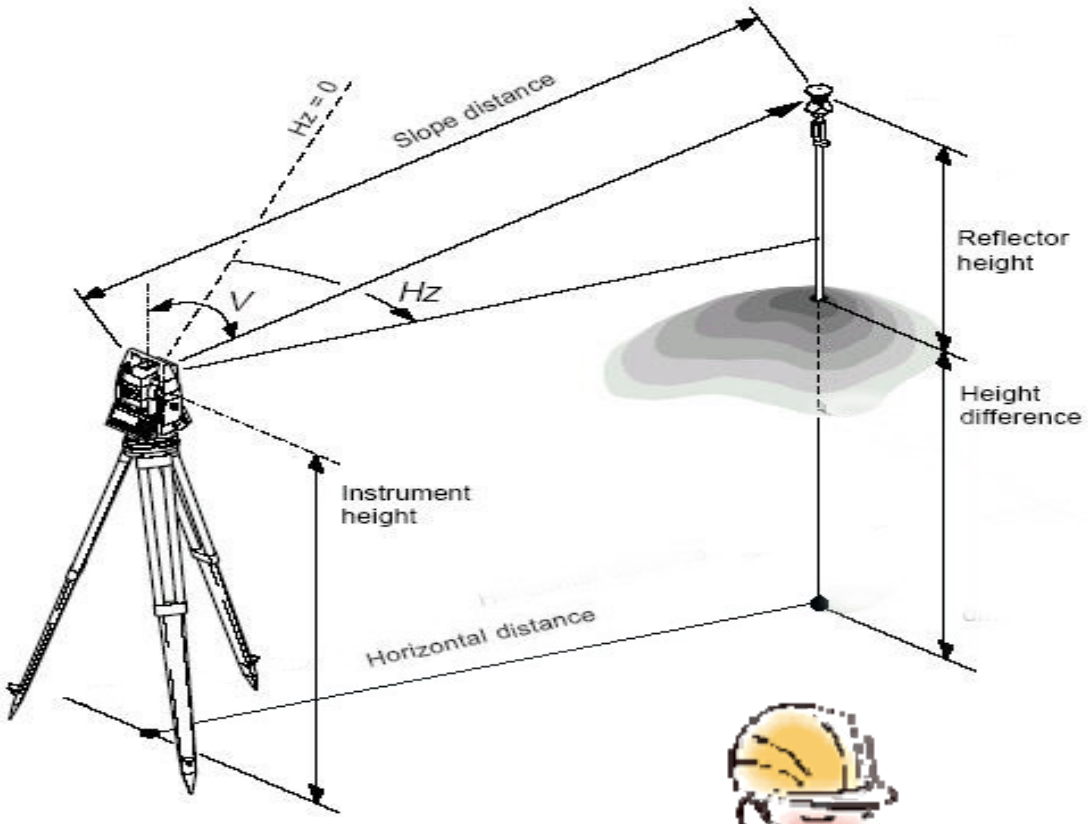
การสำรวจ 1

SURVEYING I



1 การสำรวจ

วิชาการสำรวจ เป็นวิชาที่กล่าวถึงการวัดและการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งของจุดบนผิวโลก หรือหาความสัมพันธ์ของจุดต่างๆซึ่งเป็นตัวแทนของสิ่งบนภูมิประเทศ เป็นความรู้ที่มีการพัฒนาต่อเนื่องมายาวนาน โดยพัฒนาจากความต้องการจัดทำหรือเขียนแผนที่ของคนในสมัยโบราณ และมีการพัฒนาอย่างมากในกิจการทางทหารและการทำสงคราม ความรู้ในวิชาเรขาคณิตและตรีโกณมิติถูกนำมาใช้มากที่สุดในการคำนวณหาตำแหน่งของจุด การสำรวจตามความมุ่งหมายข้างต้นอาจเรียกว่า **งานรังวัด** ส่วนความรู้ทางสถิติและความน่าจะเป็นจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการวัดหรือผลลัพธ์ที่คำนวณได้

การหาตำแหน่งของจุดบนผิวโลกอาจพิจารณาจำแนกเป็น 3 วิธี ตามอุปกรณ์ที่ใช้และวิธีการหา ดังนี้

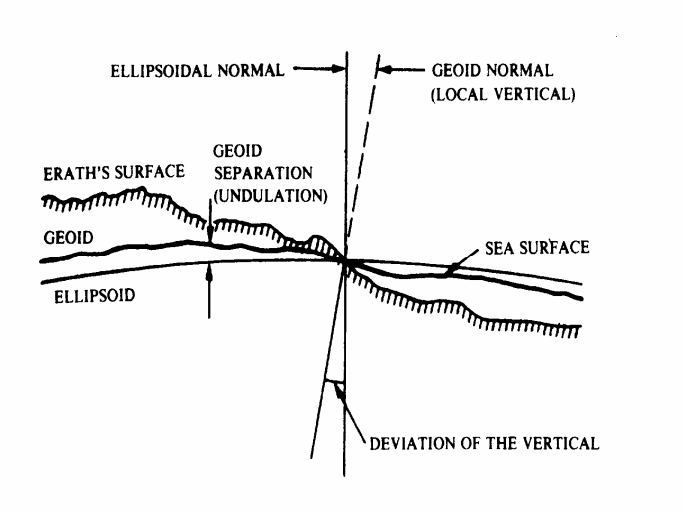
1) สำรวจโดยวัดบนพื้นดิน *(Ground Survey)* เป็นงานสำรวจในทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ การหาตำแหน่งของจุดใดๆส่วนมากจะประกอบด้วยการวัดระยะทางระหว่างจุดและวัดมุมของแนวต่างๆในพื้นที่โครงการ
2) สำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ *(Aerial Survey)* เป็นงานสำรวจโดยการบินถ่ายภาพ ภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จะถูกนำมาใช้งานใน 2 ลักษณะคือ การแปลภาพถ่าย *(Photo interpretation)* และการวัดตำแหน่งบนภาพถ่าย *(Photogrammetry)*
3) สำรวจด้วยภาพถ่ายดาวเทียม *(Remote Sensing)* และการหาพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม *(Global Positioning System; GPS)* เป็นงานสำรวจโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม ในอดีตการหาตำแหน่งของจุดจากข้อมูลดาวเทียมจะมีความถูกต้องต่ำไม่สามารถใช้ในงานวิศวกรรมได้ ปัจจุบันความถูกต้องและความละเอียดของตำแหน่งที่ได้จากอุปกรณ์ *GPS* เพียงพอที่จะใช้ในงานทางวิศวกรรม และมีการประยุกต์ใช้งานนำทางมากขึ้น

การสำรวจมีความมุ่งหมายหรือจุดประสงค์แตกต่างกันไปในงานวิศวกรรม แต่สามารถสรุปจุดประสงค์ของงานสำรวจทางวิศวกรรมได้เป็น 3 กรณี คือ

1) การรังวัดเพื่อการจัดทำแผนผังหรือแผนที่ เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของสิ่งที่อยู่บนภูมิประเทศ ให้เป็นตำแหน่งบนแผ่นกระดาษ โดยการวัดและคำนวณหาตำแหน่งของรายละเอียดบนภูมิประเทศ เช่น อาคาร สิ่งก่อสร้างต่างๆ ต้นไม้หรือสิ่งตามธรรมชาติ แล้วเขียนเป็นแผนที่ แผนผัง หรือรูปตัด ที่สอดคล้องกับสภาพจริงด้วยมาตราส่วนที่เหมาะสม
2) การรังวัดเพื่อการก่อสร้าง เป็นการเปลี่ยนค่าตำแหน่งของสิ่งที่อยู่บนแผ่นกระดาษซึ่งอาจจะเป็น แบบแผนผัง หรือแผนที่ ให้เป็นตำแหน่งบนภูมิประเทศ จุดมุ่งหมายนี้จะตรงข้ามกับจุดมุ่งหมายในข้อแรก เช่น การวัดเพื่อวางแนวในการก่อสร้างถนน การกำหนดตำแหน่งของฐานรากบนพื้นที่ในงานก่อสร้างอาคาร เพื่อให้เป็นไปตามแบบแปลน
3) การรังวัดเพื่อหาสิ่งที่ต้องการรู้ เช่น ระยะทาง ทิศทาง รูปร่าง ขนาดพื้นที่ ปริมาตรงานดินขุดหรือดินถม โดยการวัดอาจกระทำบนภูมิประเทศหรือวัดจากแผนที่ที่มีอยู่ก็ได้

2 สัณฐานของโลก

การทำงานสำรวจ โดยพื้นฐานคือการวัดเพื่อหาตำแหน่งของจุดต่าง ๆ การแสดงตำแหน่งของจุดใด ๆจะต้องเกี่ยวข้องกับสัณฐานของโลก หรือพื้นผิวที่ใช้อ้างอิง โลกมีรูปทรงไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต เพียงแต่ใกล้เคียงทรงกลม และมีพื้นผิวขรุขระ รูปร่างจริงของโลกจึงไม่สามารถใช้เพื่อการอ้างอิงตำแหน่งของจุดต่าง ๆบนพื้นโลก การอ้างอิงตำแหน่งของจุดต่าง ๆจึงใช้รูปทรงที่ห่อหุ้มด้วยผิวระดับ (*Level surface*) ที่ต่อเนื่องกัน กล่าวคือโลกที่มีพื้นผิวทุกจุดตั้งฉากกับแรงดึงดูดโลก เรียกว่า จีออย (*Geoid*) ใช้เป็นตัวแทนรูปทรงของโลก เป็นสัณฐานอ้างอิงในงานดาราศาสตร์และงานระดับควบคุม อย่างไรก็ตามแต่จีออยยังคงไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณ จึงได้ใช้รูปทรงที่มีผิวโค้งใกล้เคียงกับผิวของจีออยและเป็นรูปทรงเรขาคณิตเป็นตัวแทนของจีออย คือ รูปทรงที่เกิดจากการหมุนรูปวงรีรอบแกนสั้นที่ตรงกับแกนหมุนของโลก เรียกว่า อีลิปซอยด์ (*Ellipsoid*)



รูปที่ 1.1 แสดงพื้นผิว ภูมิประเทศ จีออยและ อีลิปซอยด์

ประเทศต่าง ๆจะใช้สัณฐานอ้างอิงที่แตกต่างกัน โดยเลือกใช้ขนาดรูปวงรีที่ทำให้อีลิปซอยด์มีพื้นผิวทับกับพื้นผิวของจีออยที่ประเทศนั้นให้มากที่สุด สำหรับประเทศไทยกิจการแผนที่หลัก หน่วยงานที่รับผิดชอบคือกรมแผนที่ทหารได้ใช้สัณฐานโลกอ้างอิง Everest Spheroid 1830 ในการคำนวณงานรังวัดชั้นสูง ซึ่งใช้รูปทรงอีลิปซอยด์ ที่เกิดจากวงรีที่มีขนาดกึ่งแกนยาว (*Semi-Major Axis*) เท่ากับ 6,377,276.3452 เมตร และอัตราการยุบตัว (*Flattening*, a/[a-b]) เท่ากับ 300.8017 โดยใช้พื้นหลักฐานราชบุรีตั้งแต่ ปี พ.ศ.2450 และมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเรื่อยมาจนใช้พื้นหลักฐาน Indian 1975 (ดูรายละเอียดได้จากเว็บไซท์ของกรมแผนที่ทหาร, http://www.rtsd.mi.th)

ในปัจจุบันการรังวัดด้วยอุปกรณ์หาตำแหน่งจากดาวเทียม GPS เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ค่าพิกัดที่ได้จากอุปกรณ์ GPS จะเป็นค่าที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน WGS84 *(World Geodetic System 1984)*

3 ประเภทของงานสำรวจ

การจำแนกประเภทของงานสำรวจขึ้นอยู่กับแง่มุมในการพิจารณา หากจำแนกโดยพิจารณาจากลักษณะพื้นผิวอ้างอิงสามารถแยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) งานรังวัดบนพื้นระนาบ *(Plane Survey)* เป็นงานรังวัดโดยสมมุติว่าผิวโลกภายในพื้นที่ที่ทำการวัดเป็นระนาบราบ ไม่มีการพิจารณาผลจากความโค้งของผิวโลก สูตรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณงานเป็นสูตรเรขาคณิตและตรีโกณมิติบนพื้นระนาบ เป็นการรังวัดในงานวิศวกรรมโดยทั่วไป
2) งานรังวัดบนสัณฐานโลก *(Geodetic Survey)* เป็นการรังวัดที่มีการพิจารณาผลจากความโค้งของผิวโลก ใช้รูปทรงจีออยเป็นสัณฐานอ้างอิง เป็นการรังวัดที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ทำการวัดปริมาณต่างๆด้วยความถูกต้องและความละเอียดสูง โดยทั่วไปเป็นงานรังวัดหมุดควบคุม

นอกจากนี้การจำแนกประเภทของงานสำรวจ อาจจำแนกแบ่งเป็นประเภทย่อยๆ โดยเรียกแตกต่างกันไปตามลักษณะการดำเนินงาน เรียกตามจุดประสงค์การรังวัด หรืออาจเรียกตามเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจ เช่น

1) งานสำรวจเบื้องต้น *(Preliminary Survey)* เป็นการสำรวจที่ยังไม่มีการทำงานสนาม เป็นเพียงการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับงานรังวัดที่มีอยู่ เพื่อนำมาใช้ประกอบการพิจารณาวางแผนงาน
2) งานสำรวจสังเขป *(Reconnaissance Survey)* เป็นการสำรวจโดยใช้วิธีการวัดอย่างง่าย สามารถดำเนินการได้รวดเร็วเสียค่าใช้จ่ายน้อย ให้ข้อมูลภูมิประเทศได้เพียงพอสำหรับการร่างโครงงาน
3) งานรังวัดควบคุม *(Control Survey)* เป็นงานรังวัดหาตำแหน่งของจุดที่เลือกวางเป็นหมุดควบคุมเพื่อใช้อ้างอิงตำแหน่งของจุดอื่นๆ โดยกำหนดค่าตำแหน่งของจุดด้วย ค่าพิกัดทางราบ *(N,E)* และค่าพิกัดทางดิ่ง*(H)*
4) งานรังวัดภูมิประเทศ *(Topographic Survey)* เป็นงานรังวัดเพื่อการจัดทำแผนที่แสดงรายละเอียดบนภูมิประเทศด้วยสัญลักษณ์ อาจเป็นรายละเอียดของสิ่งธรรมชาติ เช่น แนวร่องน้ำ สันเขา หรือรายละเอียดของสิ่งปลูกสร้าง เช่น ถนน อาคาร และอาจมีการแสดงความสูงต่ำของผิวพื้นที่ ด้วย เส้น สี เงา เป็นต้น
5) งานรังวัดแนวทาง *(Route Survey)* เป็นงานรังวัดเพื่อหาหรือกำหนดแนวก่อสร้างซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือแนวยาวๆ เช่น รางรถไฟ ทางหลวง คลองส่งน้ำ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น
6) งานรังวัดที่ดิน *(Land Survey)* เป็นงานรังวัดเพื่อหมายเขตระวางที่ดิน อาจเป็นการรังวัดสำหรับการออกเอกสารกรรมสิทธิ์ที่ดิน หรือเพื่อหาขนาดพื้นที่ของที่ดิน
7) งานรังวัดที่ดินสาธารณะ (*Cadastral Survey*) เป็นการรังวัดที่เกี่ยวกับการกำหนดเส้นแนวเขตที่ดินของรัฐ เช่น เขตอำเภอ เขตจังหวัด และเขตประเทศ
8) งานสำรวจอุทกศาสตร์ *(Hydrographic Survey)* เป็นการวัดหาข้อมูลเกี่ยวกับท้องน้ำ กระแสน้ำ ระดับน้ำ รวมทั้งการทำแผนที่ชายฝั่ง และการกำหนดแนวสำหรับการเดินเรือ
9) การรังวัดงานเหมือง *(Mine Survey)* เป็นงานรังวัดเพื่อหาพิกัดตำแหน่งจุดต่างๆ ขนาด ระยะ และทิศทางของช่องใต้ดินในเหมือง รังวัดลักษณะของภูมิประเทศ หรือธรณีวิทยา และอื่นๆ ที่จำเป็นในการทำเหมืองแร่

4 องค์ประกอบที่สำคัญในการทำงานสำรวจ

การทำงานสำรวจมีองค์ประกอบในการทำงาน 3 ส่วนคือ ช่างสำรวจ เครื่องมือ และวิธีการทำงาน เพื่อให้งานบรรลุเป้าหมาย องค์ประกอบทั้ง 3 จะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญหรือลักษณะที่ดีดังนี้

4.1 **ช่างสำรวจ** งานสำรวจหรือรังวัด เป็นงานวิชาชีพที่ผู้ปฏิบัติต้องมีความรู้อย่างดี ในทางคณิตศาสตร์ เช่น เรขาคณิต ตรีโกณมิติ และต้องได้รับการฝึกฝนทางด้านเทคนิคให้เกิดความชำนาญในการใช้เครื่องมือ นอกจากความรู้ ช่างสำรวจยังต้องมีไหวพริบปฏิภาณในการตัดสินใจแก้ปัญหาทางเทคนิคและปัญหาทั่วไปด้วยตัวเอง เพราะงานสนามอาจอยู่ในท้องที่ห่างไกลหาคนปรึกษาได้ยาก ต้องเป็นคนละเอียดถี่ถ้วน มีความอดทน และมีความซื่อสัตย์ต่อข้อมูลที่วัดได้ และยังต้องมีท่าทีที่ดี เป็นมิตรในการติดต่อกับบุคคลอื่น

4.2 **เครื่องมือ** อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้วัด ต้องให้ค่าความถูกต้องหรือความละเอียดของค่าการวัดเหมาะสมกับงาน ก่อนที่จะเริ่มทำงานสนามควรมีการประมาณค่าความถูกต้องหรือความละเอียดของการวัดและกำหนดชนิดเครื่องมือที่ใช้ให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการใช้เครื่องมือที่ละเอียดและวัดละเอียดจนเกินความจำเป็นของงานนั้น และเครื่องมือที่ใช้จะต้องตรวจสอบและปรับแก้ก่อนนำไปใช้ ส่วนเครื่องมืองานสำนักงานปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ที่ทันสมัยมาใช้ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์หรือเครื่องวาดภาพ อุปกรณ์ที่ทันสมัยเหล่านี้จะช่วยลดเวลาในการทำงาน และ ลดความผิดพลาด ให้ผลงานที่มีคุณภาพมากขึ้น

4.3 **วิธีการทำงาน** การเลือกวิธีทำงานขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการวัด กล่าวคือผลงานที่ได้จะนำไปใช้ในกิจกรรมใด นอกจากนั้นการเลือกใช้เครื่องมือและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานก็จะมีผลต่อวิธีการทำงานที่ต่างกัน อย่างไรก็ดีการทำงานจะต้องพิจารณาหรือคำนึงถึงหลักการที่สำคัญดังนี้

1) ตำแหน่งของจุดใดๆในสนาม สามารถหาได้โดยการวัดออกไปจากจุดสองจุดที่รู้ตำแหน่ง หรือวัดจากจุดที่รู้ตำแหน่งจุดหนึ่งโดยมีเส้นอ้างอิงเส้นหนึ่ง และจะต้องวัดอย่างน้อยสองค่า
2) จุดที่ทำการวัดอาจเป็นจุดควบคุมหรือจุดรายละเอียด การรังวัดจุดควบคุมต้องทำก่อนซึ่งมักจะวางเป็นโครงข่ายครอบคลุมพื้นที่ใหญ่ แล้วจึงรังวัดส่วนย่อยหรือเก็บรายละเอียด
3) ต้องระลึกไว้เสมอว่า ไม่มีการรังวัดใดๆที่ให้ผลถูกต้องอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นควรมีการตรวจสอบผลที่ได้จากการวัดในสนาม

5 ลักษณะของงานสำรวจ

งานสำรวจโดยทั่วไปจะประกอบด้วยงาน 2 ลักษณะ คือ งานสนาม และ งานสำนักงาน ทั้งงานสนามและงานสำนักงานต่างมีความสำคัญไม่น้อยกว่ากัน ถึงแม้ลักษณะของงานทั้งสองจะต่างกัน

5.1 **งานสนาม** เป็นการนำเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ไปทำการวัดหรือเก็บข้อมูลในสถานที่ที่ต้องการสำรวจและบันทึกค่าที่วัดได้ลงในสมุดสนาม ขั้นตอนการทำงาน ได้แก่

1) วางแผนการทำงาน โดยการสำรวจสังเขปดูพื้นที่ทั่วๆไป เพื่อพิจารณาเลือกวิธีการรังวัด เครื่องมือที่จะใช้ ตำแหน่งจุดตั้งเครื่องมือวัด รวมทั้งการสร้างหมุดด้วย
2) ทำการรังวัด คือ การวัดระยะทาง วัดมุม วัดระดับ ฯลฯ
3) จดบันทึกข้อมูลที่วัดได้ให้เป็นระบบและเป็นระเบียบ

5.2 **งานสำนักงาน** เป็นงานประมวลข้อมูลที่ได้จากงานสนาม ขั้นตอนการทำงาน ได้แก่

1) ตรวจสอบข้อมูลที่วัดได้
2) คำนวณเปลี่ยนค่าที่วัดได้ในสนามมาเป็นค่าที่จะนำไปใช้งาน
3) ร่าง หรือ เขียนต้นแบบ แผนผัง แผนที่ ลงในกระดาษตามมาตราส่วนที่กำหนด
4) อาจต้องคำนวณ พื้นที่ ปริมาตร หรือค่าอื่นๆ กำกับลงในแผนผังหรือแผนที่นั้นด้วย

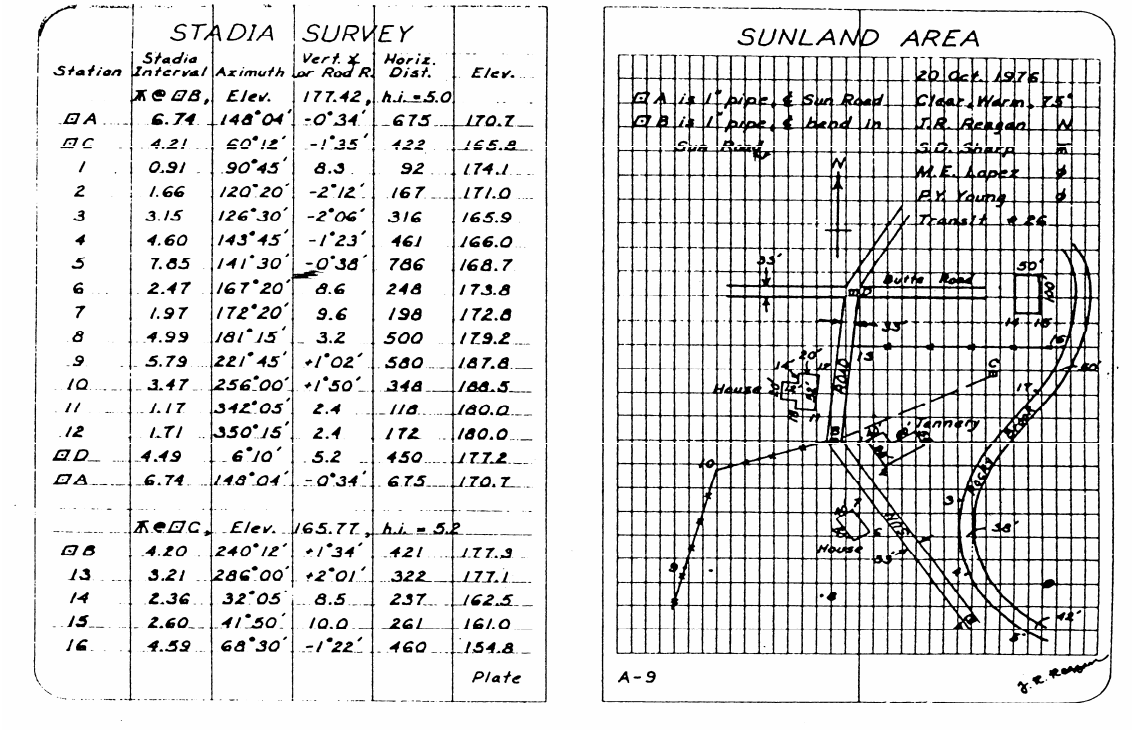
6 สมุดสนาม

การวัดทั้งหลายที่กระทำจะต้องบันทึกไว้ทันทีในสมุดสนามที่มีคุณภาพดี การบันทึกข้อมูลจะต้องชัดเจนสมบูรณ์ สามารถตีความได้ง่ายและถูกต้อง โดยอาจบันทึกเป็นตาราง ภาพร่าง หรือข้อความบรรยาย ขั้นตอนของการดำเนินงานควรจะเป็น วัด บันทึก และตรวจสอบค่าที่บันทึก

ปัจจุบันถึงแม้ว่าการบันทึกค่าการวัดมักจะเก็บในอุปกรณ์เก็บข้อมูล เมื่อใช้เครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถทดแทนการบันทึกข้อมูลในสมุดสนามได้ทั้งหมด โดยเฉพาะภาพร่างและข้อมูลเชิงบรรยาย การบันทึกในอุปกรณ์เก็บข้อมูลจึงเหมาะกับข้อมูลในเชิงตัวเลขมากกว่า

นอกจากการบันทึกค่าการวัดแล้ว ยังควรมีการบันทึกข้อมูลอื่นประกอบด้วย ได้แก่

- วัน เวลา ที่เริ่มงานและเลิกงาน
- สภาพภูมิอากาศโดยทั่วไปในวันนั้น
- รายชื่อผู้ร่วมงาน และหน้าที่ของแต่ละคน
- ชนิดเครื่องมือ หมายเลขประจำเครื่องมือที่ใช้ในการวัด



STADIA SURVEY

Station	Stadia Interval	Azimuth	Vert. ∠ or Rod R.	Horiz. Dist.	Elev.
	℄ ⊡B,	Elev.	177.42,	h.i. = 5.0	
⊡A	6.74	148°04′	-0°34′	675	170.7
⊡C	4.21	60°12′	-1°35′	422	165.8
1	0.91	90°45′	8.3	92	174.1
2	1.66	120°20′	-2°12′	167	171.0
3	3.15	126°30′	-2°06′	316	165.9
4	4.60	143°45′	-1°23′	461	166.0
5	7.85	141°30′	-0°38′	786	168.7
6	2.47	167°20′	8.6	248	173.8
7	1.97	172°20′	9.6	198	172.8
8	4.99	181°15′	3.2	500	179.2
9	5.79	221°45′	+1°02′	580	187.8
10	3.47	256°00′	+1°50′	348	188.5
11	1.17	342°05′	2.4	118	180.0
12	1.71	350°15′	2.4	172	180.0
⊡D	4.49	6°10′	5.2	450	177.2
⊡A	6.74	148°04′	-0°34′	675	170.7
	℄ ⊡C,	Elev.	165.77,	h.i. = 5.2	
⊡B	4.20	240°12′	+1°34′	421	177.3
13	3.21	286°00′	+2°01′	322	177.1
14	2.36	32°05′	8.5	237	162.5
15	2.60	41°50′	10.0	261	161.0
16	4.59	68°30′	-1°22′	460	154.8

Plate

รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการบันทึกสมุดสนาม

ข้อแนะการบันทึกสมุดสนาม

1) ควรเป็นสมุดปกแข็ง ใช้ดินสอไส้แข็ง 2-4H หรือปากกาลูกลื่น
2) ควรขึ้นหน้าใหม่เมื่อเริ่มงานในแต่ละวัน
3) เขียนเป็นตัว ๆไม่เขียนหวัด ให้เป็นแนวตรงกันอย่าเขียนเลยช่อง
4) เขียนขนาดสม่ำเสมอ สูงครึ่งบรรทัด และไม่ชิดกันมากไป
5) เขียนจุดทศนิยมและตัวเลขศูนย์ให้ครบ
6) การเขียนแผนผังพยายามให้สัดส่วนถูกต้องพอประมาณ
7) ภาพร่างหรือแผนผังควรเขียนทิศเหนือโดยประมาณกำกับ
8) ใช้สัญลักษณ์หรือเครื่องหมายในแบบร่างให้มาก
9) ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลตัวเลขที่บันทึกบ่อย ๆเท่าที่ทำได้
10) ไม่ลบข้อมูลที่ผิดทิ้งแต่ให้ขีดคร่อมและเขียนตัวที่ถูกไว้ข้างบน

7 หน่วยการวัด

งานรังวัด การวัดส่วนมาก คือ การวัดระยะทางและวัดมุม หน่วยการวัดมีหลายหน่วยแตกต่างกันไป สำหรับประเทศไทยมีการใช้หน่วยในการวัดระยะทางและวัดมุม ดังนี้

7.1 **หน่วยระยะทาง** โดยทั่วไปการวัดระยะทางจะใช้หน่วย **เมตร** เป็นหน่วยในระบบเมตริก ฉะนั้น ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับระยะทางก็จะใช้หน่วยในระบบเมตริกเช่นเดียวกับระยะทาง เช่น พื้นที่ขนาดเล็กใช้หน่วยตารางเมตร ใช้หน่วยตารางกิโลเมตรสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ และใช้หน่วยลูกบาศก์เมตรสำหรับปริมาตร

แต่การรังวัดที่ดิน หน่วยที่ใช้ในในเอกสารแสดงกรรมสิทธิ์ที่ดินจะใช้หน่วยวัดในระบบไทย คือ หน่วยระยะทางใช้ เส้น วา หน่วยพื้นที่ใช้ ไร่ งาน ตารางวา

1	เส้น	=	20	วา
1	ไร่	=	1	ตารางเส้น
1	ไร่	=	4	งาน
1	ไร่	=	400	ตารางวา
1	งาน	=	100	ตารางวา

หน่วยวัดในระบบไทย มีความสัมพันธ์และเทียบกับระบบเมตริกได้ดังนี้

1	วา	=	2	เมตร
1	ตารางวา	=	4	ตารางเมตร
1	ไร่	=	1600	ตารางเมตร

7.2 **หน่วยมุม** เครื่องมือวัดมุมมีหลายชนิด แต่หน่วยที่ใช้ในการวัดหลักมี 2 ระบบ คือ วัดเป็น **องศา** หรือ **เกรด** และมีอีกระบบหนึ่งที่ไม่ปรากฏว่ามีการใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดมุม แต่ใช้มากในการคำนวณ คือ **เรเดียน**

1) ระบบองศา มีหน่วยมุมเป็น องศา ลิปดา วิลิปดา *(Degree, Minute, Second)* ใช้สัญลักษณ์ $_^{o}_'_''$ ขนาดของมุมรอบจุดเท่ากับ *360* องศา และแต่ละหน่วยใหญ่จะแบ่งเป็น *60* หน่วยย่อยถัดไปคือ

$$1^{\circ} = 60'$$

$$1' = 60''$$

2) ระบบเกรด มีหน่วยมุมเป็น *Grad, Centesimal minute, Centesimal second* ใช้สัญลักษณ์ $_^{g}_^{c}_^{cc}$ ขนาดของมุมรอบจุดเท่ากับ *400* เกรด และแต่ละหน่วยใหญ่จะแบ่งเป็น *100* หน่วยย่อยถัดไปคือ

$$1^{g} = 100^{c}$$

$$1^{c} = 100^{cc}$$

3) ระบบเรเดียน *(Radian)* ขนาดมุมเรเดียนเท่ากับสัดส่วนของความยาวส่วนโค้งวงกลมกับรัศมีวงกลม ที่มีจุดยอดมุมเป็นจุดศูนย์กลางวงกลม ฉะนั้นมุมเรเดียนเปรียบเสมือนไม่มีหน่วย ขนาดของมุมรอบจุดเท่ากับ 2π เรเดียน

มุมเรเดียนมีบทบาทมากในการคำนวณ 2 กรณี คือ

- การเปลี่ยนมุมในหน่วยที่วัดได้ เช่น องศาเป็นเรเดียน เพื่อใช้ฟังชั่นมุม (*sin, cos, tan)* ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- การจัดการหน่วยในการคำนวณเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อน การเปลี่ยนมุมเล็กๆ ในหน่วยวิลิปดาเป็นเรเดียน โดยการคูณด้วย $\sin 1''$ หรือหารด้วย 206265 (เท่ากับ $1/60 \times 1/60 \times \pi/180$)

นอกจากการวัดมุมในหน่วยองศาและเกรด แล้วยังมีอีกระบบหนึ่งที่เครื่องมือวัดมุมที่หน่วยงานทหารใช้วัดมุมในกิจกรรมทหาร คือ **มิล** *(mil)* โดยมีขนาดของมุมรอบจุดเท่ากับ 6400 mil

2..การวัดและความคลาดเคลื่อน

การทำงานรังวัดซึ่งประกอบไปด้วยการวัดค่าต่าง ๆมากมาย แต่จะไม่มีการวัดใด ๆที่ได้ค่าจริง เนื่องจากในการวัดอาจมีความไม่สมบูรณ์ของเครื่องมือ มีความจำกัดของผู้ใช้เครื่องมือ และมีความไม่แน่นอนซ่อนอยู่ในวิธีการวัด ค่าการวัดที่ได้ถึงแม้จะได้จากการใช้เครื่องมือและวิธีการรังวัดที่กระทำด้วยความระมัดระวังอย่างมากที่สุดก็ยังไม่อาจได้ค่าที่แท้จริง ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจความคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่ในขณะทำการวัด ต้องคำนวณขนาดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น และสามารถจัดการความคลาดเคลื่อนนั้นได้อย่างเหมาะสม

1. การจำแนกการวัด

การทำงานรังวัดถึงแม้ว่าส่วนมากจะเป็นการวัดมุมและวัดระยะทาง แต่สิ่งที่ต้องการรู้ไม่ได้มีเพียงค่ามุมหรือค่าระยะทาง สิ่งที่ต้องการรู้อาจเป็นค่าพิกัดตำแหน่ง พื้นที่ ปริมาตร หรือความสูง และการวัดเพื่อต้องการหาสิ่งเดียวกันก็อาจใช้เครื่องมือที่ต่างกัน ฉะนั้นวิธีการวัดจะแตกต่างกันไปตามจุดประสงค์และเครื่องมือที่ใช้ การจำแนกการวัดจึงอาจพิจารณาได้ดังนี้

1.1 **จำแนกการวัดตามวิธีการวัด** แบ่งเป็น 2 ชนิด

1) การวัดทางตรง *(Direct Measurement)* คือการวัดที่ใช้เครื่องมือไปทำการวัดสิ่งที่ต้องการรู้โดยตรง เช่น การวัดระยะทางโดยใช้แถบวัดระยะเพื่อหาระยะทางระหว่างจุดสองจุด การหาทิศทางของแนวเส้นตรงโดยใช้เข็มทิศ เป็นต้น

การวัดทางตรงจะให้ความถูกต้องสูงกว่าการวัดทางอ้อม ฉะนั้นการวัดทางตรงจึงเป็นวิธีการวัดที่เหมาะกับการวัดจุดควบคุม *(Control point)*

2) การวัดทางอ้อม *(Indirect Measurement)* คือการวัดที่ใช้เครื่องมือไปทำการวัดส่วนอื่นที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่ต้องการรู้แล้วคำนวณหาสิ่งที่ต้องการรู้จากค่าที่วัด เช่น การหาระยะราบระหว่างจุดสองจุดที่อยู่บนพื้นเอียงโดยวัดระยะตามพื้นเอียงและค่าต่างระดับระหว่างจุดทั้งสอง แล้วคำนวณหาระยะราบระหว่างจุดทั้งสอง การหาความสูงของหอสูงโดยวัดมุมเงยและระยะทางจากจุดที่วัดถึงหอสูง แล้วคำนวณหาความสูงของหอ การวัดระยะแล้วคำนวณหาพื้นที่ เป็นต้น

การวัดทางอ้อมจะให้ความถูกต้องต่ำกว่าการวัดทางตรง แต่มีความสะดวกหรือทำงานได้เร็วกว่า ฉะนั้นการวัดทางอ้อมจึงเป็นวิธีการวัดที่เหมาะกับการวัดจุดรายละเอียด *(Detail point)*

1.2 **จำแนกการวัดตามความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้** แบ่งเป็น 2 ชนิด

1) การวัดเชิงเงื่อนไข *(Condition Observation)* เป็นการวัดค่าที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขหรือกฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์ เช่น การวัดมุมภายในของรูป *n* เหลี่ยม จะมีกฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์ที่ต้องเป็นไปคือ ผลรวมของมุมภายในจะต้องเท่ากับ *180 X (n-2)*

การวัดเชิงเงื่อนไขจะสามารถคำนวณระดับความถูกต้องของงานที่ได้ ฉะนั้นการวัดเชิงเงื่อนไขจึงเป็นวิธีการวัดที่เหมาะกับการวัดจุดควบคุม

2) การวัดเชิงอิสระ *(Independent Observation)* เป็นการวัดค่าต่างๆที่ไม่อยู่ภายใต้กฎเกณฑ์หรือเงื่อนไขที่บังคับ เช่น การวัดมุมดิ่ง การวัดมุมราบหรือการวัดระยะทางระหว่างจุด *2* จุด เป็นต้น

การวัดเชิงอิสระจะไม่สามารถคำนวณระดับความถูกต้องของงานที่ได้ ฉะนั้นการวัดเชิงอิสระจึงเป็นวิธีการวัดที่เหมาะกับการวัดจุดรายละเอียด

2. **ความคลาดเคลื่อน** *(Errors)*

ความคลาดเคลื่อน คือ ความแตกต่างระหว่างค่าการวัดกับค่าจริงของสิ่งเดียวกัน ความคลาดเคลื่อนมีขนาดเท่ากับค่าการวัดได้ลบด้วยค่าจริง ฉะนั้นค่าการวัดที่มากกว่าค่าจริงจะมีค่าคลาดเคลื่อนเป็นบวก และตรงข้ามค่าดลาดเคลื่อนเป็นลบจะได้จากค่าการวัดที่น้อยกว่าค่าจริง

การวัดปริมาณที่สำคัญ เช่น การรังวัดหมุดควบคุมอาจจะทำการวัดมากกว่าครั้งเดียว การวัดของสิ่งหนึ่งด้วยวิธีการวัดที่ต่างกัน หรือวัดซ้ำกันหลายครั้งผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้เรียกว่า **ค่าแย้ง** *(Discrepancy)* และผลต่างของค่าที่วัดได้กับค่าเฉลี่ยเรียกว่า **เศษเหลือ** *(Residual)*

โดยทั่วไปในงานรังวัดค่าจริงของสิ่งที่ทำการวัดมักไม่รู้ค่า แต่การวัดที่เป็นการวัดเชิงเงื่อนไขค่าจริงก็คือเงื่อนไขที่ต้องเป็น ค่าที่ต่างออกไปจากเงื่อนไขนั้นจึงเป็นค่าคลาดเคลื่อน การวัดเชิงเงื่อนไขจึงสามารถตรวจสอบคุณภาพการทำงานได้โดยการหาขนาดของความคลาดเคลื่อนและความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดนั้น

2.1 **ชนิดของความคลาดเคลื่อน** การดำเนินงานอย่างเหมาะสมทำได้เพียงลดค่าคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นเท่านั้น แต่ไม่สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนให้หมดไปได้ การจัดการอย่างถูกต้องกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งจำเป็น ฉะนั้นจึงต้องเข้าใจลักษณะของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1) ค่าผิดพลาด *(Mistake or Blunder)* เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยไม่ตั้งใจ มักเกิดจากความสะเพร่าไม่รอบคอบของผู้ปฏิบัติงาน เช่น การอ่านค่าผิด การจดค่าผิด ค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่และทำให้งานเสียหายมาก หากตรวจหาไม่พบจะต้องทำการรังวัดใหม่ ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดเชิงเงื่อนไขจะตรวจสอบพบได้ไม่ยากเพราะจะมีขนาดใหญ่จนผิดสังเกตุ ถ้าเป็นการวัดเชิงอิสระจะตรวจพบได้ยาก ฉะนั้นงานรังวัดที่มีความสำคัญ เช่น การรังวัดหมุดควบคุม จะเป็นการวัดเชิงเงื่อนไขหรือจะต้องมีการวัดเพิ่มจากการวัดที่ทำตามปกติเพื่อตรวจสอบค่าผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น งานรังวัดที่ทำให้เกิดความเสียหายมักเกิดจากค่าผิดพลาด

การแก้ไข ค่าผิดพลาดสามารถแก้ไขโดยการ ตรวจสอบ ค้นหา และเมื่อพบจะตัดทิ้งไป ถ้าจำเป็นก็ทำการวัดค่าที่ตัดทิ้งไปนั้นใหม่

2) ความคลาดเคลื่อนมีระบบ *(Systematic Error)* เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอย่างมีกฎเกณฑ์ ค่าคลาดเคลื่อนมีระบบจะเป็นไปตามกฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ จึงสามารถคำนวณหาขนาดค่าคลาดเคลื่อนได้ การวัดที่ได้จากการวัดย่อยๆหลายค่าผลของค่าคลาดเคลื่อนรวมจะเป็นค่าสะสมของค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดย่อยๆนั้น คือความคลาดเคลื่อนมีระบบจะมีเครื่องหมายในทิศทางเดียวกัน ความคลาดเคลื่อนมีระบบแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ความคลาดเคลื่อนมีระบบแบบคงที่ ค่าคลาดเคลื่อนจะมีขนาดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม เช่น แถบวัดระยะที่ความยาวไม่ได้มาตรฐาน

ข) ความคลาดเคลื่อนมีระบบแบบเปลี่ยนแปลง ค่าคลาดเคลื่อนจะมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไป เช่น แถบวัดระยะโลหะยืดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

การแก้ไข การจัดการค่าคลาดเคลื่อนมีระบบมี 2 วิธี คือ

ก) คำนวณหาขนาดของค่าคลาดเคลื่อน นำค่าที่ได้ไปปรับแก้ค่าการวัดเพื่อให้เป็นค่าที่ถูกต้อง การจัดการค่าคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับระดับความถูกต้องของงานที่ต้องการ ถ้าความถูกต้องของงานไม่สูงอาจไม่จำเป็นต้องคำนวณหาแต่ใช้วิธีการทำงานที่ลดค่าคลาดเคลื่อนได้

ข) ใช้วิธีการวัดที่กำจัดค่าคลาดเคลื่อนได้ เช่น การวัดมุมโดยการส่องด้วยกล้องหน้าซ้ายและขวา การทำระดับโดยการพยายามให้ระยะไม้หน้าเท่ากับระยะไม้หลัง เป็นต้น

3) ความคลาดเคลื่อนสุ่ม *(Random Error)* เป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผลรวมของเหตุต่างๆที่นอกเหนือความสามารถของผู้วัดที่จะบังคับได้ เช่น ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการจรดแถบวัดระยะให้ตรงหมุดที่หมาย ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการส่องกล้องธีโอโดไลท์ให้แนวเล็งตรงจุดหมายเดิมทุกครั้ง เป็นต้น ลักษณะของความคลาดเคลื่อนสุ่มจะเป็นไปตามกฎความน่าจะเป็น

การแก้ไข ความคลาดเคลื่อนสุ่มไม่สามารถกำจัดให้หมดไปได้ การจัดการความคลาดเคลื่อนสุ่มต้องใช้ความรู้ทางสถิติและทฤษฎีของความน่าจะเป็นคำนวณขนาดค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าคลาดเคลื่อนสุ่มที่เป็นไปได้ ซึ่งจะกล่าวในข้อต่อไป

2.2 **สาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน** ในงานรังวัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากสาเหตุเดียวหรือเกิดจากสาเหตุหลายประการแฝงรวมกันอยู่ในค่าที่วัดได้ เพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ดีมีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่น้อยที่สุด จะต้องเข้าใจต้นเหตุที่ทำให้การวัดมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 สาเหตุ คือ

1) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเครื่องมือ *(Instrument Error)* เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์หรือไม่ถูกต้องของเครื่องมือที่ใช้วัด เช่น แถบวัดระยะยาวไม่เท่ากับความยาวมาตรฐาน กล้องธีโอโดไลท์มี *Index error* หรือกล้องระดับมีแนวเล็งไม่อยู่ในแนวราบ เป็นต้น

2) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผู้วัด *(Personal Error)* เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก ข้อจำกัดหรือความไม่รอบคอบของผู้วัดและผู้ร่วมงาน เช่น ความสามารถของผู้วัดในการเล็งจุดเป้าหมายหรือความสามารถของผู้วัดในการหมุนไมโครมิเตอร์เพื่ออ่านค่ามุมละเอียดถึงวิลิบดา ผู้วัดแต่ละคนไม่สามารถกระทำได้หมือนกันถึงแม้จะใช้เครื่องมืออุปกรณ์ชุดเดียวกันก็ตาม

3) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากธรรมชาติ *(Natural Error)* เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก การเปลี่ยนแปลงของปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิของสภาพภูมิอากาศระหว่างทำงานวัดระยะทางด้วยแถบวัดโลหะทำให้แถบวัดระยะโลหะเกิดการยืดหดตัว หรือคลื่นความร้อนทำให้ภาพวัตถุที่มองผ่านกล้องสำรวจสั่นพลิ้ว ยากแก่การหมายสายใยเล็งให้ตรงจุดหมาย หรืออ่านค่าไม้ระดับได้ลำบาก

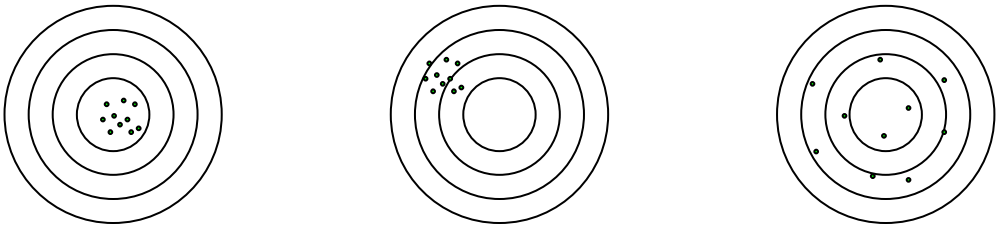
3. **ความถูกต้อง** *(Accuracy)* **กับความละเอียด** *(Precision)*

3.1 **ความถูกต้อง** หมายถึงระดับความใกล้เคียงของค่าที่วัดหรือคำนวณได้ กับค่าจริงของสิ่งที่วัด ขนาดของความถูกต้องแสดงด้วยอัตราส่วนระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับค่าจริง การวัดเชิงอิสระโดยทั่วไปจะไม่รู้ค่าจริง ในบางการณีการหาความถูกต้องจะอนุโลมให้ค่าที่ได้จากเครื่องมือที่ดีกว่าเป็นค่าจริงแทน เช่น ใช้ค่าระยะที่ได้จากการวัดด้วยแถบวัดเป็นค่าจริงในการหาความถูกต้องของการวัดระยะด้วยก้าว

3.2 **ความละเอียด** หมายถึงระดับความประณีตในการทำการวัดหนึ่ง ความละเอียดพิจารณาได้ในสองลักษณะ คือ ลักษณะแรกหมายถึงความสามารถในการวัดได้หน่วยที่เล็กมากเพียงใด เช่น การวัดระยะทางด้วยแถบวัดโดยอ่านค่าระยะที่วัดได้ถึงหน่วยมิลลิเมตรถือว่ามีความละเอียดสูงกว่าการวัดโดยวิธีเดียวกันแต่อ่านค่าระยะเพียงหน่วยเซ็นติเมตร ลักษณะที่สองใช้สำหรับการวัดที่กระทำซ้ำๆกัน ความละเอียดจะหมายถึงระดับความใกล้เคียงของที่วัดได้กับค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำๆกันนั้น คือความละเอียดจะพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวัดชุดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดเล็กจะมีค่าความละเอียดสูงกว่าการวัดชุดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขนาดใหญ่กว่า การวัดใดที่เป็นการวัดเชิงอิสระซึ่งไม่รู้ค่าจริง สามารถตรวจสอบคุณภาพการทำงานได้โดยการหาความละเอียดของผลที่ได้จากการวัดนั้น

ผลการวัดใดๆที่มีความละเอียดสูงกว่าไม่จำเป็นว่าจะต้องมีความถูกต้องสูงกว่าเสมอ เพราะผลการวัดนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนที่มีระบบแฝงอยู่ เช่น การวัดระยะทางอย่างพิถีพิถันด้วยแถบวัดระยะที่ความยาวไม่เท่าความยาวมาตรฐาน ค่าระยะทางที่ได้ย่อมผิดจากค่าที่เป็นจริง ถือว่าเป็นการวัดที่มีความละเอียดสูงแต่มีความถูกต้องต่ำ โดยทั่วไปถ้าไม่มีความคลาดเคลื่อนที่มีระบบแฝงอยู่ในผลการวัด การวัดที่มีความละเอียดสูงจะมีความถูกต้องสูง

หากเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการยิงเป้าจะอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.1 และการวัดที่มีความละเอียดสูงแต่มีความถูกต้องต่ำ เปรียบได้กับการยิงเป้าด้วยปืนและกระสุนที่มีคุณภาพดี สภาพอากาศดีโดยนักแม่นปืนแต่ศูนย์เล็งของปืนเอียง ผลการยิงที่ได้ถึงแม้จะเกาะกลุ่มดีแต่จะไม่ถูกกลางเป้า



(a) *(b)* *(c)*

รูปที่ *2.1* แสดงผลการยิงปืน *3* ผลลัพธ์

(a) มีความละเอียดดีและมีความถูกต้องดี

(b) มีความละเอียดดีแต่มีความถูกต้องต่ำ

(c) มีความละเอียดต่ำแต่มีความถูกต้องดี

4. **น้ำหนักการวัด** *(Weight)*

น้ำหนักการวัด คือระดับความน่าเชื่อถือของการวัดแต่ละครั้งหรือแต่ละชุดที่วัดในสภาพเงื่อนไขต่างกัน น้ำหนักการวัดจะมีต่อการพิจารณาค่าที่วัดได้คือ ถ้ามีระดับความน่าเชื่อถือต่างกันการปรับแก้ค่าการวัดก็จะต่างกันด้วย การกำหนดค่าน้ำหนักการวัด พิจารณาได้ ดังนี้

1) การวัดที่ทำภายใต้เงื่อนไขเดียวกันจะมีค่าน้ำหนักเท่ากัน การวัดของสิ่งหนึ่งที่วัดหลายชุดถ้าแต่ละชุดกระทำภายใต้เงื่อนไขหรือสภาพเดียวกันระดับความน่าเชื่อถือของแต่ละชุดถือว่าเท่ากัน แต่ถ้าสภาพการทำงานหรือเงื่อนไขต่าง ๆในขณะวัดต่างกัน การวัดแต่ละชุดจะมีระดับความน่าเชื่อถือหรือค่าน้ำหนักต่างกันด้วย
2) น้ำหนักจะแปรผันตามจำนวนครั้งที่วัด การวัดของสิ่งหนึ่งกระทำซ้ำ ๆเป็นชุดหลายชุดการวัด ถ้าสมมุติให้เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและความพิถีพิถันในการวัดแต่ละชุดเหมือนกัน ในกรณีที่จำนวนครั้งในการวัดแต่ละชุดไม่เท่ากันค่าน้ำหนักจะแปรผันตามจำนวนครั้งที่วัด
3) น้ำหนักจะแปรผกผันกับกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม ในกรณีที่รู้ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของการวัดแต่ละชุด ค่าน้ำหนักจะแปรผกผันกับกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของการวัดแต่ละชุด

5. **ค่าปรับแก้** *(Correction)*

ค่าปรับแก้ คือ ค่าที่นำมาบวกกับค่าการวัดซึ่งมีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง ฉะนั้นค่าปรับแก้จะมีขนาดเท่ากับค่าคลาดเคลื่อนแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม เช่น ผลการวัดมุมภายในของรูปสามเหลี่ยมรูปหนึ่งรวมกันได้ 179° 58′30″ จะได้ค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ -1′30″ ค่าปรับแก้มุมทั้งสามรวมกันจะต้องเท่ากับ +1′30″

