนแปลงไป เช่น ในปัจจุบันพบว่าเทือกเขาหิมาลัยยังมีการเคลื่อนตัวสูงขึ้นปีละ 5 เซนติเมตร เพราะเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของแผ่นอินโด-ออสเตรเลีย (Indo-Australia Plate) เข้าหาแผ่นยูเรเชีย (Eurasia Plate) เป็นต้น โดยทั่วไปแรงที่กระทำทำให้เปลือกโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงมีด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ

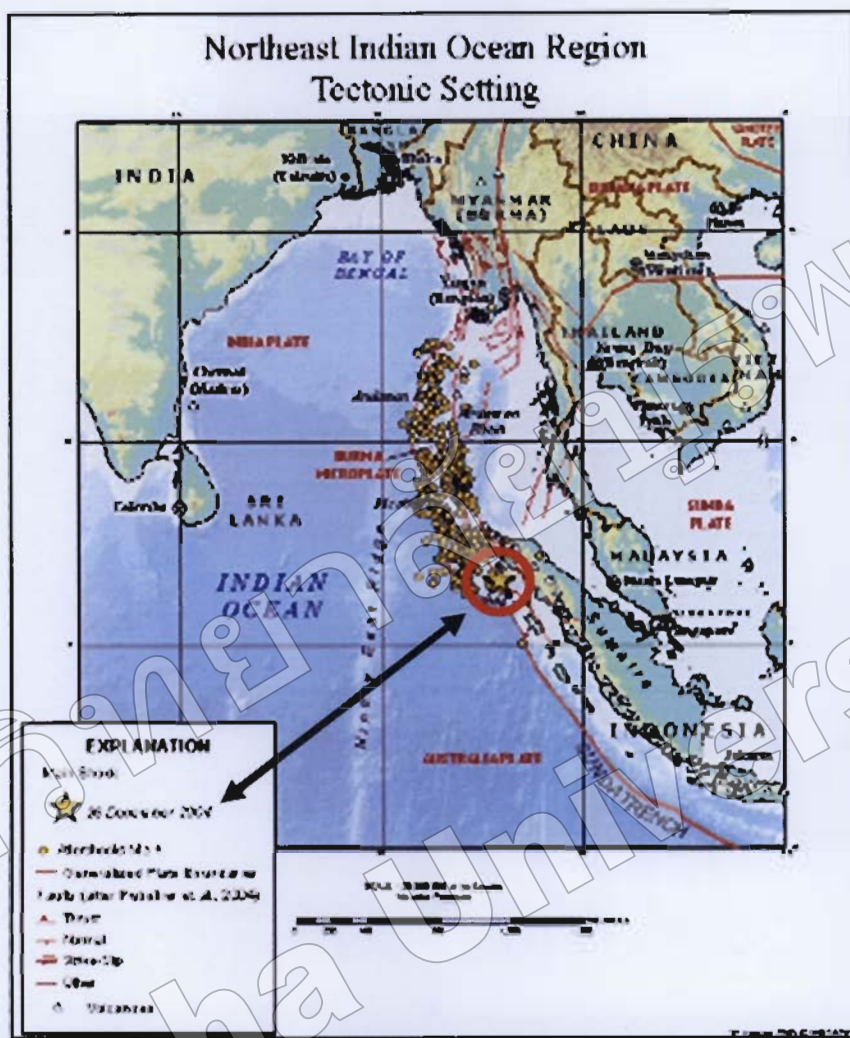
1. แรงที่กระทำให้วัตถุเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ค่อยเป็นค่อยไป เช่น การเคลื่อนที่ของเปลือกโลกที่มีความเร็วที่เพิ่มจาก 5 เซนติเมตรต่อปี ไปเป็น 6 เซนติเมตรต่อปีทุก ๆ หลายพันปี แสดงว่าความเร่งของเปลือกโลกเกิดขึ้นได้น้อยมาก

2. แรงมหาศาลที่ทำให้เปลือกโลกเคลื่อนที่อย่างรุนแรงและรวดเร็ว เช่น แรงที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว หรือภูเขาไฟระเบิด ซึ่งทำให้หินเปลี่ยนลักษณะโดยฉับพลันในเวลาอันสั้น

แผ่นดินไหวนับเป็นภัยธรรมชาติ ที่ก่อให้เกิดความเสียหายได้อย่างรุนแรง การศึกษาความรู้พื้นฐานเรื่องแผ่นดินไหว ทำให้ทราบถึงลักษณะทางธรรมชาติของแผ่นดินไหวนั้นเกิดอยู่ใต้พื้นโลกหลายสิบกิโลเมตร และอาจถึงหลายร้อยกิโลเมตร การวิเคราะห์ศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่อยู่ใต้พื้นโลก (Hypocenter) จึงเป็นลักษณะตรวจสอบหรือวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหวบนผิวโลก คลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งจึงทำหน้าที่คล้ายกับรังสีเอกซ์ (X-Rays) ที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างของโลก ลักษณะทางธรณีวิทยา และการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก เป็นต้น (บุรินทร์ เวชบรรเทิง, 2549) และเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2547 เวลา 07:58:53 นาฬิกา (เวลาในท้องถิ่น) ได้เกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ขึ้น บริเวณตะวันตกเฉียงเหนือของเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย ที่มีขนาดความรุนแรงวัดได้ เท่ากับ 9 (M_w) ที่มีศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter) อยู่ที่ $3.308^\circ N$, $95.874^\circ E$ ห่างจากชายฝั่งของเกาะสุมาตราไปทางทิศตะวันตก ที่ระดับความลึกประมาณ 10 – 30 กิโลเมตรใต้ผิวโลก ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกบริเวณรอบเลื่อนซุนดา (Sunda Trench) ซึ่งเป็นตะเข็บรอยต่อของแผ่นมหาสมุทรอินเดีย (Indian Ocean Plate)

ที่ได้มุดตัวลงใต้แผ่นเปลือกโลกย่อยพม่า (Burma Micro Plate) ที่ซึ่งแผ่นมหาสมุทรอินเดียมีอัตรา
การเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณ 60 มิลลิเมตร ต่อปี ทำให้มีการสะสมพลังงาน
ไว้จนแรงเสียดทานด้านไม่ไหวเกิดการเคลื่อนตัวของพื้นทะเลในลักษณะรอยเลื่อนย้อนมุมต่ำ
(Thrust -Fault) และทำให้เกิดการยุบตัวของพื้นทะเล ขณะเดียวกันอีกส่วนของพื้นที่ท้องทะเลยกตัว
ขึ้นตามแนวรอยต่อระหว่างแผ่นเปลือกโลกทั้งสองเป็นระยะทางประมาณ 1,200 กิโลเมตร ตั้งแต่
ทางตะวันตกเฉียงเหนือนอกชายฝั่งเกาะสุมาตราไปทางเหนือจนถึงหมู่เกาะอันดามัน การเคลื่อนตัว
ดังกล่าวทำให้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่มีศูนย์กลางอยู่ในทะเลที่ความลึกประมาณ 30 กิโลเมตร
และมีแผ่นดินไหวตามมา (After Shocks) จำนวนหลายครั้งตามแนวสัมผัสของแผ่นเปลือกโลก
ทั้งสอง (ภาพที่ 2-1) แผ่นดินไหวครั้งนี้นับว่าเป็นแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่ นับจากที่ได้เคยเกิดขึ้นที่
เมือง Prince William Sound Event (Alaska) สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1964 และถือเป็นแผ่นดินไหว
ที่มีขนาดความรุนแรง ลำดับที่ 4 นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 เป็นต้นมา ตารางที่ 2-1 (Antonios, et al.,
2005; ธรณีวิทยาประเทศไทย, 2550)

อีกทั้งได้มีการศึกษา ผลกระทบจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าว กับรอยเลื่อนที่ยังมีพลัง
(Active Faults) บริเวณภาคใต้ของประเทศ ประกอบด้วย รอยเลื่อนคลองมะรุย (ภาพที่ 2-2) ที่วางตัว
ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ – ตะวันตกเฉียงใต้ ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดภูเก็ต กระบี่ และพังงา
ในช่วงระยะเวลา 6 เดือนหลังจากเหตุการณ์ ระหว่างวันที่ 14 มกราคม 2548 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน
2548 มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นจำนวน 162 เหตุการณ์ มีขนาดความรุนแรง (MI) สูงสุดไม่เกิน
4.5 แมกนิจูด คลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ส่วนใหญ่จะเกิดตามแนวรอยเลื่อนในภาคใต้ของประเทศ
ไทย (โสภณา แดงเหมือน และคณะ, 2548) ดังนั้นในการศึกษาธรณีวิทยาโครงสร้าง จึงนิยมศึกษา
ผลของแรงแบบค่อยเป็นค่อยไปอย่างช้า ๆ จนทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่เกิดจาก
การเคลื่อนที่ การหมุน การยืดหด หรือการบิดเบี้ยว โดยที่วัตถุนั้นไม่สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้
เมื่อถูกแรงกระทำ และทำให้ปรากฏเป็นต้นเหตุของการเปลี่ยนแปลงเชิงตำแหน่ง ต่อข้อมูลที่ใช้
ประโยชน์ในการอ้างอิงภาคพื้นดิน



ภาพที่ 2-1 แสดงตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2547 และแผ่นดินไหวตามมาสะลอกหลัง (www.USGS.gov)

ตารางที่ 2-1 สถิติความรุนแรงของแผ่นดินไหว

Pos.	Date	Location	Magnitude
1	May 22 1960	Chile	9.5
2	October 16 1737	Kamchatka, Russia	9.3
3	March 28 1964	Prince William Sound, Alaska, USA	9.2
4	December 26 2004	Off west coast northern Sumatra, Indonesia	9.0-9.3*

ที่มา บุรินทร์, 2551 (* Scientists have not yet agreed on an official magnitude.)



ภาพที่ 2-2 แผนที่แสดงรอยเลื่อนมีพลังของประเทศไทย (www.dnr.go.th)

อิทธิพลจากการเกิดแผ่นดินไหวต่อโครงข่ายหมุดหลักฐาน GPS ของประเทศไทย

ทฤษฎีการแปรสัณฐานของแผ่นเปลือกโลก (Plate Tectonics) ด้วยแผ่นเปลือกโลกมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทั้งบนบกและใต้ทะเล การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกมักจะปรากฏบริเวณรอยเลื่อนมีพลังโดยเฉพาะก่อนเกิด ระหว่างเกิดและหลังเหตุแผ่นดินไหว การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแผ่นเปลือกโลกที่เกิดขึ้นในปัจจุบันสามารถศึกษาได้โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากระบบพิกัดตำแหน่ง GPS ที่ให้ความละเอียดในการหาพิกัดตำแหน่งได้ถึงระดับมิลลิเมตร ดังนั้น GPS จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมกับการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ดังเช่น

N. Chamot Rooke and X. Pichon ที่ได้ทำการศึกษาใน พ.ศ. 2537 และ พ.ศ. 2539 ภายใต้โครงการ GEODYSSSEA พบว่าส่วนของทวีปที่ประกอบด้วยเทลมอินโดจีน ขอบซุนดา (Sunda Shelf) และบางส่วนของประเทศอินโดนีเซียมีลักษณะเป็นแผ่นแข็ง (Rigid Plate) ที่เรียกว่าแผ่นย่อยซุนดา (Sundaland Platelet) ต่อมา W. J. F. Simons, A. Socquet, C. Vigny, B.A.C. Ambrosius, S. Matheussen, S. Haji Abu, C. Subarya, D.A. Sarsito, C. Promthong, M. Iwakuni, P. Morgan และ W. Spakmcn ได้ใช้ข้อมูล GPS ในโครงการ GEODYSSSEA และโครงข่ายสถานี GPS ดาวารของโลก (International GNSS Service: IGS) ทำการคำนวณหาอัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่าแผ่นซุนดามีการเคลื่อนที่ประมาณ 6-10 มิลลิเมตร/ปี ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ พบว่าแผ่นซุนดามีการเคลื่อนที่ประมาณ 6-10 มิลลิเมตร/ปี ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ เทียบกับแผ่นยูเรเชีย และภายในแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมีขนาดเล็กกว่า 7 นาโนเมตร/ปี (สรัลธร บำรุงวงศ์ และเฉลิมชนม์ สถิระพจน์, 2550)

การเคลื่อนตัวของประเทศไทยหลังจากการเกิดแผ่นดินไหว สามารถแยกพิจารณาได้สองช่วงคือ ขณะเกิดแผ่นดินไหว (Co-Seismic) และหลังการเกิดแผ่นดินไหว (Post-Seismic) ขณะเกิดแผ่นดินไหวเป็นเวลาประมาณ 10 นาที ของวันที่ 26 ธันวาคม 2547 และการเคลื่อนตัวหลังเกิดแผ่นดินไหว จะเกิดขึ้นหลังจากการเกิดสิ้นสุดลงแต่ยังคงมีอัตราการเคลื่อนตัวต่อไปอีก และจากที่กรมแผนที่ทหารได้ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกครั้งสุดท้ายก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ในช่วงปลายเดือนตุลาคม 2547 และภายหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 ซึ่งระยะห่างของช่วงเวลา คือ 3 1/2 เดือน ดังนั้นการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกบริเวณประเทศไทย จึงแยกพิจารณาได้ 3 ช่วง คือ ช่วงก่อนการเกิดแผ่นดินไหว (Continuous) ขณะเกิดแผ่นดินไหว และหลังการเกิดแผ่นดินไหว การเคลื่อนตัวก่อนการเกิดแผ่นดินไหวสามารถคำนวณได้โดยตรงจากความเร็วของการเคลื่อนตัวของประเทศไทยในแต่ละปี ซึ่งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3-4 เซนติเมตร ดังนั้นอัตราการเคลื่อนตัวในช่วงสิ้นเดือนตุลาคม 2547 จนถึงวันก่อนเกิดแผ่นดินไหว คือ 25 ธันวาคม 2547 อัตราการเคลื่อนตัวประมาณ 1 เซนติเมตร ส่วนการเคลื่อนตัวขณะเกิดแผ่นดินไหว และหลังการเกิดแผ่นดินไหว ไม่สามารถประมาณได้โดยตรง แต่สามารถประมาณค่าได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลรังวัดดาวเทียม GPS ในประเทศไทยร่วมกับ 1. สถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS แบบดาวารในประเทศมาเลเซีย คือ สถานี ARAU และ สถานี KUAN 2. สถานีรังวัดสัญญาณดาวเทียมระหว่างประเทศ (International GNSS Service: IGS) ในประเทศสิงคโปร์ คือ สถานี NTUS และ 3. สถานีรังวัดดาวเทียม GPS ในประเทศอินโดนีเซีย คือ สถานี SAMP ซึ่งทั้งสี่สถานีนี้ได้ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS ทั้งขณะเกิดและหลังการเกิดแผ่นดินไหว และพบว่าอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกประมาณ 80% เกิดขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหว และอีก 20% เกิดขึ้นหลังการเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถนำมาหา

ความสัมพันธ์และคำนวณหาขนาดการเคลื่อนตัวของหมุด GEODYSSSEA และ THAICA พบว่ามีผลกับหมุดหลักฐานการแผนที่ของประเทศไทย มีการเคลื่อนตัวไปจากตำแหน่งเดิม ไปในทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ประมาณ 27 เซนติเมตร ในภาคใต้ 8 เซนติเมตร ในภาคกลาง และ 3 เซนติเมตร ในภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และทั่วทุกภาคยังคงมีการเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดิมต่อไปอีกอย่างน้อยประมาณ 1 1/2 ปี ในภาคใต้ และ 1/2 ปี ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งคาดว่าจะมีอัตราการเคลื่อนตัวต่ำกว่า 1 เซนติเมตร แต่ในท้ายที่สุดประมาณการว่าทางภาคใต้อาจจะมีการเคลื่อนตัวมากกว่า 50 เซนติเมตร ภาคกลาง 15 เซนติเมตร ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 6-7 เซนติเมตร จากที่ตำแหน่งของหมุดหลักฐานในโครงข่ายข้อมูลเดิมของประเทศไทยเกิดการบิดเบี้ยวย่อมส่งผลกระทบต่อความละเอียดถูกต้องของงานสำรวจและการทำแผนที่ด้วย (ชัยวัฒน์ พรหมทอง และคณะ, 2549)

1. โครงข่ายหมุดหลักฐาน GPS ใหม่ของประเทศไทย

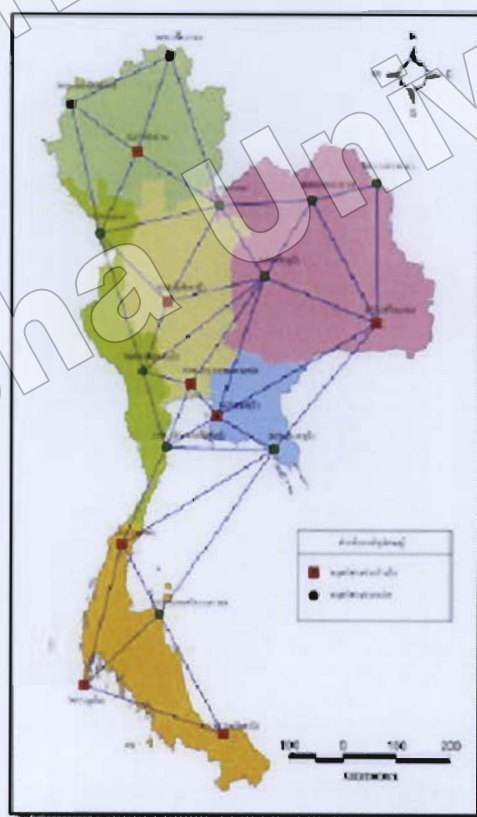
จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อ โครงข่ายหมุดหลักฐาน GPS ที่ใช้อยู่ในการทำแผนที่ทั้งภายในและระหว่างประเทศ ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวแบบไม่เท่ากันทั้งประเทศเกินกว่าที่จะใช้วิธีคำนวณปรับแก้โครงข่ายพร้อมกันทั้งหมดได้ ประกอบกับโครงข่าย GPS นี้เป็นโครงข่ายควบคุมทางข้อมูลแห่งชาติ และเป็นส่วนหนึ่งของ โครงข่ายระดับภูมิภาค ที่ต้องมีความละเอียดถูกต้องสูงตามมาตรฐานสากล และเป็นที่ยอมรับทั้งในและระหว่างประเทศ ซึ่งปัจจุบันกรมแผนที่ทหารได้ยึดถือมาตรฐาน Federal Geodetic Control Committee : FGCC ของสหรัฐอเมริกา จึงจำเป็นต้องดำเนินการรังวัดโครงข่าย GPS ใหม่เพื่อทดแทนโครงข่ายเดิม

2. โครงข่ายอ้างอิง (Reference Frame)

จัดอยู่ในประเภทงานชั้น A ตามมาตรฐาน FGCC ใช้โครงข่ายอ้างอิงเดิมจำนวน 7 หมุด ได้แก่หมุดใน โครงการ GEODYSSSEA จำนวน 2 หมุด คือ GPS 3427 จังหวัดชลบุรี และ GPS 3657 จังหวัดภูเก็ต หมุดในโครงการ THAICA จำนวน 5 หมุด คือ GPS 3217 จังหวัดลำปาง GPS 3001 จังหวัดอุทัยธานี GPS 3052 จังหวัดศรีสะเกษ GPS 3315 จังหวัดชุมพร และ GPS 3671 (ทดแทน GPS 3405 ที่ถูกทำลาย) จังหวัดปัตตานี ทำให้โครงข่ายอ้างอิงมีจำนวน 7 หมุด เช่นเดิม ประกอบกับกรมแผนที่ทหาร ได้ร่วมกับสถาบัน DEOS จัดตั้งสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GPS แบบถาวร หรือ GPS Base Station ขึ้นใหม่ คือ หมุด 3166 ณ โรงเรียนแผนที่ กรมแผนที่ทหาร และได้รวมหมุดนี้เข้ากับโครงข่ายอ้างอิงด้วย ทำให้โครงข่ายอ้างอิงใหม่มีจำนวนทั้งสิ้น 8 สถานี แต่ละหมุดรังวัดต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน (ภาพที่ 2-3) ค่าพิกัดที่ได้คำนวณโดยสถาบัน DEOS ประเทศเนเธอร์แลนด์ ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพิกัดรังวัดเมื่อเดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2548 ดังนั้น ค่าพิกัดจึงอยู่บนพื้นฐาน ITRF2000 Epoch 2005.7

3. โครงข่ายหลัก (Primary Network)

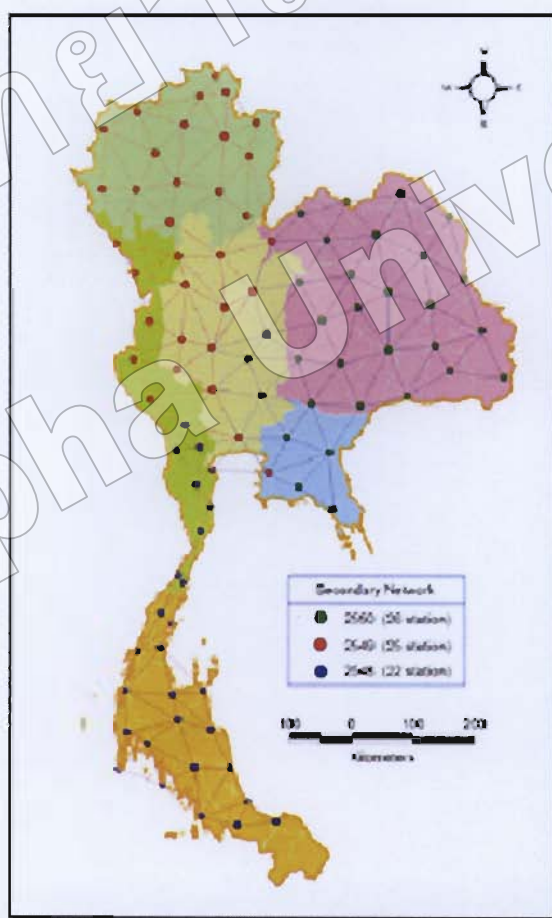
จัดอยู่ในประเภทงานชั้น B ตามมาตรฐาน FGCC การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเข้าบรรจบ (Loop Closure) ไม่เกิน 1.0 ppm. ได้จากการรังวัดขยายโครงข่ายอ้างอิงเพิ่มเติม จำนวน 11 หมุด ได้แก่ GPS 3656, GPS 3658, GPS 3239, GPS 3109, GPS 3093, GPS 3084, GPS 3159, GPS 3659, GPS 3660, GPS 3300 และ GPS 3335 ที่ส่วนใหญ่เป็นหมุดเดิมก่อนการเกิดธรณีพิบัติ มีเพียงบางส่วนที่เป็นหมุดใหม่ เนื่องจากหมุดเดิมถูกทำลาย และตำแหน่งสถานที่ตั้งไม่เหมาะสม หมุดใหม่ที่รังวัดทดแทนหมุดเดิมจะเป็นหมุดเฉลิมพระเกียรติของกรมที่ดิน ที่มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงกับหมุดเดิม แต่ละหมุดในโครงข่ายหลักส่วนใหญ่มีระยะห่างระหว่างหมุดประมาณ 200-250 กิโลเมตร รังวัดคาบการทำงานละ 12 ชั่วโมง เมื่อรังวัดโครงข่ายหลักโยงยึดกับโครงข่ายอ้างอิง ทำให้มีหมุดในโครงข่ายหลักทั้งสิ้น จำนวน 19 หมุด โดยรวมกับหมุดในโครงข่ายอ้างอิง 7 หมุด และ GPS Base Station อีก 1 หมุด (ภาพที่ 2-3)



ภาพที่ 2-3 แผนที่แสดงโครงข่ายอ้างอิง (Reference Frame) และโครงข่ายหลัก (Primary Network)
(ชัยวัฒน์ พรหมทอง, 2549)

4. โครงข่ายรอง (Secondary Network)

จัดอยู่ในประเภทงานชั้น B ตามมาตรฐาน FGCC มีเกณฑ์ความถูกต้องเท่ากับ 1.0 ppm. เป็นโครงข่ายที่ได้รับการออกแบบรังวัดเชื่อมโยงกับโครงข่ายหลักใหม่หลังจากเกิดธรณีพิบัติ โดยมีการปรับปรุงโครงข่ายเดิมค่อนข้างมาก ทั้งโครงข่ายมีหมุดเหลือเพียงไม่ถึง 100 หมุด จากเดิมมีประมาณ 700 หมุด โดยการคัดเลือกส่วนใหญ่จะเป็นหมุดเดิมของกรมแผนที่ทหารที่อยู่ในสภาพดี และบริเวณที่ตั้งที่เหมาะสมสำหรับการรับสัญญาณดาวเทียม GPS และอีกส่วนหนึ่งจะเป็นหมุดเฉลิมพระเกียรติของกรมที่ดินและส่วนราชการอื่น ระยะห่างระหว่างหมุดในโครงข่ายรองประมาณ 50-100 กิโลเมตร โดยการรังวัดคาบการทำงานละ 6 ชั่วโมง ซึ่งโครงข่ายรองนี้ได้ดำเนินการรังวัดแล้วเสร็จสมบูรณ์ทั้งโครงข่ายในปี 2550 (ภาพที่ 2-4)



ภาพที่ 2-4 แผนที่แสดงโครงข่ายรอง (Secondary Network) (ชัยวัฒน์ พรหมทอง, 2549)

ผลการวิจัยเรื่องโครงข่ายหมุดหลักฐาน GPS ใหม่ของกรมแผนที่ทหาร ภายหลังการเกิด แผ่นดินไหว เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2547 ที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกซาน-ไทย และแผ่นเปลือกโลกอินโดจีน จากการที่แผ่นเปลือกโลกได้รับอิทธิพลจากแรงเคลื่อนไหวของธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic Activity) ส่งผลให้ตำแหน่งพิกัดอ้างอิงทางภูมิศาสตร์บนพื้นผิวเปลือกโลกมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย (ชัยวัฒน์ พรหมทอง และคณะ, 2549) อีกทั้งเอกภพ ภาณุมาศตระกูล และคณะ ได้ศึกษาวิจัยถึงผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวในครั้งนั้นว่า ขณะเกิดแผ่นดินไหว จังหวัดภูเก็ต มีการเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง 28 เซนติเมตร ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ และได้ทำการตรวจวัดซ้ำอีกครั้งในเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2551 พบว่ามีการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นวัดได้เป็นระยะ 66.4 เซนติเมตร ไปในทิศตะวันตกเฉียงใต้เช่นเดิม และได้สรุปไว้ว่าสำหรับหน่วยงานที่มีโครงข่ายการรังวัดขนาดใหญ่ ย่อมได้รับผลกระทบโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกบริเวณนี้ อีกทั้งผลกระทบที่เกิดขึ้นยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง (เอกภพ ภาณุมาศตระกูล และคณะ, 2552) และ จากข้อมูลการเกิดที่ สำนักงานเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยาบันทึก วันเวลา และศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว ทั้งภายใน/ภายนอกประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน (วันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2553) สำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลหลังการเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2547 ในการศึกษา พบว่ามีการเกิดแผ่นดินไหวเกิดขึ้นทั้งภายใน/ภายนอก ประเทศไทย จำนวน 60 ครั้ง แบบออกได้เป็น 2 พื้นที่หลัก ดังนี้

ภายในประเทศไทย

- ภาคเหนือ จำนวน 21 ครั้ง
- ภาคใต้ จำนวน 1 ครั้ง

ภายนอกประเทศไทย

- 1 บริเวณตอนเหนือของประเทศ จำนวน 17 ครั้ง
- 2 บริเวณตอนใต้ของประเทศ จำนวน 21 ครั้ง

มาตรฐานองค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) ในเรื่องความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ของข้อมูลการบิน

องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ ได้กำหนดเกณฑ์ความแม่นยำของข้อมูลเชิงตำแหน่ง (ICAO, 2002) และได้แบ่งระดับความสำคัญของข้อมูลเชิงตำแหน่งที่ใช้อ้างอิงในการเดินอากาศไว้ (ตารางที่ 2-2)

ตารางที่ 2-2 มาตรฐานความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลการบิน

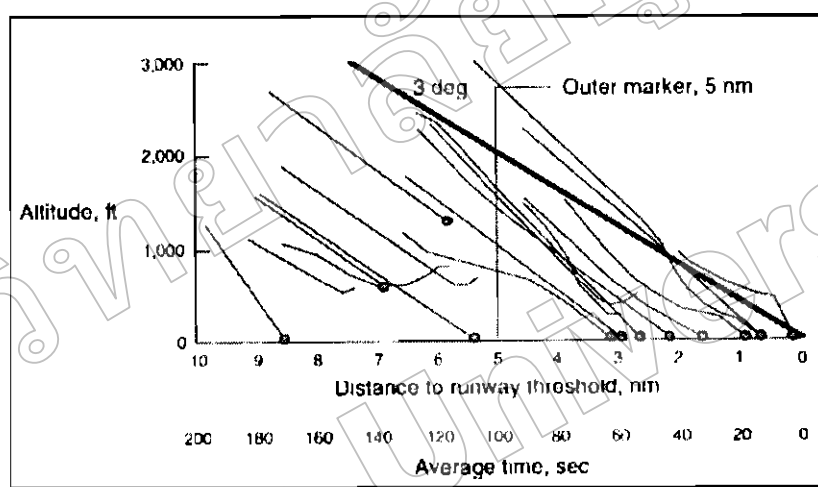
Latitude and Longitude	Accuracy data type	Integrity classification
En-route NAVAIDS and fixs, holding, STAR/SID point	100 m surveyed/calculated	1×10^{-5} essential
NAVAIDS located at the aerodrome/heliport	3 m surveyed	1×10^{-5} essential
Obstacle in the circling area and at the aerodrome/heliport	3 m surveyed	1×10^{-5} essential
Significant obstacles in the approach and take-off area	3 m surveyed	1×10^{-5} essential
Final approach fixs/points and other essential fixs/points comprising instrument approach procedures	3 m surveyed/calculated	1×10^{-5} essential
Runway threshold	1 m surveyed	1×10^{-8} critical
Runway end (flight path alignment point)	1 m surveyed	1×10^{-8} critical

ที่มา (ICAO, Doc. 9674 World Geodetic System 1984 (WGS-84) Manual, 2002)

อุบัติเหตุทางการบินที่สัมพันธ์กับความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง

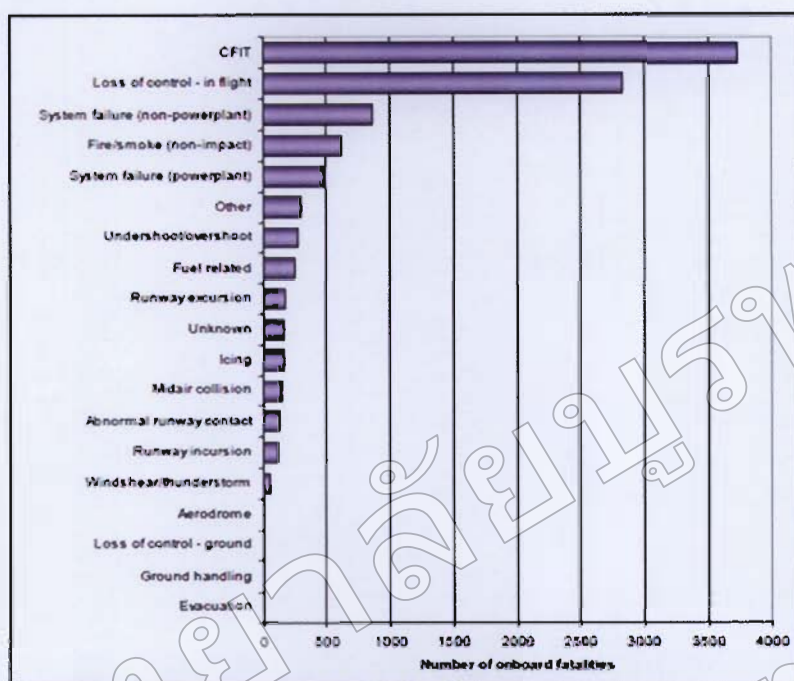
หน่วยงานด้านความปลอดภัยในการบินของสหรัฐอเมริกา (Flight Safety Foundation: FSF) ได้ตระหนักถึงสาเหตุของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในลักษณะ การควบคุมเครื่องบินเข้าหาภูมิประเทศ CFIT ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1950 ที่ได้เริ่มมีการนำเครื่องบินไอพ่นมาใช้ในการบินเชิงพาณิชย์เป็นต้นมา และจากจำนวนสถิติการเกิดอุบัติเหตุ CFIT ที่เกิดขึ้นทั่วโลก ระหว่างปี ค.ศ. 1988 – 1997 ที่มีจำนวนทั้งสิ้น 39 เหตุการณ์ ทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 2,800 คน

คิดเป็นร้อยละ 70 ของอุบัติเหตุเกิดขึ้นในช่วงสุดท้ายของการบินเข้าหาสนามบินที่ตำแหน่งของเครื่องบินอยู่ในแนวเดียวกับทางวิ่ง (Runway Axis) และส่วนใหญ่เครื่องบินอยู่ต่ำกว่าแนวร่อนที่ 3 องศา (ภาพที่ 2-5) และเป็นการเกิดขึ้นในระหว่างการควบคุมการบินตามขั้นตอนปฏิบัติการบินเข้าหาสนามบินแบบไม่แม่นยำ NPA เช่นการบินเข้าหาสนามบินด้วย NDB, VOR, NDB/DME, VOR/DME, LOC และ LOC/ DME ซึ่งเป็นการบินที่ไม่ถูกต้อง หรือการออกแบบวิธีปฏิบัติการบินที่ไม่ดีพอที่มีส่วนทำให้เกิดอุบัติเหตุ (Accident) และอุบัติการณ์ (Incident) ทั่วโลกมานานกว่า 10 ปี (Gregory, 2000; NTSB, 2000)

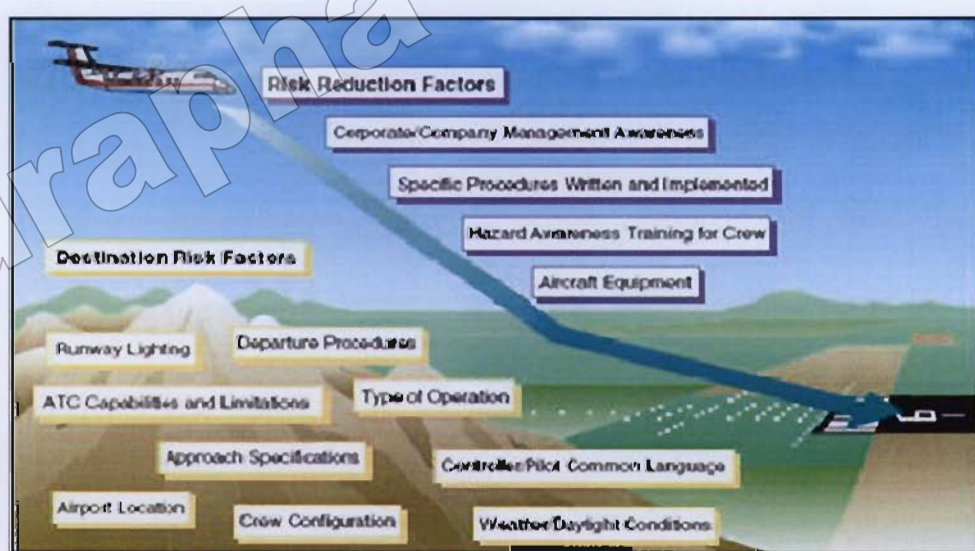


ภาพที่ 2-5 ตำแหน่งความสูงของเครื่องบินที่เกิดอุบัติเหตุ CFIT ที่เกิดขึ้นระหว่างปี ค.ศ. 1986 – 1990 (NTSB, Aircraft accident report CFIT. Korean air flight 801., 2000, p. 106)

อีกทั้ง หน่วยงานด้านความปลอดภัยเพื่อการขนส่ง ของออสเตรเลีย (Australian Transport Safety Bureau: ATSB) ได้สรุปผล และเปิดเผยเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันว่าการเกิดอุบัติเหตุลักษณะ CFIT นั้นมีโอกาสเกิดขึ้นได้ทั้งในการควบคุมการบินเข้าหาสนามบินแบบไม่แม่นยำ และการบินเข้าหาสนามบินแบบแม่นยำ ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 ด้วยขั้นตอนปฏิบัติการบินเข้าหาสนามบินแบบไม่แม่นยำ นั้นเป็นการควบคุมการบินที่ซับซ้อน ที่นักบินต้องควบคุมการบินในลักษณะบินลดระดับที่ละขั้น (Step-Down) หรือแบบขั้นบันได อีกทั้งนักบินจำนวนมากไม่คุ้นเคย จึงมีแนวโน้มของความผิดพลาดได้มากกว่า (ภาพที่ 2-6) ที่ได้แสดงสถิติการเกิดอุบัติเหตุในการเดินอากาศในลักษณะต่าง ๆ เปรียบเทียบกันจำนวนผู้เสียชีวิต ที่เกิดขึ้นในประเทศออสเตรเลีย ระหว่างปี ค.ศ. 1987 – 2007 และปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุของอุบัติเหตุ CFIT (ภาพที่ 2-7) (ATSB, 2007)