ค่าปรับแก้พิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

1) ค่าปรับแก้ของการวัดเชิงอิสระที่มีความคลาดเคลื่อนมีระบบแฝงอยู่ ค่าคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จากกฎเกณฑ์ทางคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนมีระบบนั้น เช่น การหาค่าปรับแก้ระยะทางที่ได้จากการวัดด้วยแถบวัดซึ่งขณะวัดแถบบวัดตกท้องช้าง การปรับแก้นี้จะไม่เกี่ยวข้องกับค่าน้ำหนักการวัด
2) ค่าปรับแก้ของการวัดเชิงเงื่อนไข กฎเกณฑ์หรือเงื่อนไขที่บังคับถือเป็นค่าจริงของสิ่งที่ทำการวัด ถ้าผลการวัดต่างจากเงื่อนไขที่ต้องเป็น และเราต้องคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อน และค่าปรับแก้ซึ่งมีขนาดเท่ากับค่าคลาดเคลื่อนแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม ในกรณีที่ค่าการวัดมีน้ำหนักเท่ากัน การปรับแก้ก็คือการกระจายค่าปรับแก้ไปยังการวัดทุกค่าด้วยขนาดที่เท่ากัน แต่ถ้าค่าการวัดแต่ละค่ามีน้ำหนักไม่เท่ากัน ค่าปรับแก้แต่ละค่าก็จะต่างกัน คือ ค่าที่มีระดับความน่าเชื่อถือมากค่าปรับแก้จะเล็ก และตรงข้ามค่าที่มีระดับความน่าเชื่อถือน้อยค่าปรับแก้จะมีค่าใหญ่ สัดส่วนของค่าปรับแก้หรือน้ำหนักการปรับแก้ *(Weight of correction)* จะแปรผกผันกับค่าน้ำหนักการวัด

ตัวอย่าง วัดมุมภายในรูปสามเหลี่ยม *X Y Z* ได้ *48° 36′35″, 59° 48′32″* และ *71° 34′47″* จงปรับแก้ค่ามุมที่วัดได้ ถ้า

ก. มุมทั้งสามวัดภายใต้เงื่อนไขอย่างเดียวกัน

ข. มุมทั้งสามมีค่าน้ำหนักการวัด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ก) มุมทั้งสามวัดภายใต้เงื่อนไขอย่างเดียวกัน

มุม *X* = *48° 36′35″*

มุม *Y* = *59 48 32*

มุม *Z* = *71 34 47*

รวม = ***179 59 54***

ค่าคลาดเคลื่อน = *179° 59′54″ - 180°* = *- 06″*

ค่าปรับแก้รวม = *+ 06″*

เนื่องจากมุมทั้ง *3* มีน้ำหนักเท่ากันฉะนั้นค่าปรับแก้จะกระจายไปเท่ากัน

ค่าปรับแก้แต่ละมุม = *+ 06″/3* = *+ 02″*

มุม *X* = *48° 36′35″ + 02″* = ***48° 36′37″***

มุม *Y* = *59 48 32 + 02* = ***59 48 34***

มุม *Z* = *71 34 47 + 02* = ***71 34 49***

ข) มุมทั้งสามมีค่าน้ำหนักการวัด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ค่าคลาดเคลื่อน = *- 06″*

ค่าปรับแก้รวม = *+ 06″*

เนื่องจาก มุมทั้ง *3* มีน้ำหนักการวัด = *1, 2, 3* ตามลำดับ

ฉะนั้น มุมทั้ง *3* มีน้ำหนักการปรับแก้ = *3, 2, 1* ตามลำดับ

น้ำหนักค่าปรับแก้รวม = *3 + 2 + 1* = *6*

ค่าปรับแก้มุม *X* = *+ 06 x 3 / 6* = *+ 03″*

ค่าปรับแก้มุม *Y* = *+ 06 x 2 / 6* = *+ 02″*

ค่าปรับแก้มุม *Z* = *+ 06 x 1 / 6* = *+ 01″*

มุม *X* = *48° 36′35″ + 03″* = ***48° 36′38″***

มุม *Y* = *59 48 32 + 02* = ***59° 48′34″***

มุม *Z* = *71 34 47 + 01* = ***71° 34′48″***

ตัวอย่าง วัดมุมที่จุดจุดหนึ่งจำนวน *3* มุม คือ *A, B* และ *C* ได้ *23° 46′10″, 59° 14′27″* และ *83° 00′04″* ถ้าเงื่อนไขการวัดคือมุม *C = A + B* จงปรับแก้ค่ามุมที่วัดได้ถ้า

ก) มุมทั้งสามมีค่าน้ำหนักการวัดเท่ากัน

ข) มุมทั้งสามเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด *2, 4* และ *6* ครั้งตามลำดับ

มุม *A* = *23° 46′10″*

มุม *B* = *59 14 27*

รวม = *83 00 37*

มุม *C* = *83 00 04*

ค่าแย้งระหว่างมุม *A* กับ *B+C* = *33″*

เนื่องจาก *A + B > C* ฉะนั้นค่าปรับแก้ มุม *A* และ *B* จะเป็น **-** และค่าปรับแก้ มุม *C* จะเป็น **+**

ก) เนื่องจากมุมทั้ง *3* มีน้ำหนักเท่ากัน ฉะนั้นค่าปรับแก้จะกระจายไปเท่ากัน

ค่าปรับแก้แต่ละมุม = *33″/3* = *11″*

มุม *A* = *23° 46′10″- 11″* = *23° 45′ 59″*

มุม *B* = *59 14 27 - 11″* = *59 14 16*

รวม = *83 00 15*

มุม *C* = *83 00 04 + 11″* = *83 00 15*

ข) ค่าน้ำหนักการวัดแปรผันตามจำนวนครั้งที่วัด

น้ำหนักการปรับแก้แต่ละมุม = $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{6}$

น้ำหนักค่าปรับแก้รวม = $\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{6}$ = $\frac{11}{12}$

ค่าปรับแก้มุม *A* = $33'' \times \frac{1}{2} \div \frac{11}{12}$ = - 18 ″

ค่าปรับแก้มุม *B* = $33'' \times \frac{1}{4} \div \frac{11}{12}$ = - 09 ″

ค่าปรับแก้มุม *C* = $33'' \times \frac{1}{6} \div \frac{11}{12}$ = + 06 ″

มุม *A* = *23° 46′10″- 18″* = *23° 45′52″*

มุม *B* = *59 14 27 - 09″* = *59 14 18*

มุม *C* = *83 00 04 + 06″* = *83 00 10*

การคำนวณแสดงในรูปตารางได้ดังนี้

มุม	ค่ามุมเฉลี่ย	นน.การวัด	นน.ค่าปรับแก้	ค่าปรับแก้	มุมปรับแก้แล้ว
A	*23° 46′10″*	*2*	$\frac{1}{2}$	*- 18″*	*23° 45′52″*
B	*59 14 27*	*4*	$\frac{1}{4}$	*- 09″*	*59 14 18*
C	*83 00 04*	*6*	$\frac{1}{6}$	*+06″*	*83 00 10*

6. ความน่าจะเป็นของค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม

สมมุติฐานค่าคลาดเคลื่อนสุ่มเกิดขึ้นและเป็นไปตามทฤษฎีของความน่าจะเป็น ฉะนั้นคุณลักษณะเบื้องต้นเกี่ยวกับค่าคลาดเคลื่อนสุ่มจะเป็นดังนี้

ก) ค่าคลาดเคลื่อนมีโอกาสที่จะเป็นทางบวกเท่าๆกับทางลบ

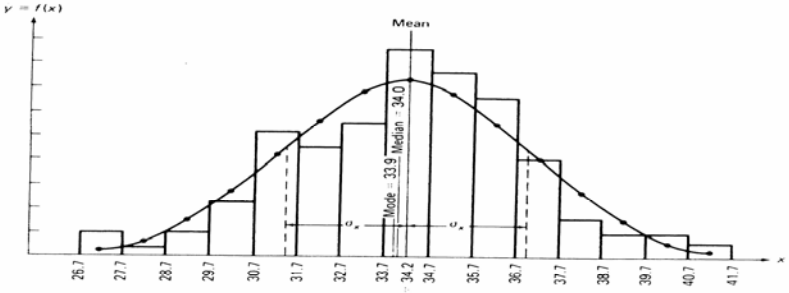
ข) ค่าคลาดเคลื่อนขนาดเล็กจะมีจำนวนมากกว่าค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่

ค) ค่าคลาดเคลื่อนที่มีขนาดใหญ่มากๆจะไม่เกิดขึ้น

จากคุณลักษณะของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มดังกล่าว การแจกแจงค่าการวัดที่มีเฉพาะค่าคลาดเคลื่อนสุ่มแฝงอยู่จะมีการแจกแจงแบบปกติ (*normal distribution*) กล่าวอีกนัยหนึ่งโค้งแจกแจงค่าการวัดจะเป็นโค้งปกติซึ่งมีลักษณะที่สำคัญ คือ โค้งจะมีลักษณะสมมาตรทั้งสองด้านของค่าเฉลี่ยมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ

ตัวอย่าง การแจกแจงค่าการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนสุ่ม เช่น จากการอ่านไมโครมิเตอร์ของกล้อง *Wild T*-2 จำนวน 127 ครั้งได้ค่าและผลการแจกแจงค่าการวัดเป็นไปดังรูปที่ 2.2

n	Value, " of arc	n	Value, " of arc	n	Value, " of arc
1	27.2	43	31.9	85	34.1
2	29.0	44	30.5	86	32.9
3	37.4	45	35.7	87	36.2
4	37.0	46	30.0	88	33.9
5	32.0	47	36.7	89	28.2
6	32.5	48	35.6	90	33.0
7	36.0	49	33.8	91	31.2
8	35.0	50	30.8	92	32.1
9	33.8	51	37.1	93	34.0
10	34.0	52	33.9	94	33.0
11	35.0	53	32.4	95	33.6
12	30.0	54	33.9	96	33.5
13	34.7	55	33.9	97	33.8
14	35.5	56	34.5	98	36.2
15	36.0	57	36.7	99	37.3
16	37.0	58	32.9	100	33.9
17	35.0	59	32.1	101	35.8
18	36.0	60	36.3	102	36.2
19	34.8	61	30.1	103	38.3
20	33.5	62	32.8	104	39.9
21	35.0	63	31.8	105	37.4
22	35.7	64	33.1	106	37.1
23	38.0	65	30.8	107	37.9
24	31.3	66	35.7	108	33.2
25	33.0	67	34.5	109	35.8
26	31.0	68	30.6	110	39.1
27	31.2	69	35.6	111	31.0
28	31.5	70	37.2	112	34.0
29	32.0	71	31.7	113	34.0
30	36.1	72	32.0	114	31.0
31	37.5	73	35.7	115	33.1
32	36.1	74	35.5	116	32.0
33	33.0	75	32.1	117	34.1
34	36.0	76	35.2	118	36.5
35	28.8	77	34.5	119	39.1
36	28.8	78	34.9	120	36.0
37	37.4	79	33.9	121	41.1
38	27.0	80	32.7	122	35.6
39	31.2	81	35.6	123	38.7
40	31.1	82	34.3	124	40.7
41	31.2	83	34.2	125	35.2
42	34.0	84	35.0	126	40.6
				127	33.1



รูปที่ *2.2* ข้อมูลจากการอ่านกล้อง *WILD T2* จำนวน *127* ครั้งและกราฟแสดงการแจกแจงข้อมูล

ความคลาดเคลื่อนสุ่มเกิดขึ้นและเป็นไปตามทฤษฎีของความน่าจะเป็น โค้งแจกแจงค่าการวัดเป็นโค้งปกติ ค่าทางสถิติที่ใช้เป็นตัวแทนหรือใช้อธิบายลักษณะของข้อมูล คือค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าเฉลี่ยจะแสดงตำแหน่งของข้อมูล และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงลักษณะการกระจายของข้อมูล เช่นเดียวกับค่าการวัดที่ดีที่สุดและขนาดของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม จะแสดงลักษณะผลลัพธ์และคุณภาพของค่าการวัด

6.1 **ค่าการวัดที่ดีที่สุด** การวัดที่กระทำซ้ำๆกัน ซึ่งมีการกระจายของค่าการวัดเป็นการแจกแจงแบบโค้งปกติ ค่าการวัดและขนาดของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มก็จะเป็นไปตามทฤษฎีความน่าจะเป็น คือ ค่าการวัดน่าจะเป็นหรือค่าที่ดีที่สุดเท่ากับค่าเฉลี่ยของการวัดที่เหมือนกันหลายๆครั้ง ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

ก) การวัดที่มีระดับความน่าเชื่อถือเท่ากัน

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n}{n}$$

เมื่อ $X_1, X_2, X_3, ...X_n$ คือ ค่าที่วัดได้ในแต่ละครั้ง

n คือ จำนวนครั้งหรือชุดการวัด

ข) การวัดที่มีระดับความน่าเชื่อถือต่างกัน

$$\bar{x} = \frac{w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + ... + w_nx_n}{w_1 + w_2 + w_3 + ... + w_n}$$

เมื่อ $X_1, X_2, X_3, ...X_n$ คือ ค่าที่วัดได้ในแต่ละครั้ง

$W_1, W_2, W_3, ...W_n$ คือ ค่าน้ำหนักของค่าการวัดแต่ละค่า

6.2 **ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม** ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนสุ่มแสดงด้วยค่าที่บ่ายเบนจากค่าเฉลี่ย ค่าบ่ายเบนนี้จะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับการกระจายของค่าการวัดและความน่าเป็นของการวัด ถ้ากำหนดความน่าจะเป็นสูงค่าบ่ายเบนจะมีค่าใหญ่และในทางกลับกัน

การหาขนาดความคลาดเคลื่อนสุ่มตามทฤษฎีความน่าจะเป็น ความน่าจะเป็นของค่าการวัดในช่วงความคลาดเคลื่อนสุ่มใดจะเท่ากับสัดส่วนของพื้นที่ใต้โค้งที่อยู่ระหว่างช่วงนั้นกับพื้นที่ใต้โค้งทั้งหมด ถ้าให้พื้นที่ใต้โค้งเท่ากับ1 ความน่าจะเป็นของค่าการวัดที่อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนสุ่มที่กำหนดจะเท่ากับพื้นที่ใต้โค้งที่อยู่ระหว่างช่วงความคลาดเคลื่อนสุ่มนั้น ความคลาดเคลื่อนสุ่มที่กำหนดใช้ในงานรังวัดมี 2 ค่า ได้แก่

- ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน *(Standard error)*
- ค่าคลาดเคลื่อนสุมเป็นไปได้ *(Probable error)*

ก) **ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน** คือ ค่าที่บ่ายเบนจากค่าเฉลี่ย โดยมีความน่าเป็นของการวัดเท่ากับ *0.6827* ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน หาจากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}$$

เมื่อ v = เศษเหลือ

n = จำนวนการวัด

σ_s = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าการวัดหนึ่ง

σ_m = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าการวัดเฉลี่ย

กรณีการวัดมีระดับความน่าเชื่อถือไม่เท่ากัน จะต้องนำค่าน้ำหนักมาคิดด้วยดังนี้

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum (wv^2)}{(\sum w)(n-1)}}$$

ข) **ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มเป็นไปได้** คือ ค่าที่บ่ายเบนจากค่าเฉลี่ยโดยมีความน่าเป็นของการวัดเท่ากับ *0.5* ค่าคลาดเคลื่อนสุ่มที่เป็นไปได้สามารถหาจากค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานดังนี้

$$E_p = 0.6745\,\sigma_m$$

ตัวอย่าง การวัดระยะทางระหว่างจุด 2 จุดด้วยเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 10 ครั้ง ได้ค่าดังตาราง จงหาระยะทางที่ดีที่สุด ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปได้

	ระยะทาง (ม.)	v	v^2
1	574.467	-.002	0.000004
2	.460	+.005	0.000025
3	.469	-.004	0.000016
4	.465	-.000	0.000000
5	.471	-.006	0.000036
6	.461	+.004	0.000016
7	.463	+.002	0.000004
8	.466	-.001	0.000001
9	.460	+.005	0.000025
10	.468	-.003	0.000009
ค่าเฉลี่ย = 574.465		$\sum v^2 = 0.000136$	

การวัดที่มีระดับความน่าเชื่อถือเท่ากัน

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n}{n}$$

ระยะทางที่ดีที่สุดคือค่าเฉลี่ยที่ได้ = 574.465 เมตร

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.000136}{(10-1)}} = \pm 0.00389 \text{ เมตร}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} = \pm 0.00123 \text{ เมตร}$$

$$E_p = 0.6745 \times 0.00123 = \pm 0.0008 \text{ เมตร}$$

<u>ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน = $\pm$ 0.00123 เมตร ค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปได้ = $\pm$ 0.0008 เมตร</u>

ตัวอย่าง การหาค่าระดับของจุดจุดหนึ่งโดยทำระดับมาหลายทาง ได้ค่าระดับและค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปได้ดังนี้ *219.776±0.007, 219.274±0.012, 219.645±0.018,* และ *219.965±0.024* เมตร จงหาค่าระดับและค่าคลาดเคลื่อนเป็นไปได้ของจุดดังกล่าว

	ค่าระดับที่วัดได้	*W*	*WX*	*v*	*Wv2*
1	*219.776±0.007*	$\frac{1}{0.007^2}$	*4485224*	*-0.019*	*7.200354*
2	*219.874±0.012*	$\frac{1}{0.012^2}$	*1526903*	*0.079*	*43.578225*
3	*219.645±0.018*	$\frac{1}{0.018^2}$	*677917*	*-0.150*	*69.244064*
4	*219.965±0.024*	$\frac{1}{0.024^2}$	*381884*	*0.170*	*50.301527*
		32175.14	*7071928.61*		*170.324171*

น้ำหนักการวัดแปรผกผันกับกำลังสองของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

$$\bar{X} = \frac{7071928.61}{32175.14} = 219.795 \text{ เมตร}$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{170.324171}{(4-1)\times 32175.14}} = \pm 0.042 \text{ เมตร}$$

$$Ep = 0.6745 \times 0.042 = \pm 0.028 \text{ เมตร.}$$

ค่าระดับที่น่าจะเป็นคือ 219.795 ± 0.028 เมตร

7. การแพร่ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

งานรังวัดประกอบด้วยการวัดทางตรงและการวัดทางอ้อม การวัดทางตรงสามารถหาขนาดค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มได้ตามวิธีการที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.7 แต่การวัดทางอ้อมผลลัพธ์เป็นค่าที่ได้โดยคำนวณจากค่าการวัดทางตรง การหาค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของผลลัพธ์จึงต้องคำนวณจากค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าที่วัดได้ โดยเป็นไปตามหลักการแพร่ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม (*Propagation of Random Errors*) สามารถแสดงด้วยสมการของความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนสุ่มของผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับความคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าที่วัดได้ดังนี้

$$U = f(X1, X2, \ldots Xn)$$

$$E_U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial X_1}\ell X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial X_2}\ell X_2\right)^2 + \ldots\ldots + \left(\frac{\partial U}{\partial X_n}\ell X_n\right)^2}$$

กำหนดให้ U คือ ค่าการวัดทางอ้อมหรือค่าที่คำนวณได้

$X1,\ X2,\ \ldots Xn$ คือ ค่าปริมาณที่ทำการวัดทางตรง

$\ell X_1\ ,\ell X_2\ ,\ldots\ell X_n$ คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าการวัดทางตรง

E_U คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่มของค่าที่คำนวณได้

ตัวอย่าง การวัดระยะเส้นฐานเส้นหนึ่งด้วยแถบวัดระยะโดยวัดแบ่งเป็น 5 ช่วง แต่ละช่วงทำการวัดอย่างระมัดระวัง และคำนวณค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของแต่ละช่วงได้ ± 6.0, ± 5.7, ± 6.3, ± 5.6 และ ± 6.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จงคำนวณค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของเส้นฐานนี้

ให้ D เป็น ความยาวของเส้นฐาน

$d1, d2, d3, d4, d5$ เป็น ระยะที่วัดได้ในแต่ละช่วง

$$D = d1 + d2 + d3 + d4 + d5$$

$$\frac{\partial D}{\partial d\,1} = \frac{\partial D}{\partial d\,2} = \frac{\partial D}{\partial d\,3} = \frac{\partial D}{\partial d\,4} = \frac{\partial D}{\partial d\,5} = 1$$

$$E_D = \sqrt{(1\times 6.0)^2 + (1\times 5.7)^2 + (1\times 6.3)^2 + (1\times 5.6)^2 + (1\times 6.2)^2}$$

$$= \pm 13.3$$

ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของเส้นฐานคือ ± 13.3 มิลลิเมตร

ตัวอย่าง วัดความยาวด้านทั้งสองของที่ดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ *123.30 ± 0.04* ม. และ *48.30 ± 0.03* ม. จงหาพื้นที่และค่าคลาดเคลื่อนสุ่มของพื้นที่

ให้ *A* เป็น พื้นที่ที่ดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

d1, *d2*, เป็น ความยาวด้านที่วัดได้

$A = d1 \times d2$

$= 123.30 \times 48.30 = 5955.39$ ตารางเมตร

$\frac{\partial A}{\partial d1} = d2 = 48.30$ ม.

$\frac{\partial A}{\partial d2} = d1 = 123.30$ ม.

$E_A = \sqrt{(48.30 \times 0.04)^2 + (123.30 \times 0.03)^2}$

$= \pm 4.17$

พื้นที่ที่ดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าคือ 5955.39 + 4.17 ตารางเมตร

ตัวอย่าง วัดระยะระหว่างหมุด *2* หมุด ด้วยแถบวัดระยะโดยวัดตามพื้นลาดเอียงได้ *83.73 ± 0.01* เมตร และวัดมุมลาดเอียงได้ *3° 20′ ± 0.5′* จงหาค่าระยะราบ และความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น

ให้ *H* เป็น ระยะราบระหว่างหมุด

l เป็น ระยะตามพื้นเอียง

α เป็น มุมลาดเอียง

$H = l \times \cos(\alpha)$

$= 83.73 \times \cos(3°20') = 83.59$ *เมตร*

$\frac{\partial H}{\partial l} = \cos(3°20') = 0.998$

$\frac{\partial H}{\partial \alpha} = -l \times \sin(3°20') = 4.868$ *เมตร*

$E_H = \sqrt{(0.998 \times 0.01)^2 + (4.868 \times 0.5 \times 60 \times \sin 1'')^2}$

$= \pm 0.01$ *เมตร*

ระยะทางราบระหว่างหมุดคือ 83.59 ± 0. 01 เมตร

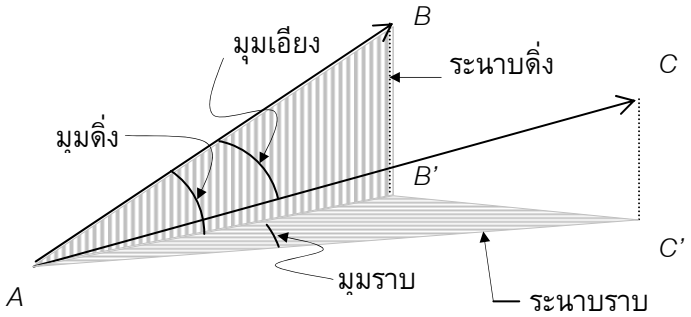
3--ทิศทางและการวัดมุม

1. นิยามเบื้องต้น

1.1. **เส้น** ได้แก่ เส้นดิ่ง*(Vertical line)* กับ เส้นราบ*(Horizontal line)* เส้นดิ่งเป็นเส้นที่มีทิศตามแนวแรงดึงดูดของโลก ที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวโลกจะมีเส้นดิ่งเพียงเส้นเดียวเท่านั้น เส้นดิ่งจึงเป็นเส้นอ้างอิงหลัก การหาเส้นดิ่งหรือแนวดิ่งทำได้ง่ายโดยการแขวนลูกดิ่งเหนือจุดนั้น ส่วนเส้นราบเป็นเส้นที่ตั้งฉากกับเส้นดิ่งซึ่งมีได้รอบเส้นดิ่ง การหาเส้นราบหรือแนวราบมักใช้หลอดระดับช่วย (ทั่วไปเรียกลูกน้ำ)

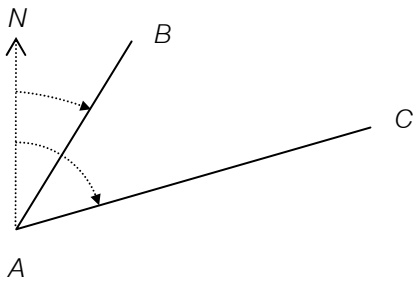
1.2. **ระนาบ** ได้แก่ ระนาบดิ่ง*(Vertical plane)* กับ ระนาบราบ*(Horizontal plane)* ระนาบดิ่งที่จุดใดคือระนาบที่มีเส้นดิ่งที่ผ่านจุดนั้นอยู่บนระนาบ ส่วนระนาบราบคือระนาบที่ตั้งฉากกับเส้นดิ่งที่จุดนั้น

1.3. **มุม** ได้แก่ มุมดิ่ง *(Vertical angle)* และ มุมราบ *(Horizontal angle)* มุมดิ่ง คือ มุมที่วัดบนระนาบดิ่งโดยวัดเป็นมุมกัมหรือมุมเงยจากระนาบราบตรงจุดที่ทำการวัด ส่วนมุมราบคือมุมระหว่างระนาบดิ่ง 2 ระนาบ ที่วัดบนระนาบราบตรงจุดที่ทำการวัดนั้น ดังนั้นเส้นตรงสองเส้นตัดกัน ถ้าเส้นตรงทั้งสองไม่อยู่ในแนวราบมุมระหว่างเส้นทั้งสองนั้นจะไม่ใช่มุมราบ แต่จะเป็นมุมบนระนาบเอียง มุมราบของเส้นตรงสองเส้นตัดกัน คือ มุมระหว่างระนาบดิ่งสองระนาบที่ผ่านเส้นตรงสองเส้นนั้นและต้องเป็นมุมที่วัดบนระนาบราบที่จุดนั้นด้วย



รูปที่ 3.1 แสดงมุมดิ่ง มุมราบ มุมเอียง

1.4. **ทิศทาง** ทิศทางของแนวเส้นตรงใดๆคือ มุมราบที่วัดจากแนวอ้างอิงเส้นหนึ่งไปยังเส้นตรงนั้น แนวอ้างอิงนี้เรียกว่า เมอริเดียน หรือเรียกกันทั่วไปว่า แนวเหนือ-ใต้



รูปที่ 3.2 แสดงทิศทาง *AB* และ *AC*

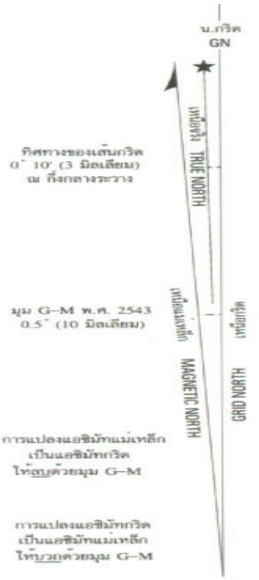
2. **เมอริเดียน** (meridian)

เมอริเดียนเป็นเส้นที่สมมุติขึ้นบนผิวโลกเพื่อใช้เป็นแนวอ้างอิงในการแสดงทิศทางของเส้นตรงใดๆ ในงานสำรวจและแผนที่มีแนวเมอริเดียน 4 ชนิด คือ

2.1. **เมอริเดียนภูมิศาสตร์** (Geographic meridian) คือ แนวเหนือ-ใต้ภูมิศาสตร์ หรือแนวเหนือ-ใต้จริง โดยจินตนาการจากแกนหมุนของโลกแทงทะลุผิวโลกที่จุด 2 จุด เรียกว่า ขั้วเหนือภูมิศาสตร์ และขั้วใต้ภูมิศาสตร์ รอยตัดระหว่างผิวระดับกับระนาบดิ่งที่ผ่านขั้วเหนือภูมิศาสตร์และขั้วใต้ภูมิศาสตร์ เรียกว่า เมอริเดียนภูมิศาสตร์ แนวที่ชี้ไปทางขั้วเหนือภูมิศาสตร์เป็นทิศเหนือภูมิศาสตร์ ส่วนแนวที่ชี้ไปทางขั้วใต้ภูมิศาสตร์เป็นทิศใต้ภูมิศาสตร์ ทิศเหนือ-ใต้ภูมิศาสตร์ถือเป็นทิศเหนือ-ใต้จริง แนวที่ชี้ไปยังดวงดาวดวงหนึ่งขณะที่มีมุมสูงมากที่สุด จะเป็นแนวเมอริเดียนภูมิศาสตร์ ซึ่งหาได้จากการรังวัดทางดาราศาสตร์

2.2. **เมอริเดียนแม่เหล็ก** *(Magnetic meridian)* คือ แนวเหนือ-ใต้แม่เหล็กโลก เนื่องจากภายในโลกเสมือนมีแท่งแม่เหล็กธรรมชาติแท่งใหญ่วางอยู่ โดยมีขั้วเหนือและขั้วใต้อยู่ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับขั้วเหนือและขั้วใต้ทางภูมิศาสตร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กโลกขึ้น ถ้าแขวนแท่งแม่เหล็กที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวให้อยู่ในแนวราบ เมื่อแท่งแม่เหล็กหยุดแกว่งจะวางตัวตามแนวของเส้นแรงแม่เหล็กโลก ซึ่งก็คือแนวเมอริเดียนแม่เหล็ก ปลายแท่งแม่เหล็กที่ชี้ไปทางขั้วเหนือแม่เหล็กโลกแสดงทิศเหนือแม่เหล็ก ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งชี้ไปทางขั้วใต้แม่เหล็กโลกแสดงทิศใต้แม่เหล็ก

2.3. **เมอริเดียนกริด** *(Grid meridian)* คือ เส้นแสดงแนวเหนือ-ใต้ของเส้นโครงแผนที่ อาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งขึ้นอยู่กับชนิดของการฉายแผนที่ ซึ่งเป็นวิธีการถ่ายทอดรายละเอียดบนผิวโลกลงบนแผนที่ เป็นการฉายจุดบนรูปทรงกลมลงบนระนาบหรือพื้นผิวรูปทรงที่สามารถคลี่เป็นแผ่นระนาบได้ เช่น รูปกรวย รูปทรงกระบอก ในแผนที่ทั่วไปจะพบเห็นเป็นรูปตาราง เส้นในแนวเหนือ-ใต้บนแผนที่ก็คือเมอริเดียนกริด



รูปที่ 3.3 แสดงทิศเหนือจริง ทิศเหนือแม่เหล็ก และทิศเหนือกริด จากแผนที่ *L7018* พื้นที่อำเภอหาดใหญ่

2.4. **เมอริเดียนสมมุติ** *(Assumed meridian)* คือ ทิศเหนือ-ใต้สมมุติ เป็นการสมมุติขึ้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณหรือการทำงานที่ไม่สนใจทิศทางที่แท้จริง

3. **แบริงและแอซิมัธ** (bearing and azimuth)

3.1. **ชนิดของแบริงและแอซิมัธ** ทิศทางของเส้นตรงใด คือ มุมราบที่วัดออกจากเส้นเมอริเดียนที่ผ่านจุดบนเส้นตรงไปยังแนวเส้นตรงนั้น

แบริง คือทิศทางที่แสดงโดยการวัดมุมราบออกจากทิศเหนือหรือทิศใต้ของเมอริเดียน ไปยังเส้นตรง เป็นการเรียกทิศทางตามภาคทิศ *(Quadrant)* โดยขนาดมุมไม่เกิน 1 มุมฉาก และกำกับมุมด้วยตัวอักษรแสดงทิศทั้ง 4 คือ เหนือ(N) ใต้ (S) ออก (E) ตก (W)

แอซิมัธ คือ ทิศทางที่แสดงโดยการวัดมุมราบตามเข็มนาฬิกาจากทิศเหนือของแนวเมอริเดียนไปยังเส้นตรง

แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามชนิดของเมอริเดียนที่อ้างอิง คือ

1) แบริงจริงหรือแอซิมัธจริง ถ้าทิศทางของเส้นวัดอ้างอิงกับเส้นเมอริเดียนภูมิศาสตร์

2) แบริงแม่เหล็กหรือแอซิมัธแม่เหล็ก ถ้าทิศทางของเส้นวัดอ้างอิงกับเส้นเมอริเดียนแม่เหล็ก

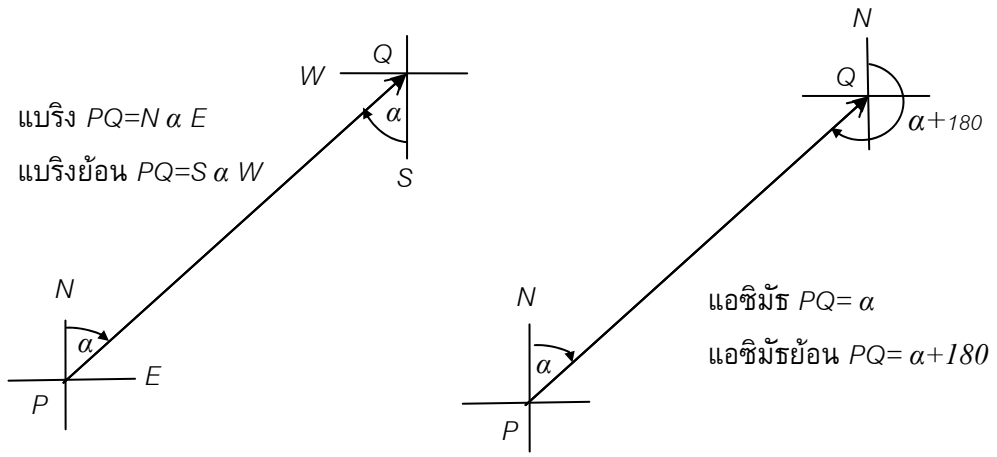
3) แบริงกริดหรือแอซิมัธกริด ถ้าทิศทางเส้นวัดอ้างอิงกับเส้นเมอริเดียนกริดของแผนที่

4) แบริงสมมุติหรือแอซิมัธสมมุติ ถ้าทิศทางของเส้นวัดอ้างอิงกับเส้นเมอริเดียนสมมุติ

3.2. **แบริงย้อนและแอซิมัธย้อน** เส้นตรงใดๆมี 2 ทิศทางซึ่งตรงข้ามกัน คือทิศทางหน้าและทิศทางหลัง การวัดหรือแสดงทิศทางของเส้นตรงด้วยแบริงหรือแอซิมัธ จะหมายถึงทิศทางหน้าของเส้นตรงนั้น และในทิศทางที่ตรงข้ามจะเรียกว่า แบริงย้อน *(back bearing)* หรือ แอซิมัธย้อน *(back azimuth)* ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางหน้ากับทิศทางย้อนจะเป็นดังนี้

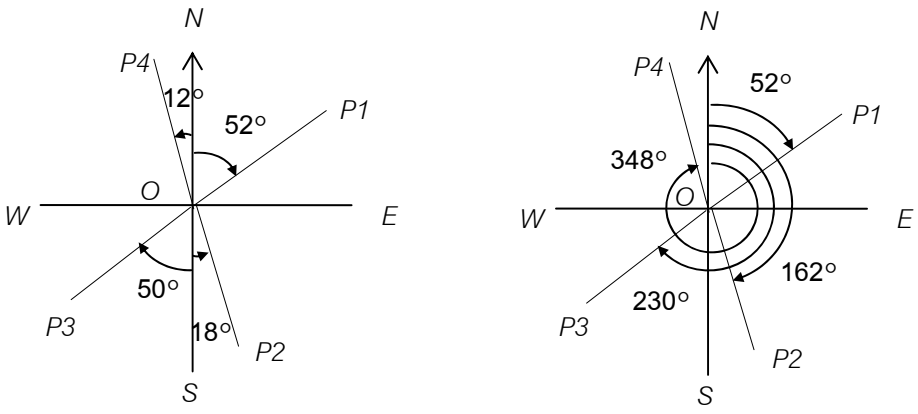
1) แบริง แบริงย้อนของแนวเส้นใดๆจะมีขนาดมุมเท่ากับแบริงของแนวเส้นนั้นแต่อักษรกำกับภาคทิศจะตรงข้าม

2) แอซิมัธ แอซิมัธย้อนของแนวเส้นใดๆจะมีขนาดต่างจากแอซิมัธของแนวเส้นนั้นเท่ากับ 180°



รูปที่ 3.4 (ก) ทิศทางแบริง *PQ* และแบริงย้อน *PQ* (ข) ทิศทางแอซิมัธ *PQ* และแอซิมัธย้อน *PQ*

3.3. **การแปลงค่าทิศทางแบริงกับแอซิมัธ** ให้พิจารณาภาคทิศของทิศทางแนวเส้นที่ต้องการแปลงค่า แล้วทำการแปลงค่าตามวิธีในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 ทิศทางแบริงและทิศทางแอซิมัธ บนภาคทิศทั้ง 4

$$OP1 = N\,52^{o}\,E = 52^{o}$$
$$OP2 = S\,18^{o}\,E = 162^{o}$$
$$OP3 = S\,50^{o}\,W = 230^{o}$$
$$OP4 = N\,12^{o}\,W = 348^{o}$$

ตารางที่ 3.1 การแปลงค่าทิศทางระหว่างแบริงกับแอซิมัธ

แนว	ภาคทิศ	การหาแบริงจากแอซิมัธ		หา แอซิมัธจากแบริง	
OP1	*1*	N *(Az)* E	***N 52° E***	Br	***52°***
OP2	*2*	S *(180-Az)* E	***S 18° E***	180 – Br	***162°***
OP3	*3*	S *(Az-180)* W	***S 50° W***	180 + Br	***230°***
OP4	*4*	N *(360-Az)* W	***N 12° W***	360 – Br	***348°***

ข้อสังเกต

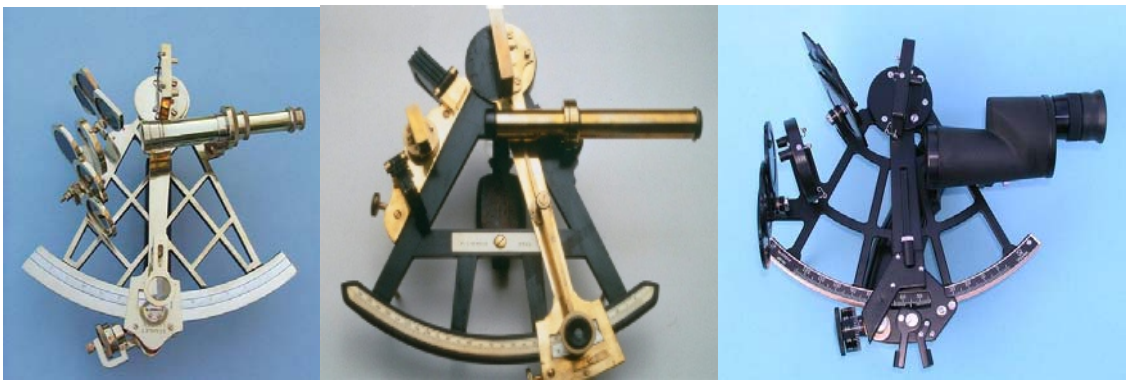
1) ทิศทางแบริง อักษรกำกับภาคทิศตัวแรกจะเป็น N หรือ S เท่านั้น เพราะทิศทางเป็นมุมราบที่วัดออกจากทิศเหนือหรือทิศใต้ของเมอริเดียน
2) ทิศทางแอซิมัธไม่นิยมแสดงเป็นค่าลบ(-) หากมีค่าเป็นลบจะบวกด้วย 360°
3) การระบุตำแหน่งของจุดในแผนที่หรืองานรังวัดใช้ระบบ N-E ซึ่งต่างกับระบบ X-Y ที่คุ้นเคย คือ แกนในแนวตั้งคือแกนเมอริเดียนจะเป็น N และในแนวนอนคือแกนขนานจะเป็น E และภาคทิศในระบบ N-E จะเรียงลำดับในทิศตามเข็ม เหมือนกับแอซิมัธ

4. เครื่องมือวัดมุมและทิศทาง

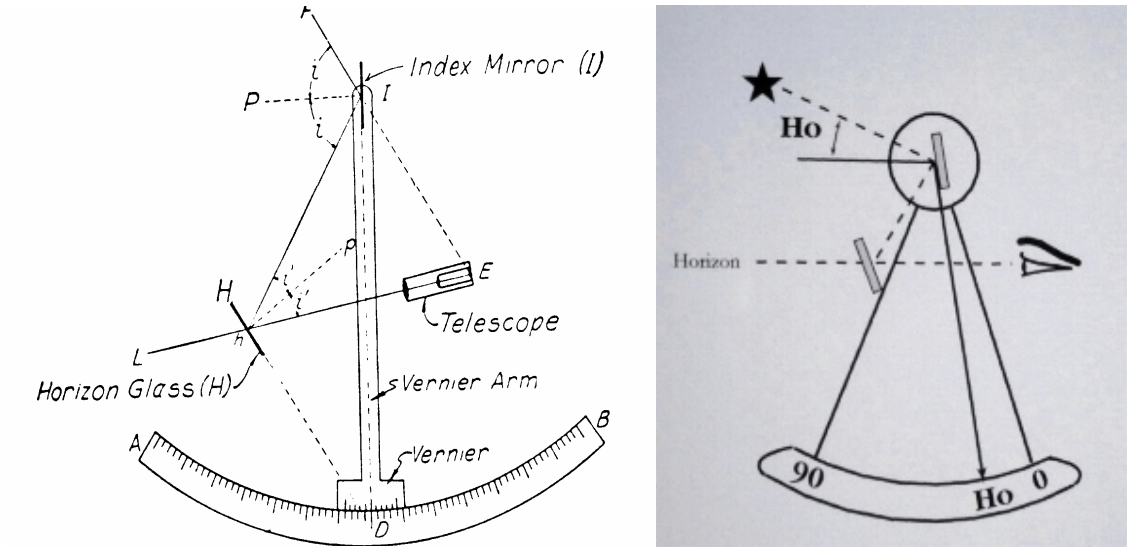
เครื่องมือที่ใช้วัดมุมหรือทิศทางในงานสำรวจ ได้แก่ sextant เข็มทิศ และ กล้องธีโอโดไลท์ *(Theodolite)*

4.1. **Sextant** เป็นเครื่องมือวัดมุมระบบทัศน์ใช้มือถือ สำหรับวัดมุมดิ่งหรือมุมระหว่างคู่เป้าโดยวัดบนระนาบที่ผ่านเป้า ในอดีตนิยมใช้ Sextant ในการวัดเพื่อหาตำแหน่งสำหรับการเดินเรือ และใช้วัดมุมสูงของดวงดาว

วิธีใช้งาน จากจุดวัดเล็งกล้องของ Sextant ไปยังเป้าข้างหนึ่ง (ถ้าวัดมุมดิ่งแนวเล็งของกล้องจะอยู่ในแนวราบ) แล้วเลื่อนดัชนีจานองศาจนเห็นภาพสะท้อนของเป้าอีกข้างหนึ่งจนตรงกับเป้าข้างแรก แล้วอ่านค่ามุมระหว่างเป้าทั้งสอง หลักการวัดมุมใช้วิธีการสะท้อนภาพเป้าข้างหนึ่งสองครั้ง การสะท้อนครั้งหลังแนวแสงจะขนานกับแนวจากจุดวัดไปยังเป้าอีกข้างหนึ่งทำให้เห็นภาพของเป้าทั้งสองอยู่ตรงกัน ค่ามุมบนจานองศา เป็นมุมระหว่างเป้าทั้งสอง



รูปที่ 3.6 Sextant แบบต่างๆ



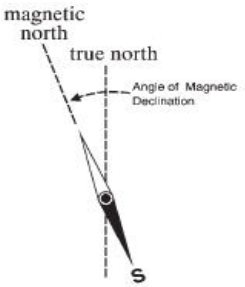
รูปที่ 3.7 เรขาคณิตการวัดมุมของ Sextant

4.2. **เข็มทิศสำรวจ** เป็นเครื่องมือวัดทิศทางของเส้นตรง โดยอ้างอิงกับทิศเหนือแม่เหล็กโลก การรังวัดด้วยเข็มทิศเป็นการรังวัดที่ทำได้ง่าย เพราะวิธีการใช้เข็มทิศไม่ซับซ้อน แต่ผลการวัดมีความละเอียดต่ำเหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูง ส่วนประกอบที่สำคัญของเข็มทิศสำรวจ คือ แท่งแม่เหล็ก แท่งแม่เหล็กมีคุณสมบัติที่ใช้ในการวัดทิศทาง คือถ้าแขวนแท่งแม่เหล็กให้อยู่ในสมดุล หลังจากแกว่งจนหยุดนิ่งแล้ว อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกจะทำให้แท่งแม่เหล็กที่แขวนหยุดนิ่งชี้ในแนวเหนือ-ใต้แม่เหล็กโลกหรือเมอริเดียนแม่เหล็ก แต่เนื่องจากขั้วเหนือและขั้วใต้ของแท่งแม่เหล็กโลกไม่อยู่ตำแหน่งเดียวกับขั้วเหนือและขั้วใต้ทางภูมิศาสตร์ ฉะนั้นแนวเหนือ-ใต้ที่ได้จากการใช้เข็มทิศจะไม่ใช่แนวเหนือ-ใต้จริง

รูปที่ 3.8 เข็มทิศสำรวจแบบต่างๆ

การรังวัดด้วยเข็มทิศสำรวจเกี่ยวข้องโดยตรงกับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลก ฉะนั้นจึงควรเข้าใจคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กโลกบางประการ ดังนี้

ก) มุมบ่ายเบนเหล็ก *(Magnetic declination)* คือ มุมที่เมอริเดียนแม่เหล็กเบี่ยงเบนจากเมอริเดียนจริง หรือมุมระหว่างเข็มทิศกับทิศเหนือจริง มุมบ่ายเบนแม่เหล็กแสดงด้วยขนาดของมุมและอักษรแสดงทิศ หรือใช้เครื่องหมายกำกับ คือ ถ้าเบี่ยงเบนจากเมอริเดียนจริงไปทางขวาจะกำกับด้วยอักษร E หรือ + แต่ถ้าเบี่ยงเบนไปทางซ้ายจะกำกับด้วยอักษร W หรือ –



รูปที่ 3.9 มุมบ่ายเบนแม่เหล็ก

ข) มุมเทแม่เหล็ก (Magnetic dip) คือมุมที่แกนแม่เหล็กที่เอียงทำมุมกับแนวราบ ถ้าแขวนแท่งแม่เหล็กที่จุดศูนย์ถ่วงเมื่อแท่งแม่เหล็กหยุดนิ่งแท่งแม่เหล็กจะไม่วางตัวอยู่ในแนวระดับ ในซีกโลกเหนือปลายขั้วเหนือจะเอียงลาดลง

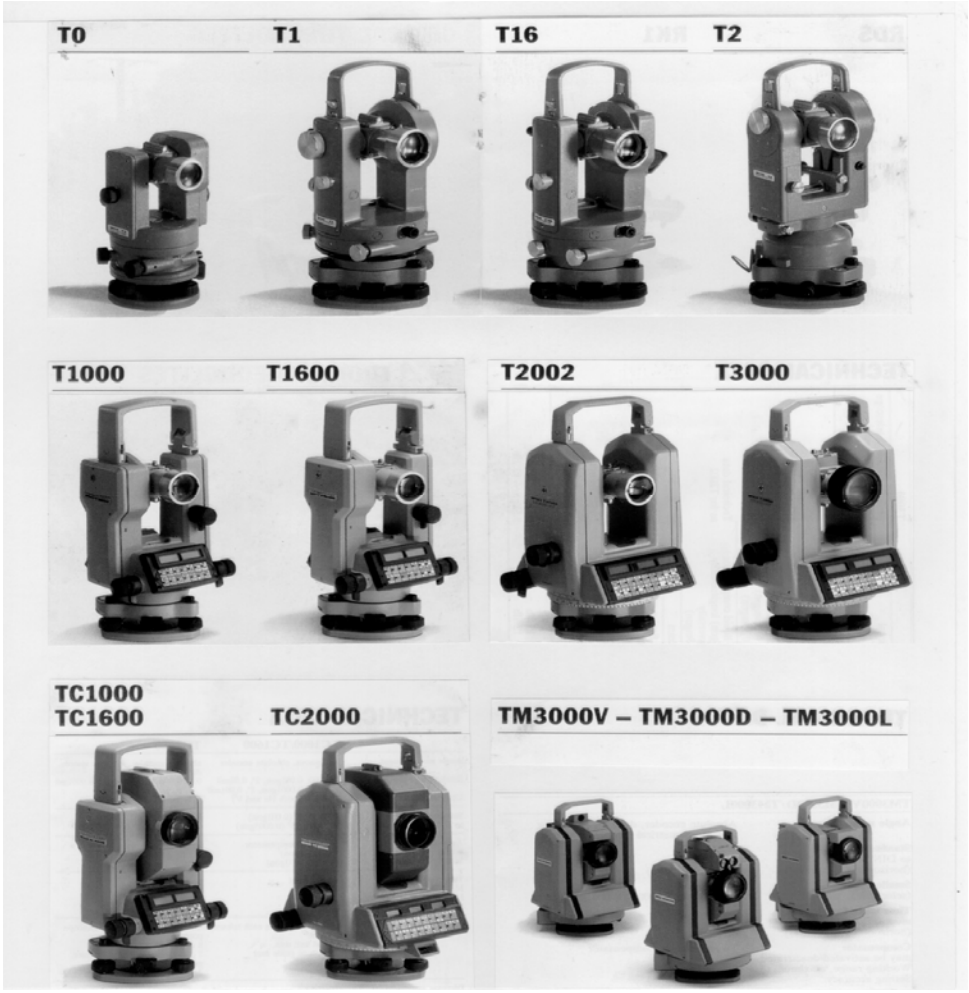
บนแผนที่สนามแม่เหล็กโลกจะแสดงค่ามุมบ่ายเบนแม่เหล็กของตำแหน่งต่างๆบนผิวโลก โดยแสดงเส้นที่ลากผ่านบริเวณที่มีค่ามุมบ่ายเบนแม่เหล็กเท่ากัน เรียกว่า *Isogonic Line* เส้นที่แสดงค่ามุมบ่ายเบนแม่เหล็กเป็นศูนย์ เรียกว่า *Agonic Line* และแสดงเส้นที่ลากผ่านบริเวณที่มีค่ามุมเทแม่เหล็กเท่ากัน เรียกว่า *Isoclinic Line* เส้นที่แสดงค่ามุมเทแม่เหล็กเป็นศูนย์ เรียกว่า *Aclinic line* ซึ่งจะอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร

4.3. **กล้องธีโอโดไลท์** *(Theodolite)* เดิมเรียกกล้องทรานสิท *(Transit)* เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับวัดหามุมราบและมุมดิ่งของแนวหรือเส้นตรงใดๆ กล้องธีโอโดไลท์มีมากมายหลายแบบ เนื่องจากมีการผลิตกล้องธีโอโดไลท์ออกใช้มานานแล้ว และมีการพัฒนาผลิตรุ่นใหม่ๆเรื่อยมา ฉะนั้นกล้องธีโอโดไลท์จึงมีรายละเอียดส่วนประกอบและมีวิธีการใช้แตกต่างกันไป แต่ถ้าพิจารณาโดยจำแนกตามลักษณะของจานองศาหรือวิธีการอ่านค่ามุม สามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิดคือ

ก) กล้องแบบเวอร์เนียร์ *(Vernier)* เป็นกล้องชนิดแรกเริ่ม อาศัยการแบ่งช่องที่มีขนาดต่างกันบนจานองศาและมาตรเลื่อน ทำให้อ่านค่ามุมได้ละเอียดขึ้น อาจมีแว่นขยายช่วยให้มองเห็นค่ามุมได้ชัดเจน

ข) กล้องแบบเชิงทัศน์ *(Optical Theodolite)* เป็นกล้องที่ใช้อุปกรณ์ที่อาศัยระบบการสะท้อนและการหักเหของแสงเป็นส่วนประกอบ เช่น เลนส์ ปริซึม กระจก ทำให้การอ่านค่ามุมง่ายขึ้น และใช้ไมโครมิเตอร์เพื่อให้สามารถวัดได้ละเอียดขึ้น

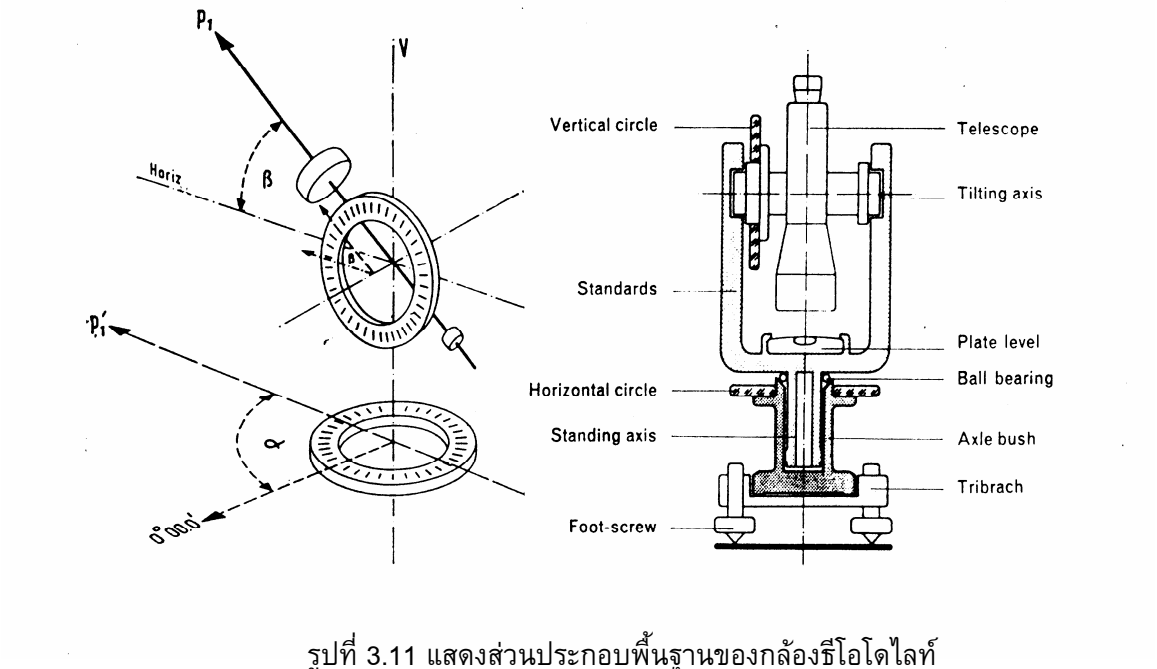
ค) กล้องแบบอิเลกทรอนิกส์ *(Electronics Theodolite)* เป็นกล้องที่ใช้เทคโนโลยี่ทางอิเลกทรอนิกส์และไมโครโปรเซสเซอร์ ทำให้ผู้ใช้กล้องสามารถอ่านค่ามุมจากจอแสดงผล โดยแสดงเป็นตัวเลข และยังสามารถเก็บค่าการวัดไว้ในอุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบหน่วยความจำแบบต่างๆอีกด้วย กล้องแบบอิเลกทรอนิกส์ถ้าสามารถวัดมุมและวัดระยะทางได้ด้วย เรียกว่า Total station



รูปที่ 3.10 กล้อง Wild ธีโอโดไลท์แบบต่างๆ

5. ส่วนประกอบของกล้องธีโอโดไลท์

กล้องธีโอโดไลท์เป็นเครื่องมือสำหรับวัดหามุมราบและวัดมุมดิ่งของแนวหรือเส้นตรงใดๆ ฉะนั้น ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องธีโอโดไลท์ จึงเป็นส่วนประกอบเพื่อการทำงานตามจุดประสงค์ของเครื่องมือ คือ แกนดิ่ง แกนราบ แนวเล็ง จานองศาดิ่ง จานองศาราบ และส่วนประกอบอื่นๆ เนื่องจากมีผู้ผลิตกล้องธีโอโดไลท์มากหลายบริษัท ฉะนั้นกล้องธีโอโดไลท์จึงมีมากมายหลายแบบหลายรุ่น และมีรายละเอียดส่วนประกอบแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบพื้นฐานตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของกล้องธีโอโดไลท์

นอกจากส่วนประกอบพื้นฐานแล้วหากพิจารณาในแง่การใช้งาน กล้องธีโอโดไลท์จะต้องมีส่วนประกอบหรือปุ่มปรับสำหรับการทำงานใน *3* ส่วน ต่อไปนี้

1) ส่วนที่เกี่ยวกับการตั้งกล้อง ได้แก่ ขากล้อง, ควงสามเส้า *(Foot-screw),* กล้องมองดิ่ง *(Optical plummet),*ลูกน้ำกลม *(Circular bubble)*, หลอดระดับ *(Plate level)*

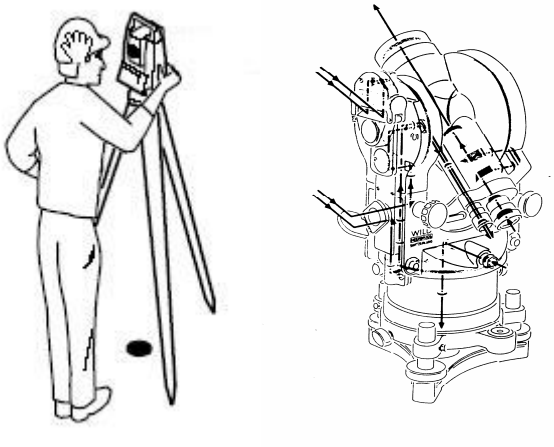
2) ส่วนที่เกี่ยวกับการเล็งเป้า ได้แก่ ศูนย์เล็งหน้า, ศูนย์เล็งหลัง, โฟกัสเส้นใยเล็ง, โฟกัสภาพ, ควงยึดราบ,ควงยึดดิ่ง, ควงสัมผัสราบ, ควงสัมผัสดิ่ง

3) ส่วนที่เกี่ยวกับการอ่านค่ามุม ได้แก่ ช่องแสงโฟกัส ช่องอ่านมุม ไมโครมิเตอร์ ลูกน้ำมุมดิ่ง และกลไกสำหรับตั้งค่ามุมราบ

6. การตั้งกล้องธีโอโดไลท์

การตั้งกล้องธีโอโดไลท์ คือ การติดตั้งกล้องธีโอโดไลท์บนขากล้องโดยให้แกนดิ่งของกล้องดิ่งจริงและอยู่ตรงจุดหมายซึ่งปกติจะเป็นหมุดที่สร้างขึ้น สิ่งที่ใช้บอกให้ทราบว่าแกนดิ่งอยู่แนวดิ่งหรือไม่คือดูจากลูกน้ำหลอดระดับ ฟองอากาศจะต้องอยู่กลางเสมอไม่ว่าจะหมุนกล้องไปทางใด และแกนดิ่งของกล้องอยู่ตรงจุดที่ต้องการหรือไม่ โดยแขวนลูกดิ่งกับขอที่ตรงกับศูนย์ของกล้อง หรือดูผ่านกล้องมองดิ่ง เส้นใยเล็งต้องตรงจุดหมาย

รูปที่ 3.12 การตั้งกล้องธีโอโดไลท์



การตั้งกล้องอาจมีการใช้ลูกดิ่งช่วยหรือไม่ใช้ลูกดิ่งก็ได้ โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติแต่ละวิธี ดังนี้

6.1. การตั้งกล้องโดยใช้ลูกดิ่ง

ก) ตั้งขากล้องเหนือจุดหมาย ปรับความยาวขาให้พอเหมาะ โดยให้ระดับแป้นฐานอยู่สูงประมาณหน้าอกและอยู่ในระนาบราบเท่าที่จะเป็นได้จากการดูด้วยตา ใช้ลูกดิ่งช่วยการวางตำแหน่งขากล้องโดยทำให้ลูกดิ่งอยู่ภายในรัศมี 30 ซม.จากหมุด

ข) กดขาสามขาให้แน่น ถ้าแนวลูกดิ่งเคลื่อนห่างจุดหมายมาก ให้ปรับความยาวของขากล้อง แนวลูกดิ่งจะเคลื่อนที่ ให้ปรับจนแนวลูกดิ่งเกือบตรงจุดหมาย

ค) เอาลูกดิ่งออก ติดตั้งกล้องบนแป้นฐาน ถ้าดูจุดหมายด้วยกล้องมองดิ่งอาจจะไม่เห็นจุดหมายก็ไม่เป็นไร ปรับควงสามเส้าให้ระดับฟองกลมได้ระดับ ดูจุดหมายด้วยกล้องมองดิ่ง ศูนย์กลางเส้นใยเล็งของกล้องมองดิ่งจะห่างจุดหมายไม่มาก

ง) คลายควงยึดกล้อง แล้วเลื่อนกล้องบนแป้นฐานของสามขาให้แนวดิ่งของกล้องตรงกับจุดหมาย แล้วยึดกล้องให้แน่น การเลื่อนระวังอย่าหมุนกล้องเพราะจะทำให้ระดับกล้องเคลื่อนไปมาก

จ) ปรับระดับกล้องขั้นละเอียด โดยหมุนกล้องให้แกนหลอดระดับขนานกับแนวควงสามเส้าคู่หนึ่ง หมุนควงสามเส้าคู่นั้นจนลูกน้ำของหลอดระดับอยู่กลางหมุนกล้องไป 90° หมุนควงสามเส้าตัวที่เหลือจนลูกน้ำของหลอดระดับอยู่กลาง

ตรวจสอบตำแหน่งแนวดิ่งของกล้องกับจุดหมายอีกครั้งด้วยกล้องมองดิ่ง ถ้าห่างจากจุดหมายให้ทำซ้ำในขั้นตอน ง) และปรับระดับกล้องขั้นละเอียดอีกครั้งเหมือนขั้นตอน จ)

6.2. **การตั้งกล้องโดยไม่ใช้ลูกดิ่ง**

ก) ตั้งขากล้องเหนือจุดหมายโดยปรับความยาวขาให้พอเหมาะ ให้ระดับแป้นฐานอยู่สูงประมาณหน้าอกและอยู่ในระนาบราบเท่าที่จะเป็นได้จากการดูด้วยตา

ข) ติดตั้งกล้องบนแป้นฐาน ดูจุดหมายด้วยกล้องมองดิ่ง หรือถ้าเป็นกล้องรุ่นใหม่จะมีอุปกรณ์ชี้เป้า *(Laser pointer)* จะต้องเห็นหรือตรงจุดหมาย พร้อมกับค่อยๆขยับวางขากล้องให้ศูนย์กลางกล้องมองดิ่งหรืออุปกรณ์ชี้เป้าจะตรงจุดหมาย

ค) กดขาสามขาให้แน่น ตรวจสอบเส้นใยเล็งของกล้องมองดิ่งห่างจากจุดหมายมากหรือไม่ ถ้ามากให้ปรับควงสามเส้าพร้อมกับดูจุดหมายทางกล้องมองดิ่ง จนเส้นใยเล็งของกล้องมองดิ่งตรงจุดหมาย โดยไม่ต้องสนใจระดับกล้อง

ง) ปรับระดับกล้องขั้นแรกด้วยการยืดหรือหดขากล้องในแนวที่กล้องเอียงโดยดูจากลูกน้ำกลม โดยทั่วไปจะปรับเพียง 2 ขาก็สามารถทำให้ลูกน้ำกลมได้ระดับ แต่เส้นใยเล็งของกล้องมองดิ่งจะเคลื่อนจากจุดหมายเล็กน้อย

จ) คลายควงยึดกล้อง แล้วเลื่อนกล้องบนแป้นฐานของสามขาให้แนวดิ่งของกล้องตรงกับจุดหมาย แล้วยึดกล้องให้แน่น การเลื่อนระวังอย่าหมุนกล้องเพราะจะทำให้ระดับกล้องเคลื่อนไปมาก

ฉ) ปรับระดับกล้องขั้นละเอียด โดยหมุนกล้องให้แกนหลอดระดับขนานกับแนวควงสามเส้าคู่หนึ่ง หมุนควงสามเส้าคู่นั้นจนลูกน้ำของหลอดระดับอยู่กลางหมุนกล้องไป 90 ^{o} หมุนควงสามเส้าตัวที่เหลือจนลูกน้ำของหลอดระดับอยู่กลาง

ตรวจสอบตำแหน่งแนวดิ่งของกล้องกับจุดหมายอีกครั้งด้วยกล้องมองดิ่ง ถ้าห่างจากจุดหมายให้ทำซ้ำในขั้นตอน จ) และปรับระดับกล้องขั้นละเอียดอีกครั้งเหมือนขั้นตอน ฉ)

หลังจากทำตามขั้นตอนที่กล่าวมาลูกน้ำหลอดระดับจะอยู่กลางเสมอไม่ว่าจะหมุนกล้องไปทางใด และแกนดิ่งจะตรงจุดหมายนั่นคือกล้องอยู่ในสภาพพร้อมที่จะวัดมุม

6.3. **เปรียบเทียบวิธีการตั้งกล้อง**

การปรับระดับของกล้องในขั้นต้นทำได้ 2 วิธี คือ

1) การหมุนควงสามเส้า เป็นการปรับระดับโดยฐานกล้องไม่เคลื่อนที่ ถ้าฐานกล้องไม่ได้ระดับแกนดิ่งจะเอียงมาก ทำให้แนวแกนดิ่งของกล้องเคลื่อนที่มาก จึงเหมาะกับการปรับในกรณีที่ฐานกล้องอยู่ตรงเหนือจุดหมาย แต่เมื่อมองผ่านกล้องมองดิ่งกลับเห็นศูนย์ของกล้องห่างจากจุดหมายมากหรือมองไม่เห็น

2) การยืดหดขากล้อง เป็นการปรับระดับและฐานกล้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ฉะนั้นจึงเหมาะกับกรณีที่แนวแกนดิ่งของกล้องชี้ตรงจุดหมายแต่ฐานกล้องไม่ได้ระดับ คือเมื่อมองผ่านกล้องมองดิ่งจึงเห็นศูนย์ของกล้องตรงจุดหมายแต่ตัวกล้องเอียงมาก

กล่าวโดยสรุป เมื่อฐานกล้องไม่ได้ระดับ ให้ปฏิบัติดังนี้

ก) ถ้าแขวนลูกดิ่งแล้ว ดิ่งชี้ตรงจุดหมาย ให้ปรับระดับกล้องโดยการหมุนควงสามเส้า

ข) ถ้ามองผ่านกล้องมองดิ่งเห็นศูนย์ของกล้องตรงจุดหมาย ให้ปรับระดับกล้องด้วยการยืดหดขา

7. การส่องกล้องธีโอโดไลท์

เมื่อมองผ่านกล้องโทรทรรศน์ *(Telescope)* จะเห็นเส้นใยเล็ง การส่องกล้องธีโอโดไลท์ คือ การทำให้จุดตัดเส้นใยเล็งหรือแนวเล็งตรงจุดเป้าหมาย การส่องกล้องในขณะที่จานองศาดิ่งอยู่ด้านซ้ายของกล้องโทรทรรศน์เรียกว่า กล้องหน้าซ้าย *(face left)* ถ้าขณะที่ส่องกล้องจานองศาดิ่งอยู่ด้านขวาของกล้องโทรทรรศน์จะเรียกว่า กล้องหน้าขวา *(face right)*

7.1. **การส่องกล้องให้ตรงเป้าหมาย** มีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

ก) ปรับโฟกัสของเลนส์ใกล้ตา ก่อนการเล็งเป้าหมายให้ปรับโฟกัสของเลนส์ใกล้ตาเพื่อให้เส้นใยเล็งเข้มชัดเจนไม่มีภาพเหลื่อม การปรับโฟกัสนี้จะปรับเพียงครั้งเดียวสำหรับผู้วัดคนหนึ่ง

ข) เล็งเป้าหมายโดยคลายควงยึดราบและควงยึดดิ่ง ส่ายกล้องโทรทรรศน์เล็งไปยังทิศทางของจุดโดยใช้ศูนย์หน้าและศูนย์หลังที่ติดอยู่เหนือกระบอกกล้องโทรทรรศน์ เมื่อตรงเป้าแล้วให้ขันควงยึดราบและควงยึดดิ่งให้แน่น

ค) ปรับโฟกัสของเลนส์ เพื่อให้เห็นภาพจุดเป้าหมายชัดเจน ซึ่งจะขึ้นกับระยะห่างของเป้า ถ้าการเล็งด้วยศูนย์หน้าและศูนย์หลังดี จุดตัดเส้นใยเล็งจะห่างจากเป้าหมายไม่มาก

ง) หมุนควงสัมผัสราบและควงสัมผัสดิ่งให้จุดตัดเส้นใยเล็งตรงจุดเป้าหมาย

หมายเหตุ การเล็งจุดเป้าหมายโดยใช้ประโยชน์จากศูนย์หน้าและศูนย์หลังให้เล็งผ่านศูนย์หน้าและศูนย์หลังให้ตรงเป้าหมายเช่นเดียวกับการเล็งปืน จะทำให้หาจุดเป้าหมายได้รวดเร็ว การเล็งโดยมองเข้าไปในกล้องโทรทรรศน์แล้วส่ายหาจุดเป้าหมาย เป็นวิธีการที่ผิด จะหาจุดเป้าหมายได้ช้า เนื่องจากโฟกัสของเลนส์จะไม่สอดรับกับระยะห่างของเป้าซึ่งเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนจุดเป้าหมาย และมุมมองเมื่อมองผ่านกล้องโทรทรรศน์จะจำกัด ทำให้มองหาเป้าไม่พบ

7.2. **การเลือกจุดเล็งและเป้า** การวัดมุมเพื่อให้ได้ค่าการวัดที่ดี นอกจากการส่องเป้าหมายอย่างประณีตแล้ว การเลือกจุดเล็งและชนิดเป้าหมายก็มีส่วนทำให้ค่าการวัดดีหรือไม่ การเลือกจุดเล็งและเป้าหมายควรคำนึงถึงหลักต่อไปนี้

ก) จุดเป้าหมายที่อยู่ไกลจะให้ค่าการวัดมุมที่ดีกว่าจุดเป้าหมายที่อยู่ใกล้

ข) ควรส่องตรงไปที่หมุดรังวัดที่อยู่บนพื้นโดยตรงถ้าทำได้ แต่ถ้าส่องหมุดโดยตรงไม่ได้ เพราะมีวัตถุอื่นบัง อาจใช้หลักเล็งหรือเข็มคะแนนปักหลังหมุดรังวัดนั้น หรืออาจใช้เป้าสามเหลี่ยมหรือลูกดิ่งติดตั้งบนสามขาและตั้งเหนือหมุดนั้นก็ได้

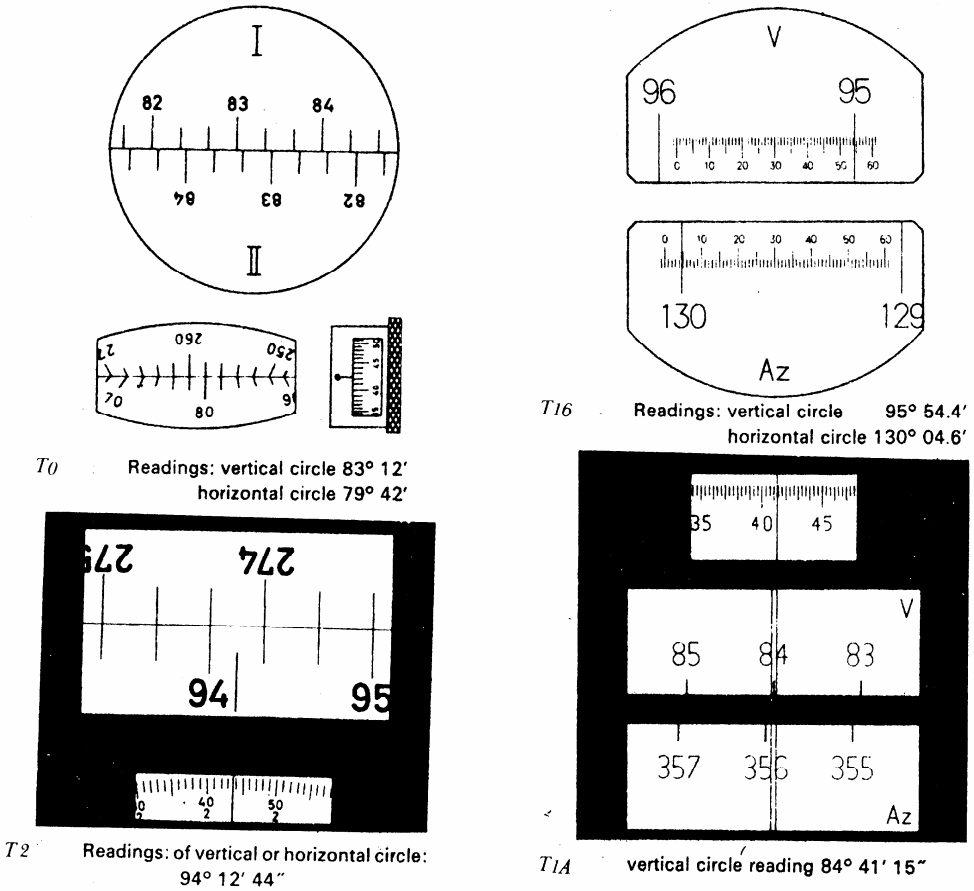
ค) การใช้เป้าชนิดใด ควรเลือกเป้าที่เล็กพอเหมาะกับระยะทาง ถ้าเล็กหรือใหญ่เกินไปทำให้เล็งจุดกลางเป้าได้ยาก เช่น

- การใช้หลักเล็งขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2 เซนติเมตร ระยะที่พอเหมาะคือ 150-300 เมตร และควรเล็งส่วนล่างสุดที่เห็นได้เพื่อแก้ปัญหาการปักหลักเล็งเอียง
- การใช้สายดิ่งจะเกิดปัญหาในการเล็งเมื่อระยะทางไกลออกไป ถ้าระยะทางมากกว่า 150 เมตร ควรเสียบกระดาษหรือเป้าที่มีสีซึ่งเห็นได้เด่นชัดไว้ที่สายดิ่ง จะทำให้มองเห็นได้ในระยะไกล และควรเล็งส่วนบนสุดที่เห็นได้เพื่อแก้ปัญหาการแกว่งของสายดิ่ง

8. การวัดหามุมราบ

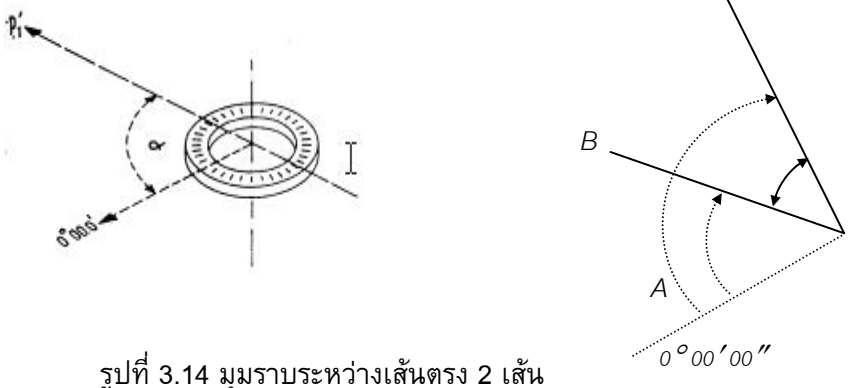
การใช้กล้องธีโอโดไลท์ส่องวัดแนวหรือเส้นตรงใดๆ ค่าที่ได้จากกล้องจะเป็นค่าทิศทางที่อ้างอิงกับแนวศูนย์องศาของกล้องในขณะนั้น และผลต่างค่าทิศทางของเส้นตรง 2 เส้นจะเป็นมุมราบระหว่างเส้นตรงสองเส้น ฉะนั้นการวัดมุมราบที่จุดใดๆจะเริ่มด้วยการตั้งกล้องธีโอโดไลท์ให้ตรงจุดนั้นตามขั้นตอนปฏิบัติในหัวข้อ 7 แล้วส่องเป้าหมายตามขั้นตอนปฏิบัติในหัวข้อ 8 แล้วอ่านค่าทิศทางของแนวจากจุดตั้งกล้องถึงจุดเป้าหมายต่างๆ ขั้นสุดท้ายเป็นการคำนวณหาค่ามุมราบจากค่าทิศทางของแนวต่างๆที่วัดได้

การอ่านค่ามุมมักต้องหมุนไมโครมิเตอร์ก่อนอ่านค่ามุม วิธีการอ่านค่ามุมจะแตกต่างกันไปตามชนิดของกล้องที่ใช้ กล้องบางรุ่นอาจไม่ต้องหมุนไมโครมิเตอร์สามารถอ่านค่ามุมได้ทันทีเมื่อส่องตรงเป้า เช่น กล้องWILD T16 ซึ่งเป็นกล้องแบบอ่านโดยตรง *(Direct reading)* รูปที่ 3.13 เป็นตัวอย่างการอ่านค่ามุมของกล้อง WILD รุ่นต่างๆ



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการอ่านค่ามุมของกล้อง WILD รุ่นต่างๆ

การอ่านค่ามุมถึงแม้จะแตกต่างกันตามชนิดของกล้อง อย่างไรก็ตามกล้องส่วนใหญ่จะทำงานเหมือนกัน โดยเป็นระบบมุมแบบตามเข็มนาฬิกา คือค่ามุมราบจะเพิ่มขึ้นเมื่อหมุนกล้องในทิศทางตามเข็ม แต่กล้องแบบอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถเลือกได้ทั้งระบบมุมตามเข็มและมุมทวนเข็ม ฉะนั้นมุมราบระหว่างเส้นตรง 2 เส้น ได้จากผลต่างของทิศทางของเส้น 2 เส้นนั้น เช่น มุมราบจากเส้น AB ไปยัง AC ในทิศทางตามเข็มจะเท่ากับ ค่าอ่านมุมราบหรือทิศทาง AC-AB



รูปที่ 3.14 มุมราบระหว่างเส้นตรง 2 เส้น

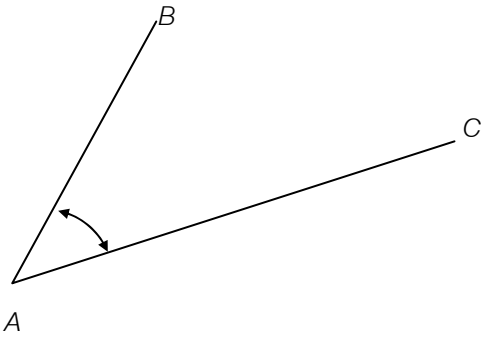
การวัดมุมราบอาจพิจารณาจำแนกตามวิธีการทำงานเป็น *3* วิธี ดังนี้

1) การวัดมุมด้วยกล้องหน้าเดียว *(Single sighting)* ดังตัวอย่างที่ 3.1 เป็นการวัดโดยอ่านค่าทิศทางจากกล้องหน้าซ้ายหรือกล้องหน้าขวาเพียงหน้าเดียว โดยอาจตั้งค่าทิศทางแนวเริ่มวัดให้เป็นศูนย์หรือค่าใดๆเพื่อความสะดวกในการคำนวณ หรืออาจไม่ตั้งค่าเริ่มวัด โดยจานองศาราบอยู่อย่างไรก็ได้ การวัดมุมด้วยกล้องหน้าเดียวเหมาะสำหรับการวัดทั่วไปที่ไม่ต้องการความถูกต้องสูง

2) การวัดมุมด้วยกล้องสองหน้า *(Double sighting)* ดังตัวอย่างที่ 3.2 เป็นการวัดโดยอ่านค่าทิศทางจากกล้องหน้าซ้าย*(Face left)* และกล้องหน้าขวา*(Face right)* การคำนวณหามุมราบทำได้ 2 วิธี คือ เฉลี่ยค่าทิศทางที่วัดได้แล้วหามุมราบ หรือหามุมราบของกล้องหน้าซ้ายและกล้องหน้าขวาแล้วเฉลี่ยมุมราบที่ได้ภายหลัง การวัดมุมราบด้วยกล้องสองหน้าเหมาะสำหรับการวัดที่ต้องการความถูกต้องสูง เพราะสามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนมีระบบออกไปได้

3) การวัดมุมแบบวัดทบ *(Repetition method)* ดังตัวอย่างที่ 3.3 เป็นการวัดมุมที่ต้องการวัดซ้ำๆกันหลายครั้งโดยให้ค่ามุมบวกสะสมเพิ่มขึ้นทุกครั้ง เสมือนการวัดมุมขนาดใหญ่เป็นจำนวนเท่า ตามจำนวนรอบที่วัดทบ วิธีการวัดเริ่มโดยตั้งค่าอ่านมุมราบเท่ากับศูนย์ขณะส่องเป้าหมายแรก หมุนกล้องไปยังเป้าหมายที่สอง ยึดแน่นจานองศาราบ (ค่าอ่านมุมราบจะไม่เปลี่ยนเมื่อหมุนกล้องรอบแกนดิ่ง ขณะนี้ค่ามุมจะเท่ากับการวัดมุม 1 ครั้ง) หมุนกล้องกลับไปยังเป้าหมายแรก เมื่อเล็งตรงเป้าหมายปลดที่ยึดจานองศาราบ แล้วหมุนกล้องส่องไปยังเป้าหมายที่สอง ค่ามุมราบจะเพิ่มเป็นสองเท่า ทำเช่นเดียวกันนี้จนครบจำนวนรอบที่ต้องการ ค่ามุมที่ต้องการ จะมีขนาดเท่ากับขนาดมุมที่อ่านได้หารจำนวนรอบ การวัดมุมแบบนี้เป็นวิธีการวัดมุมเพื่อให้ได้ค่ามุมที่มีความละเอียดมากกว่าค่าอ่านที่ละเอียดที่สุดของกล้องวัดมุม และกล้องที่ใช้วัดมุมแบบวัดทบ จะต้องได้รับการออกแบบให้มีส่วนสำหรับยึดแน่นและคลายจานองศาราบได้สะดวก เช่น กล้อง WILDT16

ตัวอย่างที่ 3.1 การวัดหาค่ามุมราบ *BAC* ด้วยกล้องหน้าเดียวจำนวน *3* ครั้ง



Set	*Sta*	*To*	*Face*	*Hor. Rdg.*	*Hor. Ang.*	*Mean Ang.*
1	*A*	*B*	*L*	*0 00 00*	*45 10 06*	*45 10 07*
		C	*L*	*45 10 06*		
2	*A*	*B*	*L*	*109 49 55*	*45 10 09*	
		C	*L*	*155 00 04*		
3	*A*	*B*	*L*	*325 10 12*	*45 10 06*	
		C	*L*	*10 20 18*		

ข้อสังเกต

ก*)* ค่าอ่านมุมราบทั้ง 3 ครั้งต่างออกไปแสดงว่า การวัดทุกครั้งได้มีการหมุนเปลี่ยนค่าจานองศาราบ

ข*)* การวัดครั้งแรกค่าอ่านทิศทาง AB เท่ากับ 0 ค่าทิศทาง AC จะเป็นค่ามุมราบ BAC ทันทีไม่ต้องคำนวณ แต่การตั้งค่าอ่านทิศทางเริ่มต้นเป็น 0° จะทำได้สะดวกในกล้องบางรุ่นเท่านั้น เช่น กล้อง WILDT 1A ซึ่งมีควงยึดจานองศาบนและควงยึดจานองศาล่าง คือเมื่อคลายควงยึดบนและล็อกควงยึดล่างค่าอ่านทิศทางจะเปลี่ยนเมื่อหมุนกล้อง แต่ถ้าล็อกควงยึดบนและคลายควงยึดล่างค่าอ่านทิศทางจะไม่เปลี่ยนเมื่อหมุนกล้อง และถ้าคลายควงยึดทั้งสองตัวจะสามารถหมุนจานองศาเปลี่ยนค่าอ่านได้ โดยไม่ต้องหมุนกล้อง

ค*)* การวัดครั้งที่ 2 ค่ามุมราบ BAC ได้จากการลบค่าทิศทาง AC ด้วย AB เป็นการหาค่ามุมราบแบบวัดทิศทาง *(Direction Method)* เป็นวิธีที่ใช้ได้ทั่วไปกับกล้องทุกรุ่น

ง*)* การวัดครั้งที่ 3 ค่าทิศทาง AC อ่านได้น้อยกว่า AB เนื่องจากแนว 0° ของกล้องอยู่ระหว่าง AB และ AC ดังนั้นมุมราบ BAC ได้จากการลบค่าทิศทาง AC ด้วย AB แล้วบวกด้วย 360°

ตัวอย่างที่ 3.2 การวัดมุม *BAC* ด้วยกล้องสองหน้า 1 ชุด และหามุมราบโดยการเฉลี่ยทิศทาง

Sta	*To*	*Face*	*Hor. Rdg*		*Mean Rdg*	*Hor. Ang.*		*Hor. Ang.*	*Mean Ang*
A	*B*	*L*	*10 00 38*		*10 00 34*	*76 09 51*		*76 09 50*	*76 09 51*
	C	*L*	*86 10 28*		*86 10 25*				
	C	*R*	*266 10 22*						
	B	*R*	*190 00 30*					*76 09 52*	

ข้อสังเกต

ก*)* การวัดมุมด้วยกล้องสองหน้า ค่ามุมจากกล้องหน้าซ้ายและกล้องหน้าขวาจะต่างกัน 180°

ข*)* การหาค่ามุมในครั้งแรกเป็นกา เฉลี่ยค่าทิศทางที่วัดได้จากกล้องหน้าซ้ายและขวาก่อน แล้วจึงหามุมราบ แต่ในครั้งหลังเป็นการ หามุมราบของกล้องหน้าซ้ายและกล้องหน้าขวา แล้วเฉลี่ยมุมราบที่ได้ภายหลัง

ค*)* การเฉลี่ยค่าทิศทางที่วัดได้จะต้องเปลี่ยนค่ามุมที่อ่านได้ของกล้องหน้าใดหน้าหนึ่ง โดยบวกหรือลบด้วย 180° ก่อน ในทางปฏิบัติจะยึดค่ามุมจากกล้องหน้าซ้ายเป็นหลักโดยบวกหรือลบค่ามุมจากกล้องหน้าขวาด้วย 180°

ง*)* การเฉลี่ยถ้าเห็นค่าองศาต่างกัน 180°และค่าลิปดาเท่ากัน สามารถเฉลี่ยค่าวิลิปดาได้ทันที

ตัวอย่างที่ 3.3 การวัดมุม *BAC* แบบวัดทบ ด้วยกล้อง WILDT16 จำนวน 6 ครั้ง

Sta	*To*	*Face*	*No.of Rep.*	*Hor. Rdg.*	*6xHor.Ang.*	*Hor. Ang.*
A	*B*	*L*	*0*	*00 00.0*	*425 43.5*	*70 57 14*
	C	*L*	*1*	*70 57.0*		
	C	*L*	*6*	*65 43.5*		
	B	*R*	*6*	*0 00.2*	*425 43.3*	

ข้อสังเกต

ก*)* การจดค่ามุมจะจดเพียง *3* ค่า คือ ค่าเริ่มต้น ค่ามุม *1* รอบ และค่าสุดท้าย

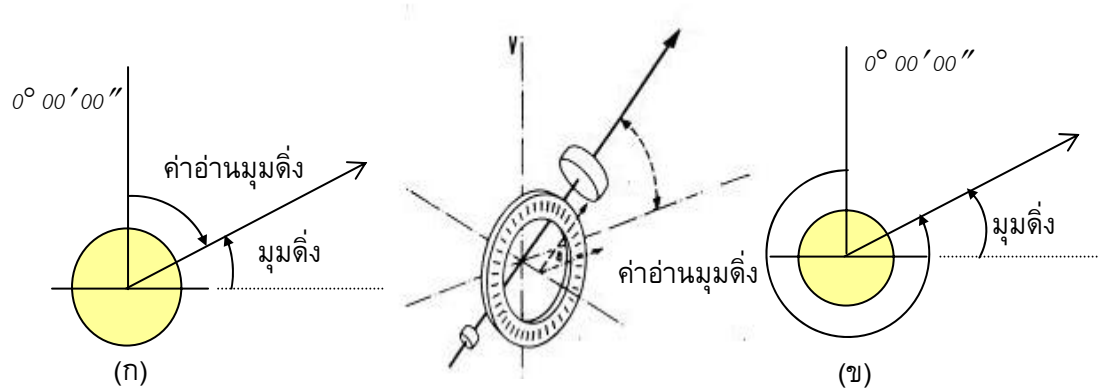
ข*)* ค่าเริ่มต้นนิยมตั้งให้เป็น 0°

ค*)* การจดค่ามุม 1 รอบ เพื่อประมาณค่ามุมสุดท้าย ทำให้รู้ว่าค่าที่อ่านได้ต้องบวกมุมเพิ่มอีกกี่รอบ จึงไม่จำเป็นต้องอ่านค่ามุมละเอียดถึงทศนิยมของลิปดา เช่น จากตัวอย่างข้างบน ค่ามุมสุดท้ายประมาณ *6x70=420* ต้องบวกมุมเพิ่มอีก *360°*

ง*)* การวัดในกล้องหน้าขวา มีขั้นตอนทำงานย้อนกลับของการวัดด้วยหน้าซ้าย จากตัวอย่างค่าอ่านสุดท้ายของกล้องหน้าขวาทำให้รู้ว่าได้ค่ามุมน้อยกว่าการวัดในหน้าซ้ายอยู่ *0.2″*

9. การหามุมดิ่ง

มุมดิ่ง คือ มุมที่วัดบนระนาบดิ่งระหว่างเส้นตรงเส้นหนึ่งกับระนาบราบ มีค่าบวกเมื่อเส้นตรงนั้นชี้ขึ้น เรียกว่า มุมเงย *(Elevation angle)* และมีค่าลบเมื่อเส้นตรงนั้นชี้ลง เรียกว่า มุมก้ม *(Depression angle)* การวัดมุมดิ่งด้วยกล้องธีโอโดไลท์ ค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าที่วัดจากแกนดิ่งจุดเหนือศีรษะ *(Zenith)* ซึ่งมีค่าอ่านมุมดิ่งเป็นศูนย์ แต่ในกล้องอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถเลือกได้ว่า ศูนย์องศาให้ชี้ไปไปยังแนวดิ่งหรือแนวราบ มุมที่อ่านได้จะเป็นมุมในทิศทางตามเข็มเมื่อมองให้จานองศาดิ่งอยู่หลังกล้องโทรทรรศน์



รูปที่ 3.15 ค่าอ่านมุมดิ่งใน (ก) กล้องหน้าซ้าย*(Face left)* (ข) กล้องหน้าขวา*(Face right)*

มุมดิ่ง = 90°- ค่าอ่านมุมดิ่ง (เมื่อส่องด้วยกล้องหน้าซ้าย)

= ค่าอ่านมุมดิ่ง – 270 (เมื่อส่องด้วยกล้องหน้าขวา)

กล้องธีโอโดไลท์ทั่วไปจะมีหลอดระดับของจานองศาดิ่ง ก่อนอ่านค่ามุมดิ่งจะต้องปรับให้ลูกน้ำอยู่กลางทุกครั้ง ยกเว้นกล้องรุ่นที่มีอุปกรณ์ปรับอัตโนมัติ เช่น WILD T1A

กล้องที่อยู่ในสภาพดีพร้อมเมื่อปรับให้ลูกน้ำของหลอดระดับและลูกน้ำจานองศาดิ่งอยู่กลางแล้ว ถ้าตั้งให้แนวเล็งอยู่ในแนวราบ ค่าจานองศาดิ่งของกล้องหน้าซ้ายจะต้องเป็น 90° หรือ 0° แต่ถ้าไม่เป็น 90° หรือ 0° นั่นคือมีค่าอ่านมุมเริ่มต้น *(Initial Reading)* เกิดขึ้น อาจเป็นบวกหรือลบก็ได้ ค่ามุมเริ่มต้นนี้เรียกว่า ***Index error***

ตัวอย่างที่ 3.4 ตั้งกล้องที่จุด *X* เล็งไปยังจุด *P* ด้วยกล้อง T1A ค่าอ่านมุมดิ่งหน้าซ้าย = *95° 06′40″* และค่าอ่านมุมดิ่งหน้าขวา= *264° 55′ 00″* หามุมดิ่งของแนว *XP*

มุมดิ่งหน้าซ้าย = *90°- 95° 06′40″*

= *- 5° 06′40″*

มุมดิ่งหน้าขวา = *264°55′ 00″ – 270°*

= *- 5° 05′00″*

มุมดิ่งของแนว *XP* $= \dfrac{(-5^\circ 06'40'') + (-5^\circ 05'00'')}{2}$

$= -5^\circ 05'50''$

10. **การทดสอบและการปรับแก้กล้องธีโอโดไลท์**

กล้องธีโอโดไลท์เป็นเครื่องมือที่มีราคาแพงที่ถูกประดิษฐ์มาอย่างปราณีตพิถีพิถัน และเป็นเครื่องมือสำหรับการวัดมุมที่มีความละเอียดและมีความถูกต้องสูง อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน หรือเกิดการสะเทือนในระหว่างการขนย้าย ทำให้กล้องอาจไม่อยู่ในสภาพที่ถูกต้องสมบูรณ์ ต้องทำการตรวจสอบและทำการปรับแก้กล้อง เป็นการปรับแก้แบบถาวร ทั้งนี้เพื่อให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นที่ประกอบกันขึ้นเป็นกล้องอยู่ในสภาพที่ทำหน้าที่ได้อย่างถูกต้อง การตรวจสอบไม่ต้องทำบ่อยนัก โดยผู้ใช้กล้องอาจต้องทำการทดสอบและปรับแก้เป็นระยะ ๆ

การปรับแก้กล้องธีโอโดไลท์ให้ถูกต้องอาจต้องทำหลายรอบ ถ้ากล้องอยู่ในสภาพคลาดเคลื่อนไปมาก ๆ ควรทำการปรับแก้อย่างหยาบ ๆเพื่อให้กล้องอยู่ในสภาพที่เกือบจะถูกต้องสมบูรณ์รอบหนึ่งก่อน แล้วจึงทำการทดสอบและปรับแก้อย่างละเอียดอีกครั้งหนึ่ง เมื่อได้รับการปรับแก้อย่างสมบูรณ์ หลังจากตั้งกล้องอย่างถูกต้องแล้ว กล้องต้องมีลักษณะที่สำคัญคือ แกนดิ่งอยู่ในแนวดิ่งจริง แกนราบตั้งฉากกับแกนดิ่ง เส้นเล็งตั้งฉากกับแกนราบ และไม่มี Index error

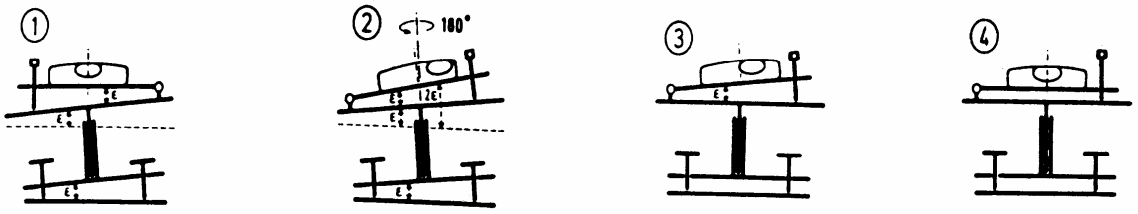
การทดสอบและการปรับแก้กล้องธีโอโดไลท์ ให้กระทำตามลำดับขั้นดังต่อไปนี้

10.1. **แกนดิ่งอยู่ในแนวดิ่ง** *(Stranding Axis Error)*

เมื่อทำการตั้งกล้องเรียบร้อยแล้ว แกนดิ่งของกล้องอยู่ในแนวดิ่งหรือไม่ ดูได้จากลูกน้ำหลอดระดับจะต้องอยู่กลางเสมอไม่ว่าจะหมุนกล้องไปทางใด เพื่อให้ได้สภาวะดังกล่าวแกนของหลอดระดับจะต้องตั้งฉากกับแกนดิ่ง ถ้าลูกน้ำเลื่อนจากศูนย์กลางหลอดเมื่อหมุนกล้องเปลี่ยนทิศทาง แสดงว่าแกนหลอดระดับไม่ตั้งฉากกับแกนดิ่ง

การตรวจสอบว่าแกนของหลอดระดับตั้งฉากกับแกนดิ่งหรือไม่ หลังจากตั้งกล้องให้ลูกน้ำกลมได้ระดับ ให้หมุนกล้องให้แกนหลอดระดับขนานกับแนวควงสามเส้าคู่หนึ่ง หมุนควงสามเส้าคู่นั้นจนลูกน้ำของหลอดระดับอยู่กลาง แล้วหมุนกล้องไป180° แกนหลอดระดับจะขนานกับแนวควงสามเส้าคู่เดิมแต่ทิศทางตรงข้าม ให้ดูว่าลูกน้ำหลอดระดับอยู่กลางหรือไม่ ถ้าไม่แสดงว่าแกนของหลอดระดับไม่ตั้งฉากกับแกนดิ่ง ระยะที่ลูกน้ำเคลื่อนออกจากศูนย์กลางจะแสดง 2 เท่าของความคลาดเคลื่อน การปรับระดับต้องปรับระดับอย่างประณีต

การปรับแก้ ทำโดยปรับควงสามเส้าคู่ที่ขนานกับแกนหลอดระดับให้ลูกน้ำเคลื่อนที่กลับครึ่งหนึ่ง แล้วหมุนสกรูที่ยึดหลอดระดับให้หลอดระดับกระดกขึ้นหรือลงแล้วแต่ทิศทางที่เอียงไปจนกระทั่งลูกน้ำเข้าสู่ศูนย์กลาง เป็นอันเสร็จ การปรับแก้ในทางปฏิบัติมักต้องทำ 2-3 รอบจึงจะสำเร็จ



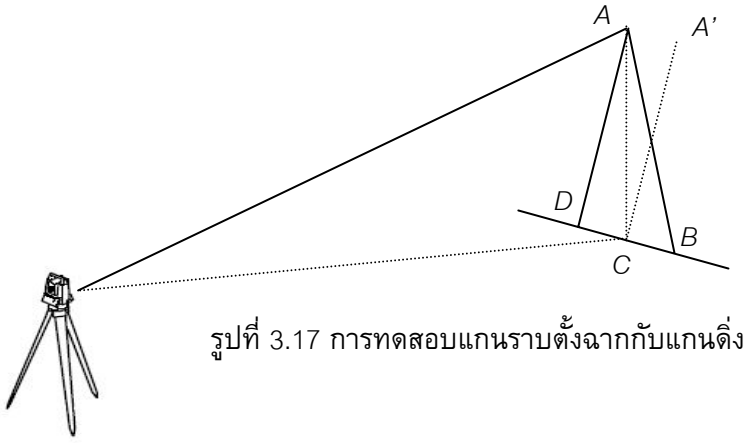
รูปที่ 3.16 การปรับแก้ให้แกนของหลอดระดับตั้งฉากกับแกนดิ่งของกล้อง

10.2. **แกนราบตั้งฉากกับแกนดิ่ง** *(Trunion Axis Error)*

การที่กล้องวัดมุมมีแกนราบไม่ตั้งฉากกับแกนดิ่ง จะทำให้ค่าทิศทางราบที่อ่านได้ คลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้องโดยมีขนาดของความคลาดเคลื่อนแปรผันตามค่ามุมดิ่ง

การตรวจสอบว่าแกนราบตั้งฉากกับแกนดิ่งหรือไม่ ทำโดยตั้งกล้องหน้าผนังเรียบ ห่างผนังไม่น้อยกว่า *30* เมตร และปรับระดับกล้องอย่างประณีต ใช้กล้องหน้าซ้ายเล็งไปยังจุดจุดหนึ่ง (สมมุติ จุด A) ซึ่งมีค่ามุมสูงประมาณ 20° หรือมากกว่าจะยิ่งดี หมุนกล้องโทรทรรศน์ลงมาให้เส้นเล็งอยู่ในแนวระดับ หมายตำแหน่งจุดไว้ (จุด B) เปลี่ยนเป็นกล้องหน้าขวาเล็งไปที่ A อีกครั้ง หมุนกล้องโทรทรรศน์ลงมาให้เส้นเล็งอยู่ในแนวระดับเช่นเดิม หมายตำแหน่งจุดไว้ (จุด C) ถ้าจุด C ทับกับจุด B แสดงว่าแกนราบของกล้องตั้งฉากกับแกนดิ่ง ไม่ต้องปรับแก้ แต่ถ้าจุดทั้งสองไม่ทับกัน ระยะราบ BC จะแสดง 2 เท่าของความคลาดเคลื่อน วิธีการทดสอบนี้เรียกว่า Spire Test

การปรับแก้ ให้เล็งที่จุดกึ่งกลางของ BC (จุด D) แล้วหมุนกล้องขึ้นไปอยู่ในระดับเดียวกับจุด A (จุด A')ปรับสกรูของแกนราบจนจุดตัดของสายใยเคลื่อนมาทับจุด A แล้วทำการตรวจสอบซ้ำอีกครั้ง ในกล้องบางชนิดออกแบบให้แกนราบยึดตายตัวเปลี่ยนแปลงไม่ได้จึงไม่มีการปรับแก้สำหรับกล้องดังกล่าว



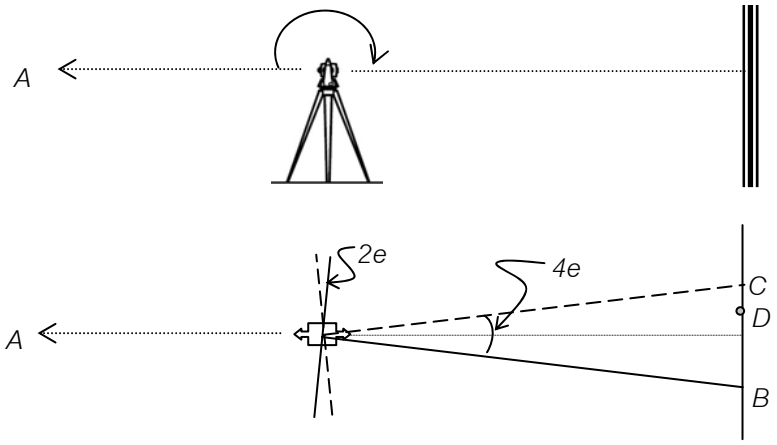
รูปที่ 3.17 การทดสอบแกนราบตั้งฉากกับแกนดิ่ง

10.3. **เส้นเล็งตั้งฉากกับแกนราบ** *(Horizontal Collimation Error)*

การที่แนวเล็งไม่ตั้งฉากกับแกนราบของกล้อง ทำให้ค่ามุมราบที่อ่านได้คลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง โดยมีขนาดของความคลาดเคลื่อนแปรผันตามค่ามุมดิ่ง การปรับแก้ให้แนวเล็งตั้งฉากกับแกนราบ เป็นการทำให้แนวที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์ทัศน์ของเลนส์ภาพกับจุดตัดของสายใย ตั้งฉากกับแกนราบ

การตรวจสอบว่าแนวเล็งตั้งฉากกับแกนราบหรือไม่ ทำโดยตั้งกล้องหน้าผนังเรียบ ห่างจากผนังไม่น้อยกว่า 30 เมตร และปรับระดับอย่างประณีต ใช้กล้องหน้าซ้ายเล็งไปยังจุดซึ่งเป็นจุดเด่นชัด (จุด A) อยู่ตรงข้ามผนัง หมุนแน่นควงยึดราบ หมุนกล้องรอบแกนราบเป็นกล้องหน้าขวาให้แนวเล็งอยู่ในแนวระดับ หมายตำแหน่งที่แนวเล็งทาบบนผนัง (จุด B) หมุนกล้องรอบแกนดิ่ง 180°ส่องไปที่จุด A อีกครั้ง แล้วหมุนกล้องรอบแกนราบเป็นกล้องหน้าซ้ายให้อยู่ในแนวระดับ หมายตำแหน่งบนผนัง (จุด C) จากผลการทดสอบ ถ้าจุด C ทับจุด B แสดงว่าแนวเล็งตั้งฉากกับแกนราบ แต่ถ้าจุดทั้งสองไม่ทับกัน ระยะราบ BC จะแสดง 4 เท่า ของความคลาดเคลื่อน

การปรับแก้ให้เล็งที่จุดที่อยู่บน BC และห่างจากจุด C เท่ากับ ¼ ของระยะ BC (จุด D) แล้วเลื่อนแหวนของสายใยให้จุดตัดสายใยมาอยู่ที่ตำแหน่งของจุด D ทำการตรวจสอบซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

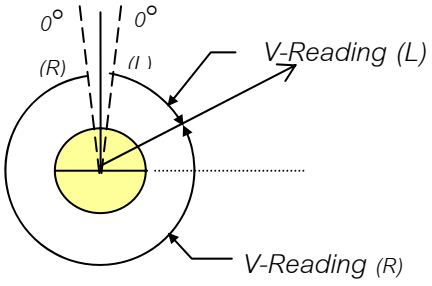


รูป 3.18 การทดสอบแนวเล็งตั้งฉากกับแกนราบ

10.4. **ศูนย์องศาของจานองศาดิ่ง** *(Index error)*

ความคลาดเคลื่อนนี้มีผลต่อการวัดมุมดิ่งเท่านั้น วิธีตรวจสอบใช้กล้องหน้าซ้ายเล็งไปที่จุดจุดหนึ่ง (จุด A) ปรับลูกน้ำดิ่งให้อยู่ศูนย์กลาง อ่านค่าจานองศาดิ่ง เปลี่ยนเป็นกล้องหน้าขวาหมุนส่องจุด A ปรับลูกน้ำดิ่งให้อยู่ศูนย์กลาง อ่านค่าจานองศาดิ่งอีกครั้ง เมื่อคำนวณค่ามุมดิ่ง ค่ามุมดิ่งที่หาได้จากกล้องหน้าซ้ายและหน้าขวาควรมีค่าเท่ากัน หรือค่ามุมที่อ่านได้จากกล้องหน้าซ้ายและหน้าขวารวมกันต้องเท่ากับ 360° หากไม่ได้ ค่าคลาดเคลื่อนจะเป็นสองเท่าของ Index error ของกล้อง เช่น