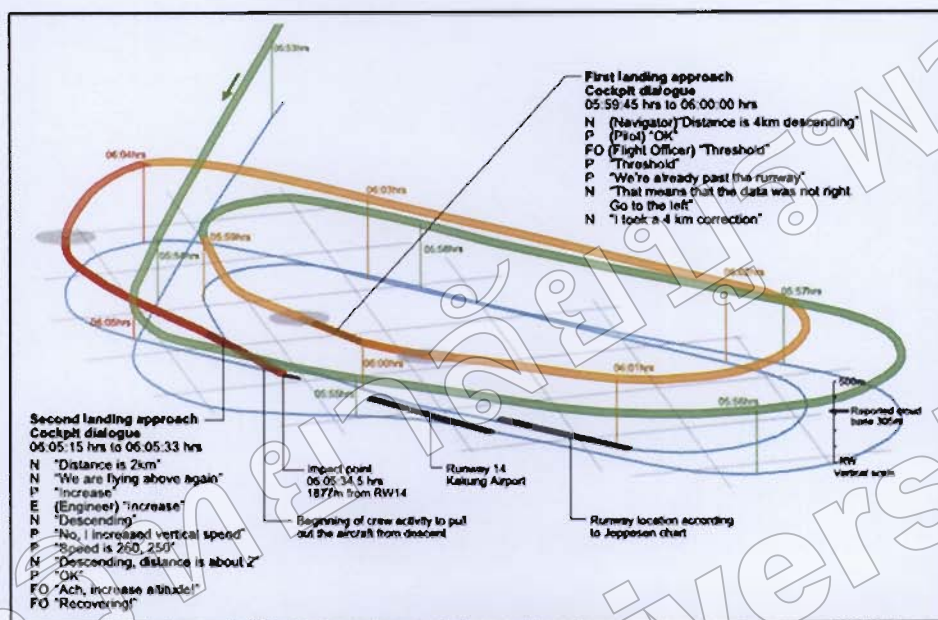
ภาพที่ 2-6 สถิติผู้เสียชีวิต ที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุ จากกลุ่มเครื่องบินไอพ่นเชิงพาณิชย์ที่เกิดขึ้น ระหว่างปีค.ศ. 1987 - 2005 (ATSB Transport Safety Research Report, 2007, p. 8)



ภาพที่ 2-7 ปัจจัยเสี่ยงต่างๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุลักษณะ CFIT (ATSB Transport Safety -Research Report, 2007, p. 22)

จากผลการไต่สวนอุบัติเหตุจากการควบคุมการบินเข้าหาภูมิประเทศ เมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2546 (ค.ศ. 2003) ของหน่วยงานด้านความปลอดภัยในการขนส่งของประเทศออสเตรเลีย ต่ออุบัติเหตุเครื่องบินขนส่งสินค้า Ilyushin 76TD ตกขณะลงจอด ณ สนามบินคาจุง (Cakung Airport) เขตเบาเกา (Baucau District) สาธารณรัฐประชาธิปไตยติมอร์-เลสเต (Timor-Leste) เป็นเหตุให้ฝูงชนเข้ากับภูมิประเทศอย่างรุนแรง และเกิดเพลิงลุกไหม้ตามมาภายหลังส่งผลให้นักบินและลูกเรือทั้งหมด จำนวน 6 คน เสียชีวิตในที่เกิดเหตุ โดยที่พยานผู้เห็นเหตุการณ์ ระบุว่าขณะเกิดเหตุมีหมอกปกคลุมทั่วบริเวณสนามบิน ประมาณการความสูงของฐานหมอกอยู่ที่ความสูง 1000 ฟุต หรือ 305 เมตร เหนือระดับพื้นดิน และมีทัศนวิสัยในการมองเห็นประมาณ 1,500 เมตร หรือ 0.8 ไมล์ทะเล สาเหตุของอุบัติเหตุครั้งนี้ เกิดจากการลดระดับความสูงลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในแผนที่วิธีปฏิบัติการบิน (Instrument Approach Chart) แบบไม่แม่นยำ ซึ่งเป็นวิธีปฏิบัติการบินที่นักบินจะต้องบินรักษาระดับความสูงลงแบบขั้นบันได และการเตรียมข้อมูลก่อนการบินที่ไม่ดีพอ อีกทั้งการประสานงานระหว่างลูกเรือที่ขาดความกระตือรือร้น ต่อการนำเครื่องบินเข้าหาสนามบินเพื่อลงจอด เนื่องด้วยความเชื่อมั่นต่อแผนที่วิธีปฏิบัติการบิน ที่ใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการบินของลูกเรือ และผลลัพธ์ที่ไม่คาดคิดต่อสิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จนกระทั่ง 2.5 วินาทีสุดท้าย ก่อนบินฝูงชนเข้ากับภูมิประเทศ โดยมีรายละเอียดที่สรุปได้ดังนี้ ด้วยการบินครั้งนี้เป็นการบินเข้าหาสนามบินด้วยแบบแผนวิธีปฏิบัติการบินแบบไม่แม่นยำ ซึ่งนักบินผู้ควบคุมจะต้องบังคับทิศทางการบินให้เข้าหาสถานีอ้างอิงภาคพื้นดิน คือ สถานีเครื่องช่วยเดินอากาศ NDB Baucau ที่เป็นอุปกรณ์ช่วยบอกตำแหน่งและทิศทางของเครื่องบินให้นักบินได้รับรู้สถานะของตนเอง อีกทั้งแบบแผนวิธีปฏิบัติการบินที่ใช้ควบคุมในการบินครั้งนี้ แสดงตำแหน่งทางวิ่ง (Runway) ไม่สอดคล้องกับตำแหน่งจริงบนภูมิประเทศที่ลูกเรือจะสามารถมองเห็นทางวิ่งได้ตามที่คาดหมาย (ภาพที่ 2-8) เมื่อทำการลดระดับความสูงลงมาถึงความสูงสุดท้ายที่เครื่องบินสามารถลดระดับลงได้ปลอดภัยจากสิ่งกีดขวาง (Minimum Descent Altitude: MDA) หรือตำแหน่งตัดสินใจยกเลิกการบินลง (Missed Approach) อีกทั้งค่าความสูงแสดงหน่วยเป็น ฟุต (Feet) ไม่แสดงหน่วยที่เทียบเท่า เมตร (Meter) ไว้ทำให้ในระหว่างการเดินทางเพื่อนำเครื่องบินเข้าสู่แนวบินสุดท้ายเพื่อเตรียมลงจอดในครั้งที่สอง ซึ่งขณะนั้นเครื่องบินมีความสูงกว่าแบบแผนวิธีปฏิบัติการบิน ทำให้นักบินผู้ควบคุมตัดสินใจเพิ่มความเร็วในการลดระดับความสูงเป็น 18 เมตร/ วินาที หรือ 3,543 ฟุต/ นาที อีกทั้งไม่มีลูกเรือคนใดทักท้วงกับการลดระดับอย่างรวดเร็วทั้งที่เป็นการลดระดับอย่างต่อเนื่องเข้าหาสนามบิน และจากการลดระดับอย่างรวดเร็วในตำแหน่งที่ใกล้กับภูมิประเทศ จึงเป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อการควบคุมการบินเข้าหาภูมิประเทศ ในลักษณะที่แทบจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แสดงให้เห็นว่าลูกเรือไม่ได้มีการเฝ้าสังเกตอุปกรณ์ควบคุมการบินเพื่อประเมินสถานการณ์

ประกอบการตัดสินใจยกเลิกการลงจอด อันเป็นเหตุให้เกิดโศกนาฏกรรมในครั้งนี้ (Courtesy; ICAO, 2005)



ภาพที่ 2-8 ลำดับเหตุการณ์ เที่ยวบิน Ilyushin 76TD (Courtesy ATSB, 2004, p. 32)

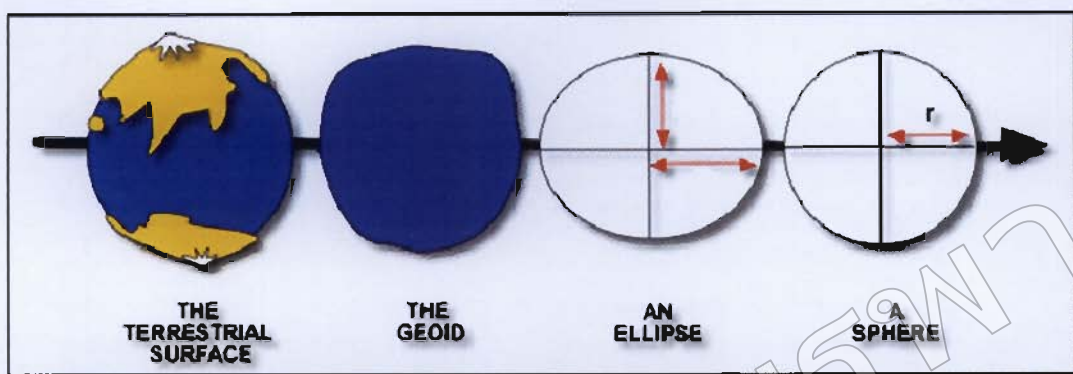
สัณฐานของโลก (The Earth's Figure)

ในอศิตสัณฐานของโลกได้ถูกประมาณขึ้นโดยนักเดินเรือ ซึ่งพวกเขากลัวว่าจะตกขอบโลกถ้าเดินเรือออกจากฝั่งไปไกลเกินไป หลักการนี้เป็นความเชื่อที่ว่าโลกมีลักษณะกลมแบน จนถึงยุคของอริสโตเติล (Aristotle) และพิทาโกรัส (Pythagoras) ได้อ้างเหตุผลและแนวทฤษฎีว่าโลกมีลักษณะเป็นทรงกลมจากการศึกษาลักษณะส่วนโค้งของเงา (The Curve Shadow) ของโลกในขณะที่เกิดจันทรุปราคา (Lunar Eclipses) (ภาพที่ 2-9) กระทั่งประมาณปลายคริสต์ศตวรรษที่ 16 เซอร์ไอแซกนิวตัน (Sir Isaac Newton) ได้อ้างอิงถึงทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ว่าโลกมีลักษณะเป็นทรงกลมที่สมบูรณ์แต่มีการยุบตัวเล็กน้อยบริเวณขั้วโลกทั้งสอง และป่องออกบริเวณเส้นศูนย์สูตร (Equator) หลักการดังกล่าวได้มีการพิสูจน์และเป็นที่ยอมรับจนถึงปัจจุบัน (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)



ภาพที่ 2-9 การจำลองลักษณะการเกิด จันทรุปราคา (Demonstration of a Lunar Eclipse)
(อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

โลกมีรูปร่างลักษณะเป็นรูปทรงรี (Oblate Ellipsoid) คือ มีลักษณะป่องตรงกลาง
ขั้วเหนือ - ใต้ และแบนเล็กน้อย อีกทั้งพื้นผิวโลกที่แท้จริงมีลักษณะขรุขระ สูง ต่ำ ไม่ราบเรียบ
สม่ำเสมอ พื้นผิวโลกมีพื้นที่ประมาณ 509,450,000 ตารางกิโลเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางยาว 12,757
กิโลเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางจากขั้วโลกเหนือถึงขั้วโลกใต้ 12,714 กิโลเมตร จะเห็นว่าระยะทาง
ระหว่างแนวนอน หรือเส้นศูนย์สูตร ยาวกว่าแนวตั้ง (ขั้วโลกเหนือ - ใต้) จากลักษณะของพื้นผิวโลก
ที่มีความขรุขระ และยากต่อการกำหนดรูปทรงที่แน่นอนได้ ดังนั้นการทำให้โลกมีรูปทรงที่ง่ายต่อ
ความเข้าใจ จึงได้มีการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทาง และตำแหน่งด้วยสมการ
คณิตศาสตร์ และแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนของโลกในการคำนวณ มีด้วยกัน 3 รูปทรง
คือ 1. รูปทรงกลม (Spheroid) 2. รูปทรงรี (Ellipsoid) และ 3. บิออยด์ (Geoid) หรืออาจจะกล่าวได้ว่า
พื้นฐานของโลกมีทั้งทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543) ที่ได้ให้
รายละเอียดของพื้นฐานของโลกไว้ดังนี้ (ภาพที่ 2-10)



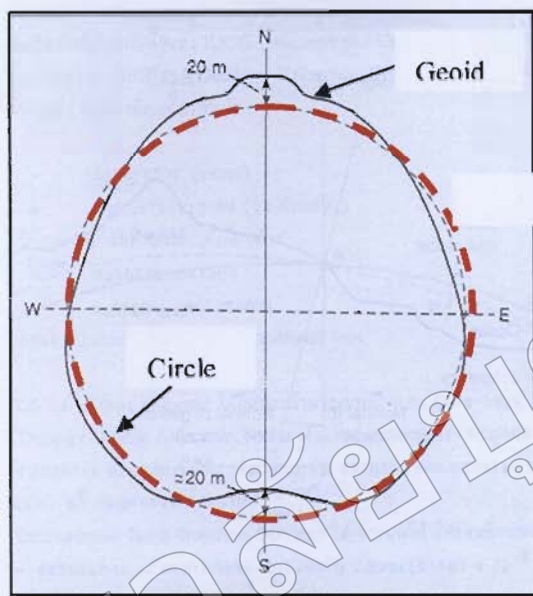
ภาพที่ 2-10 สันฐานของโลกทางกายภาพและทางคณิตศาสตร์ (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

1. ภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก (Earth Terrestrial Surface)

เป็นพื้นผิวทางกายภาพแท้จริงบนพื้นผิวโลก ทั้งที่เป็นพื้นดินและพื้นน้ำ พื้นผิวดังกล่าวเป็นพื้นผิวที่สิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ อีกทั้งการรังวัดหาระยะทางหรือขนาดของพื้นที่ ก็กระทำบนพื้นผิวดังกล่าว แต่เนื่องจากความไม่มีรูปแบบที่แน่นอนของภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

2. ซีออยด์

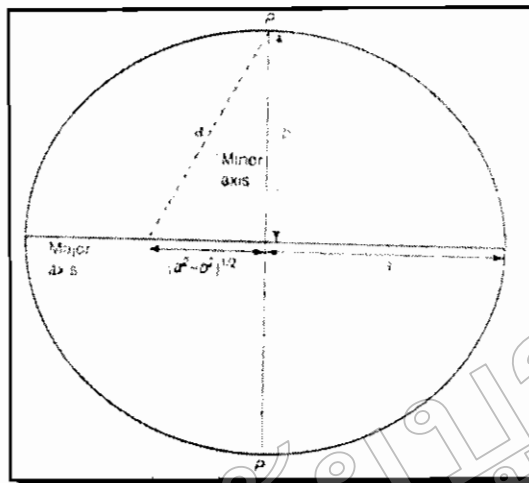
เป็นลักษณะของพื้นผิวระดับหรือพื้นผิวที่มีพลังงานศักย์เท่ากัน (Equipotential Surface) ซึ่งถ้าเราวัดแรงโน้มถ่วงที่เส้นระดับซีออยด์ นี้จะได้ค่าเท่ากันทุกจุด ตามคำนิยามที่ว่า “ถ้าเราพิจารณาถึงน้ำในมหาสมุทร ว่าเป็นสารเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระในสนามโน้มถ่วงของโลก โดยไม่มีแรงอื่นใดมาเกี่ยวข้องเลย ในสถานะที่สมดุลพื้นผิวของมหาสมุทร ในมโนทัศน์นี้จะเป็นพื้นผิวระดับของสนามความโน้มถ่วง และถ้าเราขยายพื้นผิวนี้เข้าไปภายใต้พื้นดิน พื้นผิวระดับอันนี้ก็คือ ซีออยด์” และเนื่องจากซีออยด์มีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ (ภาพที่ 2-11) สาเหตุเพราะความหนาแน่นของมวลสารภายในโลกแต่ละจุดไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถหาสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายมาใช้เพื่ออธิบายถึงลักษณะของซีออยด์ได้จึงจำเป็นต้องหารูปทรงเรขาคณิตที่สามารถแทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ และมีความใกล้เคียงกับพื้นผิวซีออยด์ มากที่สุด



ภาพที่ 2-11 รูปทรงขี้ออยด์เปรียบเทียบกับวงกลม (ยรรยง ทรัพย์สุขอำนวย, 2542)

3. รูปทรงรี (Ellipsoid)

เพื่อให้พิภคบนโลกมีความต่อเนื่องกัน และถูกต้องตามหลักคณิตศาสตร์ และมีความสัมพันธ์กันทั้งระยะและทิศทาง นักวิทยาศาสตร์หรือนักขี้ออยด์ (Geodesy) จึงได้กำหนดรูปทรงรีขึ้นเพื่อใช้เป็นรูปทรงอ้างอิง (Reference Ellipsoid) โดยที่ผิวของรูปทรงเรเรียกว่าพื้นหลักฐาน (Datum) เช่นพื้นหลักฐานสำหรับทวีปอเมริกาเหนือ (North American Datum 1983: NAD 83) ได้ใช้ Ellipsoid GRS 80 (Geodetic Reference System 1980) เป็นต้น และด้วยรูปทรงรี นั้นเกิดจากการหมุนวงรีรอบแกนโท (Minor Axis) ตามลักษณะการหมุนของโลก (ภาพที่ 2-12) ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับสัณฐานแท้จริงของโลก คือ มีการขยุบตัวบริเวณขั้ว รูปร่างของรูปทรงรี คือ รูปทรงที่แตกต่างจากรูปทรงกลมเพียงเล็กน้อย จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นพื้นผิวในการรังวัด และในงานการแผนที่ที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง เช่นแผนที่ระดับชุมชนเมือง แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วนใหญ่ทั่วไป และแผนที่นำร่อง เป็นต้น และจากผลลัพธ์จากการคำนวณจึงมีความใกล้เคียงกับพื้นผิวขี้ออยด์มากที่สุด ดังนั้นจึงทำให้มีรูปทรงรีที่เป็นตัวแทนของสัณฐานโลกในการคำนวณมีเป็นจำนวนมาก เนื่องจากแต่ละพื้นที่บนโลกมีความโค้งนูนของขี้ออยด์ที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 2-12 รูปทรงรี (Meridian Ellipse) (ขรรยง ทรัพย์สุขอำนวย, 2542)