ค่าอ่านมุมดิ่งกล้องหน้าซ้าย	66°42′20″
ค่าอ่านมุมดิ่งกล้องหน้าขวา	293 14 30 +
รวม	359 56 50
ค่าที่ควรจะเป็น	360 00 00 -
ความคลาดเคลื่อน	-03 10
Index Error $e/_2$	-01 35



การปรับแก้กล้องขึ้นอยู่กับโครงสร้างของกล้องแต่ละแบบ ดังนี้

ก) ถ้าการหมุนปรับลูกน้ำดิ่งไม่มีผลต่อแนวเล็ง ทำการปรับแก้โดยการเล็งกล้องไปที่จุดจุดหนึ่ง (A) อ่านค่ามุมดิ่ง แล้วเปลี่ยนหน้ากล้องเล็งไปที่จุด A ตั้งค่าจานองศาดิ่งให้ถูกต้องตามที่คำนวณได้ ซึ่งทำให้ลูกน้ำดิ่งไม่อยู่ศูนย์กลาง หมุนตัวยึดหลอดลูกน้ำดิ่ง ปรับให้ลูกน้ำกลับมาอยู่ที่ศูนย์กลาง

ข) ถ้าการหมุนสกรูปรับลูกน้ำดิ่งแล้วทำให้แนวเล็งเคลื่อนไปด้วย ทำการปรับแก้โดยการเล็งกล้องไปที่จุดจุดหนึ่ง (A) อ่านค่ามุมดิ่งแล้วเปลี่ยนหน้ากล้องหมุนกล้องมาทางจุด A ตั้งค่าจานองศาดิ่งให้ถูกต้องตามที่คำนวณได้ ซึ่งจะทำให้แนวเล็งไม่ตรงจุด A ใช้สกรูปรับลูกน้ำทำให้จุดตัดของสายใยมาทับกับจุด A แล้วจึงหมุนตัวยึดหลอดลูกน้ำดิ่งปรับให้ลูกน้ำกลับมาอยู่ที่ศูนย์กลาง

11. ความคลาดเคลื่อนของการวัดมุม

ความคลาดเคลื่อนในงานวัดมุมมีสาเหตุเกิดจาก 3 แหล่ง คือ บุคคล เครื่องมือ และธรรมชาติ แต่ค่ามุมที่แท้จริงเรามักจะไม่สามารถหาได้ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่แท้จริงจึงหาไม่ได้ด้วย อย่างไรก็ตามการวัดที่ดีได้จากการปฏิบัติงานในสนามตามวิธีการที่ถูกต้อง การใช้เครื่องมืออย่างระมัดระวังในเรื่องวิธีการวัด และมีการวัดสอบทานหรือวัดจำนวนหลายชุด

11.1. สาเหตุของความคลาดเคลื่อน

1) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบุคคล คือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงานเอง เป็นความคลาดเคลื่อนที่พบมากที่สุด เช่น การตั้งกล้องไม่ตรงหมุดหรือตั้งกล้องไม่ดีพอ กล้องไม่ได้ระดับขณะวัด ความคลาดเคลื่อนในการส่องเป้าเนื่องจากการปรับโฟกัสของเส้นใยเล็งและโฟกัสภาพไม่ดี ทำให้เกิดภาพเหลื่อม *(Parallax)* ทำให้เล็งไม่ตรงเป้า ความคลาดเคลื่อนในการหมุนและอ่านไมโครมิเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้การปฏิบัติงานในสนามโดยไม่มีระบบแบบแผนมักทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่เป็นค่าผิดพลาด เช่น การตั้งหรือส่องผิดจุด ผู้วัดบอกค่ามุมผิด หรือ ผู้บันทึกจดค่ามุมองศาผิด

2) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวกล้อง อาจมีผลจากการผลิตที่ไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์หรือเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน ทำให้กล้องอาจไม่อยู่ในสภาพที่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องทำการตรวจสอบและปรับแก้กล้องทุกช่วงเวลาที่เหมาะสมโดยผู้มีความชำนาญ การใช้กล้องอย่างถูกวิธีและระมัดระวังจะช่วยให้อายุการทำงานของกล้องนานขึ้น และมีสภาพไว้ใจได้ตลอดการใช้งาน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวกล้อง เช่น

- ความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก แกนดิ่งไม่อยู่ในแนวดิ่งจริง แกนราบไม่ตั้งฉากกับแกนดิ่ง เส้นเล็งไม่ตั้งฉากกับแกนราบ เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับค่ามุมราบ และจะมีขนาดเล็กเมื่อแนวเล็งอยู่ใกล้แนวราบ แต่จะมีขนาดใหญ่เมื่อแนวเล็งเอียงมากๆ ฉะนั้นสามารถลดขนาดความคลาดเคลื่อนได้ โดยการเลือกเป้าที่มีมุมดิ่งใกล้เคียงกัน
- ความคลาดเคลื่อนจากการแบ่งขีดจานองศา *(Graduation Error)* สามารถลดโอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้โดยการตั้งค่าอ่านมุมเริ่มต้นให้กระจายไปตามภาคทิศต่างๆ
- ความคลาดเคลื่อนจากแกนดิ่งไม่ตรงกับศูนย์กลางจานองศาราบ *(Eccentric Error)* สามารถลดขนาดความคลาดเคลื่อนได้ โดยการหมุนกล้องรอบแกนดิ่งในทิศทางเดียวตลอดขณะส่องหรือเล็งเป้าหมาย หากเลยเป้าหมายจะต้องหมุนต่ออีก 1 รอบ และหมุนตรงข้ามเมื่อเปลี่ยนหน้ากล้อง เช่น หมุนตามเข็มเมื่อวัดด้วยหน้าซ้ายและทวนเข็มในหน้าขวา

3) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น

- สภาพพื้นที่บริเวณที่ทำงาน เช่น พื้นดินที่อ่อนถ้ากล้องมีน้ำหนักมาก จะเกิดการทรุดตัวได้ หรือการตั้งกล้องใกล้ถนนที่มีรถหนักวิ่งผ่านจะทำให้ระดับกล้องเสีย จึงต้องวัดให้เสร็จโดยเร็ว
- ลมแรงอาจทำให้กล้องสั่น การเลือกใช้กล้องและสามขาที่มีน้ำหนักมากจะช่วยลดปัญหาได้ หรืออาจต้องมีการสร้างที่บังลม หรืองดทำงานในวันที่ลมแรงเกินไป
- อุณหภูมิทำให้ชิ้นส่วนต่างๆของกล้องเกิดการยืดหดตัวไม่เท่ากัน

- การที่แนวเล็งผ่านไปในบรรยากาศที่แตกต่างกันจะทำให้แนวเล็งเกิดการหักเหเป็นแนวโค้ง ดังนั้นจึงควรเลือกแนวเล็งที่สูงจากพื้นพอสมควร และหลีกเลี่ยงแนวเล็งที่ผ่านใกล้อาคาร ปล่องไฟ หรืออาจเลือกเวลาทำงานเฉพาะต้อนเช้าและเย็นซึ่งแดดไม่จัด การหักเหจะเกิดขึ้นน้อยและสม่ำเสมอเมื่อสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกัน

11.2. **ความละเอียดของการวัดมุม**

ความละเอียดของการวัดมุมมีความสำคัญต่องานรังวัด เพราะมีผลต่อความละเอียดของงานทั้งโครงการ ความละเอียดของการวัดมุมขึ้นอยู่กับการเลือก ชนิดกล้องวัดมุม ขนาดและชนิดของเป้าเล็งให้เหมาะสม ในขณะเดียวกันเลือกวิธีการวัดให้ถูกหลักเกณฑ์ มีจำนวนครั้งหรือจำนวนชุดที่วัดเหมาะสมกับความต้องการ ไม่วัดมากหรือน้อยเกินไป ฉะนั้นก่อนการทำงานจึงต้องมีการวางแผน ได้แก่

1) หาขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ขนาดความคลาดเคลื่อนในการวัดมุมที่ยอมรับได้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความถูกต้องของงานรังวัด ค่าผิดพลาดของงานวัดมุมในหน่วยเรเดียนจะเท่ากับความถูกต้องของการวัดมุม และจะต้องสอดคล้องกับความถูกต้องในการวัดระยะ เช่น ในงานรังวัดชั้นสาม ต้องการความถูกต้อง 1:5,000 ซึ่งเป็นความถูกต้องของการวัดระยะและการวัดมุม ค่าผิดพลาดของงานวัดมุมจะต้องไม่เกิน 1/5,000 เรเดียน ซึ่งเท่ากับ 41″ หรือปัดเศษเป็น *30*″

2) คาดคะเนขนาดของความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นได้ เช่น การตั้งกล้องไม่ตรงจุด แนวเล็งไม่ตั้งฉากกับแกนราบ การแบ่งขีดบนจานองศาไม่เท่ากัน การเล็งเป้าไม่ตรงจุด การอ่านค่ามุมบนเวอร์เนียหรือไมโครมิเตอร์คลาดเคลื่อนไป เป็นต้น

3) พิจารณาเลือกเครื่องมือที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากความสามารถของกล้องในการอ่านค่ามุมที่เล็กหรือละเอียดที่สุด *(Least count)* เช่น กล้องที่วัดได้ละเอียด 20″ ในการวัดครั้งหนึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนสุ่มสูงสุดเท่ากับ 10″ และมีความคลาดเคลื่อนสุ่มเป็นไปได้เท่ากับ 05″

การเลือกเครื่องมืออาจไม่มีทางเลือกมากนัก เพราะถูกจำกัดโดยต้องใช้เครื่องมือที่มีอยู่แล้ว ทำให้ต้องเลือกวิธีการวัดมุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของงาน เช่น การวัดทิศทางเพื่อให้ได้ความละเอียดที่เพียงพอ ต้องหาว่าจะต้องทำการวัดกี่ครั้งหรือกี่ชุด หรือเลือกวิธีการวัดมุมแบบวัดทบ เป็นต้น

4--การวัดระยะทาง

ระยะทางระหว่างจุด *2* จุดใดๆ คือ ระยะห่างระหว่างเส้นดิ่งที่ผ่านสองจุดนั้น ในงานรังวัดบนพื้นระนาบ *(Plane Survey)* หมายถึง ระยะราบ *(Horizontal distance)* หรือระยะตั้งฉากระหว่างเส้นดิ่ง 2 เส้นที่ขนานกัน แต่ในงานรังวัดบนสัณฐานโลก *(Geodetic Survey)* ซึ่งเป็นงานรังวัดที่ต้องคำนึงถึงความโค้งของผิวโลก ระยะทางหมายถึงหรือระยะที่วัดตามผิวระดับที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง

การวัดระยะทางเป็นงานพื้นฐานของการทำงานรังวัด กล่าวได้ว่าจะต้องมีการวัดระยะทางในงานรังวัดทุกงาน การวัดระยะทางมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับความถูกต้องหรือความละเอียดของงานที่ต้องการ

1. **การวัดระยะทางด้วยการก้าว** (Pacing)

การวัดระยะทางด้วยก้าว เป็นการวัดระยะทางโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ใดๆ เพียงอาศัยการเดินตามเส้นทางที่ต้องการรู้ค่าระยะทางก็สามารถหาระยะทางนั้นได้ เหมาะสำหรับการสำรวจสังเขป หรือใช้ตรวจสอบเพื่อหาค่าวัดที่ผิดพลาดของการวัดระยะทางโดยวิธีอื่น การวัดระยะทางโดยการนับก้าวของผู้ที่ผ่านการฝึกฝนมา จะมีความถูกต้องประมาณ 1/100 ถึง 1/50 สำหรับการวัดในพื้นที่ราบ

การวัดระยะทางโดยการก้าวเดินนี้มีวิธีปฏิบัติที่นิยมใช้กัน 2 วิธีคือ

1.1. **การวัดระยะทางโดยการนับก้าว** เป็นการวัดระยะทางโดยนับจำนวนก้าวของผู้วัดที่เดินไปจากจุดเริ่มต้นถึงจุดปลายทาง การหาระยะก้าวสามารถทำได้

ระยะทาง = จำนวนก้าว *x* ค่าระยะก้าว

การวัดระยะทางโดยวิธีการก้าวอาจใช้อุปกรณ์ช่วย เช่น

Passometer เป็นเครื่องมือสำหรับบันทึกจำนวนก้าวเดิน โดยอาศัยการเคลื่อนไหวของร่างกายทำให้กลไกของเครื่องมือนับจำนวนก้าวเดินได้

Pedometer เป็นเครื่องมือวัดระยะด้วยการก้าวเดินที่มีกลไกสำหรับปรับตามขนาดก้าวเดินและแสดงผลเป็นค่าระยะทางโดยตรง

ข้อควรสนใจ

ก) ผู้วัดจะต้องผ่านการฝึกฝนเพื่อสามารถก้าวเดินโดยมีค่าระยะก้าวแต่ละก้าวสม่ำเสมอ และต้องรู้ค่าระยะก้าวของตนเอง การหาระยะก้าวทำโดยเดินนับจำนวนก้าวบนแนวที่รู้ระยะทาง

ข) ในการเดินนับก้าวคือ ยิ่งเดินนานก้าวจะสั้นลง การเดินลงเนินก้าวจะยาวกว่าปกติ หรือถ้าเดินขึ้นเนินก้าวจะสั้นกว่าปกติ ฉะนั้นการวัดระยะในที่ลาดเอียงโดยการเดินไปและเดินกลับแล้วเฉลี่ยค่าระยะทางที่ได้ จะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

1.2. **การวัดระยะทางโดยการจับเวลาเดิน** เหมาะสำหรับการหาระยะทางที่ค่อนข้างไกล ไม่เหมาะกับงานทางวิศวกรรม เป็นการวัดระยะทางโดยจับเวลาเดินของผู้วัดที่เดินจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดปลายทาง ผู้วัดต้องก้าวเดินด้วยความเร็วสม่ำเสมอและรู้ค่าอัตราความเร็วในการเดินของตนเอง

ระยะทาง = เวลาเดิน *x* อัตราความเร็วในการเดิน

2. **การวัดระยะทางด้วยล้อวัดระยะ** (Odometer)

ล้อวัดระยะ เป็นเครื่องมือวัดระยะทางชนิดหนึ่งใช้ติดกับล้อหมุน ทำงานได้โดยการกลิ้งล้อหมุนไปตามแนวที่ต้องการวัด เครื่องมือนี้ทำงานโดยนับจำนวนรอบการหมุนของล้อและแปลงเป็นค่าระยะทางด้วยกลไกที่สัมพันธ์กับความยาวเส้นรอบวงของวงล้อ แสดงค่าระยะทางให้ผู้วัดทราบ ที่พบเห็นโดยทั่วไปได้แก่ล้อวัดระยะที่ติดไว้กับรถยนต์ทำให้รู้ระยะทางที่รถยนต์ได้แล่นไป

การวัดระยะทางด้วยล้อวัดระยะเหมาะสำหรับการวัดความยาวของเส้นโค้ง เช่น ระยะตามโค้งถนน ความถูกต้องที่ได้ประมาณ $^{1}/_{200}$ ถ้าวัดบนพื้นที่ราบเรียบ

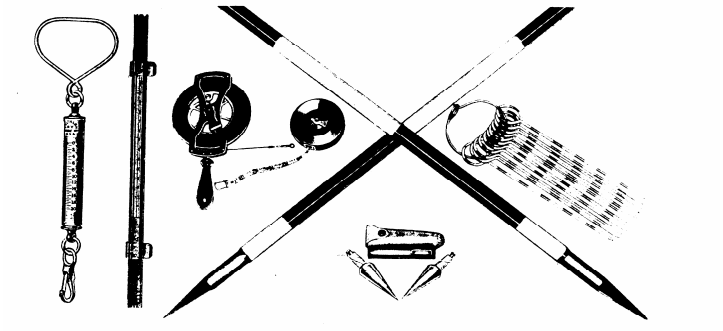
ข้อควรสนใจ ในการใช้งานคือถ้าพื้นที่ที่วัดขรุขระหรือเป็นคลื่นผลการวัดจะคลาดเคลื่อนมาก

รูปที่ *4.1* ล้อวัดระยะ

3. **การวัดระยะทางด้วยแถบวัดระยะ**

การวัดระยะทางด้วยแถบวัดระยะ เป็นวิธีการวัดระยะทางที่ใช้มากที่สุด เพราะเป็นวิธีการวัดที่ใช้อุปกรณ์ง่ายๆไม่ซับซ้อน ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องตั้งแต่ 1/1,000 ถึง 1/10,000 ขึ้นอยู่กับชนิดของแถบวัดที่ใช้ วิธีการวัด และสภาพแวดล้อมในขณะทำการวัด ปัจจุบันการวัดระยะทางมีการพัฒนาไปมากโดยเฉพาะการใช้เครื่องวัดระยะอิเลกทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งให้ค่าการวัดที่ดีกว่าและสามารถกระทำได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามการวัดระยะทั่วไป โดยเฉพาะในงานวิศวกรรมการใช้แถบวัดระยะยังมีความเหมาะสมอยู่

3.1. **เครื่องมือและอุปกรณ์**



รูปที่ *4.2* อุปกรณ์เสริมการวัดระยะด้วยแถบวัดระยะ

ก) ชนิดแถบวัดระยะ แถบวัดระยะมีหลายแบบซึ่งมีลักษณะต่างกันหรือทำด้วยวัสดุต่างกัน เช่น โซ่วัดที่ดินเส้น ลวดวัดระยะ แถบวัดเหล็ก แถบวัดผ้า แถบวัดใยสังเคราะห์ แถบวัดอินวาร์ เป็นต้น

ข) อุปกรณ์เสริม การวัดระยะทางด้วยแถบวัดนอกจากแถบวัดแล้ว ยังมีเครื่องมืออื่นๆที่ใช้ประกอบการวัดระยะทางด้วย ได้แก่ เข็มคะแนน *(Pin)* หลักเล็ง *(Pole)* ลูกดิ่ง ที่จับแถบวัด *(Clamp Handles)* เครื่องวัดความลาด *(Clinometer หรือ Abney level)* เครื่องวัดแรงดึง *(Spring Balance)* เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเป๋า เป็นต้น

3.2. **การวัดระยะทางบนพื้นที่ราบ** เป็นการวัดระยะทางโดยแถบวัดอยู่ในแนวราบ มีวิธีปฏิบัติดังนี้

1) ปักหลักเล็งให้เห็นชัดเจนที่จุดปลายทางทั้งสอง เล็งตรวจสอบแนวการวัดและกำจัดสิ่งกีดขวาง และปักหลักเล็งเป็นระยะ ๆในแนวการวัดเพื่อช่วยในการจัดวางแถบวัดระยะให้ตรงแนวขณะวัด

2) ดึงแถบวัดระยะออกจากม้วน โดยคนหน้าถือปลายแถบวัด(ขีดศูนย์) เดินจากจุดเริ่มไปยังจุดปลาย ขณะเดียวกันคอยดูคนถือแถบวัดระยะที่อยู่จุดต้นทาง ซึ่งจะให้สัญญาณมือบอกให้เคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือขวา เพื่อให้แถบวัดอยู่ในแนวของเส้นที่จะวัด

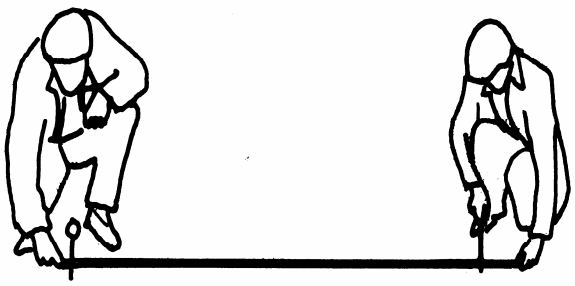
3) ดึงแถบวัดระยะให้ตึงด้วยแรงมาตรฐานที่กำหนดหรือประมาณ 5 กิโลกรัม โดยเกี่ยวเครื่องวัดแรงดึงที่ปลายแถบวัดระยะ ระวังให้ปลายทั้งสองของแถบวัดระยะอยู่ระดับเดียวกัน

4) ทิ้งดิ่ง สำหรับการทำงานในกรณีที่ไม่สามารถวางแถบวัดระยะไปตามพื้น ต้องดึงแถบวัดระยะอยู่เหนือพื้น โดยคนหลังถือสายดิ่งให้ตรงขีดความยาวเต็มช่วง เช่น 30,50 เมตร หมายปลายลูกดิ่งให้ตรงจุดหลัง คนหน้าถือสายดิ่งให้ตรงขีดศูนย์แล้วปล่อยลูกดิ่งให้ทำเครื่องหมายจุดหน้า บนพื้น

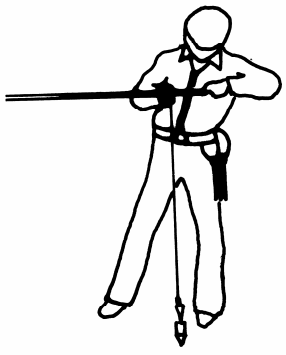
5) คนหน้าเอาเข็มคะแนนปักบนพื้นตรงจุดที่ลูกดิ่งทำเครื่องหมาย ตรวจสอบความเรียบร้อยให้สัญญาณทำเสร็จ เคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกันจนปลายหลังของแถบวัดระยะเกือบถึงจุดหน้า คนหลังให้สัญญาณคนหน้าหยุด ถ้าเป็นการวัดตั้งแต่ช่วงที่สองขึ้นไปคนหลังต้องดึงเข็มคะแนนอันก่อนที่คนหน้าปักไว้ขึ้นก่อนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ทำซ้ำตามขั้นตอนเดิมจนถึงช่วงสุดท้าย

6) การวัดช่วงสุดท้ายซึ่งไม่เต็มช่วงของแถบวัดระยะ คนหน้าจะถือแถบวัดระยะให้ขีดศูนย์ตรงหมุดปลายทาง และคนหลังหรือผู้ช่วยจะเป็นผู้อ่านและจดค่าระยะทางตัวเลขระยะของช่วงสุดท้ายนั้น

ระยะทาง เท่ากับจำนวนเข็มคะแนนคูณความยาวแถบวัดบวกด้วยระยะช่วงสุดท้าย



รูปที่ *4.3* การวัดระยะทางบนพื้นราบ



รูปที่ *4.4* การทิ้งดิ่งเมื่อแถบวัดอยู่เหนือพื้นที่

3.3. **การวัดระยะทางโดยให้แถบวัดระยะอยู่บนเสารองรับ** การวัดเช่นนี้เหมาะกับการวัดระยะทางที่ผ่านพื้นที่ที่เป็นพุ่มไม้หรือไม่สามารถขจัดสิ่งกีดขวางการวัด จำเป็นต้องวัดระยะทางโดยให้แถบวัดระยะอยู่เหนือสิ่งกีดขวาง มีวิธีปฏิบัติในการวัดดังนี้

1) วางแนวเส้นตรงและแบ่งช่วงการวัด

2) ตอกไม้ให้ปลายสูงจากพื้นดิน 75 ซม.ที่จุดต้นและปลายช่วงที่จะทำการวัด และทำเครื่องหมายบนเสาไม้ อาจใช้ตะปูสั้นตอกไว้ จับแถบวัดระยะด้านจุดต้นด้วยที่จับ แล้วเกี่ยวด้วยเครื่องวัดแรงดึงและผูกติดกับหลักเล็งที่ปักก่อนถึงจุดต้น หลักเล็งนี้ใช้เป็นหลักดึงให้แถบวัดระยะตึง

3) แถบวัดระยะด้านปลาย ผูกติดกับหลักเล็งที่ปักอยู่หลังจุดปลาย หลักเล็งนี้ใช้เป็นหลักดึงให้แถบวัดระยะตึงเช่นเดียวกัน

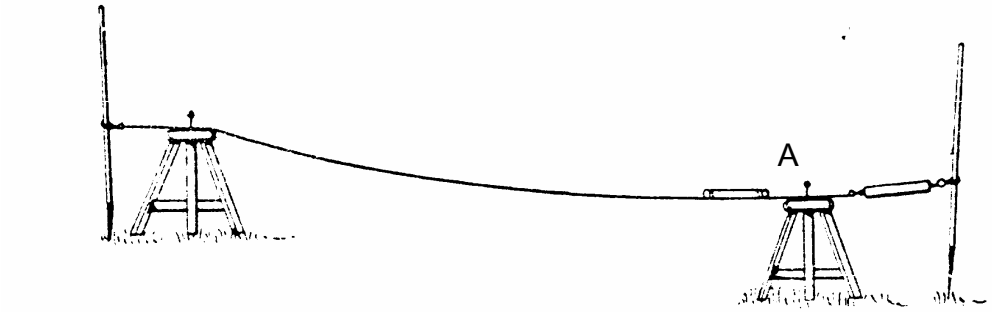
4) ถ้าช่วงการวัดยาวมากกว่า 30 เมตร จะต้องมีหลักค้ำกลางหรือค้ำเป็นช่วงๆประมาณ 25 เมตร โดยปลายหลักค้ำทำเป็นง่ามเพื่อรองรับแถบวัดระยะ มีระดับเป็นแนวเส้นตรง

5) ตรวจความพร้อม แถบวัดระยะอยู่บนหลักค้ำ คนที่จับหลักเล็งหลังจุดทั้งสองเตรียมดึง ให้สัญญาณดึงแถบวัด

6) คนที่จุดต้นดึงโดยดูเครื่องวัดแรงดึงให้ได้ค่าแรงดึงที่ต้องการ คนที่จุดปลายดึงให้ขีดศูนย์แถบวัดตรงหมุด

7) อ่านค่าระยะที่ *A* บันทึกค่าระยะที่ได้

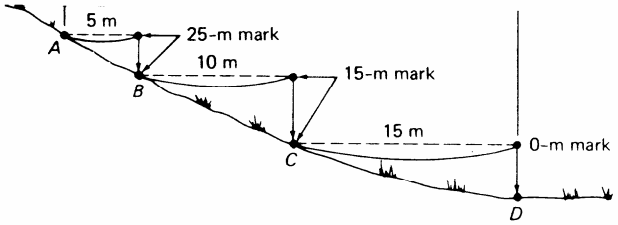
8) วัดมุมเอียงแถบวัดระยะ อุณหภูมิ และ อื่นๆตามความจำเป็น



รูปที่ *4. 5* การวัดระยะทางโดยมีเสารองรับแถบวัดระยะ

3.4. **การวัดระยะทางบนพื้นที่เอียง** การวัดระยะบนพื้นที่มีความลาดชันมาก มีวิธีปฏิบัติ 2 วิธี คือ

1) วัดระยะโดยแบ่งการวัดเป็นช่วงสั้นๆ ในกรณีที่พื้นที่มีความลาดชันมาก การดึงแถบวัดระยะเต็มความยาวให้อยู่ในแนวระดับจะทำได้ยากหรือไม่ได้ เพราะปลายแถบวัดด้านต่ำจะอยู่สูงกว่าพื้นที่มาก จึงต้องแบ่งการวัดเป็นช่วงสั้นๆ แล้วรวมระยะแต่ละช่วงที่ได้เป็นระยะทางเต็มช่วง การวัดโดยวิธีนี้ เรียกว่า "*Breaking Tape*"



รูปที่ *4.6* การวัดระยะแบบแบ่งเป็นช่วงสั้นๆ

ข้อควรปฏิบัติในการวัด การทิ้งดิ่งแต่ละช่างควรจับแถบวัดระยะให้ตรงจุดที่เหมาะสมมีความยาวเป็นตัวเลขลงตัว เพื่อความสะดวกในการรวมระยะภายหลัง ทิศทางในการวัดควรวัดลงเนินมากกว่าวัดขึ้นเนิน และควรสนใจสังเกต ปลายแถบวัดระยะด้านต่ำมักจะต่ำเกินไป

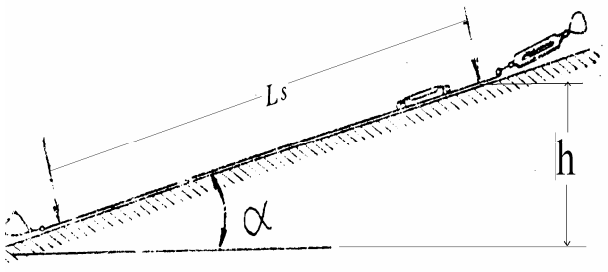
2) วัดระยะทางโดยให้แถบวัดระยะอยู่ในแนวเอียง การวัดระยะทางบนพื้นที่ที่ลาดชันมากๆ การวัดโดยการแบ่งการวัดเป็นช่วงสั้นๆบางครั้งอาจทำได้ลำบาก เพราะต้องแบ่งเป็นหลายช่วง หรือในกรณีที่พื้นที่เป็นพื้นเอียงแต่เรียบ การวัดระยะทางโดยวางแถบวัดระยะไปตามพื้นลาดเอียงอาจสะดวกกว่า โดยวัดระยะเอียงและมุมของความลาดเอียงด้วยเครื่องวัดความลาด แล้วคำนวณหาระยะราบ โดยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

ก) วัดมุมลาดเอียง แล้วคำนวณหาระยะทาง

ระยะราบ = $L_S \times COS(\alpha)$

ข) วัดค่าต่างระดับของจุด (h) แล้วคำนวณหาระยะทาง

ระยะราบ = $\sqrt{L_S^2 - h^2}$



Ls เป็น ระยะเอียง

α เป็น มุมของความลาดเอียง

h เป็น ค่าต่างระดับของจุด

รูปที่ *4. 7* การวัดระยะตามแนวเอียงของพื้น

3.5. **ความคลาดเคลื่อนและค่าปรับแก้** การวัดระยะทางด้วยแถบวัดระยะมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับงานรังวัดทั่วไป หากต้องการความถูกต้องสูง การวัดด้วยแถบวัดระยะอาจไม่เหมาะสมในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามถ้าจำเป็นต้องใช้ก็ยังกระทำได้ โดยการกำจัดความคลาดเคลื่อนที่มีระบบที่แฝงอยู่ในค่าการวัดออก ความคลาดเคลื่อนมีระบบในการวัดระยะทางด้วยแถบวัดระยะเป็นไปตามหลักคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ หาขนาดที่ผิดไปได้

ถ้าให้ L เป็นค่าระยะทางที่อ่านได้จากแถบวัดระยะ ค่าปรับแก้ต่าง ๆคำนวณได้ดังนี้

1) <u>ความยาวของแถบวัดระยะไม่ถูกต้อง</u> ความยาวของแถบวัดระยะไม่ถูกต้อง เป็นความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความยาวของแถบวัดระยะจริงคลาดเคลื่อนจากตัวเลขระยะทางบนแถบวัดระยะ แถบวัดระยะอาจสั้นหรือยาวกว่าค่าตัวเลขที่กำกับไว้ ถ้าให้ c_l คือ ค่าปรับแก้

$$c_l = \frac{(l_o - l)}{l} L$$

l_o คือ ความยาวจริง (*เทียบจากแถบวัดระยะมาตรฐาน*)

l คือ ตัวเลขความยาวที่กำกับบนแถบวัดระยะ

2) <u>ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิ</u> เป็นความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการยืดหรือหดของแถบวัดระยะอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กล่าวคือขณะทำการวัดระยะทางอุณหภูมิสภาพแวดล้อมในขณะนั้น อาจต่างจากอุณหภูมิมาตรฐานที่เป็นข้อกำหนดการใช้แถบวัดระยะนั้นมาก ทำให้ความยาวของแถบวัดระยะต่างจากความยาวจริง ถ้าให้ c_t คือ ค่าปรับแก้

$$c_t = (T - T_o)\, k\, L$$

T_o คือ อุณหภูมิมาตรฐานตามข้อกำหนดการใช้แถบวัดระยะ

T คือ อุณหภูมิในขณะทำการวัดระยะทาง

k คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของแถบวัดระยะ

3) <u>ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงดึง</u> เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้แรงดึงแถบวัดระยะขณะทำการวัดระยะทาง ไม่เท่ากับแรงตามข้อกำหนดการใช้งานซึ่งถือเป็นแรงมาตรฐาน ถ้าให้ c_p คือ ค่าปรับแก้

$$c_p = \frac{(P - Po)\, L}{a\, E}$$

P_o คือ แรงดึงมาตรฐานตามข้อกำหนด

P คือ แรงดึงแถบวัดระยะที่ใช้ทำการวัด

a คือ พื้นที่หน้าตัดของแถบวัดระยะ

E คือ *Modulus of elasticity* ของแถบวัดระยะ

4) <u>ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหย่อนหรือตกท้องช้าง</u> ลักษณะตกท้องช้างของแถบวัดระยะเกิดจากน้ำหนักของแถบวัดระยะเอง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อทำการวัดระยะทางโดยดึงแถบวัดระยะอยู่เหนือพื้นที่หรืออยู่บนเสารองรับ การเกิดลักษณะตกท้องช้างของแถบวัดระยะ ทำให้ค่าการวัดระยะที่ได้เกินค่าที่แท้จริง ฉะนั้นค่าปรับแก้จะมีเครื่องหมายลบเสมอ ถ้าให้ c_s คือ ค่าปรับแก้

$$c_s = \frac{-W2\,L}{24\,P^2}$$

W คือ น้ำหนักของแถบวัดระยะระหว่างจุดรองรับ

P คือ แรงดึงแถบวัดระยะที่ใช้ทำการวัด

5) <u>ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแนวเล็งเบี่ยงเบน</u> การวางแนวเพื่อวัดระยะทางระหว่างจุด 2 จุด ปกติจะวางเป็นเส้นตรง แต่บางครั้งแนวดังกล่าวอาจถูกบัง ทำให้จำเป็นต้องวางแนวการวัดให้เบี่ยงเบนจากแนวตรง ค่าระยะทางที่วัดได้จะยาวกว่าระยะทางตรงที่ต้องการ ถ้าให้ c_a คือ ค่าปรับแก้

$$c_a = \frac{-v2}{2\,L}$$

v คือ ระยะที่เบี่ยงเบนจากแนวตรง

6) <u>ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากพื้นที่ลาดเอียง</u> โดยทั่วไประยะทางระหว่าง 2 จุดใดๆ จะหมายถึงระยะทางราบ แต่จุดทั้งสองอาจไม่อยู่ในระดับเดียวกันและการวัดระยะทางก็อาจกระทำโดยการวัดไปตามความลาดเอียงของพื้นที่ ฉะนั้นค่าที่วัดได้จะยาวกว่าระยะทางราบที่ต้องการ การปรับแก้จะต้องวัด มุมลาดเอียงของพื้นหรือค่าต่างระดับระหว่างจุดทั้งสองด้วย ถ้าให้ c_s คือ ค่าปรับแก้

$$c_s = -L\,[\,1 - COS(\alpha)\,]$$

$$c_s = \frac{-h2}{2\,L}$$

α เป็น มุมลาดเอียงของพื้น

h เป็น ค่าต่างระดับระหว่างสองจุดที่ต้องการวัดระยะทาง

7) <u>ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงพื้นที่</u> งานรังวัดที่ต้องคำนึงถึงความโค้งของผิวโลก ระยะทางจะหมายถึงระยะตามผิวระดับอ้างอิงหรือที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง การวัดระยะทางที่ทำในพื้นที่ที่สูงจากระดับน้ำทะเลมาก ค่าระยะที่วัดได้จะยาวกว่าระยะทางที่ต้องการ ต้องปรับลดระยะทางที่ได้เพื่อให้ได้ค่าระยะทางที่ระดับผิวอ้างอิงถ้าให้ c_E เป็น ค่าปรับแก้

$$c_E = \frac{-Ev\,L}{R}$$

Ev เป็น ค่าระดับของพื้นที่ที่วัดระยะทาง

R เป็น ความยาวรัศมีของโลก ประมาณ 6,400 กิโลเมตร

ตัวอย่าง แถบวัดระยะเหล็กเส้นหนึ่งหนัก *0.908* กก. มีความหนาแน่น *0.0078* กก./ซม^3 โมดูลัสยืดหยุ่น *2.1x10^6* กก./ซม^2 ส.ป.ส.การขยายตัว *11.7 x10^{-6} /^{o}C* มาตรฐานแถบวัดระยะนี้ยาว *50* เมตร เมื่อดึงบนพื้นราบด้วยแรงดึง *10* กก.และอุณหภูมิ *16.7 ^{o}C* ถ้าใช้แถบวัดระยะนี้วัดเส้นทางเส้นหนึ่งได้ยาว *162.00* เมตร โดยให้แถบวัดระยะอยู่บนเสา ช่วงละ *50* เมตร *3* ช่วง และช่วงสุดท้ายวัดได้ *12.00* เมตร แรงดึงวัดได้ *14.5, 12.7, 11.8, 13.6* กก.ตามลำดับ ถ้าสองช่วงแรกปลายแถบวัดระยะอยู่ระดับเดียวกัน และสองช่วงหลังแถบวัดลาดเอียง *1:100* อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการวัด *22^{o}C* พื้นที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง *190* เมตร จงหาค่าระยะทางที่ถูกต้อง

L =	50.0	50.0	50.0	12.0
P =	14.5	12.7	11.8	13.6
Δh =	0.0	0.0	0.5	0.12
T =	22.0	22.0	22.0	22.0

พื้นที่หน้าตัดแถบวัด $= \frac{0.908}{(0.0078 \times 50.0)} = 0.0233 \ cm^2$

ค่าปรับแก้	สูตร	ช่วง *1*	ช่วง *2*	ช่วง *3*	ช่วง *4*
แรงดึง *(C_p)*	*$(P-Po)L/aE$*	*+0.005*	*+0.003*	*+0.002*	*+0.001*
อุณหภูมิ *(C_t)*	*$k(t-t_o)L$*	*+0.003*	*+0.003*	*+0.003*	*+0.001*
การหย่อน*(C_s)*	*$-W2L/24P2$*	*-0.008*	*-0.011*	*-0.012*	*-0.0*
ความลาด *(C_h)*	*$-h2/2L$*	*-0.0*	*-0.0*	*-0.002*	*-0.001*
รวมค่าปรับแก้	*-0.013*	*-0.0*	*-0.005*	*-0.009*	*+0.001*

ระยะที่ถูกต้อง = *162.000 - 0.013*

= *161.987* เมตร

ค่าปรับแก้เนื่องจากความสูงพื้นที่ $= \frac{-161.987 \times 190}{6,400,000}$

= *- 0.005* เมตร

ค่าระยะทางที่ระดับน้ำทะเล = *161.987 - 0.005*

= *161.982* เมตร

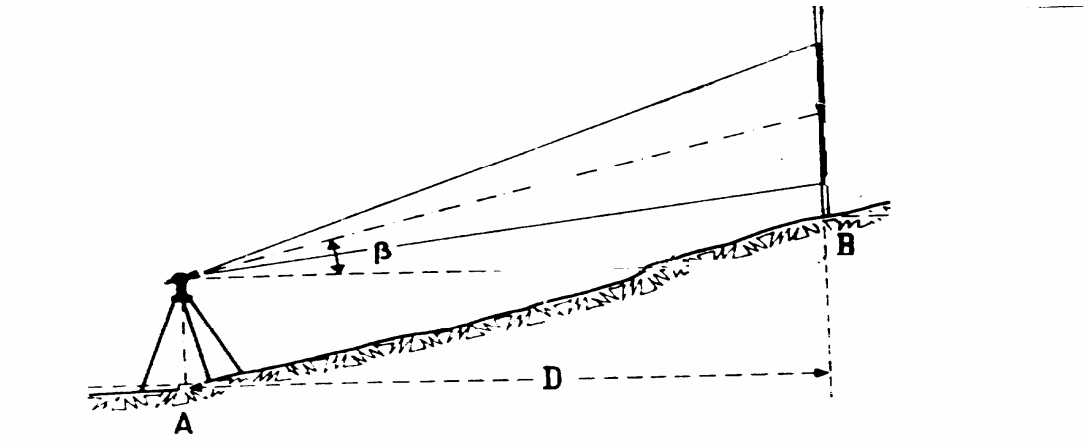
3.6. **ข้อกำหนดในการปฏิบัติงานสนาม** งานรังวัดบนพื้นระนาบระดับความถูกต้องที่ต้องการสำหรับการวัดระยะทางโดยทั่วไปได้แก่ 1:5000 1:2500 และ 1:1000 เป็นงานชั้นสาม งานชั้นสี่ และงานธรรมดา เพื่อให้การวัดระยะทางด้วยแถบวัดระยะได้ผลลัพธ์ที่มีระดับความถูกต้องตามที่ต้องการ จำเป็นต้องกำหนดแนวปฏิบัติและการจัดการความคลาดเคลื่อนมีระบบที่แฝงอยู่ในการวัดให้ถูกต้องดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อปฏิบัติการวัดระยะทางด้วยแถบวัดระยะเพื่อให้ได้ความถูกต้องตามกำหนด

ความคลาดเคลื่อน	*1:5,000*	*1:2,500*	*1:1,000*
ก. ความยาวแถบวัด	ไม่เกิน *±0.2* ซม. ปรับแก้	ไม่เกิน *±0.2* ซม. ปรับแก้	คุณภาพดี
ข. อุณหภูมิขณะวัด	วัดละเอียด *±5* ^{o}C ปรับแก้	ปรับแก้ ถ้าเกิน *30* ^{o}C	ไม่ต้องวัด
ค. ความลาดแถบวัด	วัดละเอียด *2 %* ปรับแก้	ปรับแก้ ถ้าเกิน *2 %*	ปรับแก้ ถ้าเกิน *5%*
ง. การเล็งแนว	ปรับแก้ ถ้าเกิน *30* ซม.	ปรับแก้ ถ้าเกิน *30* ซม.	ระมัดระวัง
จ. แรงดึงแถบวัด	ไม่เกิน *±1* กก. ปรับแก้	ใกล้เคียงแรงมาตรฐาน	ให้แถบวัดตึง
ฉ. การจรดแถบวัด	ผิดไม่เกิน *±1* ซม.	ผิดไม่เกิน *±1* ซม.	ระมัดระวัง

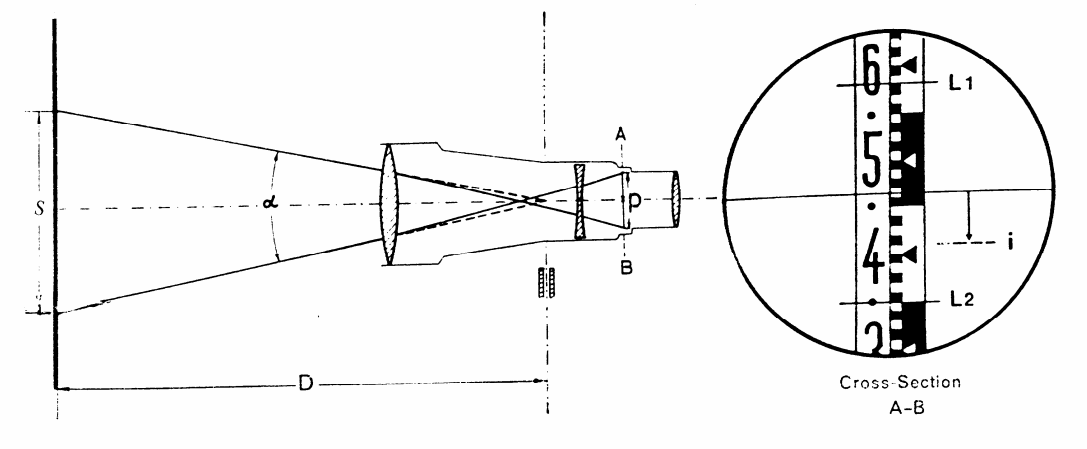
4. **การวัดระยะด้วยสเตเดีย** (Stadia)

สเตเดีย คือ ขีดสั้นๆที่อยู่บนสายใยแนวดิ่งทางด้านบนและด้านล่างของศูนย์กลางกล้อง อาจเป็นกล้องธีโอโดไลท์หรือกล้องระดับ การวัดระยะทางด้วยสเตเดียเป็นการวัดโดยใช้กล้องที่มีสายใยสเตเดียกับไม้ระดับ (*staff*) โดยตั้งกล้องที่จุดปลายข้างหนึ่งและวางไม้ระดับที่จุดอีกข้างหนึ่ง วัดช่วงสเตเดียที่ทาบบนไม้ระดับ และอ่านค่าการวัดอื่นๆที่จำเป็น แล้วอาศัยหลักเรขาคณิตคำนวณหาระยะทางราบระหว่างกล้องกับไม้ระดับ ซึ่งเป็นระยะทางระหว่างสองจุดที่ต้องการ ค่าระยะทางที่ได้มีความถูกต้องประมาณ 1/500



รูปที่ *4. 8* การวัดระยะด้วยสเตเดีย

4.1. **หลักการหาระยะทางจากสเตเดีย** จากรูปที่ 4.9 เส้นใยสเตเดียที่มองผ่านกล้องทาบบนภาพของไม้ระดับแสงจะหักเหผ่านเลนซ์กล้อง แต่ถ้าลากเส้นแนวของแสงนี้จนตัดกัน และเป็นมุมที่คงที่มุมหนึ่ง เรียกว่า มุมเหลื่อม *(Parallactic angle)* และระยะบนไม้ระดับจากขีดสเตเดียบนถึงขีดสเตเดียล่าง เรียกว่า ช่วงสเตเดีย *(Stadia interval)*



รูปที่ *4.9* หลักการหาระยะทางด้วยสเตเดีย

ถ้าให้ $\propto$ เป็น มุมเหลื่อม

s เป็น ช่วงสเตเดีย

c เป็น ระยะที่จุดตัดมุมเหลื่อมห่างจากแกนดิ่งของกล้อง

D เป็น ระยะทางระหว่างกล้องกับไม้ระดับ

$$D = \frac{s}{2} \times \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) + c$$

ให้ $$m = \frac{1}{2} \times \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

จะได้ $$D = ms + c$$

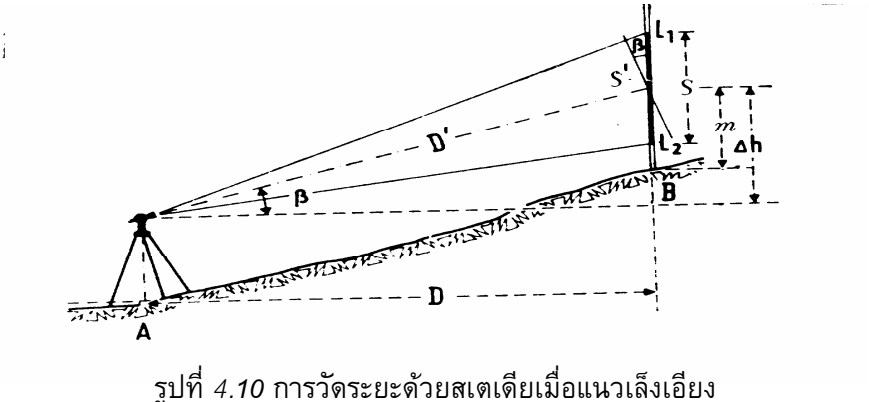
m เรียกว่าตัวคูณคงที่ *(Multiplication constant)* และ *c* เรียกว่าตัวบวกคงที่ *(Additive constant)*

ด้วยการเลือกช่วง p ที่เหมาะสม ทำให้ *m* = 100 และ *c* เรียกว่าตัวบวกคงที่ (*Additive constant*) และผู้ผลิตเครื่องมือจะสร้างให้จุดตัดมุมเหลื่อมอยู่บนแกนดิ่งของกล้องทำให้ *c* = 0 การที่กล้องมีตัวคูณคงที่ของเครื่องมือเป็น 100 และตัวบวกคงที่เป็น 0 ช่วยให้การหาค่าระยะทางง่ายขึ้น คือ

$$D = 100\ S$$

4.2. **การวัดระยะด้วยสเตเดียเมื่อแนวเล็งเอียง** รูปที่ 4.10 ถ้าให้ β เป็นมุมดิ่งที่แนวเล็งทำกับแนวราบ และสมมุติว่ามุมเหลื่อมมีขนาดเล็กมากจนแนวสเตเดียบนขนานกับแนวสเตเดียล่าง จะได้ขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

- หาช่วงสเตเดียที่ตั้งฉากกับแนวเล็ง (s′) จะเท่ากับช่วงสเตเดีย (s) คูณด้วย cos(β)
- หาระยะเอียง (D′) จากสมการ D =100 s
- หาระยะราบ (D) และระยะดิ่ง (Δh) ของแนวเล็งจากค่าระยะเอียง (D′) และค่ามุมดิ่ง (β) ได้



รูปที่ *4.10* การวัดระยะด้วยสเตเดียเมื่อแนวเล็งเอียง

จากสมการ	D	$= 100\ s$	
ระยะเอียง	D'	$= 100\ s'$	
		$= 100\ s \cos(\beta)$	$[s' = s\cos(\beta)]$
ระยะราบแนวเล็ง	D	$= D'\cos(\beta)$	
		$= 100\ s \cos^2(\beta)$	
ระยะดิ่งแนวเล็ง	Δh	$= D'\sin(\beta)$	
		$= 100\ s \cos(\beta)\sin(\beta)$	

4.3. **ความคลาดเคลื่อนการวัดระยะด้วยสเตเดีย**

1) สาเหตุจากความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าไม้ระดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับขีดจำกัดในการมองของผู้วัดในการแบ่งระยะบนไม้ระดับ ระยะการส่อง กำลังขยายของกล้อง ความหนาบางของสายใย สภาพอากาศ เป็นต้น ในการทำงานจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดในงานสนามอย่างเคร่งครัด

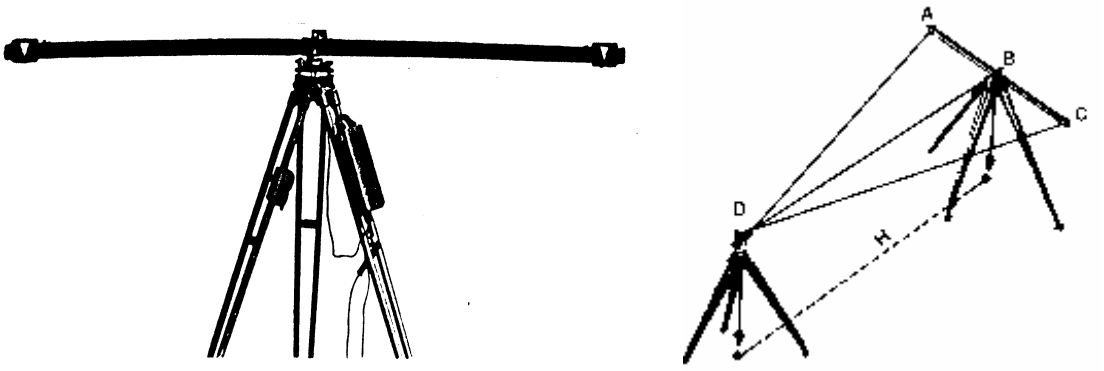
2) สาเหตุจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ ได้แก่ ความยาวของไม้ระดับไม่ได้มาตรฐาน ค่าคงที่ของกล้องไม่ถูกต้อง ($m \neq 100$ และ $c \neq 0$)

3) สาเหตุจากธรรมชาติ ได้แก่ การหักเหของแสงในบรรยากาศทำให้การอ่านค่าไม้ระดับไม่ถูกต้อง ลมทำให้การถือไม้ระดับไม่อยู่ในแนวดิ่ง แสงแดดทำให้เกิดคลื่นความร้อนทำให้การอ่านค่าไม้ระดับไม่แน่นอน

4.4. **ข้อกำหนดในงานสนาม** เพื่อควบคุมความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแนวเล็งเอียงมากและการอ่านไม้ระดับ ในการวัดหรืออ่านสเตเดีย จะกำหนดให้ค่าช่วงสเตเดียบน (u-m) และช่วงสเตเดียล่าง (m-l) ต่างกันไม่มากกว่า 2 มม. หากเกินจากค่าที่กำหนดต้องอ่านค่าใหม่