4. รูปทรงกลม (Sphere)

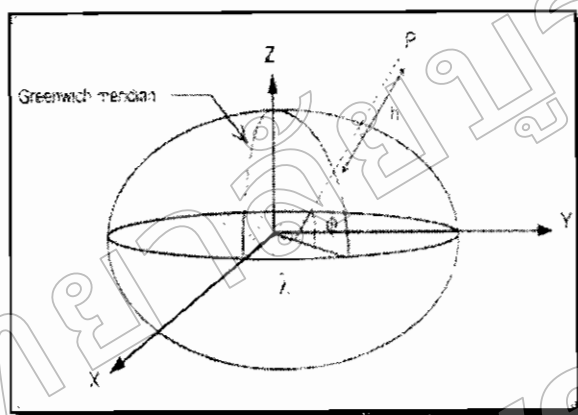
เป็นรูปทรงอีกชนิดหนึ่งที่ใช้แทนสัณฐานโลก ที่มีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์น้อยกว่ารูปทรงรี (Ellipsoid) ทำให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ง่ายขึ้น โดยมีตัวแปรเพียงตัวเดียวคือ รัศมีจากจุดศูนย์กลาง (r) แต่รูปทรงกลม (Sphere) ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่บนผิวโลก และไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นรูปทรงทางเรขาคณิตที่ใช้แทนสัณฐานโลกทั้งหมด ดังนั้นจึงเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อความเข้าใจ จึงเหมาะสมเป็นสัณฐานของโลกโดยประมาณ ใช้กับแผนที่มาตราส่วนเล็กที่มีขอบเขตกว้างขวาง เช่น แผนที่โลก แผนที่ทวีป หรือ แผนที่อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง

ระบบพิกัด (Coordinate System)

1. ระบบพิกัดทางยิออเดติก (Geodetic Coordinate)

รูปทรงรี เป็นรูปทรงที่นำมาใช้ประมาณสัณฐานของโลกสำหรับงานที่ต้องการความถูกต้องสูง โดยทั่วไปมักเรียกว่า ทรงรี หรือสเฟียรอยด์ (Ellipsoid or Spheroid) ซึ่งถูกสร้างจากการหมุนวงรีรอบแกนโท (แกนหมุนของโลก) การกำหนดรูปทรงต้องอาศัยตัวแปรอย่างน้อย 2 ตัว คือ ความยาวแกนโท (b) และค่าความยาวกึ่งแกนเอก (a) จากตัวแปรทั้งสองทำให้สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรอื่น ๆ ได้ เช่น อัตราการยุบตัว (Flattening) และค่าการเอียงศูนย์ (Eccentricity) เป็นต้น ดังนั้นในการกำหนดรูปทรงรีขึ้นมาจำเป็นต้องรู้ค่าตัวแปร อย่างน้อย 2 ตัว จากที่ได้กำหนดรูปทรงรีขึ้นจากตัวแปร 2 ตัว ทำให้สามารถกำหนดพิกัดที่อยู่บนรูปทรงรีได้ โดยใช้ตัวแปรอีก 3 ตัว คือ

ละติจูด (ϕ) ลองจิจูด (λ) และความสูง (h) โดยที่ค่าละติจูดและลองจิจูดจะถูกกำหนดตามทิศทางของแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวทรงรี (ภาพที่ 2-13) ค่าพิกัดในระบบนี้เรียกว่า ค่าพิกัดยี่ห้อเดก (Geodetic Coordinates) หรือค่าพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic Coordinates) ซึ่งเป็นค่าพิกัดที่เป็นพื้นฐานของงานสำรวจรังวัดและงานทำแผนที่ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)



ภาพที่ 2-13 ค่าพิกัด ยี่ห้อเดก (Geodetic Coordinate) (คำราเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์, 2552, หน้า 220)

ยี่ห้อเดกละติจูด (Geodetic Latitude) คือ มุมระหว่างระนาบเมริเดียน ที่เกิดจากการทำมุมระหว่างแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวรูปทรงรีของจุดที่พิจารณากับระนาบศูนย์สูตรของรูปทรงรีที่ใช้อ้างอิงระบบพิกัด

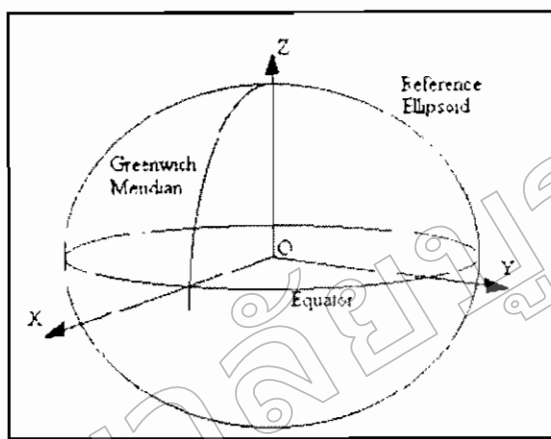
ยี่ห้อเดกลองจิจูด (Geodetic Longitude) คือ มุมตามระนาบศูนย์สูตรของรูปทรงรีที่เกิดจากการทำมุมระหว่างระนาบเมริเดียน ที่ผ่านจุดที่พิจารณากับระนาบเมริเดียนหลัก

ความสูงหรือพื้นรูปทรงรี (Ellipsoidal Height) คือ ความสูงในแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวทรงรี ของจุดที่พิจารณาเมื่อเทียบกับพื้นผิวของรูปทรงรีที่ใช้อ้างอิง

2. ระบบพิกัดฉากสามมิติ (Cartesian Coordinate System)

ในการบอกตำแหน่งของวัตถุใด ๆ นอกจากจะสามารถบอกในรูปแบบของระบบพิกัดยี่ห้อเดก (Geodetic Coordinate System) แล้วยังมีระบบพิกัดอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งสามารถบอกตำแหน่ง โดยอ้างอิงกับศูนย์กลางของรูปทรงรีหรือศูนย์กลางมวลสารของโลก ขึ้นอยู่กับการกำหนดจุดศูนย์กลางเนติของระบบพิกัด ระบบดังกล่าว คือ ระบบพิกัดฉากสามมิติ หรือระบบพิกัด X, Y และ

Z โดยมีแกน Z ตั้งฉากกับระนาบศูนย์สูตร แกน X อยู่บนระนาบศูนย์สูตร ตัดกับแนวระนาบเมริเดียนหลักและแกน Y ตั้งฉากกับแกนทั้งสอง (ภาพที่ 2-14)



ภาพที่ 2-14 ระบบพิกัดฉากสามมิติ (Cartesian Coordinate System) (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

ตามหลักทฤษฎีในการสร้างระบบพิกัด แกนทั้งสามที่ใช้กำหนดตำแหน่งทางยิออเดติก (Geodetic) ของรูปทรงรีจะขนานกับระบบแกนอ้างอิงของโลกคือ แกน Z อยู่ในแนวแกนหมุนของโลก แกน X อยู่บนระนาบศูนย์สูตรตัดกับแนวระนาบเมริเดียนหลัก และส่วนแกน Y จะตั้งฉากกับแกนทั้งสอง ดังนั้นในการแปลงค่าพิกัดจากพื้นหลักฐานหนึ่งไปยังอีกพื้นหลักฐานหนึ่ง จึงมีตัวแปรที่จำเป็น 3 ตัว คือ ตัวแปรในการย้ายจุดศูนย์กลางกำเนิดของพื้นหลักฐาน (ΔX , ΔY และ ΔZ) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการแปลงระบบพื้นหลักฐานอาจจะต้องใช้ตัวแปรอื่น ๆ เข้าร่วมด้วย เช่น ค่าการหมุนของแกนทั้งสาม (Rotation of the Axis) เป็นต้น

ระบบพิกัดฉากสามมิติ ดังกล่าว สามารถที่จะแปลงให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดยิออเดติกและความสูงเหนือพื้นรูปทรงรีได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\tan \lambda_G = \frac{Y}{X}$$

$$\tan \phi_G = \frac{Z + e^2 v \sin \phi_G}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$h = \frac{X}{\cos \phi_G \cos \lambda_G} - v$$

เมื่อ

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi_G}}$$

a = semi major axis of ellipsoid

e = eccentricity of ellipsoid

h = ellipsoidal height of point

จากสมการข้างต้นแม้ว่าจะสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบที่ง่าย แต่ในการแก้สมการดังกล่าวเพื่อหาค่า ϕ_G ต้องทำการวนซ้ำ ค่าประมาณในครั้งแรกของ ϕ_G สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\tan \phi_G = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left[1 + \frac{e^2}{1 - e^2} \right]$$

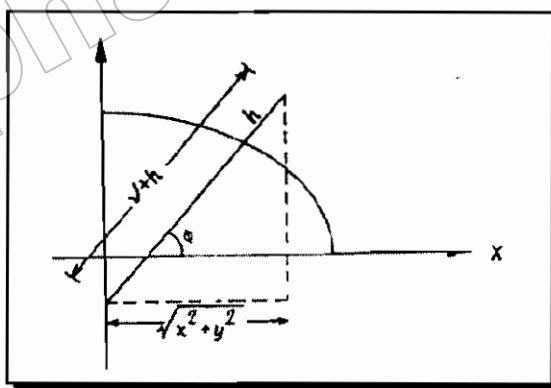
$$\text{หรือ} \quad \tan \phi_G = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left[\frac{1}{1 - e^2} \right]$$

ค่าพิกัดในระบบพิกัดขั้วโลกสามารถแปลงกลับมาสู่ระบบพิกัดจากสามมิติได้จากสมการนี้

$$X = (v + h) \cos \phi_G \cos \lambda_G$$

$$Y = (v + h) \cos \phi_G \sin \lambda_G$$

$$Z = (v(1 - e^2) + h) \sin \lambda_G$$

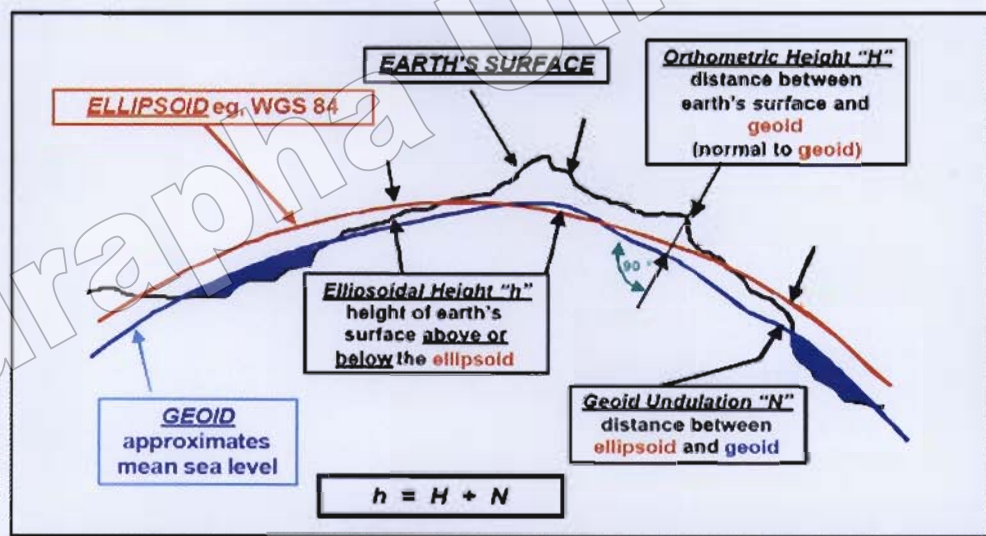


ภาพที่ 2-15 รูปตัดตามแนวเมริเดียนซึ่งแสดงตำแหน่งของจุดเหนือพื้นผิวรูปทรงรี

(อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

3. ความสูง (Height)

การอ้างอิงตำแหน่งของจุดพิจารณา อีกมิติหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ ความสูง ในระบบ พิกัดขั้วโลกความสูงที่ใช้ในการบอกตำแหน่งของจุดที่พิจารณา คือ ความสูงเหนือรูปทรงรีอ้างอิง ซึ่งเป็นการบอกระยะเชิงเส้นจากพื้นผิวของรูปทรงรีอ้างอิงถึงจุดที่พิจารณาตามแนวเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวรูปทรงรีการบอกความสูงในลักษณะดังกล่าวของระบบพิกัดขั้วโลกไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์บางอย่างที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดของโลกได้ เช่น ทิศทางการไหลของน้ำ เป็นต้น ดังนั้นการหาระดับเพื่อหาความสูง (Orthometric Height Leveling) จากระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) ย่อมอธิบายปรากฏการณ์ด้านความสูงที่สัมพันธ์กับแรงดึงดูดของโลกได้ดีกว่าการบอกความสูงเหนือรูปทรงรี ความสูงออร์โธเมตริกของจุดที่พิจารณา เป็นระยะเชิงเส้นจากพื้นผิวที่มีค่าศักย์ความถ่วงที่เท่ากันทุกจุด (Equipotential Surface) ถึงจุดที่พิจารณาตามแนวสายตั่ง (Plumb Line) หรือทิศทางของแรงดึงดูดของโลก (The Gravity Vector) ค่าความต่างระหว่างความสูงเหนือรูปทรงรี (h) และความสูงออร์โธเมตริก (H) สามารถอธิบายได้ด้วยความสูงขั้วโลก (Geoidal Height: N) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความสูงทั้งสองชนิดได้ด้วยสมการ $h = N + H$ (ภาพที่ 2-16)

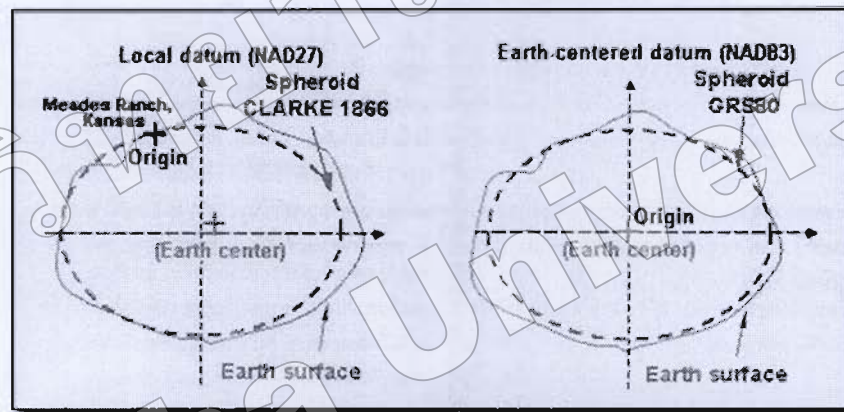


ภาพที่ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงออร์โธเมตริก (H) ความสูงเหนือรูปทรงรี (h) และความสูงขั้วโลก (N) (ชัยวัฒน์ พรหมทอง, 2549)

พื้นหลักฐาน (Datum's)

พื้นหลักฐาน (Datum) เป็นผิวระดับที่ใช้อ้างอิงเพื่อวัดหาคำแหน่งบนพื้นผิวโลก ซึ่งจุดอ้างอิงนี้จะใช้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นของเส้นรุ้งและเส้นแวง พื้นหลักฐานมักเรียกทับศัพท์ว่า “ดาดัม” แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ (ภาพที่ 2-17)

1. อ้างอิงตำแหน่งที่อยู่กึ่งกลางโลก เป็นตำแหน่งจริงตามสภาพซึ่งระบบพิกัดแบบ 1983 North America Datum (NAD83) มีตำแหน่งที่อ้างอิงใกล้เคียงกับกึ่งกลางโลกจริงมากที่สุด
2. อ้างอิงตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียงกับพื้นผิวโลก เช่นระบบพิกัดแบบ 1927 North America Datum (NAD27) ได้ใช้ตำแหน่งที่เมือง Meades Ranch Kansas เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการตรวจวัดทั้งหมด



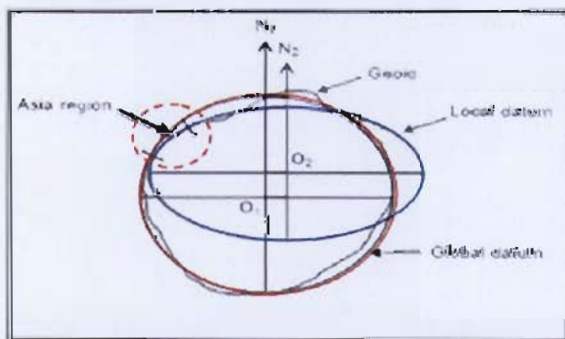
ภาพที่ 2-17 ระบบพิกัด NAD27 และ NAD83 (สุเพชร จิรขจรกุล, 2551, หน้า 110)

เมื่อพิจารณาพื้นหลักฐานทั่วโลกแล้ว รูปทรงรีอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด คือ การกำหนดให้จุดศูนย์กลางกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลสารของโลก และให้มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับพื้นผิวจริงของโลกมากที่สุด พื้นหลักฐานที่มีจุดศูนย์กลางกำเนิดที่กึ่งกลางมวลสารโลก (Geocentric Datum) นี้มีความสำคัญ และจำเป็นต่อการคำนวณวงโคจรดาวเทียมเป็นอย่างมากโดยนับตั้งแต่ปลาย ค.ศ. 1960 (พ.ศ. 2503) ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นยุคของดาวเทียม ทำให้มีการสำรวจทั่วโลก และได้มีความพยายามที่จะกำหนดพื้นหลักฐานทั่วโลกขึ้นเรียกว่าพื้นหลักฐาน World Geodetic System 1960 (WGS 60), WGS 66 และ WGS 72 ตามลำดับจนถึงปัจจุบัน เป็นพื้นหลักฐาน WGS-84 ที่ยึดถือการคำนวณจากปี ค.ศ. 1976 – 1979 ซึ่งเป็นการสำรวจหาขนาดของโลก โดยการใช้ Laser, Doppler, Radar Altimeter, Radar Plus Radar Altimeter ซึ่งมีค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดรูปทรงรีอ้างอิง ดังนี้คือ

ค่าของ $(a) = 6,378,137$ เมตร ค่าของ $(b) = 6,356,752.3142$ เมตร และ $f = 1/298.257223563$ (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543) จากการที่ได้กำหนดให้พื้นหลักฐาน WGS-84 เป็นพื้นหลักฐานทั่วโลกทำให้ผู้ใช้ GPS สามารถหาค่าพิกัดที่อยู่บนพื้นหลักฐาน WGS-84 ได้โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งของดาวเทียม GPS ที่คำนวณได้จากข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (Satellite Orbits or Ephemerides) นั้นอยู่บนพื้นหลักฐาน WGS-84 ด้วยเช่นกัน

การเลือกขนาดและรูปร่างของรูปทรงรีที่นำมาใช้อ้างอิงและการกำหนดตำแหน่งของจุดศูนย์กลางกำเนิดถือว่าการกำหนดพื้นหลักฐาน ดังนั้นความเข้าใจที่ว่ารูปทรงรีคือพื้นหลักฐานนั้นเป็นความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน ด้วยในหลายประเทศอาจใช้รูปทรงรีอันเดียวกันแต่มีจุดศูนย์กลางกำเนิดที่ต่างกันก็ถือว่าการใช้พื้นหลักฐานคนละพื้นหลักฐานกัน การกำหนดศูนย์กลางกำเนิดของพื้นหลักฐานทำให้จุดศูนย์กลางของรูปทรงรีไม่ได้อยู่ที่ศูนย์กลางมวลสารของโลก แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างพื้นหลักฐานท้องถิ่น (Local Datum) และพื้นหลักฐานทั่วโลก (Global Datum) จะเห็นได้ว่าจุดเดียวกันจะมีค่าพิกัดที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นค่าพิกัดทรงรี หรือค่าพิกัดฉากคาร์ทีเซียน ถ้าพื้นหลักฐานเป็นพื้นหลักฐานคนละอันกัน

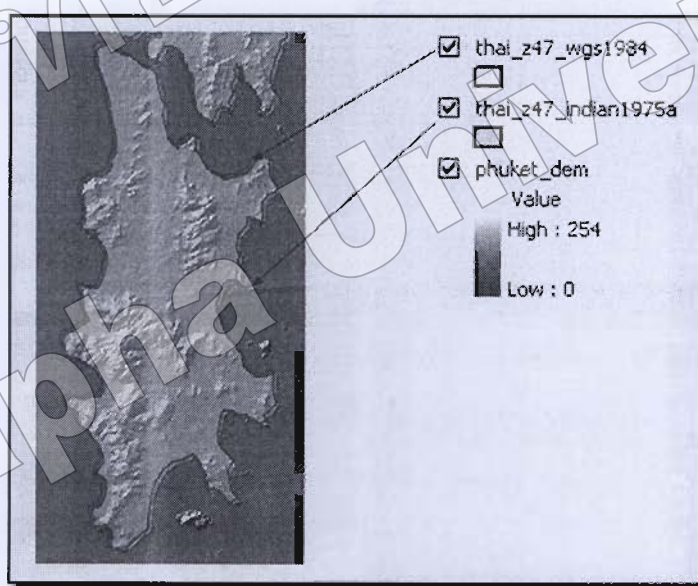
ด้วยวิธีการกำหนดพื้นหลักฐานท้องถิ่น ดังที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าพื้นหลักฐานท้องถิ่นจะแนบกับพื้นผิวขี้อายในบริเวณนั้นได้ดีกว่าพื้นหลักฐานทั่วโลก (ภาพที่ 2-18) การแปลงค่าพิกัดไปมาระหว่างพื้นหลักฐานมักจะถูกเรียกสั้น ๆ ว่าการแปลงพื้นหลักฐาน (Datum Transformation) ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการแปลงค่าพิกัดให้อยู่ในรูปของค่าพิกัดฉากคาร์ทีเซียนซึ่งใช้พารามิเตอร์ 7 ตัวในการแปลงระหว่างพื้นหลักฐานซึ่งประกอบด้วย ค่าการเลื่อนแกนทั้งสามทิศทาง (dX , dY , dZ) มุมหมุนรอบแกนทั้งสาม (ϕ , κ , ω) และค่าอัตราการย่อขยาย (Scale Factor) รายละเอียดการคำนวณสามารถหาอ่านได้ในหนังสือหลายเล่ม เช่น (Lliffe, 2000; Hofmann-Wellenhof, et al., 1997)



ภาพที่ 2-18 ความแตกต่างระหว่างพื้นหลักฐานท้องถิ่น และพื้นหลักฐานทั่วโลก

(สุเพชร จิรัชกรกุล, 2552, หน้า 221)

สำหรับประเทศไทยได้อ้างอิงพื้นหลักฐานจากหน่วยงานหลักด้านการผลิตแผนที่ คือ กรมแผนที่ทหาร ได้ใช้พื้นหลักฐาน Indian 1975 ซึ่งเป็นระดับอ้างอิงสำหรับแผนที่มูลฐานมาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7017 และระดับอ้างอิงในรูปแบบการอ้างอิงบนพื้นหลักฐาน WGS-84 เป็นระดับอ้างอิงสำหรับแผนที่มูลฐานมาตราส่วน 1:50,000 ชุด L7018 ซึ่งจะต้องมีการแปลงระดับอ้างอิงสองระบบนี้ เพื่อมาสู่ระบบของระดับอ้างอิงแบบเดียวกันที่สามารถใช้งานแผนที่ด้วยกันได้อย่างสะดวกขึ้นในการอ่านค่าพิกัด และการวัดระยะทาง (ภาพที่ 2-19) ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างพื้นหลักฐาน Indian 1975 กับพื้นหลักฐาน WGS-84 โดยหน่วยงานองค์การแผนที่ กระทรวงกลาโหม สหรัฐอเมริกา (Defense Mapping Agency Hydrographic/ Topographic Center : DMAHTC) เป็นผู้ดำเนินการโดยใช้ ค่าพิกัดของสถานีคอปเปิลอร์ จำนวน 6 สถานี ได้ผลลัพธ์ค่าความสัมพันธ์ในการแปลงพื้นหลักฐานจาก WGS-84 เป็น Indian 1975 ดังนี้คือ $DX = -206$ เมตร, $DY = -837$ เมตร, $DZ = -295$ เมตร (สุเพชร จิรขจรกุล, 2551)



ภาพที่ 2-19 ความแตกต่างระหว่างพื้นหลักฐาน Indian 1975 และ WGS 1984 ของจังหวัดภูเก็ต
(สุเพชร จิรขจรกุล, 2551, หน้า 111)

พื้นหลักฐาน เปรียบเสมือนเป็นตัวแทนของรูปโลก ประกอบด้วยรูปทรงรีที่มีขนาด สัณฐานและการจัดวางที่แน่นอน เพื่อใช้เป็นกรอบ (Frame Work) หรือระบบอ้างอิงในการกำหนด ค่าพิกัดอื่น ๆ ปัจจุบันมีพื้นหลักฐานอยู่เป็นจำนวนมาก ที่ใช้เป็นระบบอ้างอิงในการกำหนดค่าพิกัด ของแต่ละประเทศ สำหรับการวิจัยครั้งนี้ จะกล่าวถึงพื้นหลักฐานที่เกี่ยวข้องเพียง 3 พื้นหลักฐาน คือ

พื้นหลักฐาน Indian 1975, พื้นหลักฐาน WGS-84 และพื้นหลักฐาน ITRF (International Terrestrial Reference Frame)

1. พื้นหลักฐาน Indian 1975

เป็นพื้นหลักฐานที่ประเทศไทยใช้อ้างอิงค่าพิกัดในปัจจุบัน จากที่องค์การแผนที่กระทรวงกลาโหม ประเทศสหรัฐอเมริกา (Defense Mapping Agency Hydrographic/ Topographic Center) เป็นผู้ดำเนินการปรับแก้โครงข่ายสามเหลี่ยมชั้นที่ 1 ของประเทศไทย และประเทศพม่าในปี พ.ศ. 2518 ประกอบด้วยหมุดสามเหลี่ยม ชั้นที่ 1 จำนวน 426 สถานี โดยใช้ค่าพิกัดจากการรังวัดด้วยดาวเทียมคอปเปอเรอร์ จำนวน 9 สถานี ที่มีความถูกต้องสูงกว่างานสามเหลี่ยม เป็นจุดควบคุมในการปรับแก้โครงข่าย (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

พื้นหลักฐาน Indian 1975 มีองค์ประกอบดังนี้

จุดศูนย์กลางพื้นหลักฐาน หมุดสามเหลี่ยม เขาสะแกกรัง (หมายเลข 91)

ละติจูด	15° 22' 56.0487''	เหนือ
ลองจิจูด	100° 00' 59.1906''	ตะวันออก
ความสูงเหนือพื้นผิวออกไซด์	-22.46	เมตร
รูปทรงรี	เอเวอร์เรสต์ 1830	
ขนาดของครึ่งแกนยาว (a)	6,377,276.345	เมตร
อัตราการยุบตัว (f)	1/300.8017	

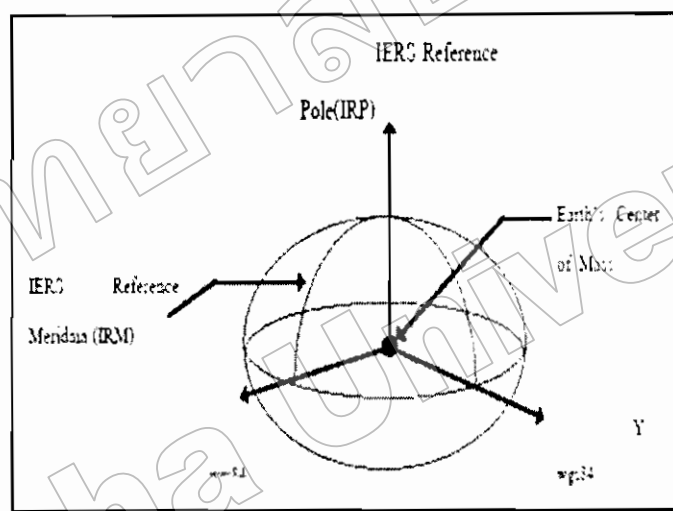
2. พื้นหลักฐาน WGS-84

เป็นพื้นหลักฐานที่อยู่บนระบบพิกัด WGS-84 ที่มีคุณสมบัติตามกฎเกณฑ์สากลของสถาบัน IERS (The International Earth Rotation Service) (ภาพที่ 2-20) ดังต่อไปนี้ (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

1. มีจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลสารของโลก รวมถึงส่วนที่เป็นพื้นน้ำและชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก
2. ขนาดของรูปทรงรีมีความสัมพันธ์กับสัณฐานที่แท้จริงของโลกหรือพื้นผิวออกไซด์
3. แกนเริ่มต้นในการกำหนดทิศทาง กำหนดโดยสถาบัน The Bureau International de l'Heure (BIH) ที่ขณะเวลา 1984.0
4. ระบบเวลาเริ่มต้นที่เส้นเมริเดียนหลัก (Prime Meridian) ของโลกและไม่มีค่าแตกต่างกับการหมุนของโลก

พื้นหลักฐาน WGS-84 ถูกสถาปนาขึ้นในปี ค.ศ. 1987 โดยใช้ข้อมูลการรังวัดดาวเทียมในระบบทรานซิท (Transit) ของกองทัพเรือสหรัฐ มีองค์ประกอบดังนี้

รูปทรงรี	WGS-84
ขนาดของครึ่งแกนยาว (a)	6,378,137 เมตร
อัตราการยุบตัว (f)	1/298.257223563
ความเร็วเชิงมุมของการหมุนรอบตัว (ω)	$7,292,115.0 \times 10^{-11} \text{ rad sec}^{-1}$
Earth's Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Include (GM))	$3,986,004.418 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$



ภาพที่ 2-20 การกำหนดคุณสมบัติของระบบพิกัด WGS-84 (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

1. พื้นหลักฐาน International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

The Terrestrial Reference Frame Section of the Central Bureau (CB) of the International Earth Rotation Service (IERS) เป็นผู้สถาปนาพื้นหลักฐาน ITRF เพื่อเป็นระบบพิกัดสากล (International Terrestrial Reference System: ITRS) ใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรการหมุนของโลก (Earth Rotation Parameter) และหาความสัมพันธ์อ้างอิงกับระบบพิกัดทรงกลมฟ้า (Celestial Reference System) (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543, Claude Boucher and Zuheir Altamimi, 1996)

ในการสถาปนาค่าพิกัด ใช้ค่าพิกัดของกลุ่มสถานีรังวัดหลายประเภทร่วมกันในส่วนของการวัดความเร็วในการเคลื่อนตัว ใช้เทคนิคการรังวัดจากอวกาศ (Space-Geodetic techniques) เช่น การรังวัด VLBI, LLR, SLR, GPS และ DORIS (Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite)

คุณสมบัติของระบบพิกัด ITRS มีดังนี้คือ

1. มีจุดศูนย์กลางของพื้นหลักฐานอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลสารของโลก (รวมถึงส่วนที่เป็นพื้นน้ำและชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก)
2. ขนาดของรูปทรงรีมีความสมพ้องกับหลักฐานที่แท้จริงของโลกหรือพื้นผิวขี้ออบ
3. แกนเริ่มต้นในการกำหนดทิศ ประกอบด้วยค่าอ้างอิงในระบบ BIH (The Bureau International de l'Heure) ที่ช่วงเวลา 1984.0 และมีความละเอียดถูกต้องตามเกณฑ์ของสถาบัน International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) และสถาบัน International Astronomical Union (IAU)

4. ระบบเวลา เริ่มต้นในแนวเดียวกับแนวเมริเดียนอ้างอิงของโลก

พื้นหลักฐาน ITRF มีองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้

บนระบบพิกัดอ้างอิง

ITRS

รูปทรงรี

WGS-84

ขนาดของครึ่งแกนยาว (a)

6,378,137 เมตร

อัตราการยุบตัว (f)

1/298.257223563

ค่าพิกัดบนพื้นหลักฐาน ITRF (International Terrestrial Reference Frame) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากแผ่นเปลือกโลกได้รับอิทธิพลจากแรงเคลื่อนไหวของธรณีแปรสัณฐาน (Tectonic Activity) ส่งผลให้ตำแหน่งบนพื้นหลักฐาน ITRF มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการจะกล่าวถึงค่าพิกัดตำแหน่งที่อ้างอิงกับพื้นหลักฐาน ITRF จำเป็นต้องอ้างอิงช่วงเวลา (Epoch) ของพื้นหลักฐานด้วย

2. ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นหลักฐาน WGS-84 กับพื้นหลักฐาน ITRF

พื้นหลักฐาน WGS-84 ได้ถูกปรับแก้ใหม่โดยใช้ค่าตัวแปร 7 ตัว ณ เวลา G730 (สัปดาห์ที่สอง ของเดือน มกราคม ค.ศ. 1994) ทำให้ค่าพิกัดของพื้นหลักฐาน WGS-84 มีความถูกต้องมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดของพื้นหลักฐาน ITRF92 ปรากฏว่าพื้นหลักฐานทั้งสองมีค่าต่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร และได้มีการเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกันอีก ณ เวลา G873 กับพื้นหลักฐาน ITRF94 ผลที่ได้ยังคงเป็นลักษณะเดิม และในการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียม ของหน่วยงาน NIMA ที่อ้างอิงกับพื้นหลักฐาน WGS-84 เปรียบเทียบกับ

หน่วยงาน IGS ที่อ้างอิงกับพื้นหลักฐาน ITRF94 ปรากฏว่ามีความต่างกันไม่เกิน 2 เซนติเมตร ดังนั้นในการปฏิบัติงานด้านแผนที่ สามารถพิจารณาได้ว่าพื้นหลักฐานทั้งสองเหมือนกัน (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

การรังวัดพิกัดด้วยระบบดาวเทียม GPS (Coordinate surveying using GPS)

เทคโนโลยีในการกำหนดตำแหน่งและหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียม GPS ในปัจจุบันได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีการนำระบบดาวเทียม GPS ไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ อย่างมากมาย ทั้งในด้านการนำหน (Navigation) ที่ต้องการความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งไม่มากนัก จนถึงงานสร้างหมุดควบคุมโครงข่าย หรืองานทางด้านวิศวกรรม และงานทางด้านวิทยาศาสตร์เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งต้องการความถูกต้องของค่าพิกัดตำแหน่งในระดับ เซนติเมตร และมีลิเมตรตามลำดับ ซึ่งมีเอกสารที่เกี่ยวข้องกับระบบ GPS ทั้งในทางทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ออกเผยแพร่อย่างมากมาย ในเอกสารการวิจัยนี้จึงไม่กล่าวถึงรายละเอียดทางทฤษฎีของระบบดาวเทียม GPS แต่จะกล่าวเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้ (อนุเทพ ภาณุมาศตระกูล, 2543)

1. การหาค่าพิกัดแบบจุดเดียว (Single Point Positioning)

โดยทั่วไปจะเรียกรังวัดการหาค่าพิกัดแบบจุดเดียวโดยย่อว่า SPP วิธีนี้เป็นการรังวัดที่ใช้เครื่องรับสัญญาณเพียง 1 เครื่อง ไปวางตรงจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ซึ่งจะใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudorange) มาประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดแบบทันที ด้วยข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudorange) เป็นข้อมูลพื้นฐานที่รับได้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ทุกชนิด ดังนั้นจึงนิยมใช้เครื่องรับสัญญาณแบบมือถือ (Handheld Receiver) นำมาหาค่าพิกัดในลักษณะนี้เนื่องจากมีราคาถูก ส่วนค่าความถูกต้องที่ได้รับจากวิธีการนี้จะอยู่ระหว่าง 10 - 20 เมตร

2. การหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ (Relative Positioning)

เป็นการรังวัดที่ใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งจะตั้งอยู่ที่จุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด เช่น หมุดหลักฐานกรมแผนที่ทหาร หรือหมุดหลักฐานกรมที่ดิน เป็นต้น ส่วนเครื่องรับอีกเครื่องหนึ่งจะถูกนำไปตั้งบนจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ผลที่ได้จากการทำงานในลักษณะนี้ คือ ตำแหน่งเปรียบเทียบระหว่างจุดที่หนึ่งกับจุดสองหรือเป็นเส้นฐานที่มีทิศทางระหว่างจุดที่นำเครื่องรับทั้งสองไปตั้ง วิธีการนี้สามารถใช้ได้ทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์และข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง ในการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัด ในกรณีที่ใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ในการหาค่าพิกัด โดยทั่วไปเรียกรังวัดนี้ว่า Pseudorange Based Differential GPS (DGPS) ค่าความถูกต้องที่ได้รับจากการรังวัดด้วยวิธีนี้อยู่ระหว่าง 0.5 – 5 เมตร และในกรณีที่ใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งในการคำนวณหาค่าพิกัด ค่าความถูก