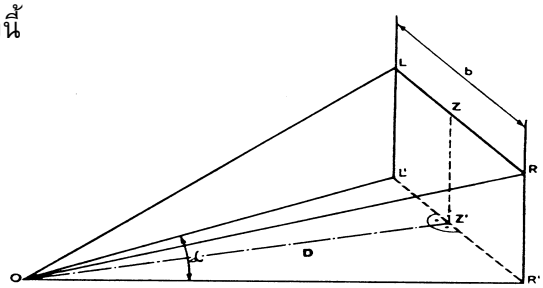
5. **การวัดระยะโดยใช้แท่งวัดระยะ** (Subtense bar)

แท่งวัดระยะ เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว 2 เมตร วางในแนวราบ การวัดระยะทางเป็นการวัดระยะโดยใช้กล้องวัดมุมคู่กับแท่งวัดระยะ โดยกล้องวัดมุมจะต้องสามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 1 วิลิปดา การวัดระยะระหว่างจุด 2 จุดทำโดยการตั้งกล้องที่จุดปลายข้างหนึ่ง และวางแท่งวัดระยะที่จุดปลายอีกข้างหนึ่ง โดยให้แท่งวัดระยะตั้งฉากกับแนวที่จะวัดระยะทาง ทำการวัดมุมราบที่รองรับความยาวแท่งวัดระยะ แล้วอาศัยหลักเรขาคณิตคำนวณหาระยะทางระหว่างกล้องกับแท่งวัดระยะ ความถูกต้องของระยะทางที่ได้ประมาณ 1/2,000 ถ้าวัดระยะภายใน 150 เมตร



รูปที่ *4.11* Subtense bar และ การวัดระยะด้วย Subtense bar

5.1. **หลักการหาระยะทางด้วยแท่งวัดระยะ** จากการวัดมุมที่รองรับความยาวแท่งวัดระยะด้วยกล้องวัดมุมหรือกล้องธีโอโดไลท์ ค่ามุมที่ได้จะเป็นมุมราบเสมอไม่ว่ากล้องวัดมุมกับแท่งวัดระยะจะอยู่ที่ระดับความสูงเดียวกันหรือไม่ ค่ามุมราบและความยาวแท่งวัดระยะสามารถคำนวณหาระยะทางได้ดังนี้



รูปที่ *4.12* เรขาคณิตการหาระยะด้วย *Subtense bar*

ถ้าให้ b เป็นความยาวของแท่งวัดระยะ

α เป็นมุมราบที่รองรับความยาวแท่งวัดระยะ

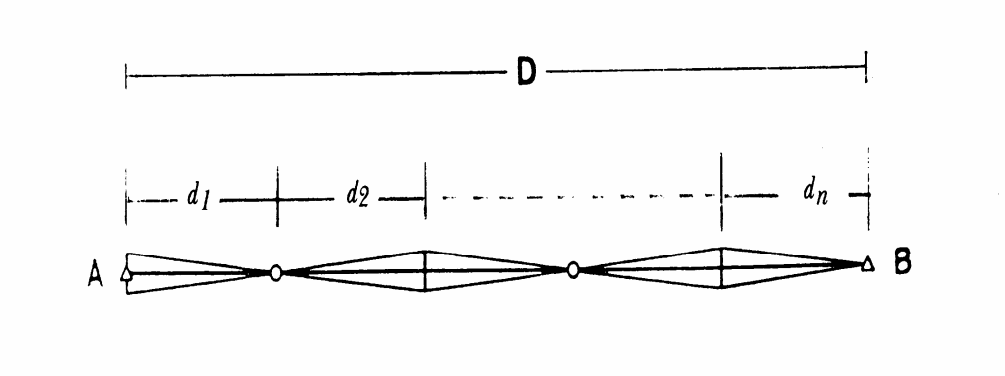
D เป็นระยะราบที่ต้องการวัด

$$D = \frac{b}{2} \times \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$= \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

5.2. **การวัดระยะทางยาว** การวัดระยะทางยาว การวัดระยะทางด้วยแท่งวัดระยะด้วยวิธีที่กล่าวมาจะใช้กับการวัดระยะทางที่ยาวไม่เกิน 200 เมตร หากต้องการวัดระยะทางที่ยาวกว่านี้สามารถกระทำได้ 2 วิธีคือการวัดโดยแบ่งเป็นช่วง และการวัดโดยใช้เส้นฐาน

1) การวัดโดยแบ่งเป็นช่วง

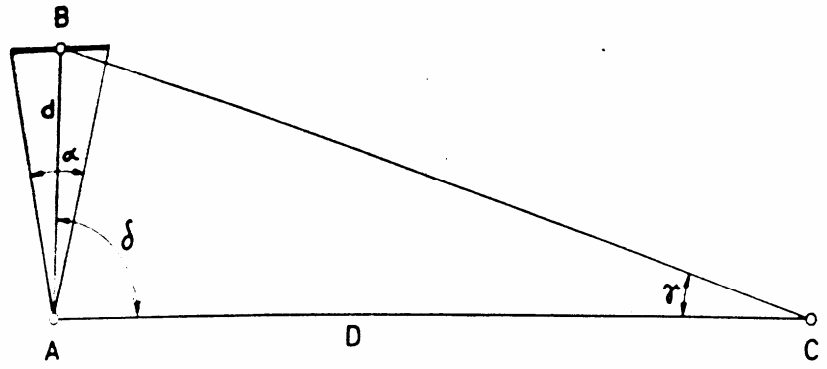


รูปที่ *4.13* การวัดโดยแบ่งเป็นช่วง

ถ้าให้ $\alpha_1, \alpha_2 \ldots\ldots \alpha_n$ เป็นมุมรองรับแท่งวัดระยะช่วงที่ *1 2.....n*

$$D = \cot\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) + \cot\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) + \ldots\ldots + \cot\left(\frac{\alpha_n}{2}\right)$$

2) การวัดโดยใช้เส้นฐาน



รูปที่ *4.14* การวัดโดยใช้เส้นฐาน

ถ้าให้ δ เป็นมุมระหว่างเส้นฐานกับแนวที่จะวัด

γ เป็นมุมรองรับเส้นฐานที่จุดปลายอีกข้างหนึ่ง

$D = d \sin(180-\delta-\gamma) / \sin(\gamma)$

$= \cot(\alpha/2) \sin(\delta+\gamma) / \sin(\gamma)$

$= \cot(\alpha/2) \cot(\gamma)$ [ถ้า $\delta = 90^{\circ}$]

5.3. **ความคลาดเคลื่อนการวัดระยะทางด้วยแท่งวัดระยะ**

1) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความยาวของแท่งวัดระยะ แท่งวัดระยะทำด้วยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยืดหดต่ำ เช่น แท่งวัดระยะ *Wild GBL2 m* ตามมาตรฐานของผู้ผลิตอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป $20^{\circ}C$ จะทำให้ความยาวแท่งวัดระยะเปลี่ยนไป 0.02 มิลลิเมตร เท่านั้น

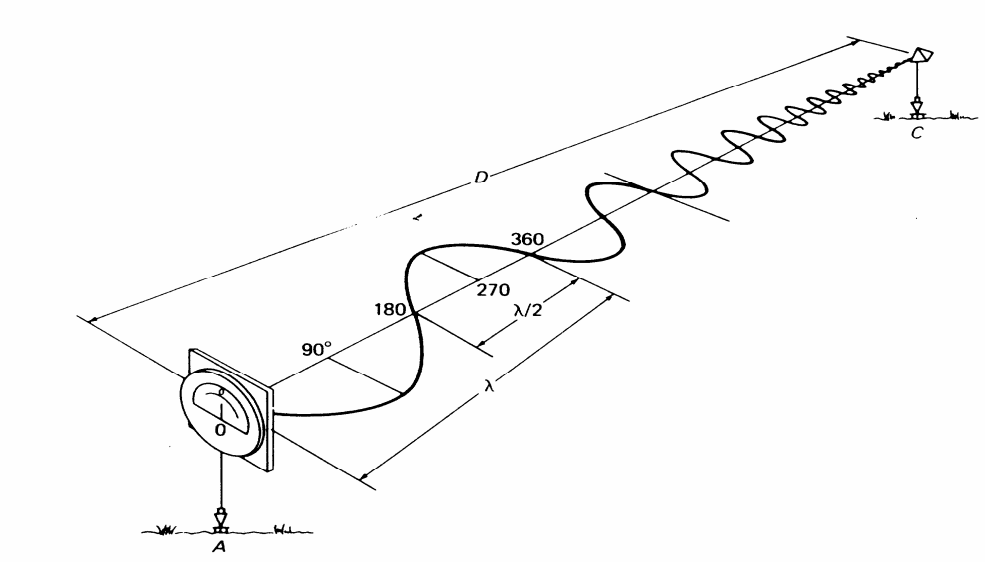
2) ความคลาดเคลื่อนในการวัดมุมรองรับแท่งวัดระยะ ความถูกต้องในการวัดมุมเป็นผลโดยตรงต่อค่าระยะทางที่ได้ ความคลาดเคลื่อนของการวัดมุมราบ 1 ชุดประมาณ ±2″ (ค่าเฉลี่ยของมุมที่วัดด้วยกล้องหน้าซ้ายและขวา) ถ้าต้องการ ±1″ จะต้องวัด 4 ชุด ซึ่งจะทำให้ได้ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระยะทางเท่ากับ $d^2/400{,}000$

3) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตั้งแท่งวัดระยะไม่ตั้งฉากกับแนวที่จะวัด ผู้ผลิตรับรองว่าการเล็งกล้องวัดมุมด้วยกล้องเล็งที่ติดอยู่กับแท่งวัดระยะ จะทำให้แท่งวัดระยะเบี่ยงเบนจากแนวตั้งฉากกับแนวเล็งไม่มากกว่า 36 ลิปดา ซึ่งจะให้ความถูกต้องของวัดระยะทางประมาณ 1/20000 ความคลาดเคลื่อนของกรณีนี้จึงตัดทิ้งได้

5.4. **ข้อกำหนดในงานสนาม** เพื่อให้ได้ความถูกต้อง 1:2500 ซึ่งเป็นความถูกต้องระดับงานชั้น 4 ระยะทางที่วัดควรอยู่ในช่วง 40 - 150 เมตร วัดมุมด้วยกล้องที่วัดมุมได้ละเอียดถึง 1 วิลิปดา จำนวน 4 ชุด และการวัดโดยใช้เส้นฐานควรเลือกความยาวเส้นฐานให้มุม α เท่าๆกับ γ หรือ D ประมาณเท่ากับ $(d^2)/2$

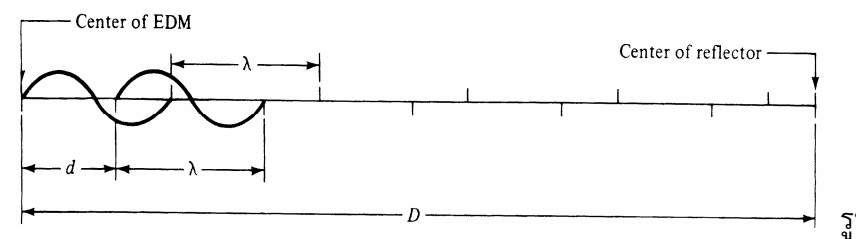
6. การวัดระยะโดยเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์

เป็นการวัดระยะโดยใช้คลื่น อาศัยหลักการที่คลื่นเดินทางจากจุดกำเนิดไปยังเครื่องรับหรืออุปกรณ์สะท้อนคลื่น แล้วกลับมายังจุดกำเนิด คำนวณหาระยะทางระหว่างจุดกำเนิดและเครื่องสะท้อนได้ จากเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง หรือจากการวัดค่าเฟสของคลื่น



รูปที่ *4.15* การวัดระยะด้วยคลื่น

6.1. หลักการของการวัดความต่างเฟส *(Phase difference)* เพื่อหาค่าระยะทาง



รูปที่ *4.16* การวัดเฟสคลื่น

$$D = \frac{n\lambda + d}{2}$$

λ คือ ความยาวช่วงคลื่นที่เครื่องวัดระยะปล่อยออก

d คือ ค่าเฟสที่เครื่องวัดระยะวัดได้

n คือ จำนวนรอบของคลื่น *(n-Ambiguity*) ทั้งหมด

จากรูปและสมการข้างบน เครื่องวัดระยะวัด จะมีวิธีการหาค่าระยะ 2 วิธี ดังนี้

1) ใช้การส่งคลื่นที่มีค่าความยาวช่วงคลื่นโดยเพิ่มครั้งละ 10 เท่า ทำให้หาระยะได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้จำนวนรอบของคลื่น เช่น เพื่อวัดระยะที่น้อยกว่า 1000 เมตร จะส่งคลื่นที่มีความยาวครึ่งช่วงคลื่นเท่ากับ ***10***, *100*, และ ***1000*** เมตร (*λ* = ***20***, *200*, และ ***2000*** เมตร) โดยคลื่นแรกจะวัดหลักหน่วยและทศนิยมของเมตร คลื่นที่สองจะวัดหลักสิบ และคลื่นที่สามจะวัดหลักร้อย

2) ใช้เทคนิคการสร้างคลื่นที่มีความละเอียดสูง ส่งคลื่นที่มีความยาวช่วงคลื่นต่างกันเพียง 2 คลื่น โดยคลื่นที่สองเพิ่มค่าความยาวช่วงคลื่นเพียงเล็กน้อย ทำให้มีโอกาสที่เป็นไปได้ 2 กรณี คือ

จำนวนรอบของคลื่นทั้งสองครั้งเท่ากัน จะวัดค่าเฟสได้ $d_2 < d_1$

$$n\lambda_1+d_1 = n\lambda_2+d_2$$

จำนวนรอบของคลื่นครั้งที่สองน้อยกว่าครั้งแรก 1 รอบ จะวัดค่าเฟสได้ $d_2 > d_1$

$$(n+1)\lambda_1+d_1 = n\lambda_2+d_2$$

6.2. ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง EDM

1) แหล่งกำเนิดคลื่น คลื่นที่ใช้ในเครื่องมือวัดระยะ เช่น แสงอินฟราเรด แสงเลเซอร์ ไมโครเวฟ และ คลื่นเสียง แต่อุปกรณ์ที่ใช้คลื่นเสียงจะให้ความถูกต้องต่ำกว่าสามชนิดแรก

2) ส่วนเล็ง เครื่องมือระบบใช้คลื่นแสงทั้งแสงอินฟราเรดและแสงเลเซอร์ จะใช้กล้องช่วยเล็งเป้าหมาย แต่เครื่องมือระบบใช้ไมโครเวฟไม่ต้องมีส่วนเล็ง เพราะการกวาดให้ตรงเป้าไม่ต้องแม่นยำแน่นอนเหมือนเครื่องมือระบบใช้คลื่นแสง

3) เป้าเล็ง เครื่องมือระบบใช้คลื่นแสงใช้ปริซึมเป็นเป้า ทำหน้าที่สะท้อนคลื่นแสงกลับมายังเครื่องวัดระยะ ส่วนเครื่องมือระบบไมโครเวฟใช้เครื่องรับส่งคลื่นกลับมายังเครื่องส่ง

4) มาตรระยะ เมื่อเครื่องมือรับสัญญาณกลับจากสถานีไกลได้ จะแปลงเป็นระยะทางตามแนวเล็งซึ่งเป็นระยะลาดเอียง ระยะทางราบและดิ่งจะถูกคำนวณออกมาได้เมื่อป้อนข้อมูลมุมดิ่งเข้าไป

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะของเครื่อง *EDM*

	ไมโครเวฟ	*เลเซอร์*	*อินฟราเรด*
ความถูกต้อง	*±15 มม*	*±10 มม.*	*±1 มม.~10 มม.*
ระยะทำงาน	*500 ม.~100 กม*	*10 ม.~ 5 กม.กลางวัน* *10 ม.~50 กม.กลางคืน*	*5 ม.~ 3 กม*
การใช้งาน	*ทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืน ไม่ต้องประณีต ความถูกต้องไม่กระทบโดยความชื้น*	*ต้องมีเป้าหมายที่แน่นอน อาจต้องทำงานกลางคืน ความถูกต้องถูกกระทบโดยแสงและความร้อน*	*ความถูกต้องสูง อ่านค่าระยะได้ทันที ต้องมีอุปกรณ์เป้า ความถูกต้องถูกกระทบโดยความร้อน*

5--งานวงรอบ (Traverse)

1. งานวงรอบ

วงรอบประกอบด้วยเส้นตรงหลายเส้นต่อเนื่องกัน ที่จุดปลายของเส้นตรงแต่ละเส้นมีหมุดกำกับ เรียกว่า หมุดวงรอบ การทำงานวงรอบจะเริ่มจากจุดจุดหนึ่งที่ทราบพิกัดฉาก และรังวัดต่อไปยังหมุดวงรอบที่อยู่ถัดไปทีละหมุดจนครบ ทำให้สามารถคำนวณค่าพิกัดราบของหมุดวงรอบทุกหมุดได้ หมุดวงรอบจึงถูกใช้เป็นหมุดควบคุมหรือหมุดบังคับทางราบ *(Horizontal control)* ใช้อ้างอิงพิกัดตำแหน่งทางราบของจุดอื่น หมุดวงรอบอาจเป็นหมุดถาวร เช่น หมุดทองเหลืองฝังอยู่ในแท่งคอนกรีต หรือเป็นหมุดชั่วคราวที่จัดทำขึ้นสำหรับงานเฉพาะอย่าง เช่น หมุดไม้

1.1. **จุดประสงค์การทำวงรอบ** การทำวงรอบมีจุดมุงหมายต่างกันไป ดังนี้

ก) การทำหมุดอ้างอิงเพื่อการรังวัดออกเอกสารหรือตรวจสอบกรรมสิทธิ์ที่ดิน

ข) การสร้างหมุดบังคับทางราบชั่วคราวในการรังวัดเพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศ

ค) การจัดทำหมุดควบคุมทางราบเพื่อการสำรวจออกแบบและการก่อสร้าง

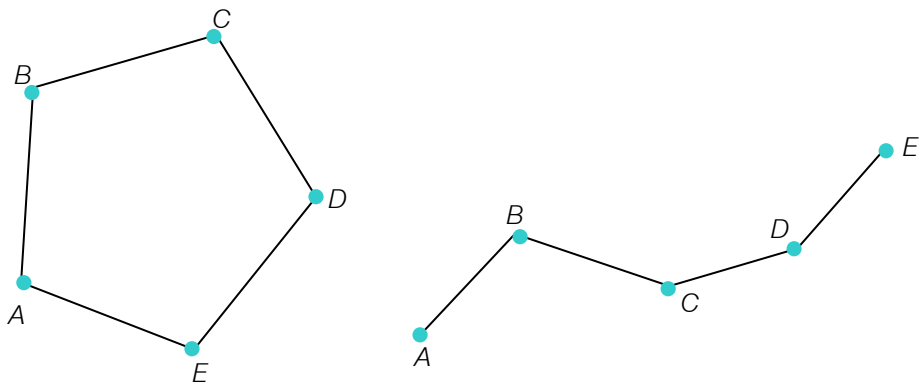
ง) การสร้างจุดควบคุมบนพื้นดินเพื่อการขยายหมุดควบคุมในภาพถ่ายทางอากาศ

จ) การจัดสร้างโครงข่ายหมุดอ้างอิงแห่งชาติหรือหมุดอ้างอิงสำหรับงานรังวัดชั้นสูง

1.2. **ชนิดของงานวงรอบ** งานวงรอบมี 2 ชนิดคือ

ก) วงรอบปิด *(Closed Traverse)* เป็นวงรอบที่มีเส้นวงรอบต่อกันแล้วกลับมาบรรจบจุดเริ่มเป็นรูปหลายเหลี่ยม หรือมีหมุดเริ่มต้นและมีหมุดบรรจบเป็นหมุดเดียวกัน

ข) วงรอบเปิด *(Open Traverse)* เป็นวงรอบที่มีเส้นวงรอบต่อกันแต่ไม่กลับมาบรรจบจุดเริ่ม หรือมีหมุดเริ่มต้นและมีหมุดบรรจบแยกกัน



รูปที่ *5.1* วงรอบปิด และ วงรอบเปิด

1.3. **ลักษณะงานวงรอบ** งานวงรอบจะประกอบด้วยงาน 2 ลักษณะ คือ

ก) งานสนาม ได้แก่ การวัดระยะทาง การวัดมุมราบระหว่างหมุดวงรอบ และการวัดแอซิมัธ

- การวัดระยะทาง เป็นการวัดระยะราบระหว่างหมุดวงรอบที่อยู่ถัดกัน วิธีการวัดระยะ ได้แก่ การใช้เทปเหล็กวัดระยะไปกลับ หรือใช้เครื่องวัดระยะอิเลกทรอนิกส์
- การวัดมุม เป็นการวัดที่หมุดวงรอบแต่ละหมุด การวัดมุมอาจใช้เข็มทิศ หรือกล้องธีโอโดไลท์ แต่ในปัจจุบันคงมีแต่การใช้กล้องธีโอโดไลท์วัดมุมวงรอบ
- การวัดแอซิมัธ เป็นการใช้เข็มทิศวัดแอซิมัธของเส้นวงรอบเส้นหนึ่ง แล้วคำนวณหาแอซิมัธของเส้นวงรอบที่เหลือ ส่วนการวัดแอซิมัธด้วยการรังวัดดาราศาสตร์จะมีในการทำงานวงรอบของงานรังวัดชั้นสูง และงานวงรอบเปิดที่เป็นแนวยาวมีระยะทางค่อนข้างไกล

ข) งานสำนักงาน ได้แก่ การคำนวณหาทิศทางของเส้นวงรอบ การคำนวณปรับแก้วงรอบ การคำนวณหาค่าพิกัดราบ และอาจมีการคำนวณหาพื้นที่ภายในวงรอบปิด

2. การคำนวณปรับแก้งานวงรอบ

งานวงรอบ เป็น การวัดเชิงเงื่อนไข การปรับแก้วงรอบเป็นการปรับให้รูปวงรอบเป็นไปตามเงื่อนไขที่บังคับ ได้แก่ เงื่อนไขทางมุม และเงื่อนไขทางด้าน วิธีการปรับแก้อาจปรับแก้มุมและด้านพร้อมกัน เช่น การปรับแก้โดยการเขียนรูป *(Graphic Method)* ซึ่งเหมาะสำหรับการทำวงรอบด้วยโต๊ะแผนที่ *(Plane Table)* ปัจจุบันการสำรวจด้วยโต๊ะแผนที่แทบไม่พบเห็นเลย หรือการปรับแก้โดย Least-square Method ซึ่งเป็นวิธีการปรับแก้ทางคณิตศาสตร์ชั้นสูง จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์และชุดคำสั่งที่เขียนมาโดยเฉพาะ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตำแหน่งหมุดวงรอบที่มีผลรวมกำลังสองของเศษเหลือน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการปรับแก้งานวงรอบที่ยังใช้กันมากจะแยกการปรับเงื่อนไขทางมุมและเงื่อนไขทางด้าน โดยปรับแก้เงื่อนไขทางมุมก่อน จึงปรับแก้เงื่อนไขทางด้าน

2.1. **การปรับแก้ทางมุม** จะเป็นการหาขนาดความคลาดเคลื่อนของการวัดมุม โดยตรวจสอบเงื่อนไขทางมุมของวงรอบ แล้วกระจายความคลาดเคลื่อนในการวัดไปที่มุมวงรอบทุกมุม เงื่อนไขทางมุมเป็นอย่างไรขึ้นอยู่กับวิธีการวัดมุมที่หมุดวงรอบ เพราะที่ตำแหน่งหมุดวงรอบจะเป็นจุดเปลี่ยนทิศทางของเส้นวงรอบวิธีการวัดมุมมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีความเหมาะสมกับลักษณะงานที่ต่างกัน และมีเงื่อนไขทางมุมที่แตกต่างกัน ทำให้วิธีการปรับแก้มุมต่างกันด้วย วิธีที่การวัดมุมในทางปฏิบัติของงานวงรอบ ได้แก่

- งานวงรอบแบบวัดมุมภายในวงรอบ *(Interior Angle Traverse)*
- งานวงรอบแบบวัดมุมตามเข็ม *(Angle to the Right Traverse)*
- งานวงรอบแบบวัดมุมเบี่ยงเบน *(Deflection Angle Traverse)*

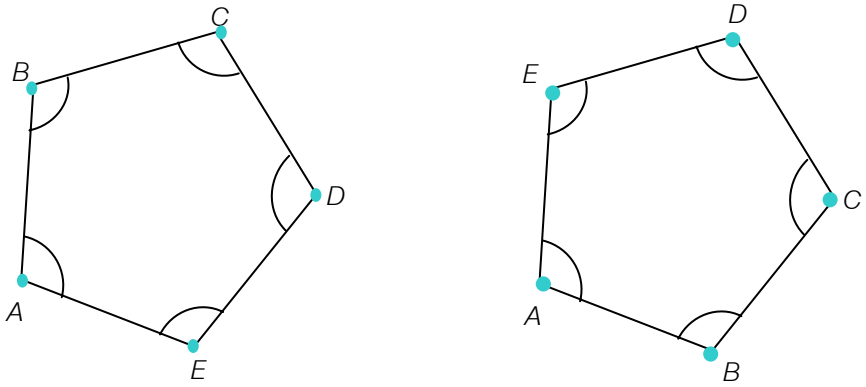
2.2. **การปรับแก้ทางด้าน** จะเป็นการหาขนาดความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางโดยตรวจสอบเงื่อนไขทางด้านของวงรอบ แล้วกระจายความคลาดเคลื่อนไปยังเส้นวงรอบทุกเส้น วิธีที่การปรับแก้ทางด้านในงานวงรอบ ได้แก่

- Transit Rule เป็น การปรับแก้เมื่อการวัดมุมดีกว่าการวัดระยะ
- Compass Rule เป็น การปรับแก้เมื่อคุณภาพการวัดมุมพอ ๆหรือด้อยกว่าการวัดระยะ

3. การคำนวณทางมุมของงานวงรอบ

งานคำนวณเกี่ยวกับมุมของงานวงรอบ ประกอบด้วยการคำนวณ 2 ขั้นตอน คือ การปรับแก้มุมวงรอบและการคำนวณหาแอซิมัธของเส้นวงรอบ วิธีการคำนวณแตกต่างกันตามวิธีการวัด ดังนี้

3.1. **งานวงรอบแบบวัดมุมภายใน** การวัดมุมภายในของวงรอบเป็นวิธีการที่ใช้ได้เฉพาะกับงานวงรอบปิดทิศทางการทำงานตามแนววงรอบมี 2 แบบ คือ ทิศทางตามเข็มหรือวนขวา และทิศทางทวนเข็มหรือวนซ้าย



รูปที่ *5.2* วงรอบแบบวัดมุมภายใน ตามเข็ม และ ทวนเข็ม

ขั้นตอนการคำนวณ ได้แก่

1) ปรับแก้มุมภายใน เงื่อนไขทางมุมที่ต้องปรับแก้ คือ

ผลรวมมุมภายใน = (จำนวนเหลี่ยมรูปวงรอบ-2) x 180

2) คำนวณหาแอซิมัธของเส้นวงรอบ คือ

กรณีวงรอบวนตามเข็ม

แอซิมัธเส้นใด = แอซิมัธย้อนเส้นก่อน – มุมภายในที่จุดนั้น

Azimuth BC = *Back Azimuth AB* – $\angle B$

= *Azimuth BA* – $\angle B$

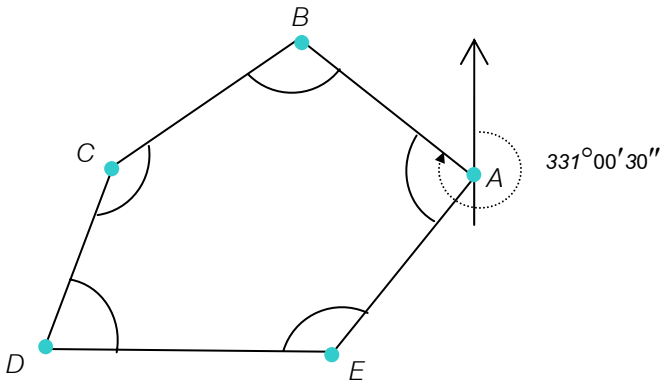
กรณีวงรอบวนทวนเข็ม

แอซิมัธเส้นใด = แอซิมัธย้อนเส้นก่อน + มุมภายในที่จุดนั้น

Azimuth BC = *Back Azimuth AB* + $\angle B$

= *Azimuth BA* + $\angle B$

ตัวอย่างที่ 5.1 การทำงานวงรอบ A B C D E โดยวิธีวัดมุมภายในทิศทางทวนเข็ม และวัดแอซิมัธของ AB ด้วยเข็มทิศได้ $331°00'30''$ จงปรับแก้มุมวงรอบ



จุด	มุมภายใน	ค่าปรับแก้	มุมหลังปรับแก้	แอซิมัธ
A	*78° 22′ 30″*	*+ 18″*	*78° 22′ 48″*	*331° 00′ 30″*
B	*110 28 00*	*+ 18″*	*110 28 18*	*261 28 48*
C	*153 29 00*	*+ 18″*	*153 29 18*	*234 58 06*
D	*58 20 30*	*+ 18″*	*58 20 48*	*113 18 54*
E	*139 18 30*	*+ 18″*	*139 18 48*	*72 37 42*
	539 58 30	*+ 90″*	*540 00 00*	

ผลรวมมุมภายใน = 539°58′30″

ความคลาดเคลื่อนมุมในการบรรจบ= 539°58′30″- 540° = -1′30″

ค่าปรับแก้แต่ละมุม = $+1'30'' x \frac{1}{5}$ = +18″

แอซิมัธ BC = แอซิมัธย้อน AB + มุม B

= (331°00′30″-180°) +110°28′18″

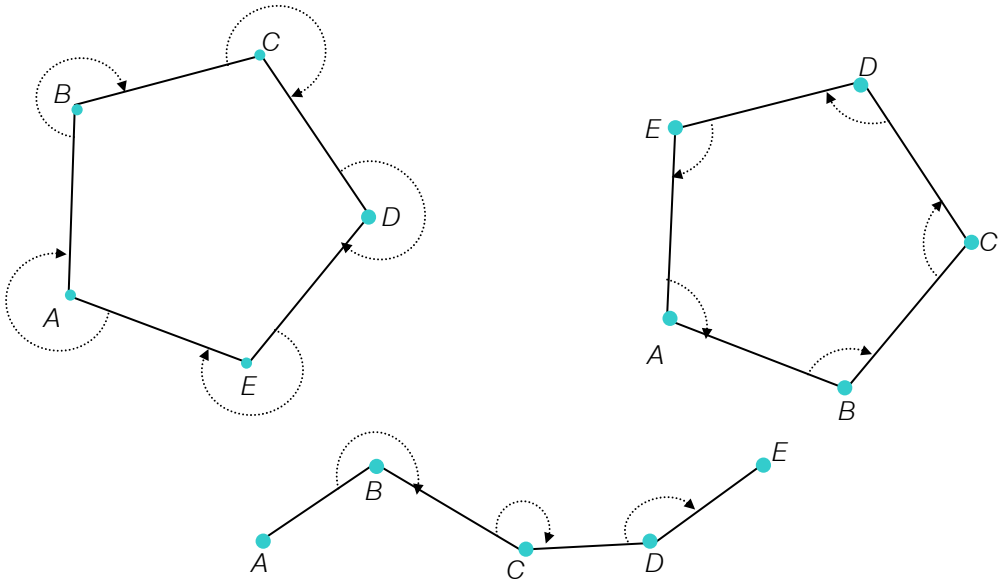
= 261°28′48″

สำหรับแอซิมัธของเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกับการหาแอซิมัธ BC

3.2. **งานวงรอบแบบวัดมุมตามเข็ม** มุมตามเข็มของเส้นวงรอบ คือ มุมวัดจากเส้นวงรอบเส้นก่อนมายังเส้นวงรอบเส้นต่อไปในทิศตามเข็ม

มุมตามเข็มที่หมุดวงรอบ = ค่าอ่านทิศทางเส้นหน้า – ค่าอ่านทิศทางเส้นหลัง

การวัดมุมตามเข็มของวงรอบ เป็นวิธีการที่ใช้ได้ทั้งงานวงรอบปิดและงานวงรอบเปิด วิธีการวัดมุมนิยมวัดด้วยกล้อง 2 หน้าเพื่อเพิ่มความถูกต้อง



รูปที่ *5.3* วงรอบมุมตามเข็ม แบบวงรอบปิด และ วงรอบเปิด

ขั้นตอนการคำนวณ ได้แก่

1) ปรับแก้มุมตามเข็ม ถ้าทำงานวงรอบปิดในทิศทางตามเข็มหรือเวียนขวา มุมตามเข็มจะเป็นมุมภายนอกของรูปเหลี่ยมวงรอบซึ่งปกติจะไม่นิยมทำ แต่ถ้าทำงานในทิศทางทวนเข็มหรือเวียนซ้าย มุมตามเข็มจะเป็นมุมภายในของรูปเหลี่ยมวงรอบ การปรับแก้จึงเหมือนการปรับแก้งานวงรอบแบบวัดมุมภายใน ฉะนั้นเงื่อนไขทางมุมที่ต้องปรับแก้สำหรับงานวงรอบปิด คือ

ผลรวมมุมภายนอก = (จำนวนเหลี่ยมรูปวงรอบ + 2) x 180

ผลรวมมุมภายใน = (จำนวนเหลี่ยมรูปวงรอบ - 2) x 180

ถ้าเป็นวงรอบเปิดเงื่อนไขทางมุมที่นำมาใช้ในการต้องปรับแก้คือ

ผลรวมมุมตามเข็ม = (จำนวนหมุด- 2) x 180 + (แอซิมัธเส้นสุดท้าย - แอซิมัธเส้นแรก)

หรือ ผลรวมมุมตามเข็ม = (จำนวนมุมตามเข็ม) x 180 + (แอซิมัธเส้นสุดท้าย - แอซิมัธเส้นแรก)

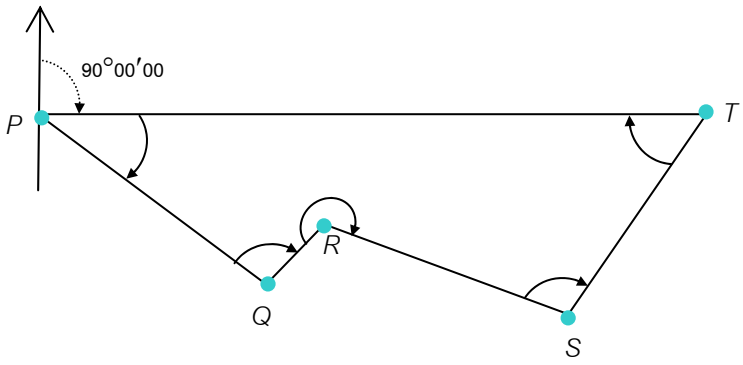
2) คำนวณหาแอซิมัธของเส้นวงรอบ คือ

แอซิมัธเส้นใด = แอซิมัธย้อนเส้นก่อน + มุมตามเข็มที่จุดนั้น

Azimuth BC = *Back Azimuth AB* + $\angle B$

= *Azimuth BA* + $\angle B$

ตัวอย่างที่ *5.2* การทำงานวงรอบ P Q R S T โดยวางหมุดในทิศทางทวนเข็ม วัดทิศทางของแนววงรอบ และวัดแอซิมัธของ PT ด้วยเข็มทิศได้ 90°00′00″ จงปรับแก้มุมวงรอบ



จุด	เป้า	ทิศทางราบ	มุมตามเข็ม (มุมภายใน)	ค่าแก้	มุมปรับแก้แล้ว	แอซิมัธ
P	*T* *Q*	*51 54 50* *92 16 00*	*40 21 10*	*- 03″*	*40 21 07*	*90 00 00* *130 21 07*
Q	*P* *R*	*195 42 15* *263 45 30*	*68 03 15*	*- 03″*	*68 03 12*	*310 21 07* *18 24 19*
R	*Q* *S*	*26 15 15* *281 15 30*	*255 01 15*	*- 03″*	*255 01 12*	*198 24 19* *93 25 31*
S	*R* *T*	*320 16 00* *101 00 20*	*140 44 20*	*- 03″*	*140 44 17*	*273 25 31* *54 09 48*
T	*S* *P*	*302 36 20* *338 26 35*	*35 50 15*	*- 03″*	*35 50 12*	*234 09 48* *270 00 00*
			540 00 15	*- 15″*	*540 00 00*	

ผลรวมมุมภายใน = 540°00′15″

ความคลาดเคลื่อนมุมในการบรรจบ= 540°00′15″-540° = +15″

ค่าปรับแก้แต่ละมุม = $-15'' x \frac{1}{5}$ = - 03″

แอซิมัธ PQ = แอซิมัธย้อน TP + มุม P

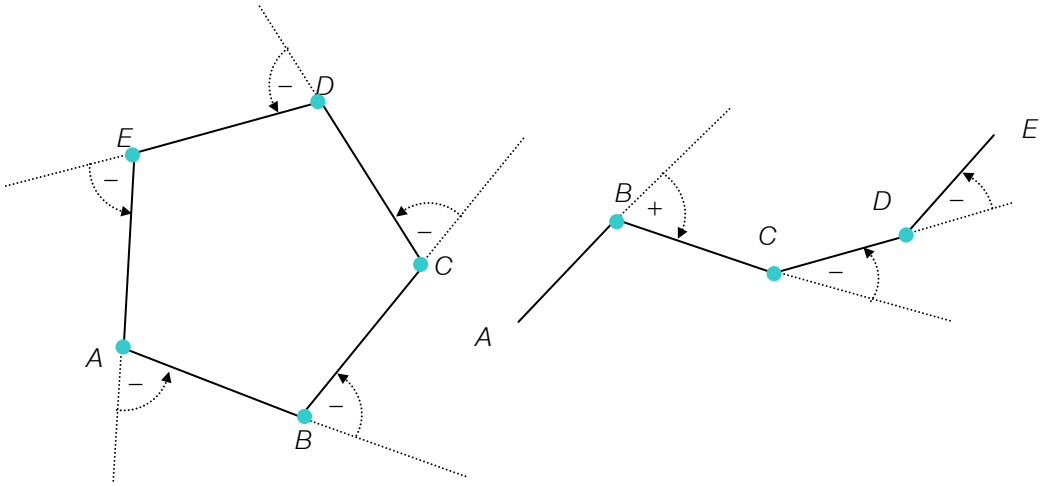
= 90°00′00″+ 40°21′07″

= 130°21′07″

สำหรับแอซิมัธของเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกับการหาแอซิมัธ PQ

3.3. **งานวงรอบแบบวัดมุมเบี่ยงเบน** การวัดมุมเบี่ยงเบนของเส้นวงรอบเป็นวิธีการที่ใช้ได้ทั้งงานวงรอบปิดและงานวงรอบเปิด แต่มีความเหมาะสมกับการรังวัดงานวงรอบเปิดที่เป็นแนวยาวมากกว่า เช่น วงรอบของแนวถนน วิธีการวัดมุมเบี่ยงเบนทำโดยใช้กล้องธีโอโดไลท์ส่องย้อนไปยังหมุดวงรอบหลัง (หมุดที่ผ่านมา) หมุนกล้องโทรทรรศน์รอบแกนราบ เป็นการเปลี่ยนหน้ากล้อง แล้วหมุนกล้องรอบแกนดิ่งส่องไปยังหมุดวงรอบถัดไป วัดมุมที่เส้นวงรอบเบนออกจากแนววงรอบก่อนไปทางซ้ายหรือทางขวา โดยกำหนดให้

- มุมเบี่ยงเบนไปทางขวาหรือไปทางทิศตามเข็มมีเครื่องหมาย +
- มุมเบี่ยงเบนทางซ้ายหรือไปทางทิศทวนเข็มมีเครื่องหมายเป็น -



รูปที่ *5.4* วงรอบปิดและวงรอบเปิด แบบมุมเบี่ยงเบน

ขั้นตอนการคำนวณได้แก่

1) ปรับแก้มุมเบี่ยงเบน เงื่อนไขทางมุมงานวงรอบแบบวัดมุมเบี่ยงเบน ที่ต้องปรับแก้ คือ

วงรอบปิด

ผลรวมมุมเบี่ยงเบน = 360°

วงรอบเปิด

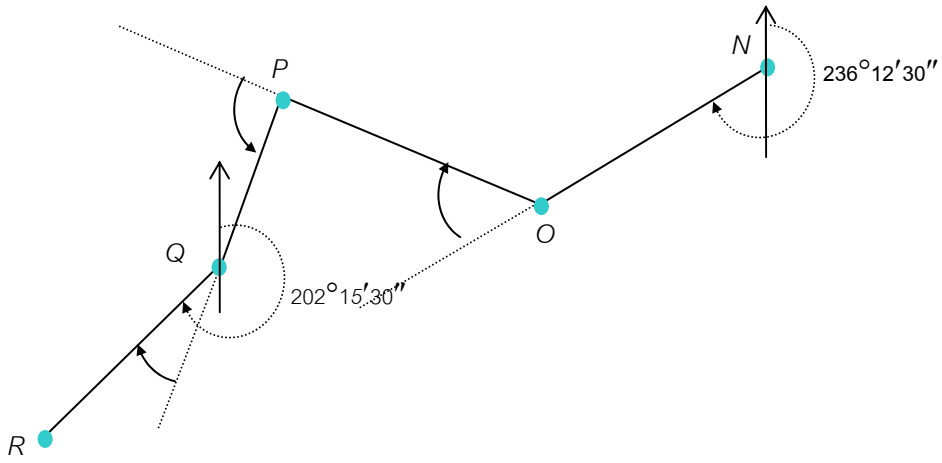
ผลรวมมุมเบี่ยงเบน = แอซิมัธเส้นสุดท้าย - แอซิมัธเส้นแรก

2) คำนวณหาแอซิมัธของเส้นวงรอบ คือ

แอซิมัธเส้นใด = แอซิมัธเส้นก่อน + มุมเบี่ยงเบนที่จุดนั้น

Azimuth BC = *Azimuth AB* + $\angle B$

ตัวอย่างที่ 5.3 การทำงานวงรอบเปิด N O P Q R โดยวิธีวัดมุมเบี่ยงเบนวัดแอซิมัธของเส้น NO และ QR โดยวิธีการวัดดวงอาทิตย์ได้ 236°12′30″ และ 202°15′30″ ตามลำดับจงปรับแก้มุมวงรอบ



จุด	มุมเบี่ยงเบน	ค่าปรับแก้	มุมหลังปรับแก้	แอซิมัธ
N	---	---	---	*236° 12′ 30″*
O	*57° 28′ 00″+*	*- 30″*	*57° 27′30″+*	*293 40 00*
P	*109 15 30 -*	*- 30″*	*109 16 00 -*	*184 24 00*
Q	*17 52 00 +*	*- 30″*	*17 51 30 +*	*202 15 30*
R	---	---	---	---
	- 33 55 30	*- 90*	*- 33 57 00*	

ผลต่างแอซิมัธเส้นสุดท้ายกับเส้นแรก = 202°15′30″ -236°12′30″

= -33°57′00″

ค่าแย้งของมุม = (-33°55′30″)-(-33°57′00″)

= +01′30″

ค่าปรับแก้แต่ละมุม = $(-01'30'')x\frac{1}{3}$

= -30″

แอซิมัธ OP = แอซิมัธ NO + มุมเบี่ยงเบนที่จุด O

= 236°12′30″+(57°27′30″+)

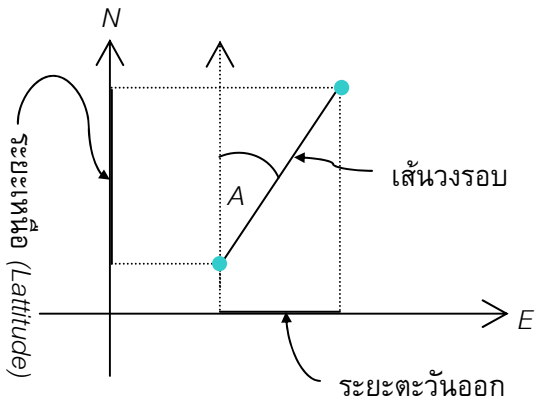
= 293°40′00″

สำหรับแอซิมัธของเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกับการหาแอซิมัธ OP

4. การคำนวณทางด้านของงานวงรอบ

งานคำนวณเกี่ยวกับระยะทางหรือด้านของงานวงรอบ ประกอบด้วยการคำนวณ 3 ขั้นตอน คือ การคำนวณระยะฉากของเส้นวงรอบ การปรับแก้ค่าระยะฉากให้สอดคล้องตามเงื่อนไขของรูปวงรอบ และการคำนวณพิกัดฉากของหมุดวงรอบ

4.1. **ระยะฉาก** เป็นระยะฉาย *(Projection)* ของเส้นวงรอบบนแกนอ้างอิง ได้แก่ ระยะเหนือ และระยะตะวันออก



รูปที่ 5.1 แสดงระยะเหนือและระยะตะวันออก

ระยะเหนือ *(Lattitude)* คือ ระยะฉายของเส้นวงรอบบนแกนเมอริเดียน หรือแกนทิศเหนือ-ใต้ มีขนาดเท่ากับความยาวเส้นวงรอบ (L) คูณด้วย Cosine ของแอซิมัธเส้นวงรอบนั้น

$$\text{Lattitude} = L \times \text{Cos}(Az)$$

ระยะตะวันออก *(Departure)* คือ ระยะฉายของเส้นวงรอบบนแกนขนาน (แกนที่ตั้งฉากกับแกนเมอริเดียน) หรือแกนทิศตะวันออก-ตะวันตก มีขนาดเท่ากับความยาวเส้นวงรอบ (L) คูณด้วย Sine ของแอซิมัธเส้นวงรอบนั้น

$$\text{Departure} = L \times \text{Sin}(Az)$$

ค่าระยะเหนือและค่าระยะตะวันออกมีเครื่องหมายบวกหรือลบกำกับ ตามผลลัพธ์ที่คำนวณได้ หรืออาจกล่าวว่า ค่าระยะเหนือและค่าระยะตะวันออกจะมีค่าบวกหรือลบขึ้นอยู่กับภาคทิศของทิศทางเส้นวงรอบ

ภาคทิศ	ระยะเหนือ	ระยะตะวันออก
1	+	+
2	-	+
3	-	-
4	+	-

ตารางที่ 5.1 แสดงเครื่องหมายระยะเหนือและระยะตะวันออก

4.2. **เงื่อนไขการปรับแก้** เงื่อนไขทางด้านของวงรอบขึ้นอยู่กับชนิดของงานวงรอบ คือ เป็นวงรอบปิดหรือวงรอบเปิด โดยตรวจสอบค่าระยะเหนือและระยะตะวันออกของวงรอบ ดังนี้

ก) วงรอบปิด ผลรวมของค่าระยะเหนือและค่าระยะตะวันออกจะเท่ากับศูนย์

$$\sum \text{Lattitude} = 0$$

$$\sum \text{Departure} = 0$$

ขนาดของความคลาดเคลื่อนทางระยะเหนือจึงเท่ากับผลรวมระยะเหนือ และขนาดของความคลาดเคลื่อนทางระยะตะวันออกจึงเท่ากับผลรวมระยะตะวันออก

$$\Delta \text{ Lattitude} = \sum \text{Lattitude}$$

$$\Delta \text{ Departure} = \sum \text{Departure}$$

ข) วงรอบเปิด ผลรวมค่าระยะเหนือเท่ากับผลต่างพิกัดเหนือของจุดสุดท้ายกับจุดแรก และผลรวมค่าระยะตะวันออกเท่ากับผลต่างพิกัดตะวันออกของจุดสุดท้ายกับจุดแรก ถ้าให้วงรอบมีหมุด *n* จุด

$$\sum \text{Lattitude} = N_n - N_1$$

$$\sum \text{Departure} = E_n - E_1$$

ขนาดของความคลาดเคลื่อนทางระยะเหนือจึงเท่ากับผลรวมระยะเหนือลบด้วยผลต่างพิกัดเหนือของจุดสุดท้ายกับจุดเริ่ม และขนาดของความคลาดเคลื่อนทางระยะตะวันออกจึงเท่ากับผลรวมระยะตะวันออกลบด้วยผลต่างพิกัดตะวันออกของจุดสุดท้ายกับจุดเริ่ม

$$\Delta \text{ Lattitude} = \sum \text{Lattitude} - (N_n - N_1)$$

$$\Delta \text{ Departure} = \sum \text{Departure} - (E_n - E_1)$$

4.3. **วิธีการปรับแก้** เป็นการเลือกวิธีการกระจายความคลาดเคลื่อน ได้แก่ Transit Rule และ Compass Rule การเลือกปรับแก้วิธีใดขึ้นอยู่กับระดับความถูกต้องของการวัดมุมและการวัดระยะทาง ถ้าการทำงานวงรอบใช้อุปกรณ์วัดมุมที่ให้ความถูกต้องสูงกว่าการวัดระยะทาง จะเลือกปรับแก้โดย Transit Rule และถ้าการทำงานวงรอบใช้อุปกรณ์วัดมุมที่ให้ความถูกต้องพอๆ กับการวัดระยะทาง จะเลือกปรับแก้โดยCompass Rule

ก) Transit Rule เป็นการกระจายความคลาดเคลื่อน โดยพิจารณาให้ค่าน้ำหนักการปรับแก้ตามค่าระยะฉากของเส้นวงรอบแต่ละเส้นคือ

$$\text{ค่าแก้ Lat ของเส้นใด} = -\Delta \text{ Lat} \times \frac{\text{Lattitude}}{\sum|\text{Lattitude}|}$$

$$\text{ค่าแก้ Dep ของเส้นใด} = -\Delta \text{ Dep} \times \frac{\text{Departure}}{\sum|\text{Departure}|}$$

ข) Compass Rule เป็นการกระจายความคลาดเคลื่อนโดยพิจารณาให้ค่าน้ำหนักการปรับแก้ตามค่าระยะทางของเส้นวงรอบแต่ละเส้นคือ

$$\text{ค่าแก้ Lat ของเส้นใด} = -\Delta \text{ Lat} \times \frac{\text{Length}}{\sum \text{Length}}$$

$$\text{ค่าแก้ Dep ของเส้นใด} = -\Delta \text{ Dep} \times \frac{\text{Length}}{\sum \text{Length}}$$

ตัวอย่างที่ 5.4 การทำงานวงรอบปิดหลังจากปรับแก้มุมแล้ว ได้ค่าทิศทางแอซิมัธของเส้นวงรอบและระยะทางตามค่าในตาราง จงปรับแก้วงรอบนี้

1) ปรับแก้โดย *Transit Rule*

เส้น	แอซิมัธ	ความยาว	ระยะ *Lat*	ระยะ *Dep*	ค่าแก้ *Lat*	ระยะ *Lat*	ค่าแก้ *Dep*	ระยะ *Dep*
AB	*16°50.0′*	*354.51*	*+339.32*	*+102.66*	*+0.01*	*+339.33*	*-0.02*	*+102.64*
BC	*85 56.0*	*318.54*	*+ 22.59*	*+317.74*		*+ 22.59*	*-0.07*	*+317.67*
CD	*65 00.0*	*274.17*	*+115.87*	*+248.48*		*+115.87*	*-0.05*	*+248.43*
DE	*191 23.0*	*469.65*	*-460.41*	*- 92.70*	*+0.01*	*-460.40*	*-0.02*	*-92.72*
EF	*292 17.5*	*246.57*	*+ 93.53*	*-228.14*		*+ 93.53*	*-0.05*	*-228.19*
FA	*252 18.5*	*365.01*	*-110.92*	*-347.75*		*-110.92*	*-0.08*	*-347.83*
		2028.45	*- 0.02*	*+ 0.29*	*+0.02*	*0*	*-0.29*	*0*

ระยะเหนือ *A-B* = *354.51 x COS(16°50.0′)* = *+339.32*

ระยะตะวันออก *A-B* = *354.51 x SIN(16°50.0′)* = *+102.66*

***เส้นวงรอบเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกัน

ความคลาดเคลื่อนระยะเหนือ = *- 0.02*

ความคลาดเคลื่อนระยะตะวันออก = *+ 0.29*

ผลรวมค่าสัมบูรณ์ระยะเหนือ = *|1142.65|*

ผลรวมค่าสัมบูรณ์ระยะตะวันออก = *|1337.47|*

ค่าปรับแก้ระยะเหนือ *A-B* กับ *D-E* = *+ 0.01* [เพราะเส้นทั้งสองมีค่า *Lat* มากกว่าเส้นอื่น]