ต้องที่ได้จะอยู่ระหว่าง 1 – 5 เซนติเมตร ซึ่งการใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งมาคำนวณหาค่าพิกัดนั้นจะใช้ได้กับเครื่องรับสัญญาณแบบรังวัดเท่านั้น วิธีการรังวัดในสนามเพื่อหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งที่ปฏิบัติกันในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็นวิธี ดังนี้

3. การรังวัดแบบสถิต (Static Survey)

วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งจะถูกตั้งไว้ที่หมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้วหรือเรียกว่าสถานีฐาน (Based) ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปตั้งรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดหรือเรียกว่าสถานีจร (Rover) วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกัน อย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่งโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1 – 2 ชั่วโมง วิธีการนี้จะเป็นวิธีที่ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุด คือ อยู่ระหว่าง 5 มิลลิเมตร – 2.5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 20 กิโลเมตร)

อนุเทพ ภาณุมาศตระกูลได้อธิบายถึงการทำงานรังวัดแบบสถิตไว้ดังนี้ “การทำงานรังวัดแบบสถิต เป็นวิธีการทำงานที่เครื่องรับไม่มีการเคลื่อนที่ เครื่องรับจะถูกตั้งไว้ที่จุดปลายของเส้นฐานที่ต้องการหาความยาวหรือตำแหน่งสัมพัทธ์ ระยะเวลาที่รับสัญญาณคือ ระยะเวลาที่นานเพียงพอที่จะนำมาหาค่าเลขปริศนาได้ตามเกณฑ์ความถูกต้องที่ต้องการ ระยะเวลาที่ทำงานรังวัดขึ้นอยู่กับความยาวเส้นฐาน จำนวนดาวเทียมรวมทั้งเรขาคณิตของดาวเทียมด้วย”

4. การรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Rapid Static Survey)

วิธีการนี้เหมือนกับวิธีการรังวัดแบบสถิตทุกประการ เพียงแต่ระยะเวลาในการรับสัญญาณจะสั้นลงเหลือประมาณ 10 – 20 นาที วิธีการนี้จะให้ค่าความถูกต้องระหว่าง 1 – 3 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร)

5. การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic Survey)

วิธีการนี้ถูกเรียกว่า RTK ซึ่งหลักการการทำงานของวิธีการรังวัดหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ด้วยวิธีการทำงานแบบจลน์ในทันทีนั้นคล้ายคลึงกับวิธีการแบบสถิต คือ ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องที่หนึ่งตั้งอยู่บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองถูกนำไปตั้งรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด แต่กรณีของวิธีการหาค่าพิกัดแบบจลน์ในทันทีนั้นสามารถเคลื่อนย้ายเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่สองได้เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารระหว่างเครื่องรับทั้งสอง ซึ่งอาจเป็นเครื่องรับและส่งคลื่นวิทยุหรือโทรศัพท์มือถือ การหาค่าพิกัดของตำแหน่งจุดต่าง ๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง และเครื่องรับสัญญาณที่ใช้จะต้องเป็น

เครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่เท่านั้น วิธีการนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1-5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นทางที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร)

การออกแบบโครงข่ายและการรังวัด

ในการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียม GPS อุปสรรคในเรื่องการมองเห็นกัน (Line of Sign) ระหว่างหมุดหลักฐานจะไม่เป็นผลกระทบต่อการรังวัดโครงข่ายอีกต่อไป ในการออกแบบโครงข่ายจึงควรเพิ่มความสนใจในส่วนอื่น ๆ เช่นการเลือกจุดควบคุม การสละและป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ระยะเวลาที่เหมาะสมในการรังวัดเป็นต้น ทุกๆสถานีในโครงข่ายจะต้องมีการเชื่อมต่อโยงชิดกันเข้ากับสถานีควบคุมที่มีความละเอียดถูกต้องสูงเพียงพอที่จะสร้างความเชื่อมั่นในระดับ 95% ว่าจะไม่เกิดความคลาดเคลื่อนเกินเกณฑ์ สถานีควบคุมควรมีการจัดวางตัวกระจายครอบคลุมพื้นที่และมีจำนวนมากเพียงพอที่จะควบคุมโครงข่ายได้อย่างเหมาะสม คือ ในการปรับแก้โครงข่ายทั้งทางราบและทางดิ่งพร้อมกัน จะต้องมีสถานีควบคุมทางราบ อย่างน้อย 2 สถานี และทางดิ่ง 3 สถานี และต้องทราบค่าพิกัดที่อ้างอิงอยู่บนพื้นหลักฐานเดียวกัน

การพิจารณาเลือกค่าการรังวัดหรือเส้นทาง หากมีการเลือกเส้นทางที่ไม่เป็นอิสระ ประกอบเข้ามาในโครงข่ายจะส่งผลกระทบต่อการปรับแก้คือ ทำให้ค่า Degree of Freedom ผิดไป การคำนวณค่าทางสถิติของการปรับแก้ย่อมที่จะคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง สำหรับจำนวนเครื่องรับสัญญาณที่รังวัดพร้อมกันหลายเครื่องในแต่ละห้วงเวลาการรังวัด จะมีจำนวนเส้นทางทั้งสิ้น $n \cdot ((n-1)/2)$ เมื่อ n คือ จำนวนเครื่องรับ แต่จะมีเพียงเส้นทาง $n-1$ เส้นทาง ที่ถูกเลือกและนำเข้าในการปรับแก้

การรังวัดข้อมูลที่มากเพียงพอ สามารถช่วยเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล และการรังวัดซ้ำในช่วงเวลาที่แตกต่างกันจะเพิ่มศักยภาพในการลดค่าความคลาดเคลื่อนอันเป็นระบบ เช่น คลื่นสะท้อน (Multipath) การหักเหในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แม้ว่าการรังวัดจะกระทำคนละวัน ก็ควรรังวัดต่างช่วงเวลาขึ้น เพื่อที่จะได้ข้อมูลจากความเข้มที่แตกต่างกัน

ในทางทฤษฎีการสร้างเส้นทางจากข้อมูลที่มีอยู่นั้นควรสร้างเฉพาะเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกัน (Independent Baselines) เท่านั้น (เฉลิมชนม์ สติระพจน์, 2546; Hofmann-Wellenhof, 1997; Rizos, 1997) และจำนวนเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกันเป็นดังสมการ

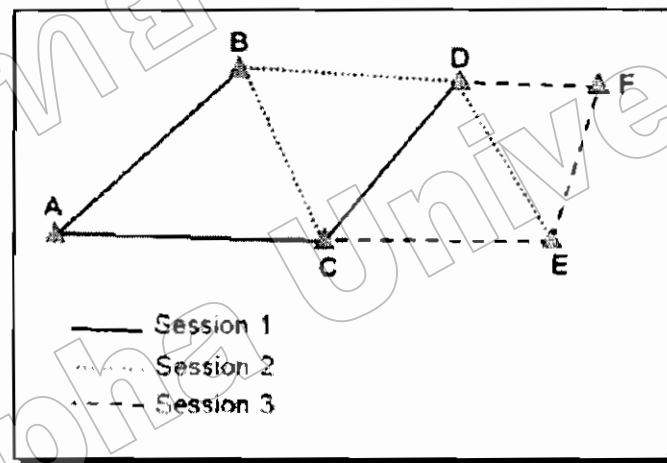
$$\text{จำนวนเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกัน} = (s - 1)$$

ด้วยเหตุนี้การสร้างโครงข่าย GPS จะทำได้โดยการสร้างเส้นทางที่เป็นอิสระต่อกันจากแต่ละช่วงการรับสัญญาณมาเชื่อมต่อกัน (ภาพที่ 2-21) แสดงตัวอย่างของการสร้างเส้นทางที่เป็น

อิสระต่อกันในแต่ละช่วงการรับสัญญาณและนำมาประกอบรวมเป็นโครงข่าย โดยสมมุติให้มีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม จำนวน 4 เครื่อง และแบ่งการรับสัญญาณดาวเทียมออกเป็น 3 ช่วงการรับสัญญาณ โดยแต่ละช่วงการรับสัญญาณมีการตั้งเครื่องรับสัญญาณดังนี้

1. ช่วงการรับสัญญาณที่ 1 ทำการตั้งเครื่องรับสัญญาณที่จุด A B C และ D
2. ช่วงการรับสัญญาณที่ 2 ทำการตั้งเครื่องรับสัญญาณที่จุด B C D และ E (ย้ายเครื่องที่ A ไปตั้งที่ E)
3. ช่วงการรับสัญญาณที่ 3 ทำการตั้งเครื่องรับสัญญาณที่จุด C D E และ F (ย้ายเครื่องที่ B ไปตั้งที่ F)

จากสมการเราสามารถเลือกเส้นฐานที่เป็นอิสระต่อกันในแต่ละช่วงการรับสัญญาณได้ 3 เส้นฐาน ที่เป็นอิสระต่อกันในแต่ละช่วงการรับสัญญาณ



ภาพที่ 2-21 การสร้างโครงข่าย GPS จากเส้นฐานที่เป็นอิสระต่อกัน (เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ, 2552, หน้า 233)

การตรวจสอบเครื่องมือก็เป็นข้อพิจารณาที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนได้ แต่ละชิ้นส่วนควรได้รับการตรวจสอบอย่างเหมาะสมและสม่ำเสมอ การรังวัดที่ต้องการความถูกต้องของค่าพิกัดที่ดีกว่า 0.02 เมตร เครื่องมือควรได้รับการตรวจสอบก่อนการรังวัดไม่เกิน 30 วัน และตรวจสอบซ้ำอีกครั้งในระยะเวลาไม่เกิน 10 วัน หลังจากการปฏิบัติงาน และเพื่อการใช้งานในระยะยาวควรตรวจสอบทุก ๆ 30 วัน สำหรับการรังวัดประเภทอื่น ๆ ควรตรวจสอบเครื่องมือทุก ๆ 6 เดือน

การปรับแก้โครงข่าย

โดยทั่วไปการทำงานสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียม GPS เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องรับสัญญาณจำนวนหนึ่งมาทำการหาค่าพิกัดของจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด ซึ่งโดยมากจะมีจำนวนจุดที่มากกว่าจำนวนเครื่องรับสัญญาณที่มีอยู่ และพื้นที่ในการทำงานอาจมีตั้งแต่ขนาดเล็ก มีความกว้างความยาวไม่กี่กิโลเมตร ไปจนถึงพื้นที่ขนาดใหญ่ที่มีความกว้างยาวหลายร้อยกิโลเมตร ในงานสำรวจรังวัดเพื่อสร้างหมุดควบคุมหลัก นั้นจะเกี่ยวข้องกับการรังวัดเส้นฐานที่มีความยาวหลายสิบกิโลเมตร และต้องการค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับเซนติเมตรหรือมิลลิเมตร ส่วนใหญ่มักจะใช้การกำหนดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ ด้วยวิธีการรังวัดแบบสถิต (Static) ในการสร้างเส้นฐาน เช่นเดียวกับงานสำรวจรังวัดภาคพื้นดินทั่วไป การทำงานสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียม GPS ต้องการการตรวจสอบที่ต้องอาศัยข้อมูลที่มีมากกว่าความต้องการขั้นต่ำ ในกรณีนี้ก็เช่นกันเรามักทำการออกแบบการทำงานให้มีการสร้างเส้นฐานที่มากกว่าความต้องการขั้นต่ำหรือเรียกสั้น ๆ ว่า เส้นฐานเผื่อ (Redundant Baseline) และเพื่อให้การตรวจสอบผลลัพธ์ทำได้ง่ายยิ่งขึ้นก็ควรจะมีการออกแบบลักษณะการต่อเชื่อมของเส้นฐานให้เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนรูปปิดย่อย ๆ (Small Loops) อยู่ภายในให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อย่างไรก็ตามในการออกแบบโครงข่ายที่เหมาะสมควรจะคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาการทำงานในภาคสนาม เป็นต้น เมื่อนำเส้นฐานที่ได้มาประกอบกันเป็นโครงข่ายก็จะต้องมีขั้นตอนการปรับแก้โครงข่ายด้วยกำลังสองน้อยที่สุดโดยวิธีสมการค่าสังเกต

1. การปรับแก้โครงข่าย GPS แบบลิสต์สแควร์

ในการปรับแก้เพื่อหาตำแหน่งค่าพิกัดทางราบและทางตั้งของ GPS แบบลิสต์สแควร์เป็นการใช้วิธีการของสมการค่าสังเกต ที่สามารถกระทำได้ง่ายกว่าวิธีการของสมการเงื่อนไขที่จำเป็นต้องมีการคิดและตรวจสอบไม่ให้เงื่อนไขที่สร้างขึ้นมีความซ้ำซ้อน ข้อด้อยของวิธีสมการค่าสังเกตคือจะทำให้เกิดระบบสมการสำหรับการคำนวณที่มีขนาดใหญ่ แต่ปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันแทบจะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานปรับแก้เพราะทรัพยากรทางด้านหน่วยความจำ และระบบการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว

สมการค่าสังเกต สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่ปรับแก้แล้วได้ดังนี้

$$L_a = F(X_a)$$

เมื่อ L_a เป็นค่าสังเกตของเส้นฐาน

X_a เป็นตัวแปรของค่าพิกัดที่ได้จากการปรับแก้

จากสมการค่าสังเกต $La = F(Xa)$ สามารถเขียนเป็นสมการในการปรับแก้โครงข่าย ในระบบพิกัดฉากสามมิติ ของเส้นฐานระหว่างคู่สถานี i และ j ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{pmatrix}$$

2. ค่าความแปรปรวนร่วม (Variance Covariance)

ค่าความแปรปรวนร่วม (Qx) เป็นการแสดงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อตัวแปรอื่น เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากข้อมูลรังวัดที่มีความสัมพันธ์กัน

ในสมการค่าสังเกต $La = F(Xa)$ สามารถแสดงเป็นสมการของค่าความแปรปรวนร่วมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_x &= N^{-1} \\ N &= A^T P A \\ A &= \frac{\partial F}{\partial X_a} \end{aligned}$$

P = เมตริกของค่าน้ำหนัก

3. การวิเคราะห์ทางสถิติจากผลการปรับแก้

การปรับแก้แบบลีสทส์สแควร์ เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จำเป็น เพื่อการวิเคราะห์ผลข้อมูลและค่าพิกัดตำแหน่ง ปัจจัยสำคัญของการปรับแก้โครงข่ายคือ การปรับแก้เพื่อตรวจสอบความเข้ากันของข้อมูลการรังวัดภายในโครงข่าย และการปรับแก้เพื่อโยงยึดเข้ากับหมุดควบคุม ซึ่งผลที่ได้จากการปรับแก้ทั้งสองลักษณะควรได้รับการพิจารณาอย่างถี่ถ้วน ค่าทางสถิติที่จำเป็นต้องตรวจสอบมีดังต่อไปนี้

1. The Network Variance Unit Weight (Variance Factor) และ Degree of Freedom โดยค่า Variance Factor จะต้องน้อยกว่า 1.5 และเข้าใกล้ 1.0
2. The RMS ค่ารากกำลังที่สองของเศษคงเหลือที่น้อยที่สุดและมากที่สุด
3. ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลค่าพิกัด
4. ค่าผลการทดสอบ Tukey Criterion ค่าที่เกินเกณฑ์ควรจะขจัดออกจากการปรับแก้

5. การทดสอบ Chi Square เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองปริมาณความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่มีความเหมาะสม เมื่อมีการกำหนดค่าควบคุมจากภายนอก

6. การตรวจสอบค่าพิกัดและค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละสถานี โดยค่าความคลาดเคลื่อนควรคำนวณที่ 95% (1.96 Sigma)

7. การตรวจสอบ Error Ellipsoid รูปร่างที่ใกล้เคียงวงกลมและมีขนาดเล็กแสดงถึงสถานะที่ดีของโครงข่าย รูปร่างที่ไม่แน่นอนและมีขนาดใหญ่ชี้ให้เห็นถึงปัญหาของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่และโครงข่ายที่ไม่ดี

การตรวจสอบค่าพิกัดของจุดควบคุม โดยการปรับแก้แบบ Free Adjustment หรือ Minimally Constrained Adjustment เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ของข้อมูลการรังวัดและเปรียบเทียบผลของค่าพิกัดที่ได้รับค่าพิกัดของสถานีควบคุมที่ทราบค่าพิกัดแล้วเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าพิกัดของสถานีควบคุม

การรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing: RS)

ความหมายของการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing: RS) ในภาษาไทยมีคำแปลที่ใช้กันอยู่หลายคำ ได้แก่ “การรับรู้ระยะไกล” “การสำรวจข้อมูลจากระยะไกล” “โทรสัมผัส” และ “โทรนิทัศน์” เป็นต้น โดยราชบัณฑิตยสถานใช้คำว่า “การรับรู้จากระยะไกล” (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)

การรับรู้จากระยะไกล เป็นวิทยาศาสตร์และศิลปะของการได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุพื้นผิว และปรากฏการณ์บนพื้นโลก จากเครื่องรับรู้ (Sensor) โดยปราศจากการเข้าไปสัมผัสวัตถุเป้าหมาย ทั้งนี้อาศัยพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Energy) เป็นสื่อในการได้มาของข้อมูลซึ่งมีคุณสมบัติ 3 ประการ คือ ลักษณะการสะท้อนช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Spectral Characteristics) ลักษณะเชิงพื้นที่ของวัตถุบนพื้นผิวโลก (Spatial Characteristics) และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวัตถุตามช่วงเวลา (Temporal Characteristics)

เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล ทำให้สามารถศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงทั้งในเชิงพื้นที่ (Spatial) และเชิงเวลา (Temporal) ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งในปัจจุบันยังสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วทั้งในระดับท้องถิ่นจนถึงระดับโลก การรับรู้จากระยะไกลและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ สำหรับการวางแผนจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม จำเป็นต้องรู้ข้อเท็จจริงของทรัพยากรธรรมชาติในสถานการณ์ปัจจุบัน การรับรู้จากระยะไกล เป็นวิวัฒนาการด้านหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการสำรวจข้อมูลที่ให้รายละเอียดเกี่ยวกับสภาพการณ์ปัจจุบัน และ

การเปลี่ยนแปลงได้อย่างประหยัด และรวดเร็วอันเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และวางแผน
แก้ปัญหาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ

การใช้ข้อมูลการรับรู้จากระยะไกลในการจัดทำแผนที่ ทำให้ผู้ใช้มีโอกาสได้ข้อมูล
บริเวณเดิมอย่างสม่ำเสมอ ปัจจุบันข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล มีความละเอียดสูงกว่าเดิม ทำให้
ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ได้ตามวัตถุประสงค์ และมาตราส่วนที่ต้องการมาตราส่วนของแผนที่เป็นปัจจัย
จำกัดในการเลือกใช้ข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล การสร้างแผนที่จึงควรเลือกรายละเอียดของข้อมูล
ให้เหมาะสม เกณฑ์การเลือกข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล ได้แก่ รายละเอียดของข้อมูล มาตราส่วน
ของแผนที่ วันบันทึกข้อมูล ช่วงคลื่นแสงที่เหมาะสม

1. ภาพถ่ายดาวเทียม (Satellite Image)

เป็นข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ที่สามารถสร้างขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ภาพของพื้นผิวภูมิ
ประเทศจะถูกบันทึกด้วยเซนเซอร์ดิจิทัล ภาพที่ได้จะแสดงถึงลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวโลก
เช่น สิ่งปกคลุม การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในแผนที่ภาพถ่ายที่เป็นมาตราส่วนใหญ่ เช่น มาตราส่วน
1:1,000 ถึง 1:4,000 และแผนที่มาตราส่วนกลาง ที่ครอบคลุมมาตราส่วนตั้งแต่ 1:10,000 ถึง
1:50,000 ผู้ใช้จะสามารถมองเห็นสิ่งปกคลุมพื้นผิวโลก การใช้ที่ดินรวมถึง สาธารณูปโภคต่าง ๆ
เช่น อาคารบ้านเรือน โรงงาน สนามบิน เป็นต้น เมื่อทำการประมวลผลภาพเหล่านี้ประกอบกับ
ข้อมูลพื้นฐานบางอย่างบนพื้นดินก็จะทำให้ได้แผนที่ภาพ ที่ผู้ใช้สามารถรังวัดตำแหน่ง ขนาด และ
รูปร่างของสิ่งต่าง ๆ ที่ปรากฏบนแผนที่ภาพได้ เช่นเดียวกับการใช้แผนที่ลายเส้นหรือแผนที่ภูมิ
ประเทศ (สำนักสำรวจด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยา, 2551)

2. ภาพถ่ายทางอากาศ (Aerial Photograph)

รัชช บวรวิทย์ และบัญชา ภูเจริญไพบุลย์ (2548) ได้กล่าวว่า เป็นภาพที่ได้จากการถ่ายภาพ
จากอากาศยาน เช่น บอลลูน เครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์ หรือยานอวกาศ เป็นต้น ภาพถ่ายดังกล่าวถือว่า
มีประโยชน์อย่างยิ่งในทางทหารทั้งในยามสงครามและยามสงบ ถ้าหากเราพิจารณาถึงแผนที่
ลักษณะภูมิประเทศที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้แล้วจะพบว่าค่อนข้างจะล้าสมัยมากถ้าหากแผนที่ฉบับ
นั้นได้สร้างมาเป็นเวลานานแล้ว แต่ภาพถ่ายทางอากาศจะแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวซึ่ง
แผนที่ไม่สามารถจะทำได้

การทำแผนที่ภาพถ่าย

โชตินารถ รัตนสาขา, พรพรรณ แสนบุญศิริ และศุดาวรรณ ไวกจริญ. (2546) ได้อธิบาย
การทำแผนที่ภูมิประเทศด้วยวิธีภาพคณิต ว่าเป็นการผลิตแผนที่โดยการถ่ายภาพทางอากาศที่มี
ส่วนซ้อนทับด้านหน้า (Overlap) ร้อยละ 60 และส่วนซ้อนทับด้านข้าง (Slide Lap) ร้อยละ 30

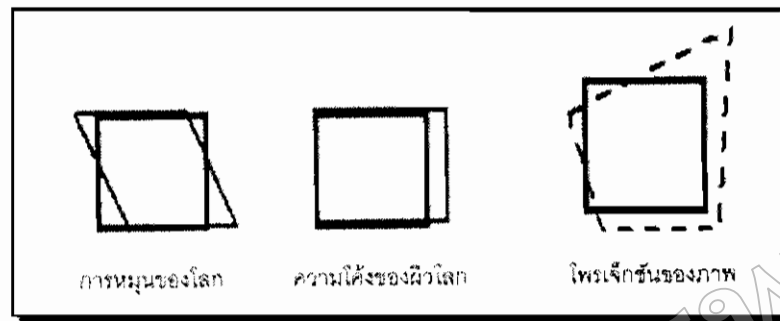
นำมาจัดเรียงให้เกิดเป็นแบบจำลองสามมิติ ใช้ร่วมกับค่าพิกัดและค่าระดับของหมุดบังคับภาพภาคพื้นดิน (Ground Control Points: GCPs) ที่ทำการสำรวจภาคสนาม เพื่อนำมาปรับมาตราส่วนและปรับระดับความสูงของแบบจำลอง ให้สอดคล้องและถูกต้องตรงกับลักษณะภูมิประเทศ แล้วทำการถ่ายทอดรายละเอียดลักษณะภูมิประเทศที่ปรากฏ ให้เป็นแผนที่ภูมิประเทศตามมาตราส่วนที่ต้องการ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องสูง รวดเร็ว และประหยัดงบประมาณ โดยเฉพาะโครงการที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ๆ และสภาพภูมิประเทศทุรกันดาร ทั้งยังเป็นการศึกษาถึงความเหมาะสมของการใช้ข้อมูลแผนที่ที่มีอยู่ และเทคโนโลยีการทำแผนที่ เพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และแผนที่ซึ่งถือเป็นเครื่องมือสำหรับการใช้ในการวางแผน ตลอดจนแผนปฏิบัติการ โดยทั่วไปประกอบด้วย แผนที่ภาพ (Image Map) ข้อมูลความสูงต่ำของภูมิประเทศ (Digital Elevation Model: DEM) แผนที่ทางน้ำ เส้นทางคมนาคม แผนที่อาคารบ้านเรือน ตลอดจนตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ มีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจแก้เชิงเรขาคณิต (Geometric Correction)

ก่อนนำข้อมูลภาพถ่ายไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องปรับแก้เชิงเรขาคณิต เพราะพิกัดตำแหน่งของวัตถุต่าง ๆ มีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง เนื่องจากความบกพร่องทางเครื่องรับสัญญาณและรูปลักษณะของวัตถุ การตรวจแก้เชิงเรขาคณิตมีความจำเป็นมากยิ่งขึ้นเมื่อต้องการนำข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล ไปใช้งานร่วมกับข้อมูลเชิงแผนที่อื่น ๆ เพื่อให้สามารถซ้อนทับกันได้หรือหากต้องการศึกษาปรากฏการณ์บางอย่างในหลายช่วงเวลา การเปรียบเทียบข้อมูลแต่ละช่วงเวลาต้องมีระบบพิกัดเดียวกันจึงจะสามารถซ้อนข้อมูลแต่ละเวลาลงกันได้สนิทจำเป็นต้องทำการปรับแก้เชิงเรขาคณิต (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552) และสมพร สง่าวงศ์ (2552) ได้กล่าวถึงสาเหตุของความบิดเบี้ยวทางเรขาคณิต (Geometric Distortion) คือ ความผิดพลาดซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากพิกัดของภาพไม่เป็นไปตามระบบพิกัดแผนที่ ความบิดเบี้ยวเชิงเรขาคณิตมี 2 ลักษณะ คือ

1.1 ความบิดเบี้ยวแบบไม่เป็นระบบ (Non-Systematic Distortions)

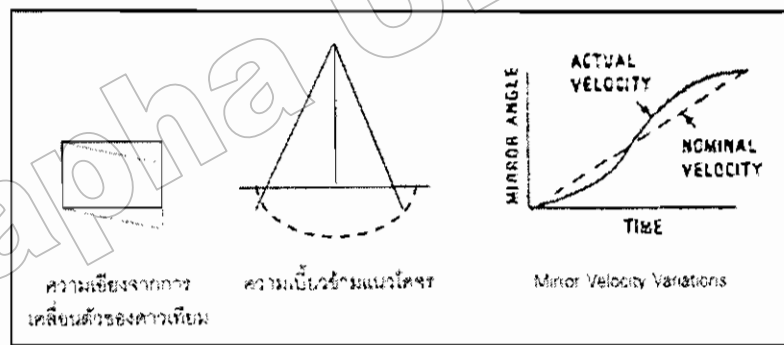
เป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ไม่เหมือนกันและไม่เท่ากันในแต่ละภาพ ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้ มีสาเหตุมาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การหมุนรอบตัวเองของโลก (Earth Rotation) ความโค้งของโลก (Earth Curvature) ความเร็วในการโคจรของดาวเทียม การเปลี่ยนแปลงของระดับความสูง (Altitude Variation) การเปลี่ยนแปลงของการทรงตัวของดาวเทียม และ โพรเจกชันของภาพดาวเทียม (ภาพที่ 2-22)



ภาพที่ 2-22 ประเภทของความบิดเบี้ยวแบบไม่เป็นระบบ (Non-Systematic Distortions)
(สมพร สง่าวงศ์, 2552)

1.2 ความบิดเบี้ยวแบบเป็นระบบ (Systematic Distortion)

เป็นความบิดเบี้ยวที่เกิดจากเครื่องกวาดภาพ (Scanner Distortion) และความเร็วของการกวาดวงของกระจก (Scanning Velocity) การเปลี่ยนแปลงความเร็วของเครื่องกวาดภาพในขณะที่ทำการบันทึกภาพนั้น เกิดจากกระจกหมุนของเครื่องกวาดซึ่งมักจะ ไม่คงตัวตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนกระทั่งจุดสุดท้ายของแต่ละเส้นที่กวาดผ่าน ไปบนพื้นที่ภายใต้การสำรวจ (ภาพที่ 2-23)



ภาพที่ 2-23 ประเภทของความบิดเบี้ยวแบบเป็นระบบ (Systematic Distortions)
(สมพร สง่าวงศ์, 2552)

ความบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นทั้ง 2 แบบมีผลทำให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลภาพลดลง จึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ก่อนที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ การจัดความผิดพลาดดังกล่าวจึงทำให้ได้ภาพที่มีความถูกต้องตรงกับข้อมูลภาคพื้นดิน หรือแผนที่ภูมิประเทศ ในขณะที่เดียวกันก็ปรับขนาดของข้อมูลภาพใหม่ โดยทั่วไปแล้วก็คือเป็นการเปลี่ยนแปลงข้อมูล

นำเข้าให้เป็นข้อมูลชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างตลอดจนรายละเอียดจุดภาพที่แตกต่างกันไปตามต้องการ

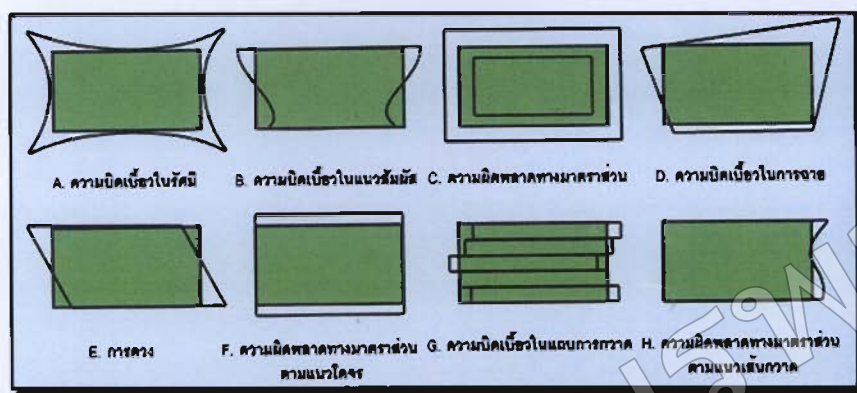
2. ความบิดเบี้ยวภายใน (Internal Distortion)

มีสาเหตุมาจากความบกพร่องของอุปกรณ์ในเครื่องวัดสัญญาณ เช่น ความบิดเบี้ยวในรัศมีของเลนส์ ทำให้บริเวณที่ห่างจากศูนย์กลางภาพมีความบิดเบี้ยวมากขึ้น ความบิดเบี้ยวในแนวสัมผัสของเลนส์ ความผิดพลาดของความยาวโฟกัส การเอียงของระนาบภาพ ความไม่คงที่ของระนาบภาพ ความผิดพลาดในการจัดแนวของแผงรับสำหรับเครื่องวัดแบบแผงเชิงเส้น (Linear Array Sensor) ความไม่คงที่ของอัตราการสุ่มตัวอย่าง ความผิดพลาดของเวลาสุ่มตัวอย่าง ความไม่คงที่ของความเร็วของกระจกกวาด เป็นต้น สรุปสาเหตุของความบิดเบี้ยวภายใน (ตารางที่ 2-3 และภาพที่ 2-24)

ตารางที่ 2-3 ประเภทของความบิดเบี้ยวภายใน

สาเหตุความบิดเบี้ยว	ชนิดเครื่องวัด			พิสัยเชิง (ไมโครเวฟ) (4)
	แบบกรอบ (1)	แบบเส้น (2)	แบบจุด (3)	
ความบิดเบี้ยวในรัศมีของเลนส์	A	A	A	-
ความบิดเบี้ยวในแนวสัมผัสของเลนส์	B	B	B	-
ความผิดพลาดของความยาวโฟกัส	C	C	C	-
การเอียงของระนาบภาพ	D	D	D	-
ความไม่คงที่ของระนาบภาพ	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	-
ความผิดพลาดในการจัดแนวของแผงรับ	-	E	G	-
ความไม่คงที่ของอัตราการสุ่มตัวอย่าง	-	F	H	F/H
ความผิดพลาดของเวลาสุ่มตัวอย่าง	-	-	G	-
ความไม่คงที่ของความเร็วของกระจกกวาด	-	-	H	-

หมายเหตุ: (1) กล้องถ่ายภาพ (2) ข้อมูล SPOT ระบบ HRV (3) ข้อมูล LANDSAT ระบบ TM (4) ข้อมูล RADARSAT (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์ (องค์การมหาชน), 2552)



ภาพที่ 2-24 ความบิดเบี้ยวภายในรูปแบบต่างๆ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)

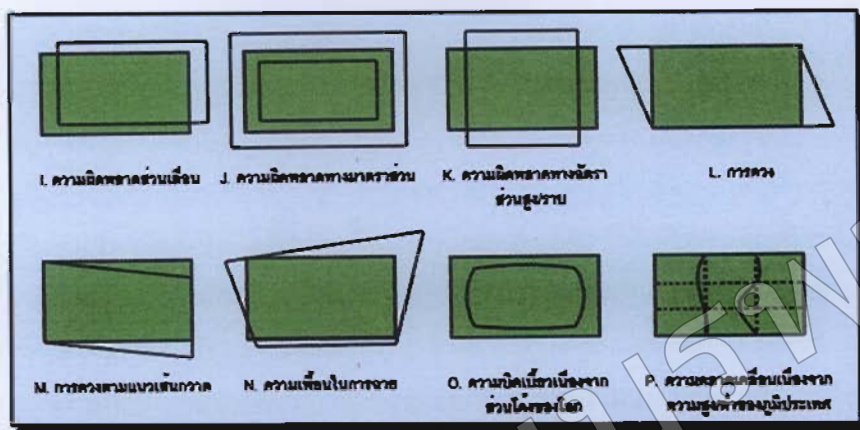
3. ความบิดเบี้ยวภายนอก (External Distortion)

มีสาเหตุหลายประการ เช่น จากการทรงตัวของเครื่องวัด ความไม่คงที่ของการทรงตัว ความโค้งและการเคลื่อนที่ของโลก การหมุนของโลก บรรยากาศและการหักเหของชั้นบรรยากาศ ความผิดพลาดเชิงระนาบของยาน ความผิดพลาดทางระดับความสูงของยาน การเคลื่อนที่ทางตำแหน่งวงโคจร ความโค้งของผิวโลก ความสูงของพื้นผิว และรูปร่างของวัตถุ เป็นต้น สรุปสาเหตุของความบิดเบี้ยวภายนอก (ตารางที่ 2-4 และภาพที่ 2-25)

ตารางที่ 2-4 ประเภทของความบิดเบี้ยวภายนอก

สาเหตุความบิดเบี้ยว	ชนิดเครื่องวัด			
	ชนิดการฉายจากศูนย์กลาง			แบบพิกัดเชิง (ไมโครเวฟ) (4)
	แบบกรอบ (1)	แบบเส้น (2)	แบบจุด (3)	
ความผิดพลาดเชิงระนาบของยาน	I	I	I	I
ความผิดพลาดเชิงระดับความสูงของยาน	J	J	J	J
การเคลื่อนที่ของตำแหน่งวงโคจร	-	K/L	K/L/M	K/L/M
ระดับความสูงของยาน	N	N	N	N
ความไม่คงที่ของการทรงตัว	-	N	N	N
การหมุนของโลก	-	L	L	L
ความโค้งของโลก	-	P	P	P
ความสูงของพื้นผิว	-	P	P	P
การหักเหของชั้นบรรยากาศ	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น	ไม่เป็นเชิงเส้น

หมายเหตุ: (1) กล้องถ่ายภาพ (2) ข้อมูล SPOT ระบบ HRV (3) ข้อมูล LANDSAT ระบบ TM (4) ข้อมูล RADARSAT (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)



ภาพที่ 2-25 ความบิดเบี้ยวภายนอกรูปแบบต่าง ๆ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)