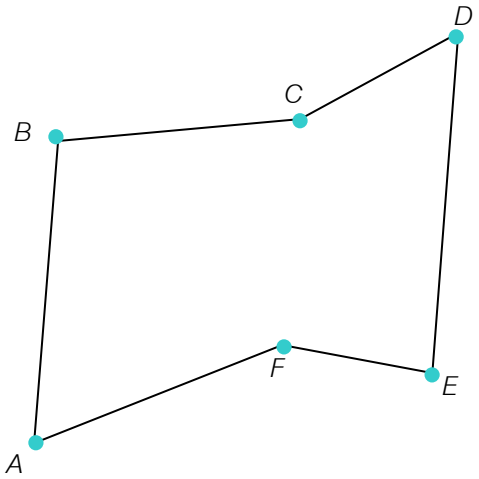
ค่าปรับแก้ระยะตะวันออก *A-B* = $- 0.29 \times \frac{102.66}{1337.47}$ = *- 0.02*

***ค่าปรับแก้ของเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกัน

ระยะเหนือ *A-B* ที่ถูกต้อง = *339.32 + 0.01* = *+339.33*

ระยะตะวันออก *A-B* ที่ถูกต้อง = *102.66 - 0.02* = *+102.64*

***เส้นวงรอบเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกัน



2) ปรับแก้โดย Compass Rule

เส้น	ความยาว	ระยะ Lat	ระยะ Dep	ค่าแก้ Lat	ระยะ Lat	ค่าแก้ Dep	ระยะ Dep
AB	*354.51*	*+339.32*	*+102.66*		*+339.32*	*-0.05*	*+102.61*
BC	*318.54*	*+ 22.59*	*+317.74*		*+ 22.59*	*-0.04*	*+317.70*
CD	*274.17*	*+115.87*	*+248.48*		*+115.87*	*-0.04*	*+248.44*
DE	*469.65*	*-460.41*	*- 92.70*	*+0.01*	*-460.40*	*-0.07*	*- 92.77*
EF	*246.57*	*+ 93.53*	*-228.14*		*+ 93.53*	*-0.04*	*-228.18*
FA	*365.01*	*-110.92*	*-347.75*	*+0.01*	*-110.91*	*-0.05*	*-347.80*
	2028.45	*- 0.02*	*+ 0.29*	*+0.02*	*0*	*-0.29*	*0*

หมายเหตุ การคำนวณระยะเหนือ ระยะตะวันออก เหมือนกับ Transit Rule

ผลรวมระยะทางเส้นวงรอบ = *2028.45*

ความคลาดเคลื่อนระยะเหนือ = *- 0.02*

ความคลาดเคลื่อนระยะตะวันออก = *+ 0.29*

ค่าปรับแก้ระยะเหนือ *D-E* กับ *F-A* = *+ 0.01* [เพราะเส้นทั้งสองมีค่าระยะมากกว่าเส้นอื่น]

ค่าปรับแก้ระยะตะวันออก *A-B* = $- 0.29 \times \frac{354.51}{2028.45}$ = *- 0.05*

***ค่าปรับแก้ของเส้นอื่นให้คำนวณโดยวิธีเดียวกัน

***การคำนวณระยะเหนือและระยะตะวันออกที่ถูกต้อง เหมือนกับ ก)

5. การคำนวณค่าความถูกต้อง

ความละเอียดของการวัดมุมและการวัดระยะทาง มีความสำคัญต่องานรังวัดเป็นอย่างยิ่งเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของงาน ความละเอียดของการวัดขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดเครื่องมือและอุปกรณ์ ในขณะเดียวกันเลือกวิธีการวัดให้ถูกต้อง และมีจำนวนครั้งหรือจำนวนชุดวัดที่เหมาะสมกับความต้องการไม่วัดมากหรือน้อยเกินไป

5.1. **ขนาดความถูกต้อง** ขนาดความถูกต้องในการวัดที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นทั้งความถูกต้องของการวัดมุมและความถูกต้องของการวัดระยะทาง ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความถูกต้องของงานรังวัด เช่น

- งานรังวัดชั้นสามต้องการความถูกต้อง 1:5,000
- งานรังวัดชั้นสี่ต้องการความถูกต้อง 1:2,500
- งานรังวัดทั่วไปต้องการความถูกต้อง 1:1,000

งานรังวัดชั้นหนึ่งและสอง ตามมาตรฐานต่างๆมีข้อกำหนดความถูกต้องแตกต่างกันมากและมีการแบ่งชั้นย่อยอีก อย่างไรก็ตามความถูกต้องขั้นต่ำอาจกำหนดเป็น 1:20,000 และ 1:10,000 สำหรับงานรังวัดชั้นหนึ่งและสอง ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการกำหนดมาตรฐานงานวงรอบของแต่ละหน่วยงานจะแตกต่างกันไป และไม่เพียงแต่กำหนดความถูกต้องหรือความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เท่านั้น ยังกำหนดข้อจำกัดต่างๆ ในการทำงาน เช่น ผลรวมระยะทางสูงสุดของเส้นวงรอบ จำนวนหมุดวงรอบสูงสุด ชนิดของเครื่องมือที่ใช้ และจำนวนชุดที่ต้องวัด ค่าคลาดเคลื่อนในงานวัดมุมและระยะทางจึงเป็นเพียงส่วนหนึ่งของกฎเกณฑ์เพื่อตรวจสอบหรือประเมินผลงานที่ได้

5.2. **ค่าคลาดเคลื่อนในงานวัดมุม** คือ ความแตกต่างของค่าที่วัดได้กับเงื่อนไขทางมุมของรูปวงรอบตามหลักเรขาคณิต จะต้องไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนของมุมที่ยอมรับได้หาจากความถูกต้องที่กำหนดตามชั้นงาน เช่น งานรังวัดชั้นสาม ต้องการความถูกต้อง 1:5,000 ฉะนั้นค่าคลาดเคลื่อนในงานวัดมุมที่แต่ละหมุดวงรอบจะต้องไม่เกิน $\frac{1}{5{,}000}$ เรเดียน เท่ากับ 41″ หรือปัดเศษเป็น 30″ ดังนั้นงานวงรอบปิดชั้นที่ 3 จึงกำหนดความคลาดเคลื่อนของการบรรจบมุม *(Angular Error of Closure)* เท่ากับ $30''\sqrt{n}$ เมื่อ n เป็นจำนวนมุมของวงรอบ

5.3. **ค่าคลาดเคลื่อนในงานวัดระยะทาง** คือ ความแตกต่างของค่าที่วัดได้กับเงื่อนไขทางด้านของรูปวงรอบตามหลักเรขาคณิต ขนาดของความคลาดเคลื่อน (e) หาได้จากค่าคลาดเคลื่อนทางระยะเหนือและทางระยะตะวันออก โดยหาในรูปของความคลาดเคลื่อนของการบรรจบด้าน *(Linear Error of Closure)* แล้วหาความถูกต้องทางด้านที่ได้ จะต้องไม่เกินค่าตามกำหนดของชั้นงาน

$$e = \sqrt{\Delta Lattitude^2 + \Delta Departure^2}$$

$$Accuracy = \frac{e}{\Sigma \text{ระยะเส้นวงรอบ}} = 1:(\Sigma \text{ระยะเส้นวงรอบ} / e)$$

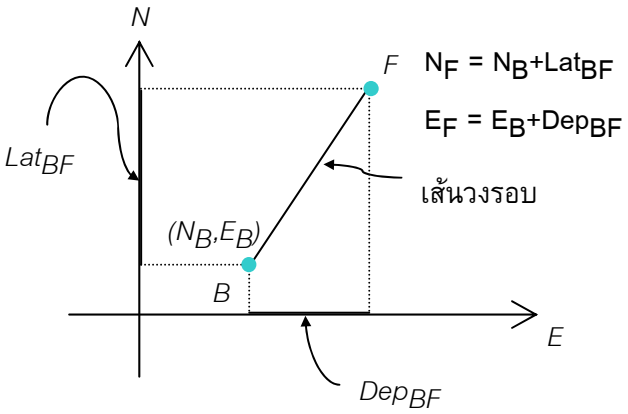
6. การคำนวณค่าพิกัดหมุดวงรอบ

การคำนวณพิกัดตำแหน่งหมุดวงรอบจะทำหลังจากการปรับแก้วงรอบให้เงื่อนไขต่างๆ ทั้งเงื่อนไขทางมุมและเงื่อนไขทางด้านถูกต้องแล้ว เป็นการคำนวณหาพิกัดราบ N,E อาจเป็นระบบพิกัดเดียวกับหมุดควบคุมอื่น โดยจะมีหมุดอ้างอิงที่รู้ค่าพิกัดเป็นส่วนหนึ่งของวงรอบ หรือเป็นพิกัดสมมุติที่เป็นอิสระก็ได้ ถ้าเป็นพิกัดสมมุติ จะนิยมสมมุติพิกัดหมุดเริ่มงานเป็นตัวเลขลงตัว เช่น 500.00,1000.00 โดยพิจารณาประมาณว่าไม่มีค่าพิกัดหมุดใดๆ ที่คำนวณได้หลังจากปรับแก้แล้วมีค่าเป็นลบ

โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

พิกัดเหนือที่จุดใด = พิกัดเหนือจุดก่อน + ระยะเหนือจากจุดก่อนถึงจุดนั้น

พิกัดตะวันออกที่จุดใด = พิกัดตะวันออกจุดก่อน + ระยะตะวันออกจากจุดก่อนถึงจุดนั้น



รูปที่ 5.5 แสดงการหาพิกัดหมุด

ตัวอย่างที่ 5.5 การทำงานวงรอบปิดในตัวอย่างที่ 5.4 หลังจากปรับแก้ทางมุมและปรับแก้ทางด้านแล้ว ได้ค่าระยะเหนือและระยะตะวันออกตามค่าในตาราง ถ้าให้พิกัดราบ N,E ของจุด A มีค่า 100.00,300.00 จงหาพิกัดราบของจุดที่เหลือ

จุด	ระยะ *Lat*	ระยะ *Dep*	*N*	*E*
A	*+339.33*	*+102.64*	*100.00*	*300.00*
B	*+ 22.59*	*+317.67*	*439.33*	*402.64*
C	*+115.87*	*+248.43*	*461.92*	*720.31*
D	*-460.40*	*- 92.72*	*577.79*	*968.74*
E	*+ 93.53*	*-228.19*	*117.39*	*876.02*
F	*-110.92*	*-347.83*	*210.92*	*647.83*
A			*100.00*	*300.00*

พิกัดเหนือจุด *B* (N_B) = *100.00 + 339.33* = *439.33*

พิกัดตะวันออกจุด *B* (E_B) = *300.00 + 102.64* = *402.64*

สำหรับพิกัด *N,E* ของจุดอื่นคำนวณได้โดยวิธีเดียวกัน

ตัวอย่างการคำนวณปรับแก้งานวงรอบปิด

จุด	ระยะ	มุมภายใน	ค่าแก้	ปรับแก้	แอซิมัธ	*Lat*	*Dep*	*C Lat*	*C Dep*	*Adj Lat*	*Adj Dep*	*N*	*E*
A	*86.90*	*100° 43′*	*+1′*	*100° 44′*	*333° 50′*	*77.99*	*-38.32*	*+0.03*	*+0.02*	*78.02*	*-38.30*	*200.00*	*300.00*
B	*186.09*	*101 34*	*+1′*	*101 35*	*255 25*	*-46.85*	*-180.08*	*+0.05*	*+0.04*	*-46.80*	*-180.04*	*278.02*	*261.70*
C	*219.60*	*89 05*	*+0*	*89 05*	*164 30*	*-211.61*	*58.69*	*+0.06*	*+0.05*	*-211.55*	*58.74*	*231.22*	*81.66*
D	*61.87*	*17 11*	*+1′*	*17 12*	*1 42*	*61.84*	*1.84*	*+0.02*	*+0.01*	*61.86*	*1.85*	*19.67*	*140.40*
E	*197.21*	*231 23*	*+1′*	*231 24*	*53 06*	*118.41*	*157.71*	*+0.06*	*+0.04*	*118.47*	*157.75*	*81.53*	*142.25*
A												*200.00*	*300.00*
	751.67	*539 56*	*+4′*	*540 00*		*-0.22*	*-0.16*	*+0.22*	*+0.16*	*0.00*	*0.00*		

<u>ข้อกำหนดงานชั้นสี่</u>

ความคลาดเคลื่อนการบรรจบมุมไม่เกิน $\sqrt{5}$ ลิปดา หรือ *134* วิลิปดา

ความคลาดเคลื่อนการบรรจบด้านไม่เกิน *1:2500*

ความคลาดเคลื่อนการบรรจบมุม = *539 56 - 540* = *- 04 ′> 134 ″* **ใช้ไม่ได้***

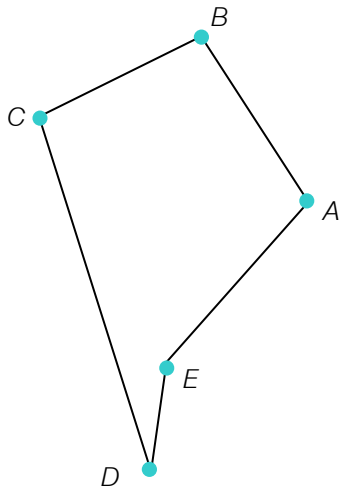
ค่าปรับแก้มุม = *+ 04 ′/5* = *+ 0.8 ′* ปัดเป็น *+1″* (มุม *C* ไม่ต้องปรับแก้)

ความคลาดเคลื่อนการบรรจบด้าน $=\sqrt{0.22^2 + 0.16^2}$ = *0.272*

ความถูกต้องทางระยะ = *0.272 /751.67* = *1:2700* ดีกว่า *1:2500* **ใช้ได้***

ปรับแก้ *Lat* และ *Dep* ใช้ *Compass Rule* กระจายความคลาดเคลื่อนตามขนาดระยะ

พิกัดจุด *A 200.00, 300.00* เป็นพิกัดสมมุติ



ตัวอย่างการคำนวณปรับแก้งานวงรอบเปิด

กำหนดให้ แอซิมัธแนว *XA* และ *EY* พิกัดจุด *A = 970.20,556.10 E = 295.05,964.20*

จุด	ระยะทาง	มุมตามเข็ม	ค่าแก้	มุมปรับแก้	แอซิมัธ	*Lat*	*Dep*	*C Lat*	*C Dep*	*Adj Lat*	*Adj Dep*	*N*	*E*
X					*156°22′45″*							*970.20*	*556.10*
A	*346.21*	*271°38′00″*	*-18″*	*271°37′42″*	*248 00 27*	*-129.65*	*-321.02*	*-0.04*	*+0.11*	*-129.69*	*-320.91*	*840.51*	*235.19*
B	*448.62*	*116 52 45*	*-18″*	*116 52 27*	*184 52 54*	*-446.99*	*-38.18*	*-0.14*	*+0.01*	*-447.13*	*-38.17*	*393.38*	*197.02*
C	*502.74*	*93 46 15*	*-18″*	*93 45 57*	*98 38 51*	*-75.59*	*497.02*	*-0.02*	*+0.16*	*-75.61*	*497.18*	*317.77*	*694.20*
D	*270.86*	*176 10 00*	*-18″*	*176 09 42*	*94 48 33*	*-22.71*	*269.91*	*-0.01*	*+0.09*	*-22.72*	*270.00*	*295.05*	*964.20*
E		*237 08 45*	*-18″*	*237 08 27*	*151 57 00*								
Y													
	1568.43	*895 35 45*	*+4′*	*895 34 15*		*-674.94*	*407.73*	*-0.21*	*+0.37*	*0.00*	*0.00*		
						|674.94|	*|1126.13|*						

ข้อกำหนดงานชั้นสี่

เงื่อนไขทางมุม $= (7-2) \times 180 + (151°57′00″ - 156°22′45″)$ $= 895°34′15″$

ความคลาดเคลื่อนการบรรจบมุม $= 895°35′45″ - 895°34′15″$ $= +90″ < 134″$

ค่าต่างพิกัด $N_E - N_A$ $= 295.05 - 970.20$ $= -675.15$

ค่าต่างพิกัด $E_E - E_A$ $= 964.20 - 556.10$ $= 408.10$

ความคลาดเคลื่อนการบรรจบด้าน $= \sqrt{(674.94 - 675.15)^2 + (407.73 - 408.10)^2}$

$= \sqrt{0.21^2 + 0.37^2}$ $= 0.425$

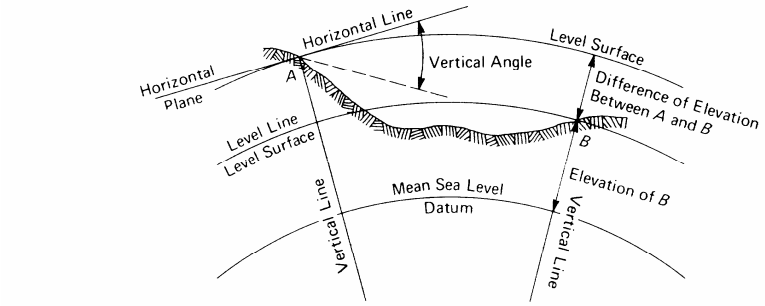
ความถูกต้องทางระยะ $= 0.425 / 1568.43$ $= 1:3700$ ดีกว่า $1:2500$ **ใช้ได้****

6–งานระดับ (Leveling)

การทำระดับ คือ การหาระยะตามแนวดิ่ง ด้วยวิธีโดยตรงหรือวิธีโดยอ้อม เพื่อให้ได้ค่าระดับความสูงของจุดบนภูมิประเทศ หรือจุดบนสิ่งก่อสร้าง หรือเพื่อให้ได้ค่าต่างระดับของจุดสองจุดใดๆ โครงการทางวิศวกรรมมักมีความจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความสูงของผิวดินบริเวณที่ตั้งโครงการเพื่อการทำงานในลักษณะต่างๆ เช่น การกำหนดระดับฐานรากในการก่อสร้างอาคาร การกำหนดความลาดหรือระดับของระบบระบายน้ำ และการกำหนดระดับผิวถนน และงานก่อสร้างอื่นๆล้วนมีการกำหนดค่าระดับความสูงของสิ่งก่อสร้างทั้งนั้นนอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่ไปคำนวณหาปริมาณงานดินขุดหรือถม ปริมาณการเก็บกักน้ำของเขื่อน เป็นต้น

1. **ระดับความสูง** (Elevation)

ระดับความสูงหรือระดับของจุดใด คือ ระยะตามแนวดิ่งที่วัดจากเส้นระดับหรือผิวระดับอ้างอิงถึงจุดนั้น ผิวระดับอ้างอิงโดยทั่วไปจะใช้ผิวระดับที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง(ร.ท.ก.) ซึ่งใช้เป็นพื้นผิวอ้างอิงของสากล เป็นพื้นผิวที่ทุกๆจุดตั้งฉากกับทิศทางของแรงดูดของโลก สำหรับประเทศไทยได้ทำการวัดระดับน้ำทะเลปานกลางที่เกาะหลักจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยสร้างหมุดระดับขึ้นหมุดหนึ่ง แล้วทำการวัดระดับความสูงของหมุดเทียบกับระดับน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี คือ ตั้งแต่ พ.ศ. 2453 ถึง พ.ศ. 2458 ได้ค่าระดับของหมุดเท่ากับ 1.4477 เมตร



รูปที่ 6.1 นิยามระดับความสูงของจุด

ระดับของจุด A คือ ระยะที่วัดตามแนวทิศทางแรงดึงดูดของโลก จากผิวระดับน้ำทะเลปานกลางถึงจุด A หรือ ระยะระหว่างผิวระดับที่ระดับน้ำทะเลปานกลางกับผิวระดับที่ผ่านจุด A ในทำนองเดียวกันค่าต่างระดับของจุด A และ B จะเท่ากับระดับของจุด B ลบด้วยระดับของจุด A หรือเท่ากับระยะที่วัดตามแนวดิ่งระหว่างพื้นผิวโค้งที่ขนานกับพื้นผิวของระดับน้ำทะเลปานกลางที่ผ่านจุด A และจุด B

หมุดระดับ (Benchmark,BM.) คือ จุดที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเป็นจุดที่รู้ค่าระดับ เป็นจุดถาวรไม่มีการทรุดตัวหรือถูกทำลายได้ง่าย หมุดระดับมาตรฐานของประเทศจะถูกสร้างขึ้นกระจายทั่วทั้งประเทศโดยกรมแผนที่ทหาร ในโครงการทางวิศวกรรมผู้ทำการรังวัดอาจจะสร้างหมุดระดับขึ้นเองเพื่อใช้งาน และมักจะสมมุติค่าระดับของหมุดระดับขึ้นหมุดหนึ่ง แล้วใช้อ้างอิงคำนวณระดับของจุดต่างๆ ได้โดยไม่จำเป็นจะต้องใช้ระดับน้ำทะเลปานกลาง แต่ในกรณีที่โครงการจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับโครงการอื่นหรือสัมพันธ์กับค่าระดับมาตรฐานของประเทศ จึงจะใช้ระดับน้ำทะเลปานกลางเป็นพื้นผิวอ้างอิง

2. วิธีการทำระดับ

หลักการที่สำคัญของการหาค่าระดับของจุดใดๆ คือ การวัดค่าต่างระดับของจุดนั้นกับจุดที่รู้ค่าระดับหรือหมุดระดับ วิธีการทำงานเพื่อหาค่าต่างระดับอาจแบ่งได้ 3 แบบ

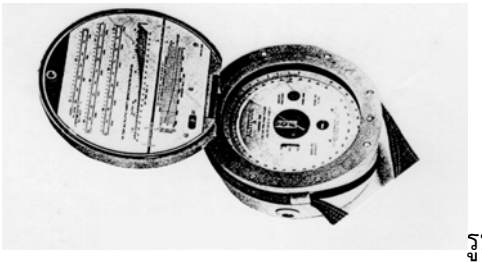
1) งานระดับโดยใช้กล้องระดับ *(Spirit leveling)* เป็นการทำงานระดับโดยวัดระยะดิ่งโดยตรง วิธีนี้มีความละเอียดมากที่สุดและใช้มากที่สุดในการทำงานโครงการทางวิศวกรรม เครื่องมือที่สำคัญในการทำงานคือกล้องระดับและไม้ระดับ

รูปที่ 6.2 งานระดับโดยใช้กล้องระดับ

2) งานระดับตรีโกณมิติ *(Trigonometric leveling)* เป็นการทำงานระดับโดยอาศัยการรังวัดมุมดิ่งและระยะทางราบ แล้วคำนวณหาค่าต่างระดับด้วยสูตรทางตรีโกณมิติ เครื่องมือในการวัดที่สำคัญ คือ กล้องวัดมุมและเครื่องมือวัดระยะทาง

รูปที่ 6.3 งานระดับตรีโกณมิติ

3) งานระดับบารอมิเตอร์ *(Barometric leveling)* อาศัยปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของความดันบรรยากาศที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความสูง หรือค่าต่างระดับระหว่างจุดเป็นสัดส่วนกับผลต่างของความดันบรรยากาศ คือ เมื่อระดับสูงขึ้นความดันบรรยากาศจะลดลง เป็นวิธีการทำงานระดับที่ให้ความถูกต้องน้อยที่สุด ใช้เฉพาะงานสำรวจเบื้องต้นเท่านั้น เครื่องมือที่ใช้คือบารอมิเตอร์ที่มีหน้าปัทม์บอกระดับความสูง เรียกว่า Altimeter



รูปที่ 6.4 Altimeter

3. กล้องระดับ

กล้องระดับเป็นเครื่องมือที่หลังจากทำการตั้งอย่างถูกต้องแล้ว ถ้าเครื่องมือไม่มีความคลาดเคลื่อน จะมีแนวเล็งทำมุมฉากกับเส้นดิ่ง หรือแนวเล็งของกล้องจะอยู่ในแนวราบเสมอ

3.1. ส่วนประกอบของกล้องระดับ

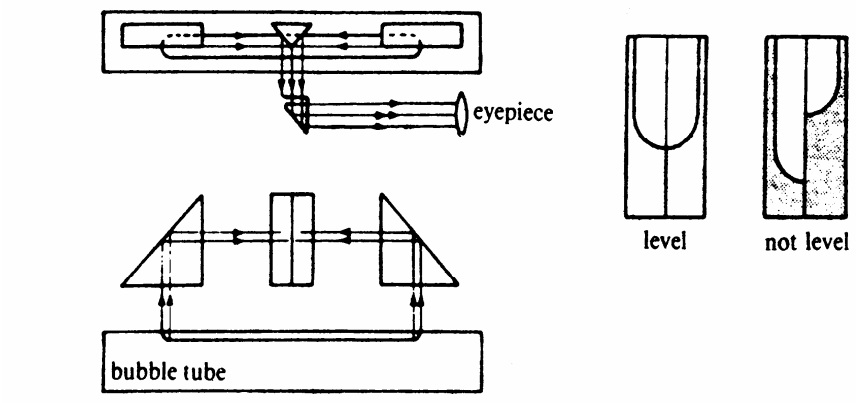
กล้องระดับประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ กล้องโทรทรรศน์ทำหน้าที่เป็นแนวเล็ง และหลอดระดับใช้เป็นตัวชี้สภาวะของแนวเล็งอยู่แนวราบหรือไม่

1) กล้องโทรทรรศน์ ประกอบด้วยเลนส์ภาพ *(Objective)* เลนส์ตา *(Eye piece)* และสายใยเล็ง *(Cross hair)* โดยจะต้องทำให้เห็นภาพไม้ระดับชัดเจนบนระนาบของสายใยเล็งพอดี มิฉะนั้นจะเกิดภาพเหลื่อม *(Parallax)* ผู้วัดสามารถสังเกตภาพเหลื่อมได้โดยการขยับตาขึ้นลง ถ้าเห็นภาพวัตถุเลื่อนขึ้นลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสายใยเล็ง แสดงว่ายังเกิดภาพเหลื่อม การปรับโฟกัสของเลนส์ยังไม่ดีพอ ฉะนั้นเวลาทำงานต้องกำจัดภาพเหลื่อมให้หมดไปก่อนที่จะทำการวัดปริมาณต่างๆ โดยปรับเลนส์ตาให้มองเห็นสายใยชัดที่สุด แล้วปรับโฟกัสภาพให้ภาพไม้ระดับเกิดบนระนาบของสายใยเล็ง ทดสอบจนมั่นใจจึงเริ่มวัด

2) หลอดระดับมี 2 ลักษณะ คือ หลอดระดับกลม และหลอดระดับยาว

ก) หลอดระดับกลม ประกอบด้วยกล่องรูปวงกลม มีส่วนบนเป็นแก้วรูปทรงกลม ฟองอากาศจะเป็นรูปทรงวงกลมมีความไวต่ำ ใช้ปรับหาระนาบราบโดยประมาณก่อน แล้วจึงปรับหาแนวราบอย่างถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง วิธีนี้ช่วยให้การทำงานสะดวกและรวดเร็วขึ้น

ข) หลอดระดับยาว ประกอบด้วยหลอดแก้วผิวในโค้งภายในบรรจุด้วยของเหลวมีความไวสูง เช่น แอลกอฮอร์ อีเธอร์ หรือคลอโรฟอร์ม และเหลือช่องว่างหรือฟองอากาศ ฟองอากาศจะลอยอยู่ตรงส่วนที่อยู่สูงสุดของหลอดแก้วเสมอ การปรับระดับจะมองผ่านปริซึมซึ่งเป็นตัวสะท้อนภาพจากปลายทั้งสองของหลอดระดับให้มาปรากฏอยู่ในตำแหน่งเดียวกันบนจอภาพ ถ้าหากแนวเล็งเอียงไปจากแนวราบ ภาพที่ปรากฏจากปลายทั้งสองของฟองอากาศจะเคลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้าม ระยะที่มองเห็นจึงเป็นสองเท่าของระยะจริงที่ฟองอากาศเคลื่อนไปจากจุดกึ่งกลาง ซึ่งช่วยให้การหาตำแหน่งกึ่งกลางของฟองอากาศถูกต้องและชัดเจนยิ่งขึ้น และมักเรียกหลอดระดับที่มีปริซึมช่วยสะท้อนภาพแบบนี้ว่า หลอดระดับเขาควาย

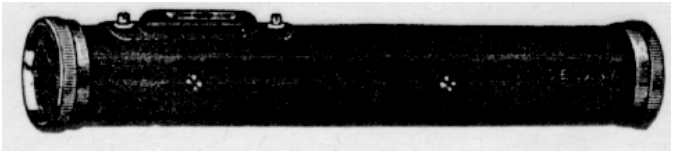


รูปที่ 6.5 ส่วนประกอบและภาพที่เห็นของหลอดระดับเขาควาย

3.2. ชนิดของกล้องระดับ

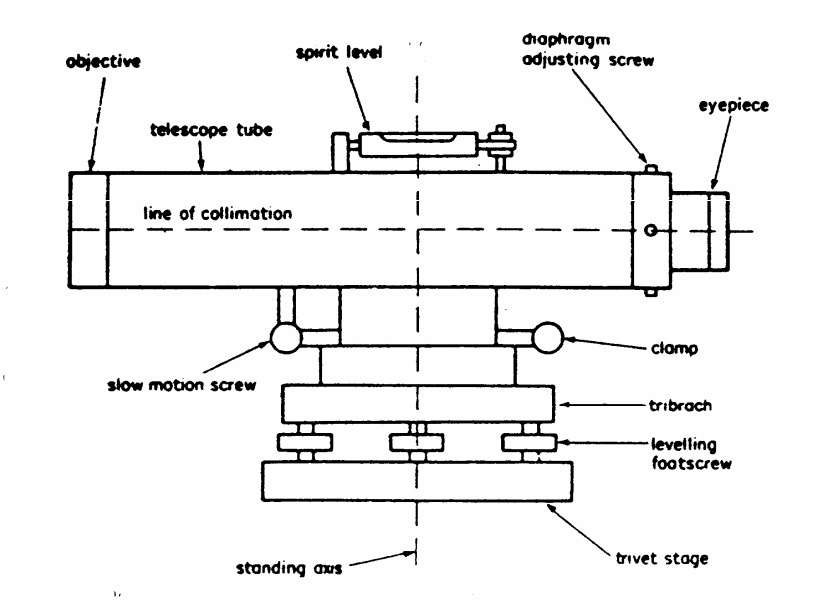
กล้องระดับทุกชนิดจะมีกล้องโทรทรรศน์และหลอดระดับ แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือวิธีทำให้แนวเล็งอยู่ในแนวราบขณะกำลังใช้งาน ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ กล้องระดับมือ กล้องระดับดัมปี้ กล้องระดับทิ้งลติ้ง และกล้องระดับอัตโนมัติ

1) กล้องระดับมือ *(Hand Level)* เป็นกล้องระดับแบบง่ายๆสะดวกต่อการใช้และพกพา มีลักษณะเป็นหลอดกลมหรือสี่เหลี่ยมยาวประมาณ 10 ซม. มีหลอดระดับอยู่ด้านบน แนวเล็งของกล้องใช้วิธีเล็งผ่านรูเล็กๆเห็นสายใยที่เป็นลวดโลหะที่อยู่อีกปลายหนึ่งของตัวกล้อง และเพื่อให้ผู้วัดสามารถถือกล้องให้อยู่ในแนวราบได้ขณะส่อง ตรงกลางตัวกล้องจึงมีปริซึม 45 องศาที่จะช่วยสะท้อนภาพของหลอดระดับด้านบน ทำให้ขณะมองผ่านช่องเล็งจะเห็นภาพเป้าและฟองอากาศของหลอดระดับพร้อมกัน กล้องชนิดนี้ไม่มีเลนส์ช่วยขยายภาพจึงมีระยะการเล็งสั้น และมีความละเอียดค่อนข้างต่ำ แต่ก็เหมาะที่จะใช้กับงานบางประเภทที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง



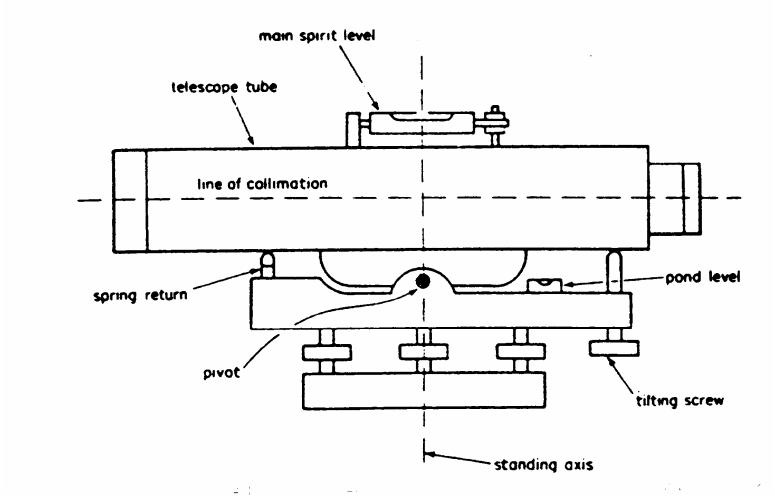
รูปที่ 6.6 กล้องระดับมือถือ

2) กล้องระดับดัมปี้ *(Dumpy Level)* เป็นกล้องระดับที่มีตัวกล้องโทรทรรศน์ยึดติดกับแกนดิ่งเป็นชิ้นเดียวกัน จึงมีแนวเล็งที่ตั้งได้ฉากกับแกนดิ่งของกล้อง ดังนั้นในการทำงานระดับเพื่อทำให้แกนดิ่งของกล้องอยู่ในแนวดิ่ง การตั้งกล้องจะดูจากหลอดระดับยาว แล้วแนวเล็งของกล้องก็จะกวาดอยู่ในแนวระนาบราบตลอดเวลา



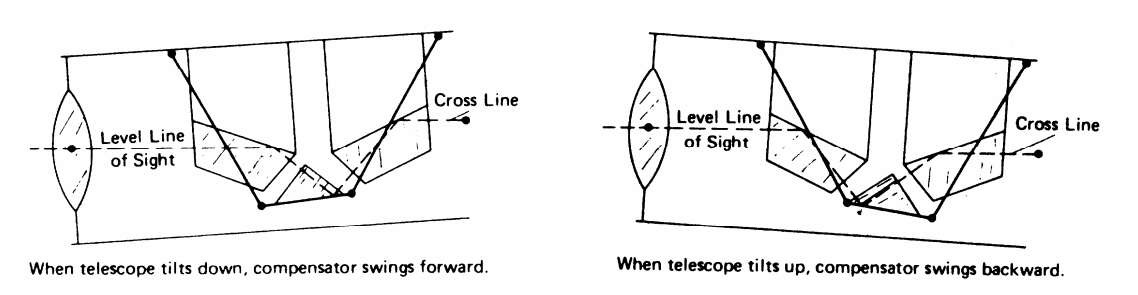
รูปที่ 6.6 โครงสร้างของกล้องระดับดัมปี้

3) กล้องระดับทิลติ้ง *(Tilting Level)* เป็นกล้องระดับที่มีตัวกล้องโทรทรรศน์อิสระไม่ได้ถูกตรึงแน่นอยู่กับแกนดิ่ง แต่สามารถขยับให้เอียงได้เล็กน้อย การขยับกล้องนี้อาศัยสกรูที่มีเกลียวละเอียดมาก ทำให้แนวเล็งขยับตามกล้องโทรทรรศน์ แนวเล็งของกล้องจึงไม่จำเป็นต้องตั้งฉากกับแกนดิ่งกล้อง ฉะนั้นการตั้งกล้อง แกนดิ่งจึงไม่จำเป็นต้องอยู่แนวดิ่งจริง จะใช้เพียงการดูจากหลอดระดับกลม และเพื่อให้แนวเล็งอยู่ในแนวราบจึงต้องปรับอีกครั้งให้ฟองอากาศหลอดระดับเขาควายอยู่กึ่งกลาง ซึ่งต้องปรับทุกครั้งก่อนที่จะอ่านค่าบนไม้ระดับ



รูปที่ 6.7 โครงสร้างของ กล้องระดับทิลติ้ง

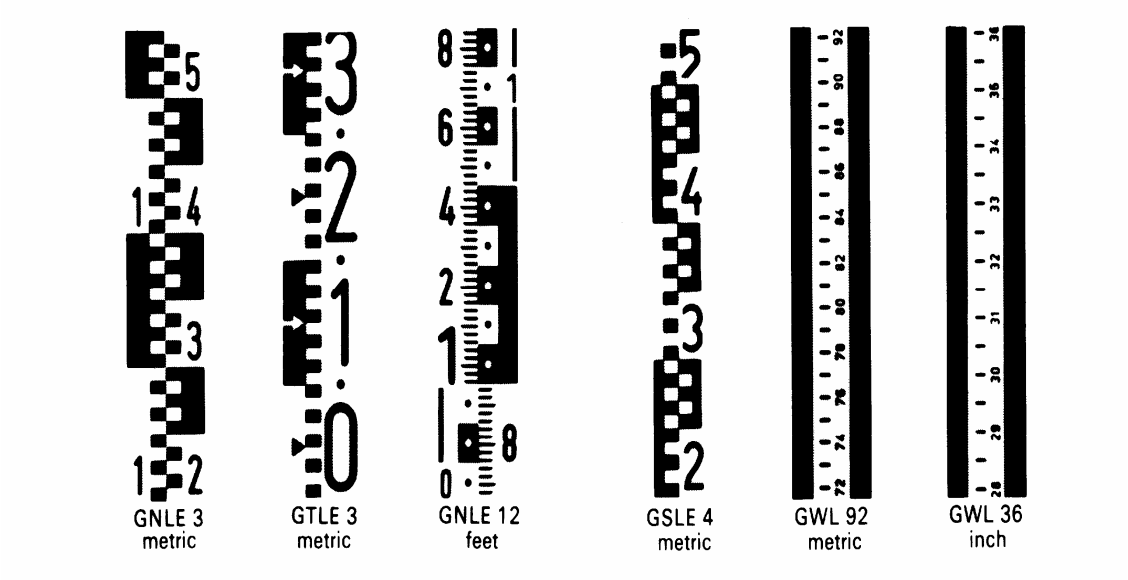
4) กล้องระดับอัตโนมัติ *(Automatic Level)* เป็นกล้องที่มีโครงสร้างภายในค่อนข้างซับซ้อน เพราะต้องมีระบบทัศนูปกรณ์และกลไกตัวทดแทน เพื่อทำให้แนวเล็งอยู่ในแนวราบและคงระดับเดิมไว้ตลอดเวลาไม่ว่าหมุนกล้องไปในทิศทางใด แม้แนวแกนของกล้องโทรทรรศน์จะเอียงจากแนวราบเล็กน้อย การตั้งกล้องจะมีเพียงหลอดระดับกลมช่วยในการทำให้กล้องวางตัวอยู่ภายในขอบเขตการทำงานของตัวทดแทนเท่านั้น ปกติกลไกตัวทดแทนจะถูกยึดตรึงไว้เพื่อป้องกันการกระเทือน ฉะนั้นหลังการตั้งกล้องก่อนการวัดจะต้องมีการปลดตัวยึดกลไกตัวทดแทน ซึ่งขณะปลดควรที่จะมองผ่านกล้องโทรทรรศน์เพราะจะเห็นเส้นใยเล็งเต้นขึ้นลงอยู่ชั่วขณะแล้วหยุด ทำให้มั่นใจว่าตัวทดแทนทำงาน การทดสอบระบบอัตโนมัติของตัวทดแทน ทำโดยการกดด้วยแรงเล็กน้อยลงบนสามขาที่รองรับกล้องแล้วปล่อย ถ้ามองผ่านกล้องโทรทัศน์จะเห็นสายใยเล็งเต้นขึ้นลงอยู่ชั่วขณะแล้วหยุด และค่าที่อ่านได้หลังการกดจะต้องเท่ากับเมื่อก่อนการกดจึงจะแสดงว่าตัวทดแทนทำงานเป็นปกติ



รูปที่ 6.8 หลักการทำงานของกลไกตัวทดแทน

4. **ไม้ระดับ** (leveling staff)

ไม้ระดับ ทั่วไปจะทำด้วยไม้เนื้ออ่อนน้ำหนักเบา และได้รับการอบแห้งเป็นอย่างดีเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปขึ้นได้ในภายหลัง หรืออาจทำด้วยวัสดุโลหะผสม มีขนาดของความกว้างและความหนาแตกต่างกันไป ส่วนความยาวมีตั้งแต่ 2 3 และ 4 เมตร บางชนิดทำให้เลื่อนได้บางชนิดพับเก็บได้ ด้านหน้าของไม้ระดับจะมีตัวเลข สัญลักษณ์ และทาสีขาวสลับสีดำหรือสีขาวสลับสีส้ม การออกแบบมีมากมายหลายแบบวัตถุประสงค์เพื่อทำให้มองเห็นและอ่านค่าได้สะดวก เช่น หลักเมตรจะใช้จำนวนจุดหรือตัวเลขกำกับ มีตัวเลขเพื่อบอกความสูงทุกสิบเซนติเมตรและทาสีสลับ มีสัญลักษณ์สามเหลี่ยมหรือทาสีสลับกันทุกห้าเซนติเมตร มีขีดแบ่งช่องเล็กสุดช่องช่องละ 1 เซนติเมตรหรือทาสีสลับ เป็นต้น ไม้ระดับบางแบบจะเขียนตัวเลขในลักษณะกลับหัวเพราะกล้องระดับบางชนิดจะเห็นภาพของวัตถุเป็นภาพหัวกลับ



รูปที่ 6.9 ภาพไม้ระดับแบบต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์เพิ่มที่ใช้กับไม้ระดับ เพื่อให้ค่าการวัดดีขึ้น ได้แก่

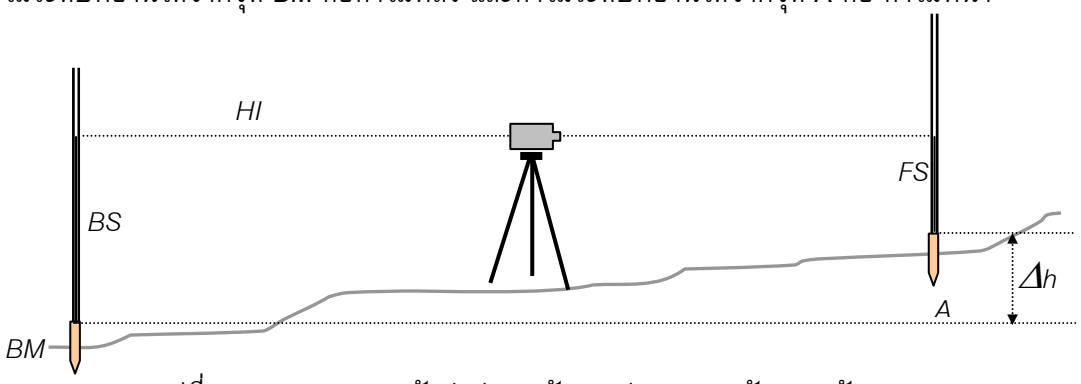
ก) หลอดระดับกลม จะติดไว้ด้านหลังของไม้ระดับสูงจากพื้นดินประมาณ 1.20 เมตร ใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยให้การถือไม้ระดับอยู่ในแนวดิ่ง

ข) เป้าเล็ง ใช้ช่วยในการทำระดับเมื่อระยะที่ทำการเล็งกล้องไกลจนไม่สามารถอ่านค่าบนไม้ระดับจากกล้องโดยตรงได้

5. **การทำระดับโดยวิธีการวัดค่าต่างระดับ** (Differential leveling)

การทำระดับโดยการวัดค่าค่าต่างระดับเป็นวิธีการวัดทางตรง หลักการวัดค่าต่างระดับระหว่างจุด 2 จุด คือ การใช้กล้องระดับและไม้ระดับ วัดระยะดิ่งจากจุดทั้งสองถึงระนาบราบระนาบหนึ่ง โดยระนาบราบคือระนาบที่ผ่านแนวเล็งเมื่อหมุนกล้องระดับไปรอบ ๆ และเมื่อเอาไม้ระดับวางบนจุดใดค่าอ่านไม้ระดับโดยมองผ่านกล้องระดับคือค่าระยะดิ่งจากจุดนั้นถึงระนาบราบของแนวเล็ง

ในทางปฏิบัติวิธีการวัดค่าระดับระหว่างจุด 2 จุด จะตั้งกล้องในตำแหน่งที่มองเห็นจุดทั้งสองได้สะดวก อ่านค่าไม้ระดับที่จุดที่รู้ค่าระดับ เรียกว่า ค่าอ่านไม้หลัง *(Backsight, BS)* แล้วหมุนกล้องไปอ่านค่าไม้ระดับที่จุดที่ต้องการหาค่าระดับ เรียกว่า ค่าอ่านไม้หน้า *(Foresight, FS)* พิจารณาจากรูปที่ 6.10 ค่าไม้ระดับที่อ่านได้จากจุด BM คือค่าไม้หลัง และค่าไม้ระดับที่อ่านได้จากจุด A คือ ค่าไม้หน้า



รูปที่ 6.10 แสดงการหาวัดค่าต่างระดับระหว่างหมุดระดับ BM กับจุด A

การคำนวณหาค่าระดับอาจพิจารณาแบ่งเป็น 2 วิธีที่ต่างกันคือ การหาค่าระดับจากค่าระดับของแนวเล็ง และการหาค่าระดับจากค่าต่างระดับ

5.1. การหาค่าระดับจากค่าระดับของแนวเล็ง จะหาค่าระดับของแนวเล็งก่อนแล้วจึงคำนวณหาค่าระดับของจุดที่ต้องการ โดยระดับของแนวเล็งหรือที่เรียกว่าความสูงของเครื่องมือ *(Height of Instrument,HI.)* คือระยะตามแนวดิ่งที่วัดจากพื้นผิวอ้างอิงถึงแนวเล็งที่อยู่ในแนวราบ สามารถหาได้โดยเอาค่าระดับของหมุดระดับ เช่น BM หรือจุดที่รู้ค่าระดับบวกกับค่าไม้หลัง เมื่อรู้ค่า HI. จะสามารถหาค่าระดับของจุดใด ๆก็ได้ โดยอ่านค่าไม้ระดับที่วางอยู่บนจุดนั้น ซึ่งถือเป็นค่าไม้หน้า เช่น วางบนจุด A ค่าระดับของจุด A จะเท่ากับค่า HI. ลบด้วยค่าไม้หน้า

$$\text{HI} = \text{ค่าระดับ BM} + \text{BS}$$

$$\text{ค่าระดับจุด A} = \text{HI} - \text{FS}$$

5.2. การหาค่าระดับจากค่าต่างระดับ จะหาค่าต่างระดับก่อนแล้วจึงคำนวณค่าระดับของจุดที่ต้องการ เช่น ค่าค่าต่างระดับของ BM กับจุด A (Δh_{BM-A}) สามารถหาได้โดยเอาค่าไม้หลังลบด้วยค่าไม้หน้า ค่าระดับของจุด A จะเท่ากับค่าระดับของ BM บวกค่าค่าต่างระดับ

$$\Delta h_{BM-A} = BS - FS$$

$$\text{ค่าระดับจุด A} = \text{ค่าระดับBM} + \Delta h_{BM-A}$$

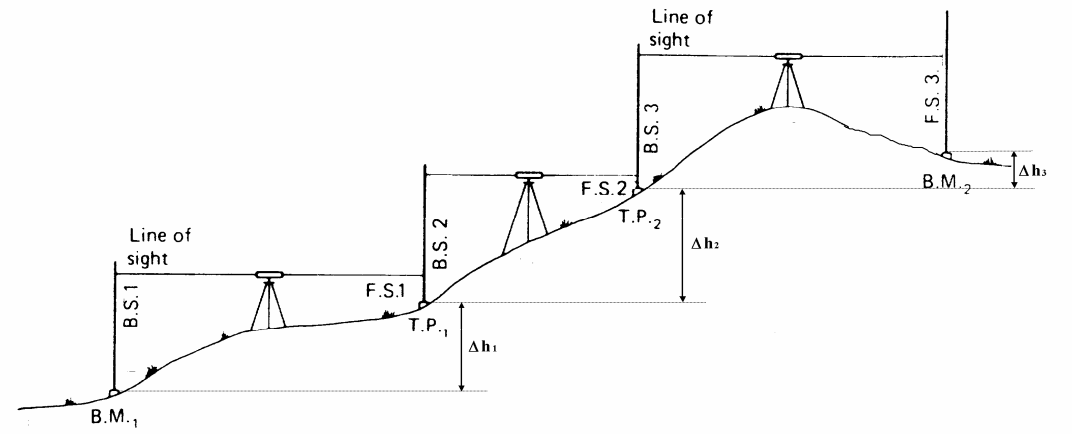
วิธีการวัดค่าต่างระดับของจุดสองจุดข้างต้นมีข้อจำกัด ในกรณีดังต่อไปนี้ คือ

ก) ค่าต่างระดับมากเกินกว่าความยาวไม้ระดับ หรือ

ข) ไม่สามารถหาจุดตั้งกล้องระดับที่สามารถมองเห็นได้ทั้งจุด BM และจุด A

ค) จุดทั้งสองอยู่ไกลกันเกินกว่าความสามารถที่จะส่องกล้องอ่านค่าไม้ระดับได้

การตั้งกล้องเพียงครั้งเดียวเพื่อวัดค่าต่างระดับจึงเป็นไปไม่ได้ ต้องแบ่งเป็นส่วนๆโดยทำจุดชั่วคราวขึ้น เรียกว่า จุดเปลี่ยนระดับ *(Turning point,TP.)* แล้วดำเนินกรรมวิธีหาผลต่างระดับเป็นช่วงๆ ต่อเนื่องกันไปด้วยหลักการทำนองเดียวกัน ดังรูปที่ 6.11



$$\Delta h_1 = BS1 - FS1$$

$$\Delta h_2 = BS2 - FS2$$

$$\Delta h_3 = BS3 - FS3$$

$$\Delta h_{BM\text{-}A} = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3$$

$$= \Sigma BS - \Sigma FS$$

รูปที่ 6.11 การหาค่าต่างระดับ BM-A โดยใช้จุดเปลี่ยนระดับ

ตัวอย่างที่ 6.1 ในการถ่ายระดับจากหมุด BM ไปหมุด A อ่านค่าไม้ระดับที่ BM ได้ 1.752 เมตร และอ่านค่าไม้ระดับที่จุด A ได้ 1.230 เมตร ถ้าค่าระดับของ BM =10.144 เมตร จงหาค่าระดับของจุด A

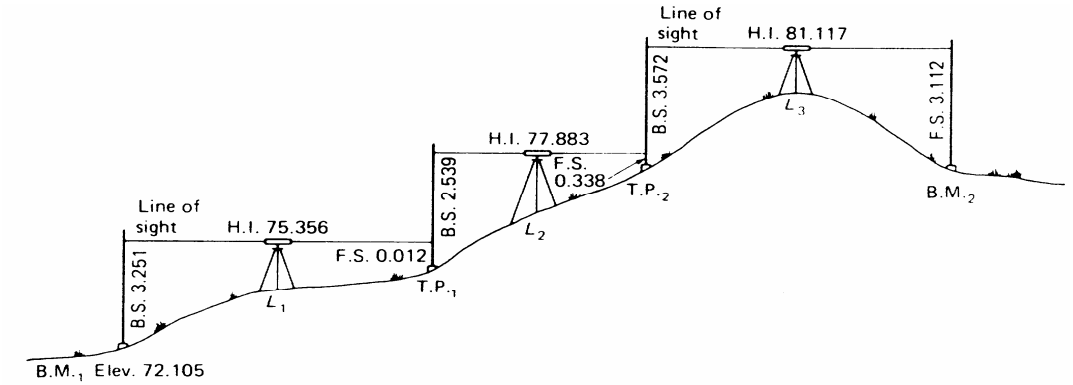
ก) คำนวณจากค่าระดับแนวเล็ง

ค่าระดับแนวเล็ง HI	=	10.144 + 1.752	
	=	11.896	เมตร
ค่าระดับของจุด A	=	11.896 - 1.230	
	=	10.666	เมตร

ข) คำนวณจากค่าต่างระดับ

ค่าต่างระดับระหว่างจุดทั้ง	=	1.752 - 1.230	
	=	0.522	เมตร
ค่าระดับของจุด A	=	10.144 + 0.522	
	=	**10.666**	เมตร

ตัวอย่างที่ 6.2 การถ่ายระดับจาก BM1 ไปหมุด BM2 อ่านค่าไม้ระดับดังรูป จงหาค่าระดับของจุด BM2



ก) คำนวณจากค่าระดับแนวเล็ง

ค่าระดับแนวเล็ง *HI1*	= 72.105 + 3.251	= 75.356	
ค่าระดับของจุด *TP1*	= 75.356 – 0.012	= 75.344	เมตร
ค่าระดับแนวเล็ง *HI2*	= 75.344 + 2.539	= 77.883	
ค่าระดับของจุด *TP2*	= 77.883 – 0.338	= 77.545	เมตร
ค่าระดับแนวเล็ง *HI3*	= 77.545 + 3.572	= 81.117	
ค่าระดับของจุด *BM2*	= 81.117 – 3.112	= **78.005**	เมตร

ข) คำนวณจากค่าต่างระดับ

ค่าต่างระดับ *BM1- BM2*	= (3.251+2.539+3.572) - (0.012+0.338+3.112)		
	= 9.362 – 3.462	= 5.900	เมตร
ค่าระดับของจุด *BM2*	= 72.105 + 5.900	= **78.005**	เมตร

ข้อสังเกต การคำนวณหาค่าระดับทั้ง 2 วิธีคือ การหาค่าระดับจากค่าระดับของแนวเล็ง และการหาค่าระดับจากค่าต่างระดับ ดูเหมือนมีความแตกต่างกันน้อยมาก แต่แท้จริงแล้วการเลือกใช้วิธีในการคำนวณที่เหมาะสมมีความสำคัญ เพราะในบางกรณีถ้าเลือกผิดวิธี จะทำให้การคำนวณยืดยาวโดยไม่จำเป็น หรืออาจคำนวณไปถึงขั้นตอนสุดท้ายไม่ได้ จึงอาจให้ข้อสังเกตเบื้องต้น ดังนี้

1) การหาค่าระดับจากค่าระดับของแนวเล็ง เหมาะสำหรับการหาค่าระดับของจุดรายละเอียด เพราะการทำงานลักษณะนี้จะส่องไม้หลัง 1 ครั้ง แต่ส่องไม้หน้าไปยังจุดหลายจุด โดยส่องไม้หลังไปยังจุดอ้างอิง และส่องไม้หน้าไปยังจุดต่างๆที่ต้องการหาค่าระดับ การคำนวณหาค่าระดับของแนวเล็งเพียงครั้งเดียว สามารถนำไปหาค่าระดับของจุดที่ต้องการหาค่าระดับได้หมด

2) การหาค่าระดับจากค่าต่างระดับ เหมาะสำหรับการหาค่าระดับของจุดควบคุมหรือจุดอ้างอิง เพราะการทำงานลักษณะนี้จะส่องไม้หลัง *(BS)* ส่องไม้หน้า *(FS)* แล้วย้ายกล้อง จนจบงาน เช่น การถ่ายระดับจากจุดควบคุมที่มีอยู่ไปยังจุดควบคุมใหม่ จะเริ่มจากส่องไม้หลังไปยังจุดควบคุม *(BM)* และส่องไม้หน้าไปที่จุดเปลี่ยนระดับ *(TP)* ย้ายกล้อง ส่องกลับมายัง *TP* เดิมแล้วส่องไม้หน้าไป *TP* ถัดไป ทำเช่นนี้จนเข้าบรรจบจุดควบคุมใหม่ที่ต้องการหาค่าระดับ การคำนวณหาค่าต่างระดับสามารถหาได้สะดวกรวดเร็วจาก $\Sigma BS - \Sigma FS$

6. การตรวจสอบความถูกต้องและการปรับแก้งานระดับ

การตรวจสอบผลการทำงานว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด จะต้องทำงานระดับแบบการวัดเชิงเงื่อนไข คือ การทำระดับย้อนกลับไปที่จุดเริ่มต้นอีกครั้งหนึ่ง หรือทำไปบรรจบกับหมุดระดับอื่นที่รู้ค่าระดับแล้วก็ได้ เป็นการทำระดับแบบวงจรปิด สามารถคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของการบรรจบ *(Error of closure)* ได้

การตรวจสอบโดยทำระดับวงจรปิดแบบวนกลับมายังจุดเริ่มนั้น เนื่องจากจุดเริ่มและจุดสุดท้ายเป็นจุดเดียวกันฉะนั้นค่าต่างระดับจุดเริ่มกับจุดสุดท้ายต้องเท่ากับศูนย์ ผลรวมค่าไม้หน้าจึงควรเท่ากับผลรวมค่าไม้หลัง หรือหากทำไปบรรจบกับหมุดระดับอื่นที่รู้ค่าระดับ ผลรวมค่าไม้หน้าลบกับผลรวมค่าไม้หลังจะต้องเท่ากับค่าต่างระดับของจุดทั้งสอง ค่าที่ผิดไปเป็นความคลาดเคลื่อนของการทำงาน ใช้เป็นตัวชี้ว่าผลงานอยู่ในเกณฑ์ความถูกต้องที่ต้องการหรือไม่ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในการทำงานระดับแต่ละชั้นงานแปรผันโดยตรงกับรากที่สองของระยะทางหน่วยกิโลเมตร ดังนี้

ก) งานชั้นหนึ่ง = $4\sqrt{K}$ มิลลิเมตร

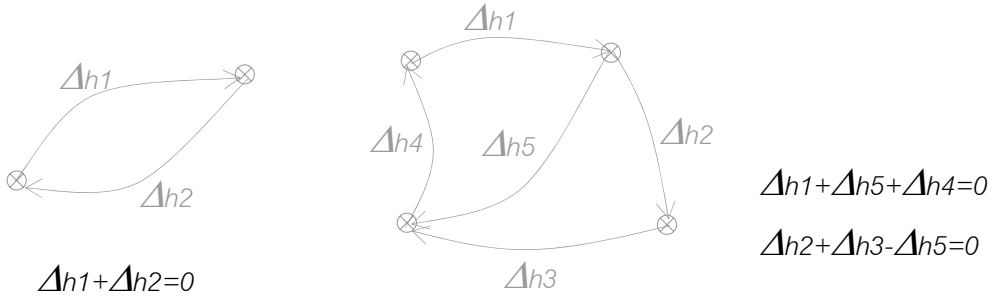
ข) งานชั้นสอง = $8\sqrt{K}$ มิลลิเมตร

ค) งานชั้นสาม = $12\sqrt{K}$ มิลลิเมตร

ง) งานชั้นสี่ = $25\sqrt{K}$ มิลลิเมตร

K เป็น ระยะทางของการทำงานระดับในหน่วย กิโลเมตร

ในงานระดับหมุดควบคุมหรือหมุดอ้างอิง จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลงานที่ได้ โดยหาความคลาดเคลื่อนของการบรรจบ และปรับแก้ให้ค่าระดับถูกต้องตามเงื่อนไขทางเรขาคณิต โดยเงื่อนไขของงานระดับ คือ ผลรวมของค่าต่างระดับในทุกวงจรปิดต้องเท่ากับศูนย์ ($\Sigma\Delta h = 0$)



รูปที่ 6.12 เงื่อนไขทางเรขาคณิตของค่าต่างระดับ

ถ้าความคลาดเคลื่อนของการบรรจบอยู่ในกำหนดของชั้นงานที่ต้องการ ถือว่างานนั้นยอมรับได้ แล้วจึงทำการคำนวณปรับแก้ ซึ่งจะใช้วิธีกระจายความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไปตามหมุดระดับแต่ละหมุดด้วยการปรับแก้ค่าต่างระดับ โดยอาจให้น้ำหนักการปรับแก้แต่ละค่าเท่ากัน หรือให้น้ำหนักการปรับแก้แปรตามระยะทางระหว่างจุด หรืออาจประมาณไปตามจำนวนครั้งที่ทำการตั้งกล้อง (จำนวนหมุด TP) ในแต่ละช่วงของค่าต่างระดับ

ตัวอย่างที่ 6.3 ในการถ่ายระดับจากหมุด BM ที่มีค่าระดับ 22.394 เมตร ไปยังจุด A ที่ห่างออกไปประมาณ 400 เมตร โดยทำระดับจาก BMถึงจุด A แล้วย้อนกลับมาสิ้นสุดที่ BM ได้ข้อมูลการอ่านค่าไม้ระดับตามตารางจงหาระดับจุด A

ถ่ายระดับจาก BM ไปจุด A

จุด	ค่าไม้หลัง	ค่าไม้หน้า	จุด
BM	1.256	1.241	TP1
TP1	1.233	1.542	TP2
TP2	1.361	1.402	TP3
TP3	1.395	1.220	A
	5.245	5.405	

ถ่ายระดับจาก A กลับจุด BM

จุด	ค่าไม้หลัง	ค่าไม้หน้า	จุด
A	1.220	1.371	TP4
TP4	1.415	1.359	TP5
TP5	1.515	1.230	TP6
TP6	1.236	1.248	BM
	5.386	5.208	

สมมุติข้อกำหนดเป็นงานระดับชั้น 4

ความคลาดเคลื่อนที่ยอมได้ = $25\sqrt{0.8}$ = 22.4 มม.

ความคลาดเคลื่อนในการบรรจบ = $\Sigma BS - \Sigma FS$

= (5.245+5.386) - (5.405+5.208)

= 10.631-10.613 = 0.018

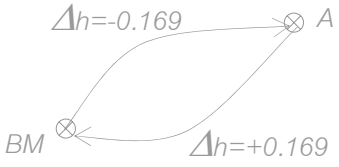
ความคลาดเคลื่อนในการบรรจบ (18.0) < ความคลาดเคลื่อนที่ยอมได้ (22.4) ***ใช้ได้***

ค่าปรับแก้ = $-0.018/_2$ = -0.009

ค่าต่างระดับ BM-A = (5.245-5.405)-0.009 = -0.169

ค่าต่างระดับ A-BM = (5.386-5.208)-0.009 = +0.169

ค่าระดับจุด A = 22.394-0.169 = 22.225 เมตร



ตัวอย่างที่ 6.4 การทำระดับโดยถ่ายระดับจากหมุด BM มายังจุด A ได้ค่าระดับจุด A = 10.144 เมตร ถ้า A เป็นหมุดหนึ่งในวงรอบปิด A B C D E เพื่อหาค่าระดับของหมุดที่เหลือ จึงทำระดับจากจุด A ผ่านจุดต่างๆของ วงรอบแล้วกลับมาบรรจบที่จุด A ได้ข้อมูลการวัดตามตาราง จงหาค่าระดับของหมุดวงรอบ

จุด	ค่าไม้หลัง	ค่าไม้หน้า
A	1.752	---
B	1.660	1.230
TP1	1.776	1.415
C	1.965	1.176
TP2	1.335	1.223
TP3	1.251	1.944
D	1.275	1.762
E	1.183	1.826
A		1.623

จุด	Σ ค่าไม้หลัง	Σ ค่าไม้หน้า	Δh	ค่าปรับแก้	ปรับแก้ Δh	ค่าระดับ
A						*10.144*
B	*1.752*	*1.230*	*0.522*		*0.522*	*10.666*
C	*3.436*	*2.591*	*0.845*	*+.001*	*0.846*	*11.512*
D	*4.551*	*4.929*	*- 0.378*	*+.001*	*- 0.377*	*11.135*
E	*1.275*	*1.826*	*- 0.551*		*- 0.551*	*11.584*
A	*1.183*	*1.623*	*- 0.440*		*- 0.440*	*10.144*
	12.197	*12.199*	*- 0.002*		*0.000*	

ความคลาดเคลื่อนของการบรรจบ = ***12.197***-*12.199* = *- 0.002*

การปรับแก้ต้องกระจายความคลาดเคลื่อนไปยังค่าต่างระดับ (Δh) ระหว่างหมุดวงรอบ แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนน้อยมากจึงพิจารณาปรับแก้เฉพาะช่วงที่มี TP คือ Δh_{BC} และ Δh_{CD} ดังนั้นจะได้ค่าต่างระดับ Δh ที่ปรับแก้แล้ว จึงคำนวณหาค่าระดับของหมุดต่างๆ

ค่าระดับ จุด *B* = *10.144 + 0.522* = *10.666*

ค่าระดับ จุด *C* = *10.666 + 0.846* = *11.512*

ค่าระดับ จุด *D* = *11.512 - 0.377* = *11.135*

ค่าระดับ จุด *E* = *11.135 - 0.551* = *11.584*

ค่าระดับ จุด *A* = *11.584 - 0.440* = *10.144* **** ตรวจสอบถูกต้อง

7. การทำระดับรูปตัด ตามแนว (Profile) และขวางแนว (Cross section)

การทำระดับรูปตัดตามแนวมีจุดประสงค์เพื่อหาระดับของจุดบนพื้นผิวตามแนวทางที่กำหนด แต่การทำระดับรูปตัดขวางแนวจะหาระดับของจุดบนพื้นผิวในแนวที่ตั้งฉากกับแนวทางที่กำหนด เป็นการหาค่าระดับของจุดรายละเอียด วิธีการทำงานจะส่องไม้หลังไปยังจุด*BM* และส่องไม้หน้ารอง *(Intermediate Foresight, IFS)* ไปยังจุดต่างๆที่ต้องการรู้ค่าระดับจนมีระยะไกลพอสมควรจึงส่องไม้หน้าไปจุด BM หรือ TP ถัดไป ย้ายกล้อง ส่องไม้หลังกลับมายังจุด BM หรือ TP ที่ผ่านมา แล้วส่องจุดที่ต้องการวัดต่อไปอีก ทำต่อไปเช่นนี้จนจบงาน เช่น งานก่อสร้างทางอาจจะวัดจุดในแนวศูนย์กลางที่ระยะเต็มทุก 25 เมตร และวัดในแนวตั้งฉากออกไปซ้าย-ขวาทุก 5 เมตร การคำนวณที่เหมาะสมใช้วิธีการหาค่าระดับจากค่าระดับแนวเล็ง เพราะเมื่อหาค่าระดับแนวเล็งเพียงครั้งเดียวสามารถนำไปหาค่าระดับของจุด *IFS* ที่วัดในการตั้งกล้องครั้งนั้นได้ทุกจุด

ตัวอย่างที่ 6.5 การทำระดับเพื่อหาระดับของรูปตัดตามแนวของเส้นทางสายหนึ่ง โดยออกจาก BM_6 ที่มีค่าระดับ 270.273 เข้าบรรจบ BM_7 ที่มีค่าระดับ 273.600

Sta	*BS*	*HI*	*IFS*	*FS*	*Elevation*
BM_6	2.868	273.141			270.273
2+000			2.06		271.08
2+025			1.63		271.51
2+050			1.62		271.52
2+075			1.41		271.73
2+100			1.01		271.13
TP_{15}	1.977	274.136		0.982	272.159
2+125			1.73		272.41
2+150			1.70		272.44
2+175			1.67		272.47
2+200			1.60		272.54
2+225			1.31		272.83
BM_7				0.540	273.596
Σ	4.845			1.522	

HI ช่วง BM_6 *-*TP_{15} = 270.273 + 2.868 = 273.141 ≈ 273.14

ค่าระดับที่ 2+000 = 273.14 - 2.06 = 271.08

HI ช่วง $TP_{15} - BM_7$ = 273.141 - 0.982 + 1.977 = 274.136

ค่าคลาดเคลื่อนระดับที่ BM_7 = 273.596 - 273.600 = -0.004 **OK

ค่าคลาดเคลื่อนระดับที่ BM_7 ถ้าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ก็ใช้ได้ ไม่ต้องมีการปรับแก้

ตัวอย่างที่ 6.6 การทำระดับเพื่อหาระดับของรูปตัดขวางแนวของเส้นทางสายหนึ่ง เริ่มออกงานจากหมุด BM_8 ที่มีค่าระดับ 42.485 เมตร โดยวัดจุดที่แนวศูนย์กลาง และจุดที่วัดจากแนวศูนย์กลางไปทางซ้ายและขวาข้างละ 3 จุด

Sta.	BS	HI	FS	Elev.	Left			C_L	Right		
BM_8	1.483	43.968		42.485							
2+025					1.02 42.95	1.35 42.62	1.42 42.55	1.56 42.41	1.68 42.29	1.72 42.25	1.78 40.19
2+050					1.46 42.51	1.50 42.67	1.58 42.39	1.63 42.34	1.70 42.27	1.80 42.17	1.88 42.04
2+075					1.50 42.47	1.58 42.39	1.66 42.31	1.74 42.23	1.80 42.17	1.87 42.10	1.94 42.03
2+100					1.55 42.42	1.64 42.33	1.71 42.26	1.80 42.17	1.94 42.03	1.99 42.98	2.15 41.82
TP_1	1.241	43.783	1.426								
2+125					1.58 42.20	1.68 42.10	1.65 42.08	1.70 42.08	1.54 42.34	1.78 42.10	1.84 41.94
2+150					1.80 41.98	1.81 41.97	1.87 41.91	1.92 41.96	1.98 41.80	2.10 41.68	2.18 41.60

HI ช่วง BM_8 *-*TP_1 = 42.485 + 1.483 = 43.968 ≈ 43.97

ค่าระดับที่ 2+025 C_L = 43.97 – 1.56 = 42.41

Left **จุดแรก** = 43.97 – 1.42 = 42.55

Right **จุดแรก** = 43.97 – 1.68 = 42.29

HI ช่วงหลัง TP_1 = 43.968 - 1.426+ 1.241 = 43.783

การคำนวณค่าอื่นก็ทำเช่นเดียวกัน

ข้อสังเกต

1) การทำระดับรูปตัดตามแนวและขวางแนว เป็นการหาค่าระดับของจุดรายละเอียด ฉะนั้นจึงไม่มีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อน เพียงแต่มีการทำระดับเข้าบรรจบหมุดควบคุม เพื่อตรวจสอบคุณภาพของงาน ถ้าความคลาดเคลื่อนเมื่อเข้าบรรจบหมุดควบคุมน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ ก็ถือว่างานนั้นใช้ได้
2) การวัดไปยังจุดรายละเอียดจะวัดด้วยความละเอียดเพียง เซนติเมตร ในขณะที่การวัดไปยังหมุด *BM* และ *TP* จะวัดด้วยความละเอียดถึง มิลลิเมตร เพราะ *BM* และ *TP* ถือเป็นจุดควบคุมหรือจุดอ้างอิง
3) ความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดจุดรายละเอียดจุดใด ๆจะไม่มีผลต่อความถูกต้องในการวัดจุดอื่น

8. สาเหตุความคลาดเคลื่อนในงานระดับ

8.1. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเครื่องมือ เนื่องจากกล้องอาจไม่ได้รับการตรวจสอบและปรับแก้ให้อยู่ในสภาพพร้อมที่จะใช้งาน กล้องระดับจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนของแนวเล็ง *(Collimation Error)* คือ แนวเล็งไม่อยู่ในแนวราบจริงในขณะใช้งาน นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนยังอาจเกิดจากการแบ่งระยะบนไม้ระดับ เป็นต้น

8.2. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากบุคคล โดยทั่วไปข้อจำกัดในการมองของผู้วัดปกติในระยะ 100 เมตร ไม่ควรอ่านผิดเกินกว่า 2 มิลลิเมตร แต่ถ้าผู้ปฏิบัติงานให้ความใส่ใจในการทำงานน้อยไป เช่น ขณะอ่านค่าไม้ระดับฟองอากาศหลอดระดับไม่อยู่กึ่งกลาง ถือไม้ระดับไม่อยู่ในแนวดิ่ง ปรับโฟกัสเส้นใยเล็งหรือโฟกัสภาพไม้ระดับไม่ดีพอ ทำให้เกิดภาพเหลื่อม เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนในการอ่านไม้ระดับก็จะเกินกว่าที่ควรจะเป็น

8.3. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากธรรมชาติ มีหลายสาเหตุที่ทำให้ผลงานที่ได้ไม่ดี เช่น บริเวณพื้นดินอ่อนทำให้จุดตั้งกล้องหรือจุดเปลี่ยนระดับมีการทรุดตัว ความโค้งของโลกและการหักเหของแสงในบรรยากาศทำให้ค่าอ่านไม้ระดับต่างจากค่าที่ควรได้ คลื่นความร้อนในเวลาที่มีแดดจัดถ้าจุดเล็งอยู่ใกล้พื้นดิน จะทำให้เห็นแนวเล็งเต้น ลมทำให้กล้องระดับสั่นและยากแก่การปรับให้ฟองอากาศของหลอดระดับอยู่กึ่งกลาง เป็นต้น

ขนาดของความคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆที่กล่าวมา ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างและเป็นการยุ่งยากที่จะคำนวณหาขนาดของความคลาดเคลื่อนหรือพยายามที่จะแสดงให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนชนิดใดมีผลหรือสำคัญกว่ากัน เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำงานน้อยที่สุด ควรที่จะคำนึงถึงข้อปฏิบัติหรือพยามทำตามคำแนะนำดังต่อไปนี้

ก) รักษากล้องให้อยู่ในสภาพดีมีการปรับแก้อย่างถูกต้องสมบูรณ์อยู่ตลอดเวลา

ข) พยายามรักษาให้ระยะไม้หน้าเท่ากับระยะไม้หลังในการตั้งกล้องทุกครั้ง

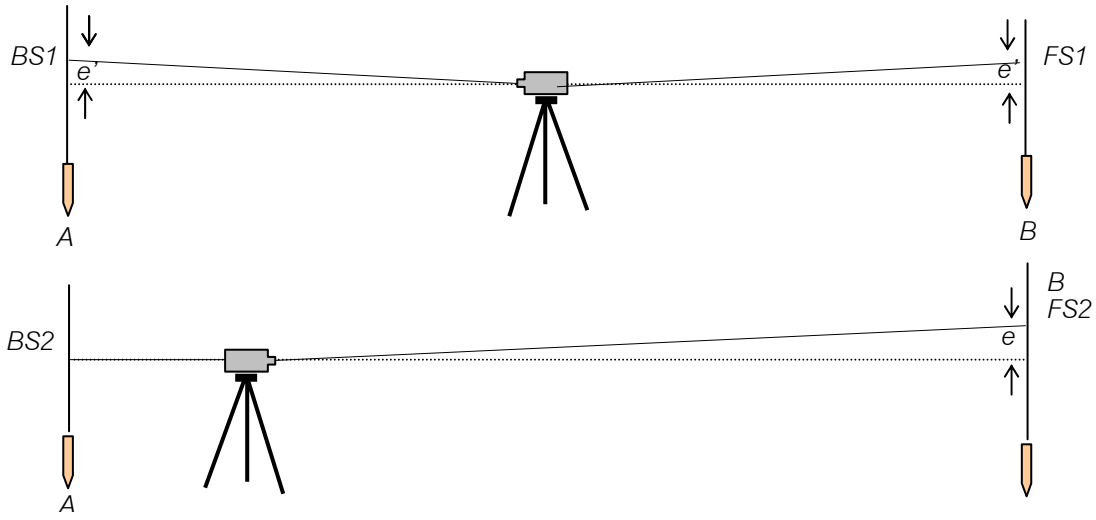
ค) ปรับฟองอากาศหลอดระดับให้อยู่กึ่งกลางในขณะใช้งาน

ง) ถือไม้ระดับให้อยู่ในแนวดิ่ง หากจำเป็นต้องอ่านโดยที่ไม้ระดับไม่นิ่ง ให้เลือกอ่านค่าที่น้อยที่สุด เพราะจะเป็นค่าที่ ไม้ระดับตั้งฉากกับแนวเล็ง

9. ผลของแนวเล็งเอียงและการตรวจสอบกล้องระดับ

กล้องระดับที่มีความคลาดเคลื่อนของแนวเล็ง คือ สภาพที่แนวเล็งของกล้องไม่ขนานกับแนวแกนของหลอดระดับ ดังนั้นแม้การตั้งกล้องจะกระทำอย่างดีจนฟองอากาศของหลอดระดับอยู่กึ่งกลาง แต่แนวเล็งก็ไม่อยู่ในแนวราบ จะมีผลทำให้อ่านไม้ระดับได้มากหรือน้อยไป หากเทียบกับแนวราบ ถ้าแนวเล็งเอียงขึ้น ทำให้ค่าอ่านไม้ระดับมากไป กล้องจะมีค่าคลาดเคลื่อนของแนวเล็งเป็นบวก ตรงข้ามถ้าแนวเล็งเอียงลง จะทำให้ค่าอ่านไม้ระดับน้อยไป หรือกล้องมีค่าคลาดเคลื่อนของแนวเล็งเป็นลบ ขนาดของความคลาดเคลื่อนจะแปรผันตามระยะทางจากกล้องถึงไม้ระดับ

การกำจัดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าต่างระดับที่เป็นผลจากแนวเล็งไม่อยู่แนวราบนี้สามารถทำได้โดยการรังวัดให้ผลรวมระยะไม้หน้าเท่ากับผลรวมระยะไม้หลัง ความคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่ในค่าอ่านไม้หน้าจะเท่ากับที่แฝงในค่าอ่านไม้หลัง ค่าต่างระดับที่ได้จากค่าอ่านไม้หลังลบค่าอ่านไม้หน้าจะเป็นค่าที่ถูกต้องไม่มีความคลาดเคลื่อน เพราะค่าคลาดเคลื่อนหักลบกันพอดี จากที่กล่าวถึงแม้จะสามารถวัดค่าต่างระดับจากกล้องระดับที่มีความคลาดเคลื่อนของแนวเล็งได้ ด้วยการพยายามรักษาให้ระยะไม้หน้าเท่ากับระยะไม้หลังในการตั้งกล้องทุกครั้งก็ตามแต่ในการทำงานไม่ง่ายนัก และเสียเวลามากถ้าต้องเลือกจุดตั้งกล้องหรือจุดเปลี่ยนระดับตามเงื่อนไขดังกล่าวอย่างเคร่งครัด ดังนั้นการการปรับแก้ให้กล้องอยู่ในสภาพดีจะช่วยทำให้การทำงานง่ายขึ้นมาก ก่อนการใช้งานกล้องระดับจึงควรตรวจสอบสภาพแนวเล็งของกล้องและปรับแก้ให้ดีถ้าแนวเล็งเอียง



รูปที่ 6.13 การวัดเพื่อตรวจสอบแนวเล็งของกล้องระดับ

วิธีการตรวจสอบแนวเล็งของกล้องระดับ เรียกว่า *Two Pegs Test* โดยการวัดค่าต่างระดับของหมุดสองหมุดที่ห่างกันประมาณ 50 เมตร สองครั้ง การวัดครั้งแรกให้ตั้งกล้องที่จุดกึ่งกลางระหว่างหมุด ค่าต่างระดับที่ได้จะเป็นค่าที่ถูกต้อง เพราะถ้ามีค่าคลาดเคลื่อนก็จะมีขนาดเท่ากันหักลบกันพอดี การวัดครั้งหลังให้ตั้งกล้องใกล้หมุดที่สมมุติเป็นหมุดหลัง *(BS)* ถ้าค่าต่างระดับต่างจากค่าแรกมาก แสดงว่ากล้องมีความคลาดเคลื่อนของแนวเล็ง โดยความคลาดเคลื่อนจะแฝงอยู่ในค่าอ่านไม้ระดับบนหมุดที่อยู่ไกล *(FS)*

วัดค่าต่างระดับครั้งแรก Δh = (BS1-e')-(FS1-e')

= BS1-FS1

วัดค่าต่างระดับครั้งที่สองΔh = BS2 - (FS2-e)

BS2 - FS2 + e = BS1-FS1

e = (BS1-FS1) - (BS2-FS2)

สรุป ความคลาดเคลื่อนเท่ากับผลต่างของค่าต่างระดับปรากฏ การปรับแก้ให้หมุนสกรูยึดหลอดระดับจนได้ค่าอ่านไม้ระดับของหมุดที่อยู่ไกลถูกต้อง

10. **ผลจากความโค้งของโลกและการหักเหของแสงในบรรยากาศ**

ความโค้งของโลกมีผลต่อการอ่านค่าไม้ระดับที่ระยะไกล เนื่องจากเส้นระดับจะโค้งไปตามส่วนโค้งของผิวโลกในขณะที่แนวเล็งเป็นเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแนวแรงดึงดูดของโลกที่จุดที่ตั้งกล้อง ดังนั้นผลจากการที่ผิวโลกโค้งจึงทำให้ค่าที่อ่านได้จากไม้ระดับที่อยู่ไกลได้มากเกินไป

การหักเหของแสงในบรรยากาศ เกิดจากบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ชั้นที่อยู่ใกล้ผิวโลกจะมีความหนาแน่นมาก ยิ่งสูงขึ้นไปจากผิวโลกก็จะหนาแน่นน้อยลงตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนาแน่นก็จะน้อยลงเช่นกัน ฉะนั้นแนวเล็งของกล้องที่ผ่านไปในชั้นของบรรยากาศที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากันนี้จึงไม่ได้เป็นเส้นตรง แต่เกิดการหักเหขึ้นตามกฎการหักเหของแสง คือ เมื่อแสงผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเห และเนื่องจากความหนาแน่นของบรรยากาศนั้นค่อย ๆเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่อง แนวเล็งจริงจึงเป็นเส้นโค้งผลจากปรากฏการณ์นี้ก็จะทำให้ค่าที่อ่านได้น้อยไป

เนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิและระดับความสูง เป็นสาเหตุที่ทำให้บรรยากาศเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น ฉะนั้นขนาดของการหักเหของแสงจะเปลี่ยนตลอดวัน โดยหักเหมากในตอนเช้าและเย็นและหักเหน้อยหรือมีการเปลี่ยนแปลงช้าในช่วงกลางวัน แต่เนื่องจากงานระดับแนวเล็งอยู่ในแนวราบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของบรรยากาศจากกล้องถึงจุดเล็งจึงมีน้อย โดยผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหักเหของแสงในบรรยากาศมีค่าประมาณ 1/7 ของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความโค้งของโลก ดังนั้นเมื่อรวมผลกระทบต่อการอ่านค่าไม้ระดับเนื่องจากสาเหตุทั้งสองแล้วจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6/7 ของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความโค้งของผิวโลก

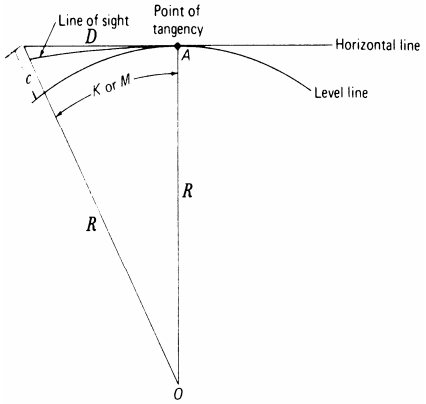
$$D^2 + R^2 = (R+c)^2$$

$$c = D^2/(2R+c)$$

$$\approx D^2/2R$$

$$\text{C\&R} = (6/7) \times (D^2/2R)$$

$$= 0.067 \times 10^{-6} \times D^2$$

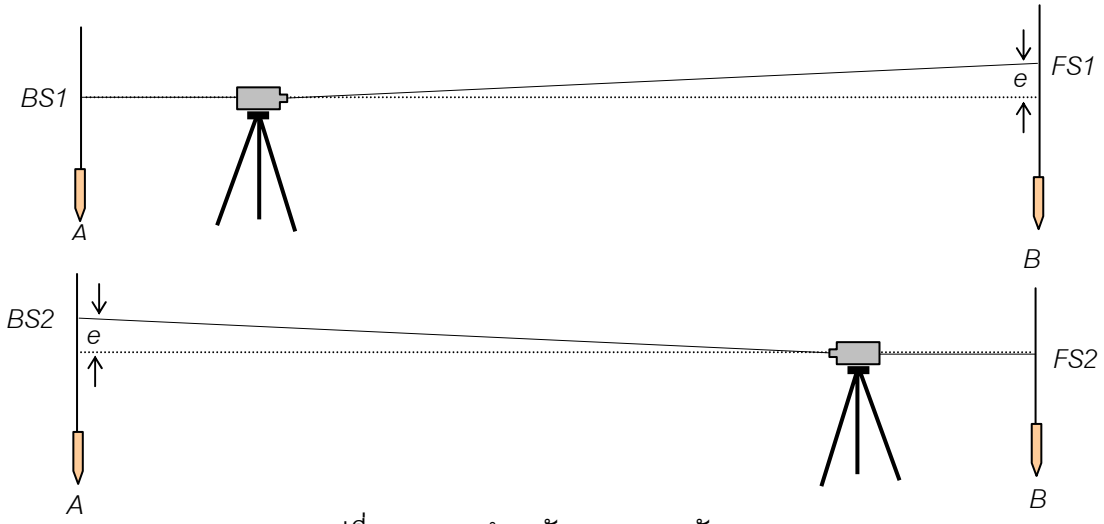


รูปที่ 6.14 ผลจากความโค้งของโลกและการหักเหของแสงในบรรยากาศ

สรุป ความคลาดเคลื่อนจากความโค้งของโลกและการหักเหของแสงเท่ากับ $0.067 \times 10^{-6} \times D^2$ เมตร. การกำจัดความคลาดเคลื่อนนี้ สามารถทำได้โดยพยายามให้ ระยะไม้หน้าเท่ากับระยะไม้หลัง ค่าต่างระดับที่ได้จากค่าอ่านไม้หลังลบค่าอ่านไม้หน้าจะไม่มีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่เพราะค่าคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่มีขนาดเท่ากันหักลบกันพอดี หรือใช้วิธีการทำระดับแบบสอบกลับ

11. **การทำระดับแบบสอบกลับ** (Reciprocal leveling)

การทำงานระดับในบางกรณีจะไม่สามารถตั้งกล้องให้ระยะไม้หน้าเท่ากับระยะไม้หลัง เช่น ทำงานระดับข้ามแม่น้ำหรือข้ามหุบเขา ซึ่งไม่มีจุดสำหรับจะตั้งกล้องระหว่างกลางได้ กรณีนี้จะทำให้ระยะทางไม้หน้าและระยะทางไม้หลังต่างกันมาก ดังนั้นแนวเล็งที่มีระยะการส่องไกลๆจึงมีผลของความโค้งของโลกและการหักเหของแสงในบรรยากาศแฝงอยู่ หรือถ้ามีความคลาดเคลื่อนของแนวเล็งแฝงอยู่ในเครื่องมือด้วยจะยิ่งมีผลต่อค่าอ่านไม้ระดับที่มีระยะไกลมากขึ้น วิธีการทำงานเพื่อจะกำจัดความคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาจะใช้การวัดสองครั้งโดยตั้งกล้องระดับทั้งสองฝั่งของแม่น้ำหรือหุบเขา แนวเล็งของกล้องส่องไปและกลับจะอยู่ในแนวราบที่ไม่ขนานกัน ทำให้ได้ค่าต่างระดับ 2 ค่า ค่าที่ถูกต้องจะเท่ากับค่าเฉลี่ยของค่าต่างระดับปรากฏของทั้งสองครั้ง



รูปที่ 6.15 การทำระดับแบบสอบกลับ

วัดค่าต่างระดับครั้งแรก Δh = BS1-(FS1-e) .....(1)

วัดค่าต่างระดับครั้งที่สอง Δh = (BS2-e)-FS2 .....(2)

(1)+(2) ได้ $2\Delta h$ = (BS1-FS1)+(BS2-FS2)

$$\Delta h = \frac{(BS1-FS1)+(BS2-FS2)}{2}$$

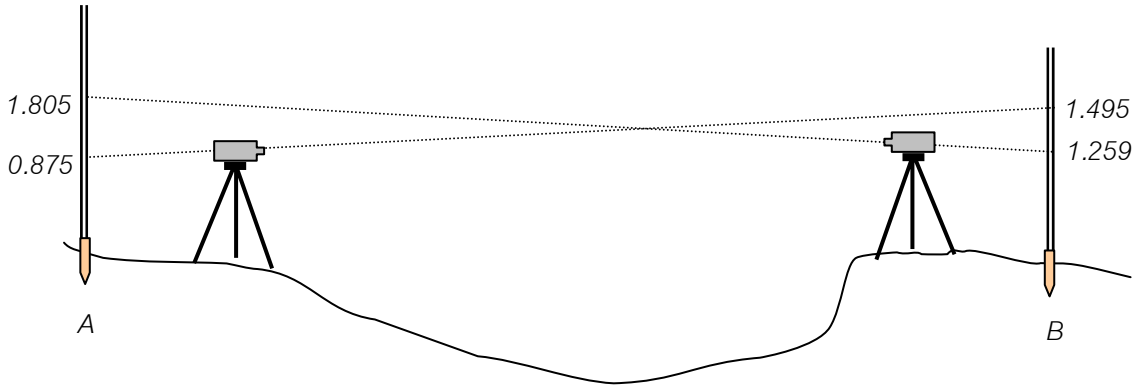
สรุป ค่าต่างระดับที่ถูกต้องเท่ากับค่าเฉลี่ยของค่าต่างระดับปรากฏทั้งสอง

การทำระดับแบบสอบกลับไม่เพียงใช้แก้ปัญหาการทำระดับในกรณีที่ไม่สามารถตั้งกล้องที่จุดกลางระหว่างจุดที่ต้องวัดเท่านั้น ยังสามารถใช้หาค่าความคลาดเคลื่อนของแนวเล็งได้ โดยวัดค่าต่างระดับแบบสอบกลับระหว่างหมุดที่อยู่ห่างกันประมาณ 50 เมตร เช่นเดียวกับการทำ Two Pegs Test แล้วคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนของแนวเล็งจาก

(1)-(2) ได้ 0 = (BS1-FS1)-(BS2-FS2)+2e

$$e = \frac{(BS2-FS2)-(BS1-FS1)}{2}$$

ตัวอย่างที่ 6.7 จุด A มีค่าระดับ 10.000 เมตร ถ้าต้องการหาค่าระดับจุด B ด้วยการทำระดับแบบสอบกลับระหว่างจุด A และ B ได้ค่าอ่านไม้ระดับดังรูป



ค่าต่างระดับปรากฏเมื่อกล้องใกล้ A = *0.875-1.495* = *-0.620*

ค่าต่างระดับปรากฏเมื่อกล้องใกล้ B = *1.805-1.259* = *0.546*

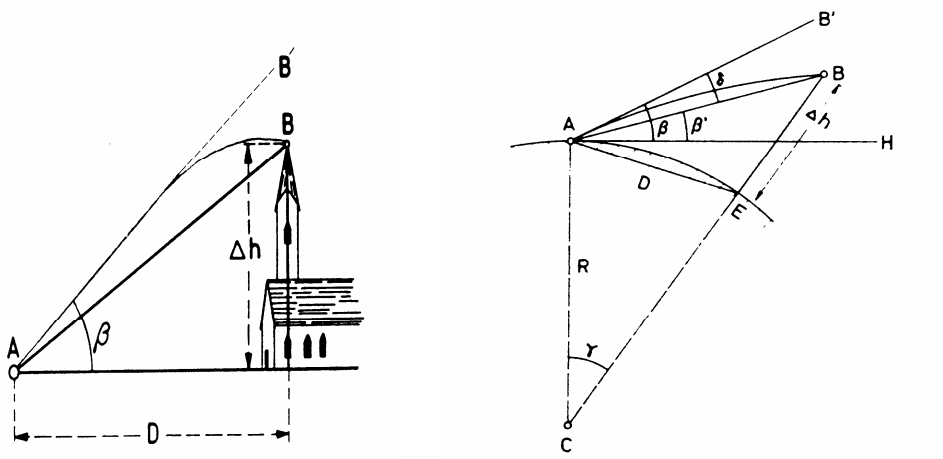
ค่าต่างระดับจริง $= \frac{-0.620+0.546}{2}$ = *-0.037*

ค่าระดับจุด B = *10.000-0.037* = *9.963* *เมตร*

12. งานระดับตรีโกณมิติ

12.1. หลักการหาค่าต่างระดับโดยวิธีตรีโกณมิติ

งานระดับตรีโกณมิติ เป็นการทำงานระดับโดยอาศัยการรังวัดมุมดิ่งและระยะทางราบ แล้วคำนวณหาค่าต่างระดับด้วยสูตรทางตรีโกณมิติ เครื่องมือที่สำคัญ คือ กล้องวัดมุมและเครื่องมือวัดระยะทาง



รูปที่ 6.16 หลักการหาค่าต่างระดับโดยวิธีตรีโกณมิติ

Δh = Dxtan(β)-C&R (C&R ผลจาก**ความโค้งของโลกและการหักเหของแสง** =*BB'*)

ΔhAB = Δh + HI –HO (เมื่อ HI คือ ความสูงของกล้อง และ HO คือ ความสูงของเป้า)

การวัดมุมดิ่งเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสนใจมากกว่าปกติ กล้องธีโอโดไลท์ที่ใช้ ต้องสามารถอ่านค่ามุมดิ่งละเอียดได้ถึง 1 วิลิบดา ในการรังวัดใช้ทั้งกล้องหน้าซ้ายและหน้าขวา จำนวนชุดของการรังวัดต้องการอย่างน้อย 2 ชุด อย่างไรก็ตามงานระดับตรีโกณมิติให้ความละเอียดถูกต้องไม่ดีเท่างานระดับโดยใช้กล้องระดับ อาจกล่าวได้ว่า งานระดับตรีโกณมิติที่ทำอย่างดีที่สุด ยังให้ความถูกต้องไม่ดีเท่างานระดับโดยใช้กล้องระดับที่ทำอย่างธรรมดาๆ แต่งานระดับตรีโกณมิติก็มีบทบาทในงานหาระดับของจุดสูงบนสิ่งก่อสร้างหรือยอดเขาที่ไม่อาจทำงานระดับโดยกล้องระดับได้ การทำงานระดับตรีโกณมิติอาจรังวัดมุมดิ่งที่สถานีเดียว หรือรังวัดมุมดิ่งแบบสอบกลับ ก็ได้

1) งานระดับตรีโกณมิติโดยวัดมุมดิ่งที่สถานีเดียว การรังวัดแบบนี้สามารถทำงานได้รวดเร็วแต่จำเป็นต้องปรับแก้ผลอันเนื่องจากความโค้งของโลกและการหักเหของแสงด้วย ถ้าระยะทางระหว่างสองจุดที่ทำการวัดอยู่ไกลทำให้โอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนมีมาก โดยเฉพาะกรณีที่มุมสูงมีค่ามาก เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความหักเหของแสงเป็นค่าที่แปรผันได้ เหมาะสำหรับการหาความสูงระหว่างจุดที่มีระยะทางไม่ไกลมากและที่เข้าไม่ถึง เช่น หลังคาอาคาร ยอดเสา หรือต้นไม้ เป็นต้น

2) งานระดับตรีโกณมิติที่รังวัดจากทั้ง 2 สถานี *(Reciprocal Observation)* เป็นการวัดโดยตั้งกล้องที่จุดทั้งสองแล้วหาค่าต่างระดับทั้งไปและกลับ เป็นการวัดที่เพิ่มงานสนามมากขึ้น แต่สามารถขจัดผลเนื่องจากความโค้งของโลกและความหักเหของแสงได้เช่นเดียวกับการทำระดับแบบสอบกลับด้วยกล้องระดับ การรังวัดพร้อมกันจะช่วยขจัดความไม่แน่นอนอันเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความหักเหของแสงแต่การรังวัดพร้อมกันทั้งสองสถานีย่อมเพิ่มปัญหาในการทำงานมาก บางครั้งจึงต้องยอมให้ค่าที่ได้ลดความถูกต้องแน่นอนลงบ้าง โดยทำการรังวัดไม่พร้อมกัน อย่างไรก็ตามควรเลือกเวลารังวัดขณะมีความหักเหต่ำสุดเพราะให้ค่าที่ดีกว่า

ตัวอย่างที่ 6.8 ในการหาต่างระค่าระดับระหว่างจุด A และ B ซึ่งอยู่ห่างกัน 3,125.30 เมตร โดยตั้งกล้องที่จุด A สูง 1.65 เมตร และตั้งเป้าที่จุด B สูง 2.50 เมตร วัดมุมเงยได้ $8^{\circ}35'20''$

ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจาก C&R $= 0.067x10^{-6}x3125.30^{2}$

$= 0.65$

ระยะดิ่งระหว่างกล้องกับเป้า $= 3125.30 \times \tan(8^{\circ}35'20'')-0.65$

$= 471.39$

ค่าต่างระดับ AB $= 1.65+471.39-2.50$

$= 470.54$

ตัวอย่าง การหาค่าต่างระดับระหว่างจุด PQ ที่อยู่ห่างกัน 1,500 เมตร ขณะตั้งกล้องที่ P สูง 1.43 เมตร ตั้งเป้าที่ Q สูง 4.45 เมตร วัดได้มุมเงย 1° 08′ 45″ และ ขณะตั้งกล้องที่ Q สูง 1.40 เมตร ตั้งเป้าที่ P สูง 5.45 เมตร วัดได้มุมก้ม -0° 51′ 34″

ขณะตั้งกล้องที่ *P* ตั้งเป้าที่ *Q*

ระยะดิ่งกล้องกับเป้า = 1500 x tan(1°08′45″) - C&R

= 30.00 - C&R

ค่าต่างระดับ PQ = 1.43 + (30.00 - C&R) - 4.45

= 26.98 - C&R ..... (1)

ขณะตั้งกล้องที่ Q ตั้งเป้าที่ P

ระยะดิ่งกล้องกับเป้า = 1500 x tan(-0°51′34″) - C&R

= -22.50 - C&R

ค่าต่างระดับ QP = 1.40 + (-22.50 - C&R) - 5.45

= -26.55 - C&R

ค่าต่างระดับ PQ = 26.55 + C&R ..... (2)

(1)+(2) 2 x Δh PQ = 26.98 + 26.55

= 53.53 ม.

ค่าต่างระดับ PQ = 53.53/2

= 26.77 ม.