4. วิธีการตรวจแก้เชิงเรขาคณิต

หลักการตรวจแก้โดยการสร้างความสัมพันธ์ของระบบพิกัดระหว่างข้อมูลที่ปรับแก้ (Rectified Image) กับระบบพิกัดภูมิศาสตร์ของข้อมูลอ้างอิง (Reference Image) เพื่อที่พิกัดของข้อมูลที่ต้องการตรวจแก้ ถูกเปลี่ยนให้เป็นระบบพิกัดใหม่ตามระบบพิกัดของข้อมูลอ้างอิงจะเป็นข้อมูลจากระยะไกลเช่นเดียวกันก็ได้ เช่น ในกรณีที่ต้องการศึกษาข้อมูลในพื้นที่เดียวกันแบบหลายช่วงเวลา ในกรณีนี้เรียกว่า เป็นการตรวจแก้ระหว่างภาพกับภาพ (Image to Image Correction) หรือข้อมูลอ้างอิงอาจเป็นแผนที่ภูมิประเทศหรือแผนที่เฉพาะเรื่อง ที่มีระบบพิกัด หากต้องการนำข้อมูลจากระยะไกลไปศึกษาร่วมกับข้อมูลแผนที่อื่น ๆ หรือเพื่อเปรียบเทียบกับสภาพจริงในพื้นที่ศึกษา ในกรณีนี้เรียกว่า การตรวจแก้ระหว่างภาพกับแผนที่ การตรวจแก้เชิงเรขาคณิตมีวิธีการ 3 วิธี ดังต่อไปนี้

4.1 การตรวจแก้แบบมีระบบ (Systematic Correction)

เป็นการปรับแก้ตามค่าอ้างอิงเชิงเรขาคณิตต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ก่อนแล้วทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้อย่างมีระบบ เช่น เรขาคณิตของรูปถ่ายชนิดเลนส์ จะถูกกำหนดโดยสมการร่วมเชิงเส้นด้วยความยาวโฟกัสที่ปรับเทียบแล้ว การตรวจแก้เชิงสัมผัสผิว (Tangent Correction) ของเครื่องกวาดภาพแบบกลเชิงแสง ก็จัดอยู่ในการตรวจแก้แบบมีระบบโดยทั่วไป การตรวจแก้แบบมีระบบสามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ทั้งหมด การคำนวณตรวจแก้เชิงเรขาคณิตสำหรับข้อมูลจากระยะไกล มักจะทำมาแล้วในระดับหนึ่งจากสถานีรับ และแปลงสัญญาณ เรียกว่าเป็นระดับ Bulk คือ แก้ไขความบิดเบี้ยวจากสาเหตุทั้งแบบภายในและภายนอก แต่พิกัดข้อมูลยังเป็น

ระบบพิกัดของแถวและสดมภ์ของข้อมูลภาพ ตามโครงสร้างข้อมูลแบบเรสเตอร์ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2540, สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)

4.2 การตรวจแก้แบบไม่มีระบบ (Non Systematic Correction)

เป็นการตรวจแก้จากพิกัดของระบบภาพไปสู่ระบบที่มีพิกัด โดยอาศัยสมการหลายตัวแปร (Polynomial Equation) วิธีนี้ต้องมีการหาค่าพิกัดจากจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points : GCPs) ที่รู้ค่าพิกัดจากแผนที่ภูมิประเทศ หรือแผนที่เฉพาะเรื่องที่มีพิกัด หรือจากพิกัดจริง ซึ่งรังวัดได้จากความเที่ยมระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก จุดควบคุมภาคพื้นดินใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบพิกัดภาพและระบบพิกัดภูมิศาสตร์ การคำนวณใช้หลักการวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) และสามารถกำหนดระดับความแม่นยำได้จากลำดับการยกกำลัง (Order) ของสมการหลายตัวแปร จำนวนและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552) ลำดับของสมการพอลิโนเมียล ที่ใช้ในการแปลงพิกัดมีให้เลือกหลายลำดับขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศที่ปรากฏในภาพถ่าย สนามุมมองของอุปกรณ์บันทึก และความบิดเบี้ยวของภาพ (สมพร สว่างศ์, 2552) ถ้าลักษณะของภูมิประเทศเป็นที่ราบ จะใช้ลำดับของสมการพอลิโนเมียลลำดับที่ 1 (1st Order Polynomial) แต่ถ้าลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสลับที่ราบหุบเขา ซึ่งจะปรากฏความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความสูงของพื้นที่ ต้องใช้สมการพอลิโนเมียลลำดับที่สูงขึ้น จำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน GCPs ขั้นต่ำที่ต้องการใช้จะเพิ่มขึ้นตามลำดับของสมการพอลิโนเมียล

4.3 การตรวจแก้แบบวิธีผสม (Combined Method)

เป็นการปรับแก้โดยนำวิธีการปรับแก้ทั้งสองแบบข้างต้นมาใช้ร่วมกัน ซึ่งเป็นวิธีการปกติที่นิยมทำกันทั่วไปกับข้อมูลจากระยะไกล โดยการตรวจแก้แบบมีระบบจะถูกคำนวณเสมอที่สถานีรับข้อมูลก่อนจะมีการแจกจ่ายข้อมูลไปสู่ผู้ใช้งาน และการตรวจแก้แบบไม่มีระบบเป็นส่วนที่ทำตามมาโดยผู้ใช้งาน เพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้ โดยมากยอมรับให้มีความผิดพลาดของการปรับแก้ไม่เกินหนึ่งจุดภาพของตำแหน่งจริงของจุดนั้น ๆ ในกรณีของภาพถ่ายดึง (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)

5. การคัดเลือกวิธีการ (Selection of Method)

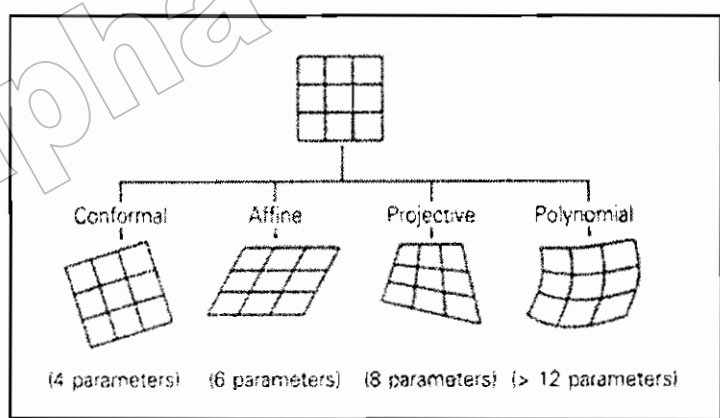
การปรับแก้เชิงเรขาคณิตโดยทั่วไป จำแนกออกได้ 2 วิธี คือ การปรับแก้แบบมีระบบ (System Correction) และการปรับแก้แบบไม่มีระบบ (Non-system Correction) การปรับแก้แบบมีระบบ เป็นการปรับแก้ที่พิจารณาจากสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน เช่น ความโค้งของผิว

โลก ความเพี้ยนของเลนส์กล้อง แล้วใช้ความรู้มาออกแบบกำหนดวิธีการปรับแก้ที่เหมาะสมไว้ล่วงหน้า เช่น เรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพรูปชนิดเลนส์จะถูกกำหนดโดยสมการเชิงเส้น ด้วยความยาวโฟกัสที่ปรับเทียบแล้ว ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของความเพี้ยนของเลนส์กล้อง พิกัดของจุดดัชนีภาพถ่าย (Fiducial Mark) ส่วนการปรับแก้แบบไม่มีระบบนั้น เป็นการปรับแก้ที่ไม่ต้องพิจารณาสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน แต่จะทำการปรับแก้โดยการแปลงพิกัดภาพที่คลาดเคลื่อนให้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยการใช้แผนที่หรือภาพถ่ายที่มีพิกัดถูกต้องในการอ้างอิง (สมพร สง่าวงศ์, 2552)

6. การแปลงค่าพิกัด (Coordinate Transform)

หมายถึง การสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างพิกัดของจุดบนภาพดาวเทียม และตำแหน่งของจุดพิกัดเดียวกันบนแผนที่ภูมิประเทศ หรือภาพถ่าย ที่ใช้ในการอ้างอิงซึ่งมักจะใช้สมการเชิงเส้นตรง (Linear Equation) เนื่องจากมีรูปแบบที่ง่าย และให้ผลลัพธ์ที่ดีพอสมควร หรือใช้สมการพหุนาม (Polynomial Equation) ซึ่งต้องใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องมากกว่าสมการเชิงเส้นตรง ที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำ

การแปลงพิกัดข้อมูลเพื่อให้สอดคล้องกับความบิดเบี้ยวของภาพและจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่านี้มีหลายประเภท (สมพร สง่าวงศ์, 2552) เช่น การแปลงค่าพิกัดแบบขนาน (Affine Transformation) มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 6 ค่า การแปลงแบบพหุนาม (Polynomial Transformation) มีจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่ามากกว่า 12 ค่า (ภาพที่ 2-26)



ภาพที่ 2-26 ประเภทของการแปลงพิกัดข้อมูล (สมพร สง่าวงศ์, 2552)

การแปลงค่าพิกัดแบบขนาน (ภาพที่ 2-27) สามารถปรับแก้ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจาก มาตรการส่วน การหมุน และการเลื่อน ผลลัพธ์จากการแปลงพิกัดแบบขนาน จะทำให้ภาพ

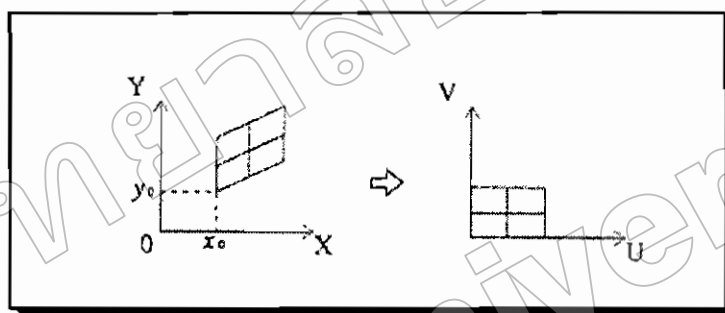
ถูกเปลี่ยนมุมแต่ยังคงรักษารูปร่างพื้นที่ และคุณลักษณะของภาพเดิมไว้ได้ สมการที่ใช้ในการแปลงพิกัด ดังนี้

$$X' = a_0 + b_1X + b_2Y \quad Y' = a_0 + b_3X + b_4Y$$

X, Y คือ ค่าพิกัดของภาพที่นำเข้า

X', Y' คือ ค่าพิกัดของภาพปรับแก้

a_0, b_1, b_2, b_3, b_4 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลง (Transformation Coefficients)



ภาพที่ 2-27 การแปลงพิกัดข้อมูลแบบขนาน (สมพร สว่างศรี, 2552)

การแปลงพิกัดสำหรับการปรับแก้เรขาคณิตแบบไม่มีระบบ จะใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points: GCP) จำนวนหนึ่งมากำหนดรูปแบบของสมการการแปลงเพื่อจัดตำแหน่งทั้งหมดในภาพไปสู่พิกัดใหม่ที่ต้องการซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ 1. การแปลงจากภาพนำเข้าไปยังแผนที่อ้างอิง (Image Mapping) 2. การแปลงจากภาพนำเข้าไปยังภาพอ้างอิง (Image to Image) และ 3. การแปลงภาพนำเข้า เช่น ข้อมูลดาวเทียมกับค่าพิกัดที่บันทึกด้วยเครื่องบอกพิกัดโดยดาวเทียม (Global Positioning System: GPS)

1. การแปลงจากภาพนำเข้าไปยังแผนที่อ้างอิง หมายถึง การแปลงค่าพิกัดจากภาพข้อมูลนำเข้า (Input Image) ไปยังแผนที่อ้างอิง เช่น แผนที่ภูมิประเทศ โดยการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน ซึ่งจะบอกค่าพิกัดในระบบต่าง ๆ เช่น Universal Transverse Mercator: UTM เพื่อใช้ในการแปลงพิกัดภาพ (Image Coordinates) ไปสู่พิกัดแผนที่ (Map Coordinates) GCP ที่ควรเลือกเป็น สิ่งก่อสร้างที่ถาวร เช่น แยกถนน สะพาน จุดตัดทางรถไฟ สนามบิน เป็นต้น GCP ที่ไม่ควรเลือก ได้แก่ โถงแม่น้ำ หรือทางน้ำเนื่องจากมีโอกาสต่อการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา แหล่งข้อมูลภาพ

จากกูเกิลเอิร์ท (Google Earth) สามารถบอกพิกัดของจุดต่าง ๆ ในระบบภูมิศาสตร์บนพื้นหลักฐาน World Geodetic System 1984 (WGS-84) และยังให้รายละเอียดทางด้านพื้นที่ที่ดีสามารถนำมาใช้เป็นภาพอ้างอิงในการปรับแก้ทางเรขาคณิตได้เช่นกัน (สมพร สง่าวงศ์, 2552) ค่าพิกัดเหล่านี้จะนำมาใช้ในการสร้างสมการเส้นตรง เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงพิกัดระหว่างข้อมูลภาพกับข้อมูลแผนที่ เพื่อสร้างผลลัพธ์ภาพใหม่ที่มีความถูกต้องได้

2. การแปลค่าพิกัดจากภาพข้อมูลนำเข้าไปยังภาพอ้างอิง (Image-to-Image Registration) หมายถึง การใช้ภาพหนึ่งเป็นภาพอ้างอิง (Reference Image) ส่วนภาพนำเข้าก็จะถูกนำมาปรับพิกัดเข้ากับภาพที่ใช้อ้างอิง วิธีนี้เหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้กับภาพข้อมูลบริเวณเดียวกันที่ทำการบันทึกต่างช่วงเวลา พิกัดของภาพที่ใช้อ้างอิง จะนำมาใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางตำแหน่งของวัตถุในภาพที่อ้างอิงกับตำแหน่งของวัตถุในภาพนำเข้า ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับการแปลจากภาพนำเข้าไปยังแผนที่อ้างอิง

3. การแปลค่าพิกัดโดยใช้ภาพข้อมูลดาวเทียมกับข้อมูลค่าพิกัด GPS (Image-to-GPS Registration) หมายถึง การใช้ภาพข้อมูลดาวเทียมกับข้อมูลค่าพิกัดเชิงตำแหน่งที่ได้จากการสำรวจภาคสนามด้วย GPS ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะอุปกรณ์สำรวจด้วยดาวเทียม GPS ให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่สามารถนำมาใช้ในการปรับแก้เชิงเรขาคณิตของข้อมูลดาวเทียมซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ เช่น การปรับแก้ภาพดาวเทียม SPOT-5 บริเวณป่าทุ่งเกวียน อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง ให้ตรงกับตำแหน่งภาคพื้นดิน โดยใช้ GCP จำนวน 16 จุด และทำการแปลงค่าพิกัดจากดาวเทียม SPOT-5 สู่อ้างอิงของแผนที่ในระบบ UTM โดยควบคุมความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error: RMSE) ไม่เกิน 1 จุดภาพ (ศูนย์ภูมิภาคเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ ภาคเหนือ, 2549)

4. การพิจารณาจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points: GCP)

การตรวจแก้เชิงเรขาคณิตจะมีความถูกต้องมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การเลือกจุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP เป็นจุดที่ตำแหน่งใดก็ได้บนข้อมูลจากภาพถ่ายที่ปรากฏได้ชัดเจนเป็นจุดเดียวกันบนข้อมูลอ้างอิง จุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP ที่ดีจะต้องเป็นจุดที่มีความคงที่ของรูปทรงโดยเฉพาะในระหว่างเวลาที่มีข้อมูลจากระยะไกลและข้อมูลอ้างอิง ต้องเป็นจุดที่สังเกตได้ง่าย ได้แก่ จุดตัดของวัตถุต่าง ๆ เช่น สี่แยกถนนตัดกัน แปลงนา มุมของอาคาร ฯลฯ จุดที่โดดเด่น เช่น ต้นไม้ในนาข้าว บ้านกลางนาเกลือ พื้นที่หิน โส่บนภูเขาโดดเขา เป็นต้น โดยอาศัยการสังเกตความแตกต่างของค่าความสว่างระหว่างวัตถุที่แตกต่างกันมาพิจารณา จุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP ควรมีจำนวนมากพอ และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ศึกษา มีมากก็ยิ่งดี เพื่อควบคุมการแปลงค่าพิกัดให้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ ถ้าจุดควบคุมภาคพื้นดินไปรวมกลุ่มอยู่เฉพาะบางบริเวณความถูกต้องบริเวณนั้นจะมากกว่าบริเวณที่มีจุดควบคุมภาคพื้นดินน้อยกว่า

5. การตรวจสอบความถูกต้อง (Accuracy Check)

ข้อมูลที่ได้รับจากการสำรวจระยะไกลจำเป็นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้อง (Accuracy Check) สำหรับยืนยันความแม่นยำตามเงื่อนไขที่กำหนด การตรวจสอบความถูกต้องทำได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

5.1 ตรวจสอบการแปลงค่าพิกัด (Geometric Coordinate Transformation) ระหว่างข้อมูลภาพเริ่มต้น (x' , y') และพิกัดภูมิศาสตร์ (x , y) มีการตรวจแก้เชิงเรขาคณิตโดยใช้สูตรของสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าตำแหน่งพิกัดใหม่ กระบวนการนี้เรียกว่า การประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial Interpolation) มีสูตรสมการดังนี้

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y$$

โดยที่ x' = พิกัดของด้านสมมติของข้อมูลนำเข้า (Original Input Image)

y' = พิกัดของด้านแนวของข้อมูลนำเข้า

x = พิกัดของด้านสมมติของข้อมูลภาพผลลัพธ์ (Output Image)

y = พิกัดของด้านแนวของข้อมูลภาพก่อนผลลัพธ์

5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการตรวจแก้ จำนวนโดยใช้สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Regression Method) การหาค่าความถูกต้องจำนวนได้จากกราฟที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนจากแต่ละจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Root Method) การหาค่าความถูกต้องจำนวนได้จากกราฟที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากแต่ละจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Root Mean Square Error = RMS_{error}) มีสูตรคำนวณดังนี้

$$RMS_{error} = \sqrt{(x' - x_{orig})^2 + (y' - y_{orig})^2}$$

โดยที่ RMS_{error} = ค่าความถูกต้องของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

x_{orig} , y_{orig} = ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินในภาพก่อนตรวจแก้

ถ้า RMS_{error} จะบอกได้ว่า จุดควบคุมภาคพื้นดินมีตำแหน่งพิกัดใกล้เคียงกับพิกัดอ้างอิงเพียงใด (มีหน่วยเป็นจุดภาพ) โดยมากยอมรับค่าที่มีค่าบวกหรือลบไม่เกิน 1 จุดภาพ ถ้าค่า RMS_{error} มีค่าสูง หมายความว่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งยังมีมาก สามารถคำนวณเป็นหน่วยเมตริก

โดยนำค่า RMS_{error} คูณกับขนาดของจุดภาพ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ
(องค์การมหาชน), 2552)

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University