ตัวอย่างที่ 6.6 โดยการวัดแบบสอบกลับระหว่างจุด P และ Q ขณะตั้งกล้องที่ P สูง 1.43 เมตร ตั้งเป้าที่ Q สูง 4.45 เมตร วัดได้มุมเงย $1^\circ 08' 45''$ และขณะตั้งกล้องที่ Q สูง 1.40 เมตร ตั้งเป้าที่ P สูง 5.45 เมตร วัดได้มุมก้ม $-0^\circ 51' 34''$ จงประมาณระยะทางระหว่างจุด P กับ Q และหาค่าต่างระดับระหว่างจุดทั้งสอง

ให้ *ค่าต่างระดับ PQ* $= \Delta h$

ระยะทางระหว่างจุด PQ $= D$

<u>*ขณะตั้งกล้องที่ P ตั้งเป้าที่ Q*</u>

ระยะดิ่งระหว่างกล้องกับเป้า $= D\tan(1^\circ 08' 45'') - C\&R$

ค่าต่างระดับ PQ $= D\tan(1^\circ 08' 45'') - C\&R + 1.43 - 4.45$

$\Delta h = 0.020D - 0.067 \times 10^{-6} D^2 - 3.02$ ----------(1)

<u>*ขณะตั้งกล้องที่ Q ตั้งเป้าที่ P*</u>

ระยะดิ่งระหว่างกล้องกับเป้า $= D\tan(-0^\circ 51' 34'') - C\&R$

ค่าต่างระดับ QP $= D\tan(-0^\circ 51' 34'') - C\&R + 1.40 - 5.45$

$= -0.015D - 0.067 \times 10^{-6} D^2 - 4.05$

$-\Delta h = -0.015D - 0.067 \times 10^{-6} D^2 - 4.05$ ---------- (2)

(1)+(2) $0 = 0.005D - 0.134 \times 10^{-6} D^2 - 7.07$

$0.134D^2 - 5000D + 7.07 \times 10^6 = 0$

$$D = \frac{5000 \pm \sqrt{5000^2 - 4 \times 0.134 \times 7.07 \times 10^6}}{2 \times 0.134}$$

$D = 1472$

$\Delta h = 0.020 \times 1472 - 0.067 \times 10^{-6} \times 1472^2 - 3.02$

$= 26.27$

ค่าต่างระดับ PQ $=$ ***26.27*** *เมตร*

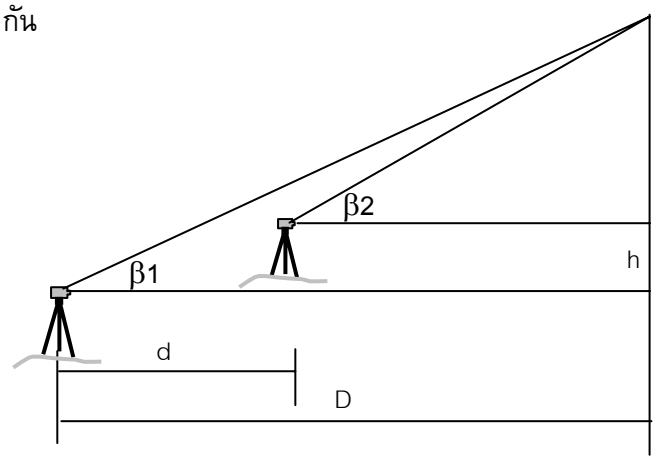
ระยะทาง PQ $=$ ***1472*** *เมตร*

12.2. การหาระยะทางโดยวิธีทางตรีโกณมิติ

งานระดับตรีโกณมิติ โดยทั่วไปต้องทำการวัดมุมดิ่ง และระยะทางระหว่างจุดตั้งกล้องถึงจุดที่ต้องการหาค่าระดับความสูง แต่การวัดระยะทางอาจทำไม่ได้ เพราะมีระยะทางไกลหรือเป็นจุดที่เข้าไม่ถึง งานในลักษณะนี้ต้องใช้วิธีทางตรีโกณมิติหาทั้งค่าระดับและระยะทาง เป็นการแก้ปัญหาของรูปสามเหลี่ยม วิธีการวัดเพื่อหาระยะทางจากจุดตั้งกล้องถึงจุดที่ต้องการหาค่าระดับสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

ก) จุดตั้งกล้องและเป้าอยู่ระนาบดิ่งเดียวกัน

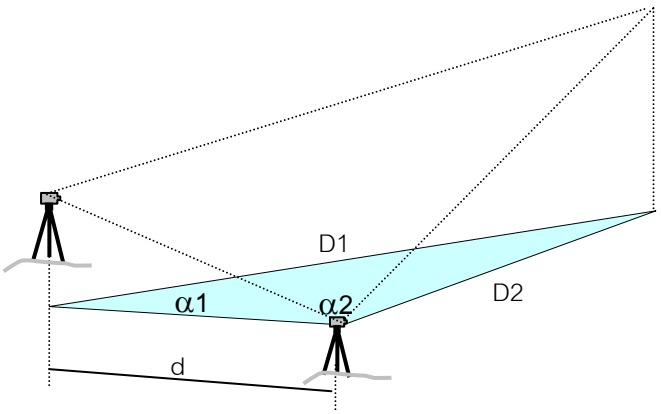
- วัดระยะราบ d
- วัดระยะดิ่ง h
- วัดมุมดิ่ง$\beta 1$
- วัดมุมดิ่ง$\beta 2$



$$\text{ระยะทาง } D = \frac{h - d\tan(\beta 2)}{\tan(\beta 1) - \tan(\beta 2)}$$

ข) จุดตั้งกล้องและเป้าอยู่ต่างระนาบดิ่ง

- วัดระยะราบ d
- วัดมุมราบ $\alpha 1$
- วัดมุมราบ $\alpha 2$



$$\text{ระยะทาง } D1 = \frac{d\sin(\alpha 2)}{\sin(\alpha 1 + \alpha 2)}$$

$$\text{ระยะทาง } D2 = \frac{d\sin(\alpha 1)}{\sin(\alpha 1 + \alpha 2)}$$

7..แผนที่และเส้นชั้นความสูง

การทำแผนที่ คือ การวาดสิ่งที่ต้องการบันทึกลงบนแผ่นกระดาษ อาจเป็นลักษณะภูมิประเทศ สิ่งธรรมชาติ หรือสิ่งที่ถูกสร้างขึ้นมา สิ่งที่ปรากฏบนแผนที่เพื่อแสดงรายละเอียดต่างๆ คือ สัญลักษณ์ แผนที่จึงต่างจากรูปถ่าย รูปถ่ายได้รายละเอียดแบบภาพเหมือนจริง แต่แผนที่แสดงรายละเอียดด้วยสัญลักษณ์ สัดส่วนระหว่างระยะห่างของจุดสองจุดบนแผนที่กับระยะทางราบของสองจุดนั้นบนภูมิประเทศ คือ มาตราส่วนแผนที่ ฉะนั้นอาจกล่าวว่าแผนที่เป็นแบบจำลองโดยการย่อส่วนสภาพภูมิประเทศหรือรายละเอียดต่างๆมาเขียนลงบนแผ่นกระดาษ

ตำแหน่งของสิ่งต่างๆในแผนที่หมายถึงตำแหน่งทางราบและระยะทางดิ่ง การแสดงตำแหน่งทางราบโดยทั่วไปจะใช้ระบบพิกัดฉาก *X-Y* หรือพิกัดฉากเหนือใต้ *N-E* แต่ในแผนที่ขนาดใหญ่จะใช้พิกัดภูมิศาสตร์แลติจูด-ลองกิจูด (*Latitude -Longitude*) แผนที่ที่ไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับความสูงโดยแสดงเพียงตำแหน่งทางราบและทิศทางสัมพันธ์ของจุดและเส้น เรียกว่า แผนที่อาณาเขต (*Planimetric Map*) แผนที่ที่แสดงระยะทางดิ่งหรือลักษณะสูงต่ำของภูมิประเทศด้วย เรียกว่า แผนที่ภูมิประเทศ *(Topographic map)* การแสดงลักษณะสูงต่ำของพื้นที่สามารถแสดงได้หลายวิธี เช่น กำกับด้วยจุดความสูง *(Spot height)* ระบายสีแรเงา และ เส้นชั้นความสูง *(Contour Line)*

1. สัญลักษณ์แผนที่

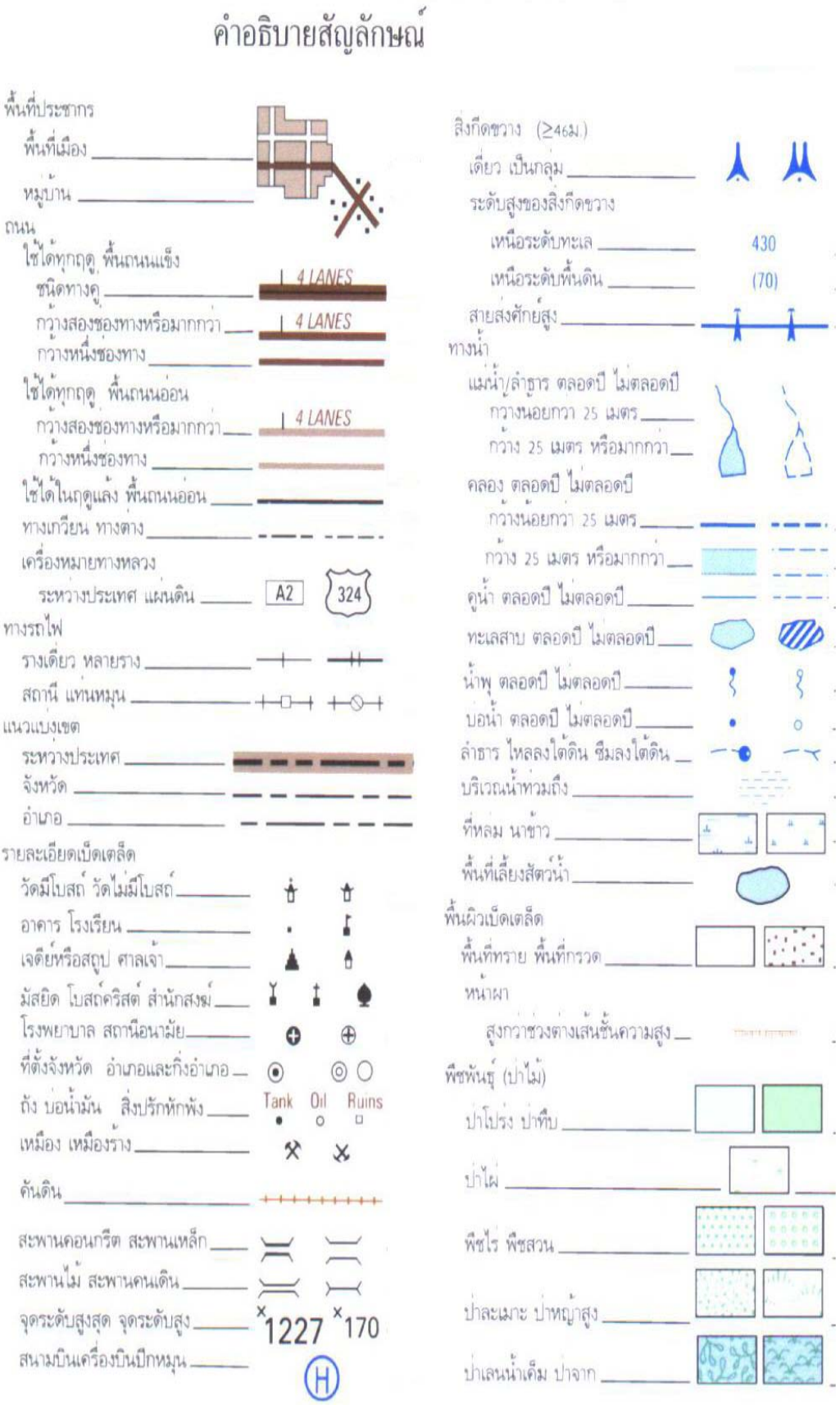
สัญลักษณ์แผนที่ คือ เครื่องหมายชนิดต่างๆที่ผู้ทำแผนที่กำหนดขึ้นในแผนที่ เพื่อใช้แทนรายละเอียดที่ปรากฏอยู่บนพื้นที่ จุดประสงค์การใช้สัญลักษณ์เพื่อให้การตีความในแผนที่ได้รวดเร็วและถูกต้องตรงตามลักษณะตามธรรมชาติหรือรายละเอียดบนภูมิประเทศจริง โดยใช้รูปร่างของสัญลักษณ์ที่เข้าใจง่าย เช่น สัญลักษณ์แสดงต้นไม้มักเขียนรูปด้านข้างของต้นไม้มากกว่าที่จะเขียนรูปด้านบน ซึ่งมองเห็นเข้าใจได้ง่ายกว่า สัญลักษณ์ในแผนที่จะต้องมีคำอธิบายสัญลักษณ์เหล่านั้นบนแผนที่ด้วย

สัญลักษณ์ในแผนที่โดยทั่วไปสามารถแยกออกได้เป็น 5 ประเภทคือ

ก) แหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำ ลำธาร หนอง บึง ที่ลุ่ม
ข) สิ่งก่อสร้าง เช่น ถนนทางรถไฟ อาคาร
ค) พืชหรือต้นไม้ เช่น ป่าสวนไร่
ง) ลักษณะสูงต่ำของภูมิประเทศ
จ) สิ่งที่กำหนดขึ้นเป็นพิเศษต่างๆ

นอกจากการใช้สัญลักษณ์รูป อาจมีการใช้สี ช่วยเสริมให้แผนที่มีความเด่นชัดและอ่านเข้าใจง่ายยิ่งขึ้น สีที่ใช้แสดงร่วมกับสัญลักษณ์รูป ได้แก่ ดำ แดง น้ำตาล เขียว น้ำเงิน โดยใช้กับสัญลักษณ์ต่างๆกัน คือ

ก) สีดำใช้กับเส้นแสดงขอบเขตพื้นที่
ข) สีแดงใช้กับถนนหลัก
ค) สีน้ำตาลใช้กับเส้นแสดงความสูงต่ำของภูมิประเทศ
ง) สีเขียวใช้กับพืช
จ) สีน้ำเงินใช้กับน้ำเป็นต้น

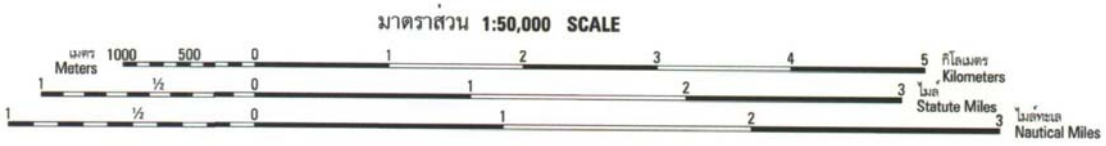


รูปที่ 7.1 สัญลักษณ์แผนที่ (จากแผนที่ ลำดับชุด *L7018* มาตรส่วน 1:50,000)

2. มาตราส่วนแผนที่

มาตราส่วนแผนที่ คือ สัดส่วนระหว่างระยะราบของจุดสองจุดบนแผนที่กับ ระยะราบของสองจุดนั้นบนภูมิประเทศ แผนที่ทุกแผ่นจะต้องมีมาตราส่วน ถ้าไม่มีจะเรียกว่า แผนผัง

2.1. **รูปแบบมาตราส่วน** การแสดงมาตราส่วนแผนที่ รูปแบบที่ใช้ทั่วไปอยู่ 2 แบบ คือ มาตราส่วนแบบตัวเลขอัตราส่วน และ มาตราส่วนแบบรูปภาพ



รูปที่ 7.2 มาตราส่วนแผนที่ (จากแผนที่ ลำดับชุด *L7018* มาตรส่วน 1:50,000)

1) มาตราส่วนแบบตัวเลขอัตราส่วน ตัวเลขอัตราส่วนที่ใช้จะเป็นตัวเลขลงตัวที่ง่ายต่อการเปลี่ยนค่าระยะบนแผนที่เป็นค่าระยะทางจริง เช่น 1:10,000 หรือ 1/10,000 การใช้มาตรส่วนรูปแบบนี้มีข้อด้อย คือ ถ้ากระดาษแผนที่มีการยืดหดเนื่องจากสภาพอากาศชื้นหรือแห้ง การใช้ไม้บรรทัดวัดระยะบนแผนที่แล้วคูณด้วยตัวเลขอัตราส่วนเพื่อหาระยะทางจริงจะคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง หรือกรณีที่แผนที่ที่มีอยู่เป็นแผ่นสำเนาที่ได้จากการถ่ายเอกสาร ถ้าเป็นการถ่ายย่อหรือขยาย จะไม่สามารถหาระยะทางที่ถูกต้องได้ เพราะการถ่ายเอกสารย่อหรือขยาย ตัวเลขมาตราส่วนไม่ได้เปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร

2) มาตราส่วนแบบรูปภาพ จะแสดงด้วยเส้นหรือแถบสีเล็กๆ มาตราส่วนรูปภาพจะช่วยแก้ปัญหาการยืดหดของกระดาษแผนที่ ยกเว้นการยืดหดเฉพาะที่ เพราะเมื่อแผนที่ยืดหด แถบมาตราส่วนก็จะยืดหดด้วย หรือกรณีการเปลี่ยนขนาดแผนที่โดยการถ่ายเอกสารย่อหรือขยายแถบมาตราส่วนก็จะเปลี่ยนขนาดตามด้วย ฉะนั้นการใช้วงเวียนทาบระยะบนแผนที่แล้วมาวัดบนแถบมาตราส่วนในแผนที่นั้น จะได้ระยะทางที่ถูกต้อง ดังนั้นในแผนที่จึงควรมีทั้งมาตราส่วนตัวเลขและรูปภาพ แถบมาตราส่วนกำกับ

2.2. **ขนาดมาตราส่วน** การพิจารณาว่าควรใช้มาตราส่วนของแผนที่ขนาดใดนั้น นอกจากจะต้องคำนึงถึงการใช้ค่ามาตราส่วนตัวเลขลงตัวที่เหมาะสมแล้ว การพิจารณาใช้ค่าใดจะขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

ก*)* จุดประสงค์ในการใช้แผนที่ เช่น แผนที่ภูมิประเทศเพื่อการก่อสร้างจะมีมาตราส่วนใหญ่กว่าแผนที่ภูมิประเทศเพื่อการวางผังแม่บท

ข*)* ขนาดของพื้นที่ดินที่จะทำแผนที่ แผนที่ของพื้นที่ขนาดใหญ่จะมีมาตราส่วนเล็กกว่าแผนที่ของพื้นที่ขนาดเล็ก

ค*)* ขนาดมาตรฐานของกระดาษที่ใช้พิมพ์แผนที่หรือขนาดของเครื่องวาดแผนที่

ง*)* ความถูกต้องของการใช้แผนที่ หากต้องการความถูกต้องสูงจะต้องใช้แผนที่มาตราส่วนขนาดใหญ่

การเลือกขนาดมาตราส่วนจะมีผลต่อความละเอียดในการรังวัด เพราะการเขียนแผนที่เป็นการเขียนจุดหรือเส้นลงบนแผนที่ จึงถูกจำกัดโดยเครื่องเขียนหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเขียนแผนที่ โดยทั่วไปความหนาของเส้นหรือขนาดของจุดที่เล็กที่สุดจะไม่เล็กกว่า 0.2 ม.ม.เมื่อเปลี่ยนเป็นระยะบนภูมิประเทศตามมาตราส่วนที่ใช้ เป็นขนาดของความละเอียดในการรังวัด เช่น แผนที่ 1:500 ความละเอียดในการวัดระยะทางเท่ากับ $0.2x10^{-3}x500=0.1$ การวัดระยะทางบนภูมิประเทศให้วัดละเอียดเพียง 10 เซนติเมตรก็เพียงพอ การวัดระยะบนภูมิประเทศให้ละเอียดมากกว่าขนาดดังกล่าวเป็นการทำงานที่เกินความจำเป็นไม่มีประโยชน์แต่อย่างใด เพราะค่าที่วัดละเอียดเกินนั้นไม่สามารถลงในแผนที่ได้

2.3. **ตัวอย่างขนาดมาตราส่วน** เช่น

ก) แผนที่หรือแผนผังสำหรับงานก่อสร้างหรืองานวิศวกรรม ซึ่งจะประกอบด้วยแผนผังแสดงตำแหน่งสิ่งก่อสร้าง รูปตัดแสดงรายละเอียดต่างๆ มาตราส่วนจะใช้ขนาดต่างๆกันดังนี้
แผนผังใช้มาตราส่วน 1:100 1:250 1:500 1:1,000 1:2,000
รูปตัดขวางแสดงการขุดดินถมดินใช้มาตราส่วน 1:100 1:50 1:25 1:20
รูปตัดตามยาวของแนวทาง ใช้มาตราส่วนทางราบ 1:1,000 และมาตราส่วนทางดิ่ง 1:100 1:50

ข) แผนที่กรรมสิทธ์ที่ดิน มาตราส่วนที่ใช้ในแผนที่ประเภทนี้ต่างจากแผนที่ประเภทอื่น โดยเลือกใช้ให้เหมาะสมกับหน่วยระยะทางหรือหน่วยพื้นที่ เนื่องจากหน่วยที่ใช้ในการบอกขนาดพื้นที่อาจใช้หน่วยเมตริก คือ ตารางเมตร หรือใช้หน่วยของไทย คือ ไร่ งาน ตารางวา ดังนั้นจึงใช้มาตราส่วน1:500 1:1,000 1:2,000 1:4,000 นอกจากนี้การเลือกใช้ขนาดมาตราส่วนจะขึ้นกับราคาของที่ดิน ถ้าที่ดินราคาสูง เช่น ที่ดินในนครหลวงใช้ มาตราส่วน 1:500 ส่วนที่ดินราคาต่ำ เช่น ไร่ นา สวน ใช้มาตราส่วน 1:4,000

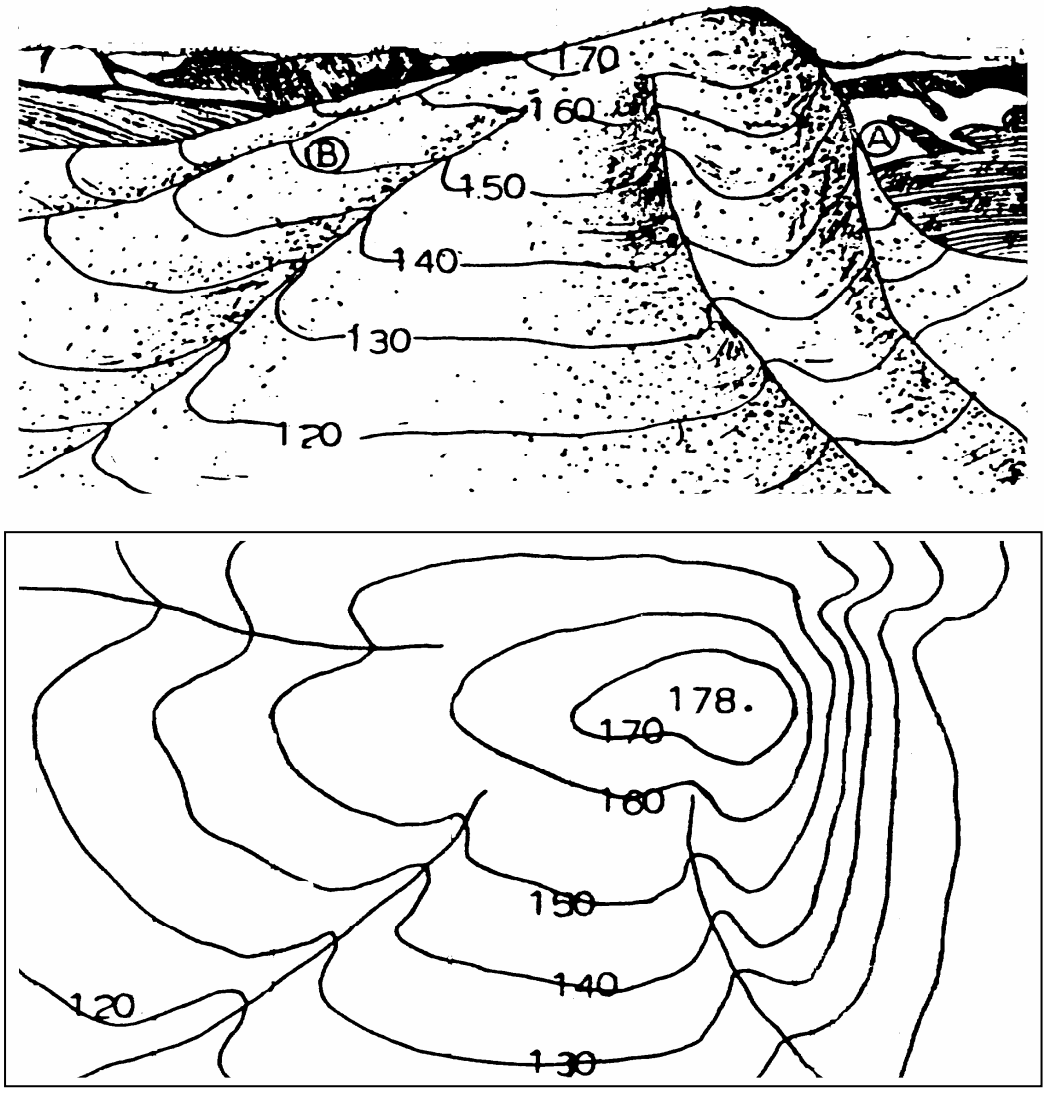
ค) แผนที่ภูมิประเทศของพื้นที่ขนาดเล็กถ้าต้องการรายละเอียดมากต้องใช้มาตราส่วนขนาดใหญ่และตรงข้ามถ้าพื้นที่ขนาดใหญ่ต้องการรายละเอียดไม่มากจะใช้มาตราส่วนปานกลาง หรือมาตราส่วนขนาดเล็ก มาตราส่วนแผนที่ภูมิประเทศมีหลายสัดส่วนตั้งแต่ 1:500 ถึง 1:250,000 แบ่งออกเป็น 3 ขนาดคือ

มาตราส่วนขนาดใหญ่ใช้มาตราส่วน 1:500 1:1,000 1:2,500
มาตราส่วนขนาดกลางใช้มาตราส่วน 1:500 1:10,000 20,000 และ 1:25,000
มาตราส่วนขนาดเล็กใช้มาตราส่วน 1:50,000 1:100,000 1:250,000

แผนที่ที่มีมาตราส่วนเล็กกว่า 1:250,000 ถือว่าเป็นแผนที่ภูมิศาสตร์ไม่เป็นแผนที่ภูมิประทศ

3. เส้นชั้นความสูงและแผนที่เส้นชั้นความสูง

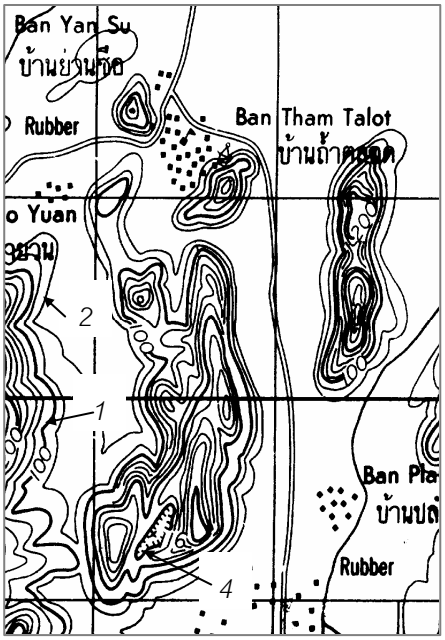
แผนที่ที่แสดงลักษณะของภูมิประเทศด้วยเส้นชั้นความสูงเรียกว่า แผนที่เส้นชั้นความสูง *(Contour map)* เส้นชั้นความสูง คือ เส้นที่ลากผ่านจุดบนพื้นดินที่มีระดับความสูงเท่ากัน หรืออาจคิดว่าเป็นรอยตัดที่เกิดจากระนาบราบหนึ่งตัดกับผิวพื้นดิน บนแผนที่จะเห็นเส้นชั้นความสูงเขียนไว้เป็นเส้นๆในลักษณะเกือบขนานกัน ทุกจุดบนเส้นชั้นความสูงเส้นหนึ่งจะมีระดับความสูงเท่ากันหมด เส้นชั้นความสูงอาจมีตัวเลขความสูงกำกับทุกเส้น หรือกำกับเว้นเป็นช่วงๆสม่ำเสมอ ค่าต่างระดับของสองจุดใดๆบนเส้นชั้นความสูงสองเส้นที่อยู่ถัดกัน เรียกว่า ช่วงเส้นชั้นความสูง *(Contour Interval)* ช่วงเส้นชั้นความสูงจะมีค่าคงที่หรือค่าเดียวบนแผนที่แผ่นหนึ่ง

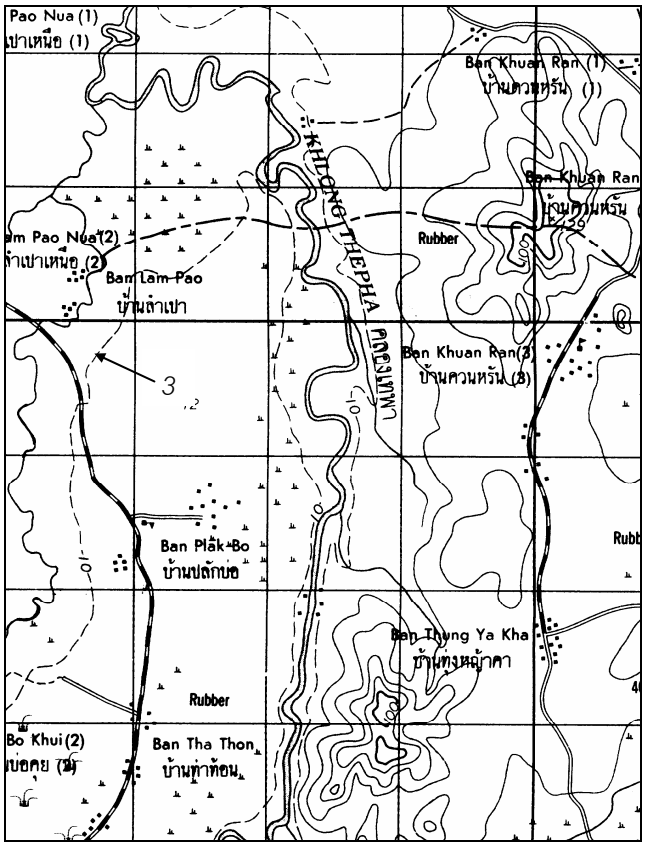


รูปที่ 7.3 เส้นชั้นความสูงและแผนที่เส้นชั้นความสูง

ชนิดของเส้นชั้นความสูง พิจารณาจากลักษณะที่แตกต่างกัน แบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด คือ

1) เส้นชั้นความสูงหลัก *(Index Contour)* เป็นเส้นชั้นความสูงที่แสดงด้วยเส้นหนา มีตัวเลขความสูงกำกับโดยบอกความสูงเป็นหน่วยถ้วนๆ เช่น 100, 200, 300 เมตร
2) เส้นชั้นความสูงย่อย *(IntermediateContour)* เป็นเส้นชั้นความสูงที่อยู่ระหว่างเส้นชั้นความสูงหลัก แสดงด้วยเส้นที่บางกว่า บอกความสูงละเอียดกว่า เช่น 110,120,130 เมตร
3) เส้นชั้นความสูงเสริม *(Supplemental Contour)* เป็นเส้นชั้นความสูงที่เขียนเสริมขึ้นเป็นพิเศษในบริเวณที่พื้นดินมีความลาดชันน้อยเพราะเส้นชั้นความสูงอยู่ห่างกันเกินควรเส้นชั้นความสูงเสริมเขียนเป็นเส้นประเขียนอยู่ระหว่างกลางเส้นชั้นความสูงปกติช่วยให้การใช้แผนที่สะดวกขึ้น
4) เส้นชั้นความสูงลด *(Depression Contour)* เป็นเส้นชั้นความสูงที่มีขีดสั้นๆในแนวตั้งฉากกับเส้นชั้นความสูงและชี้ไปทางทิศที่ลาดลงใช้แสดงลักษณะภูมิเทศที่ลาดลงเป็นหลุมบึงเหว
5) เส้นชั้นความสูงสมมุติ *(Approximate Contour)* เป็นเส้นชั้นความสูงที่เขียนสมมุติขึ้นใช้ในกรณีที่ไม่ทราบความสูงของภูมิประเทศ





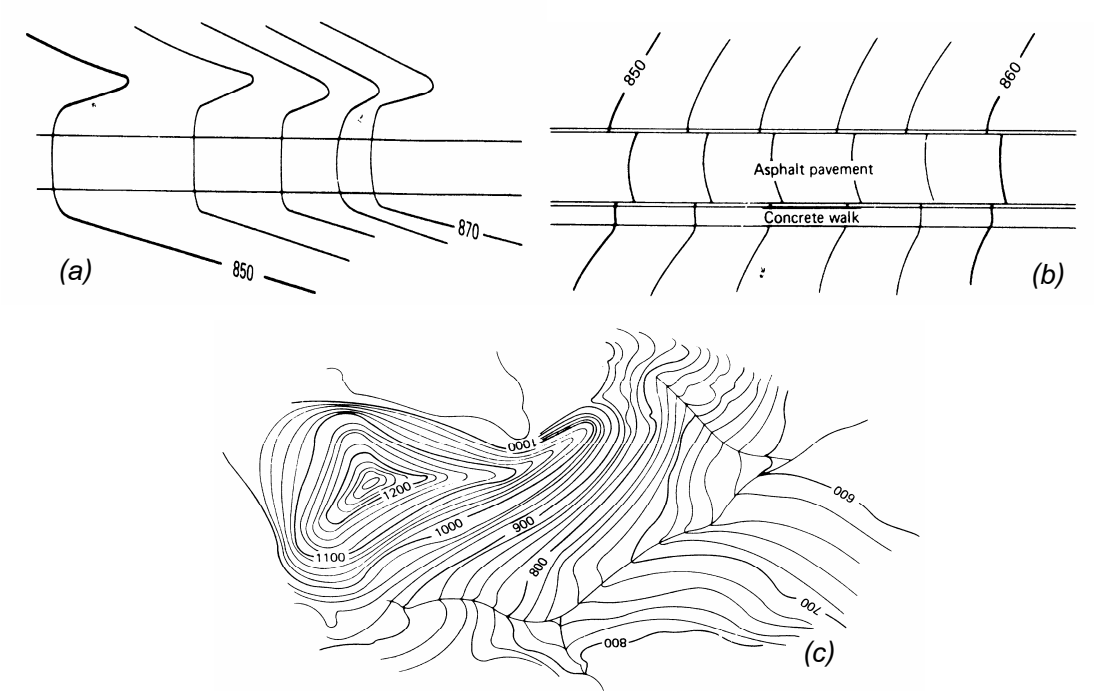
รูปที่ 7.4 เส้นชั้นความสูงชนิดต่างๆ

1. *Index Contour*
2. *Intermediate Contour*
3. *Supplemental Contour*
4. *Depression Contour*

4. คุณสมบัติของเส้นชั้นความสูง

แผนที่เส้นชั้นความสูงแสดงลักษณะของภูมิประเทศ ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นชั้นความสูง จะช่วยให้การแปลความหมายของแผนที่ได้รวดเร็วและถูกต้อง คุณสมบัติของเส้นชั้นความสูงที่ควรรู้ ได้แก่

1) ทุกจุดบนเส้นชั้นความสูงเดียวกันจะมีระดับเท่ากัน และเส้นชั้นความสูงที่มีค่าระดับต่างกัน จะไม่มารวมเป็นเส้นเดียวกัน ยกเว้นพื้นที่ที่เป็นหน้าผาดิ่งหรือชะโงกผายื่นออกมา
2) เส้นชั้นความสูงที่มีค่าระดับเท่ากัน จะไม่มาบรรจบเป็นเส้นเดียว หรือเส้นชั้นความสูงเส้นเดียวจะไม่แยกออกเป็นสองเส้นที่มีระดับเท่ากัน
3) เส้นชั้นความสูงจะไม่ไปหยุดที่ใด แต่จะวนกลับมาที่เดิม หรือบรรจบขอบเขตของแผนที่ ฉะนั้นถ้าแผนที่ของพื้นที่บริเวณกว้างจะเห็นเส้นชั้นความสูงบรรจบตัวเองเสมอ
4) พื้นที่บริเวณที่มีเส้นชั้นความสูงอยู่ชิดกันมาก แสดงว่าเป็นพื้นที่ลาดชันมาก และตรงข้ามถ้าพื้นที่บริเวณที่มีเส้นชั้นความสูงอยู่ห่างกันแสดงว่าเป็นพื้นที่ค่อนข้างราบ
5) พื้นที่ระหว่างเส้นชั้นความสูง 2 เส้น ทิศทางของความลาดเอียงมากที่สุด คือทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นชั้นความสูง เพราะมีระยะทางราบสั้นที่สุดระหว่าง 2 จุดที่มีค่าต่างระดับเท่ากัน
6) พื้นที่ปริเวณใดมีเส้นชั้นความสูงห่างกันสม่ำเสมอ แสดงว่าพื้นที่นั้นมีความลาดเอียงสม่ำเสมอ และถ้าเป็นเส้นตรงขนานกันมีระยะห่างเท่าๆกันพื้นที่บริเวณนั้นจะเป็นพื้นระนาบเอียง เช่น ด้านข้างถนนด้านข้างเขื่อน แต่ถ้าผ่านบริเวณที่ขรุขระไม่เป็นรูปทรงจะเป็นเส้นคดงอ
7) เส้นชั้นความสูงเส้นเดียวกัน จะปรากฏอยู่ทั้งสองด้านของสันเขา หรือร่องน้ำไหล โดยเส้นชั้นความสูงที่ตัดผ่านสันเขาจะเป็นรูป U และทำมุมฉากกับแนวสันปันน้ำ ขณะที่เส้นชั้นความสูงตัดที่ผ่านแนวหุบเขาหรือทางน้ำไหลจะเป็นรูป V และทำมุมฉากกับแนวทางน้ำเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7.5 เส้นชั้นความสูงของ *(a)* ถนนไม่มีขอบ *(b)* ถนนมีขอบและทางเท้า *(c)* สันเขาและทางน้ำไหล

5. การกำหนดช่วงเส้นชั้นความสูง

การเลือกช่วงเส้นชั้นความสูงที่เหมาะสมในการทำแผนที่เป็นสิ่งสำคัญ การใช้ช่วงเส้นชั้นความสูงที่ไม่เหมาะสมจะทำให้แผนที่นั้นใช้ประโยชน์ไม่ได้เต็มที่ เช่น ถ้าช่วงเส้นชั้นความสูงถี่ไป เส้นชั้นความสูงจะบังรายละเอียดอื่นหมดทำให้แผนที่ไม่ชัดเจน หรือถ้าห่างเกินไปก็อาจไม่เหมาะกับลักษณะของงาน

ข้อพิจารณาในการเลือกช่วงเส้นชั้นความสูงในการทำแผนที่มีดังนี้

1) เวลาและค่าใช้จ่ายของงานสนามและงานสำนักงาน เวลาและค่าใช้จ่ายแม้ไม่ใช่เหตุผลทางเทคนิค แต่ก็อาจกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกช่วงเส้นชั้นความสูงได้ เพราะการเลือกใช้ช่วงเส้นชั้นความสูงยิ่งเล็ก การรังวัดในสนามการคำนวณและการเขียนในสำนักงานจะมากขึ้นไปด้วย หมายถึงเวลาและค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นตาม แต่ถ้าเลือกช่วงเส้นชั้นความสูงที่ห่างเกินไป ก็จะเป็นการละเลยเหตุผลทางเทคนิคทำให้ได้แผนที่ที่ไม่เหมาะต่อการใช้งาน

2) วัตถุประสงค์และความถูกต้องที่ต้องการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการแผนที่เพื่อนำมาคิดปริมาณของงานดินแผนที่ต้องเป็นแผนที่มาตราส่วนใหญ่ งานรังวัดในสนามเพื่อเอาข้อมูลมาเขียนแผนที่ต้องมีความถูกต้องสูงช่วงเส้นชั้นความสูงอาจใช้ 0.25,0.50 เมตร. แต่ถ้าต้องการแผนที่เพื่อใช้ในงานหาปริมาตรของน้ำในการสร้างอ่างเก็บน้ำ จะทำแผนที่มาตราส่วนเล็ก ช่วงเส้นชั้นความสูงใช้ห่างได้ เช่น 1, 2 เมตร ความถูกต้องของงานรังวัดจะน้อยกว่างานแรก

ข้อแนะนำสำหรับช่วงเส้นความสูงที่จะใช้ในแผนที่ที่จะนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น

ก*)* แผนผังงานก่อสร้างอาคารควรใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 0.25 ถึง 0.5 เมตร

ข*)* งานสร้างอ่างเก็บน้ำ งานจัดสวน และงานวางผังของเมือง ใช้ 0.5 ถึง 2.0 เมตร

ค*)* งานทางงานถนนงานทางรถไฟใช้ 1.0 ถึง 5.0 เมตร

3) ลักษณะภูมิประเทศ ช่วงเส้นชั้นความสูงจะต้องมีขนาดพอที่จะแสดงความสูงต่ำของผิวพื้นดิน ดังนั้นบริเวณที่มีพื้นที่ราบ แผนที่จะใช้ขนาดช่วงเส้นชั้นความสูงถี่กว่าบริเวณพื้นที่ภูเขา หรือถ้าพื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงระดับมากในบริเวณเล็กๆ ก็ควรใช้ช่วงเส้นชั้นความสูงถี่ เช่น แผนที่มาตรส่วน 1:2000 พื้นที่แถบภูเขามีความลาดชั้นสูงและต่างระดับมาก ใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 1.0 เมตร แต่ถ้าความลาดชันไม่เกิน 45° ใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 0.5 เมตร และถ้าพื้นที่เป็นเนินเล็กๆ หรือค่อนข้างราบจะใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 0.25 เมตร เป็นต้น

4) มาตราส่วนของแผนที่ ขนาดช่วงเส้นชั้นความสูงที่ใช้จะแปรผกผันกับมาตราส่วนของแผนที่ ถ้าแผนที่มาตราส่วนใหญ่ ขนาดช่วงเส้นชั้นความสูงจะเล็กกว่าแผนที่มาตราส่วนเล็ก เช่น พื้นที่แถบภูเขามีความลาดชั้นสูงและต่างระดับมากแผนที่มาตรส่วน 1:1,000 ใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 1.0 เมตร แผนที่มาตรส่วน1:2,000 ใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 2.0 เมตรและแผนที่มาตรส่วน 1:5,000 ใช้ช่วงเส้นชั้นความสูง 5.0 เมตร

ตารางที่ 7.1 ช่วงเส้นชั้นความสูงที่ใช้แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วนต่าง ๆ

มาตราส่วนแผนที่	พื้นที่ภูเขาและลาดชันมาก	พื้นที่ภูเขาและลาดชันปานกลาง	พื้นที่เนินและค่อนข้างราบ
1:1,000	*1*	*0.50*	*0.25*
1:2,000	*2*	*1*	*0.50*
1:5,000	*5*	*2*	*1*
1:10,000	*10*	*5*	*2*
1:20,000	*20*	*10*	*2.5*
1:25,000	*20*	*10*	*2.5*
1:50,000	*20/30*	*10/20*	*5*
1:100,000	*50*	*25*	*5/10*

จากตารางที่ 7.1 อาจสรุปสำหรับการรังวัดเพื่อทำแผนที่ภูมิประเทศ ในงานทางวิศวกรรมโดยทั่วไปจะมีมาตราส่วนใหญ่กว่า 1:5,000 ช่วงเส้นชั้นความสูงเท่ากับตัวเลขส่วนของมาตราส่วนแผนที่หารด้วยตัวเลขที่แปรผันตามลักษณะภูมิประเทศ คือ

ก) พื้นที่แถบภูเขามีความลาดชันสูงและต่างระดับมาก หารด้วย 1,000

ข) พื้นที่ความลาดชั้นไม่เกิน 45° หารด้วย 2,000

ค) พื้นที่เป็นเนินเล็กๆหรือค่อนข้างราบ หารด้วย 4,000

6. การรังวัดเพื่อทำแผนที่เส้นชั้นความสูง

การรังวัดเพื่อทำแผนที่กล่าวโดยหลักการคือ การหาพิกัดตำแหน่งทั้งพิกัดราบและพิกัดดิ่งของจุดต่าง ๆที่กระจายอยู่บนพื้นที่ แล้วลากเส้นชั้นความสูงผ่านไปบนจุดที่มีความสูงเท่ากัน และมีค่าระดับเท่ากับค่าของเส้นชั้นความสูงการจำแนกวิธีการรังวัด อาจพิจารณาจำแนกจากการกำหนดจุดที่ทำการวัด ในทางปฏิบัติสามารถแบ่งวิธีการรังวัดออกเป็น 4 วิธี ได้แก่

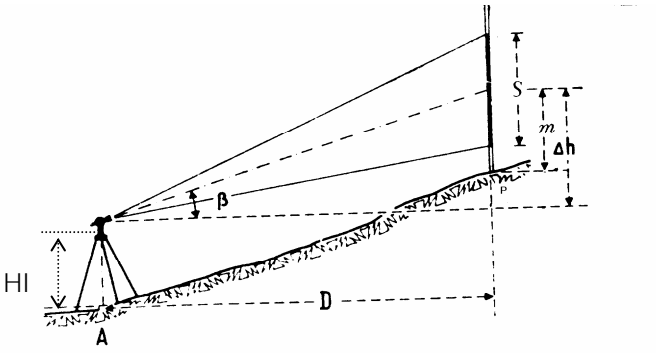
1) รังวัดจุดที่มีระดับความสูงเท่ากับเส้นชั้นความสูงที่กำหนด เรียกว่า วิธี Trace Contours เป็นการรังวัดด้วยโต๊ะแผนที่ โดยเขียนเส้นชั้นความสูงลงในแผนที่โดยตรง ตามตำแหน่งของจุดที่มีระดับเดียวกันหลาย ๆจุดที่หาไว้แล้วบนพื้นดิน จุดเหล่านี้คือจุดที่อยู่บนเส้นชั้นความสูงเส้นหนึ่ง ๆนั่นเอง การรังวัดด้วยโต๊ะแผนที่ปัจจุบันพบน้อยมาก เป็นวิธีที่ทำได้ช้าไม่เหมาะกับการทำในพื้นที่บริเวณกว้าง แต่เหมาะสำหรับการซ่อมแซมหรือแก้ไขแผนที่ที่มีอยู่

2) วัดค่าระดับของจุดที่รู้ตำแหน่งเรียกว่าวิธี CheckerBoard วิธีนี้จะกำหนดจุดบนพื้นที่เป็นรูปทางเรขาคณิตเช่น รูปสี่เหลี่ยมจตุรัสรูป สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปสามเหลี่ยม แต่ส่วนมากจะใช้รูปตารางสี่เหลี่ยม ด้านของรูปเหลี่ยมอาจมีความยาวตั้งแต่ 5-25 เมตร ขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศและมาตราส่วนของแผนที่โดยทำเครื่องหมายไว้บนพื้นดินตรงมุมของรูปเหลี่ยม แล้วหาระดับของจุดเหล่านี้ด้วยวิธีทำระดับด้วยกล้องระดับ

3) รังวัดโดยทำระดับรูปตัดขวางแนว *(Cross Section)* และรูปตัดตามแนว *(Profile)* แนวที่ว่าอาจเป็นเส้นวงรอบหรือเส้นตรงที่ลากผ่านกลางพื้นที่ การทำระดับรูปตัดขวางแนวจะหาระดับของจุดบนเส้นที่ตั้งฉากกับแนวเส้น ส่วนการทำระดับรูปตัดตามแนวจะหาระดับของจุดบนแนวเส้น จุดบนแนวเส้นหรือตั้งฉากโดยทั่วไปจะกำหนดให้ห่างเท่าๆกัน วิธีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องทำระดับรูปตัดขวางแนวและรูปตัดตามแนวอยู่แล้ว เช่น งานก่อสร้างทาง

4) รังวัดจุดบนพื้นที่โดยอ้างอิงหรือเทียบกับจุดควบคุม เรียกว่า Controlling Points วิธีนี้ จะตั้งกล้องที่จุดอ้างอิงหรือจุดควบคุมที่รู้ค่าพิกัดและค่าระดับ และส่องหาตำแหน่งและระดับของจุดต่างๆตามแนวรัศมีออกไปจากจุดที่ตั้งกล้อง จุดตั้งกล้องมักเป็นหมุดวงรอบที่รู้ค่าพิกัดทั้งทางราบและทางดิ่ง จุดที่วัดจะกระจายไปบนพื้นที่และรังวัดจุดที่สำคัญ เช่น จุดยอดของเนินจุดตามแนวสันเขา จุดตามแนวร่องน้ำ จุดต่ำสุดของแอ่ง จุดเหล่านี้จะช่วยให้การเขียนเส้นชั้นความสูงเป็นไปโดยถูกต้อง ถ้าการวัดใช้กล้อง *Total Station* การทำงานจะรวดเร็วมาก เพราะกล้องในปัจจุบันจะสามารถให้ผลลัพธ์เป็นค่าพิกัดและระดับของจุดที่ส่องได้ทันที แล้วเก็บผลไว้ในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอิเลกทรอนิกส์ อย่างไรก็ตามการใช้กล้องทีโอโดไลท์ในการทำการรังวัดโดยใช้หลักการของ Tacheometry หรือวิธี Stadia ก็ยังมีความเหมาะสมในการทำงาน

การวัดจะเริ่มจาก ตั้งที่กล้องจุดอ้างอิงหรือหมุดควบคุม *(A)* วัดความสูงของกล้อง *(HI)* ส่องไปยังแนวที่รู้ *Azimuth (Az_0)* อ่านค่ามุมราบ *(Az_0Rdg)* แล้วจึงส่องไปจุดต่างๆ *(P)* อ่านค่ามุมราบ *(Az Reading)* มุมดิ่ง *(V Reading)* ค่าสเตเดีย *(u,m,l)* ซึ่งสามารถคำนวณค่าพิกัดและระดับของจุดที่ส่องได้ ดังนี้



Vertical Angle (β) = *90 – (V Reading – Index error)*

ระยะทางราบ *(Distance ; D)* = *$100 \times (u - l) \times COS^2\beta$*

ค่าความต่างระดับ *(Δh)* = *$100 \times (u - l) \times COS\beta\ SIN\beta$*

Az_{AP} = $Az_0 + Az\ Reading_{AP} - Az_0Rdg$

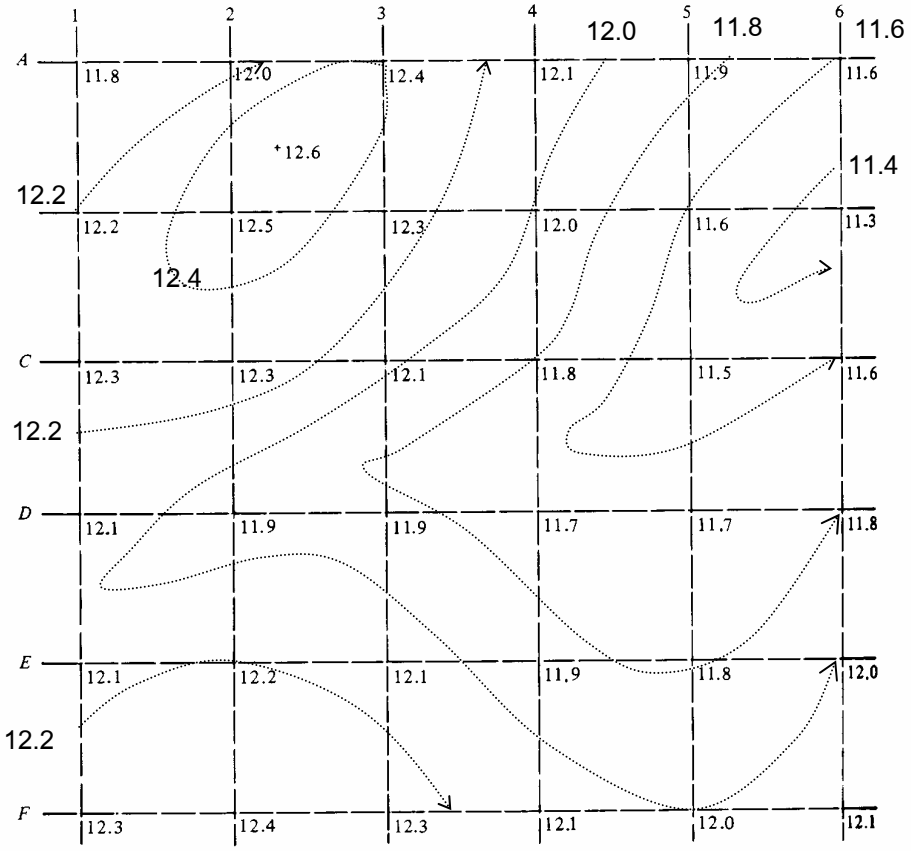
N_P = $N_A + D\ COS(\ Azimuth\ AP\ )$

E_P = $E_A + D\ SIN(\ Azimuth\ AP\ )$

H_P = $H_A + \Delta h + HI - m$

7. การเขียนเส้นชั้นความสูง

แผนที่ภูมิประเทศจะแสดงความสูงต่ำของพื้นดินด้วยเส้นชั้นความสูง และแสดงตำแหน่งทางราบของรายละเอียดบนภูมิประเทศ ได้แก่ สิ่งที่เกิดตามธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำธาร ทะเลสาบ บริเวณป่า ร่องน้ำ สันเขา และสิ่งที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น ไร่ นา สวน อาคารบ้านเรือน ถนน คลองส่งน้ำ ทางรถไฟ สายไฟฟ้าแรงสูง เสาโทรเลข เสาไฟฟ้า ท่อระบายน้ำ เป็นต้น การลงรายละเอียดที่อยู่บนภูมิประเทศโดยวาดสัญลักษณ์ของรายละเอียดนั้นบนแผนที่ตามตำแหน่งราบ (N,E) ที่คำนวณได้ ส่วนการเขียนเส้นชั้นความสูงจะต้องลงที่หมายของจุดบนพื้นดินที่รู้ค่าระดับ เพื่อใช้เป็นแนวในการเขียนเส้นชั้นความสูง



รูปที่ 7.6 การลากเส้นชั้นความสูง

การลากเส้นชั้นความสูงเริ่มจากขอบแผนที่ผ่านไปยังจุดที่มีค่าระดับเท่ากับค่าเส้นชั้นความสูง จนบรรจบขอบของแผนที่ หรือถ้าเริ่มจากจุดภายในแผนที่ก็จะกลับมาบรรจบที่จุดเริ่ม ถ้าจุดที่วัดมีค่าระดับไม่เท่ากับค่าเส้นชั้นความสูง ต้องเขียนโดยวิธีอ้อม เพราะไม่ใช่จุดที่เส้นชั้นความสูงผ่าน แต่จะหาตำแหน่งที่เส้นชั้นความสูงผ่านโดยการประมาณภายใน *(Interpolation)* จากจุดเหล่านี้ การหาจุดที่มีความสูงเท่ากับเส้นชั้นความสูง เป็นวิธีการแบ่งระยะทางบนแผนที่ระหว่างเส้นชั้นความสูงให้ได้สัดส่วนกับค่าต่างระดับระหว่างจุดที่ลงหมายไว้ในแผนที่ ภายใต้ข้อสมมุติฐานว่าระหว่างจุดสองจุดที่วัดระดับผิวดินจะลาดเอียงสม่ำเสมอและเนื่องจากจุดที่วัดมีค่าระดับจะไม่เท่ากับค่าระดับของเส้นชั้นความสูง การหาจุดที่มีความสูงเท่ากับเส้นชั้นความสูงอาจทำได้ด้วยวิธีต่อไปนี้

1) วิธีกะประมาณ *(Estimation)* เป็นวิธีที่ใช้กับการเขียนแผนที่มาตราส่วนเล็กและกลาง โดยผู้เขียนใช้การประมาณด้วยตาหรือการคิดเลขในใจช่วยในการกะประมาณระยะทาง

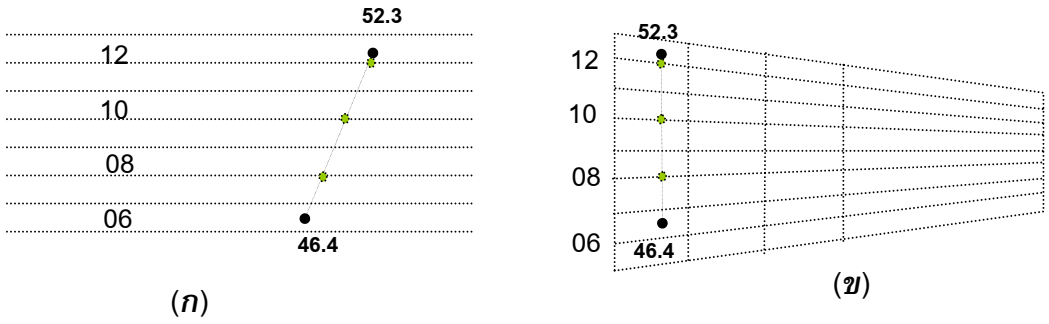
2) วิธีการคำนวณ *(Computation)* เป็นวิธีที่ใช้เมื่อต้องการแผนที่ความถูกต้องสูง การคำนวณอาจใช้เครื่องคิดเลขช่วยเช่นระดับของจุด C=46.4 และจุด D=52.3 เมตร ต้องการเส้นชั้นความสูง 2.0 เมตร ดังนั้นระหว่างสองจุดนี้จะมีเส้นชั้นความสูง 48, 50 และ 52 ผ่าน ถ้าระยะบนแผนที่ระหว่างจุด C กับ D วัดได้ 4ซม.จะคำนวณหาจุดที่เส้นชั้นความสูงผ่านได้ดังนี้

ระยะทางจากจุด C ถึงเส้นชั้นความสูง 48 = $\frac{4x(48.0-46.4)}{(52.3-46.4)}$ =1.1 ซม.

ระยะทางจากจุด C ถึงเส้นชั้นความสูง 50 = $\frac{4x(50.0-46.4)}{(52.3-46.4)}$ = 2.4 ซม.

ระยะทางจากจุด C ถึงเส้นชั้นความสูง 52 = $\frac{4x(52.0-46.4)}{(52.3-46.4)}$ = 3.8 ซม.

3) วิธีใช้แผนภาพ *(Graphic)* การหาจุดที่เส้นชั้นความสูงผ่านโดยการคำนวณระยะทางต้องใช้เวลามากถ้ามีจุดที่ต้องคำนวณจำนวนมาก การใช้วิธีแผนภาพจะง่ายกว่า แผนภาพที่ใช้เป็นแผ่นใสหรือกระดาษไขโปร่งแสงที่มีเส้นขนานห่างเท่าๆกันจำนวนหนึ่ง หรือมีเส้นรัศมีจำนวนหนึ่งที่ตัดเส้นฐานเป็นส่วนๆมีความยาวเท่ากัน บนแผนภาพจะมีตัวเลขที่สอดคล้องกับค่าระดับของพื้นที่กำกับเพื่อช่วยให้การประมาณหาจุดได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 7.7 แผนภาพและตัวอย่างการใช้แผนภาพ

วิธีประมาณภายในเพื่อหาตำแน่งจุดที่มีระดับเท่ากับค่าของเส้นชั้นความสูงทำดังนี้

ก) แผนภาพแบบเส้นขนาน เลือกเส้นขนานคู่ที่จำนวนช่องห่างกันเป็นสัดส่วนกับค่าต่างระดับระหว่าง 2จุด ที่จะทำการประมาณภายใน แล้วหมุนจนจุดทั้งสองอยู่บนเส้นขนานคู่นั้น จุดที่มีค่าระดับเท่ากับเส้นชั้นความสูงจะอยู่บนเส้นขนานที่อยู่ระหว่างเส้นขนานคู่ที่เลือก ดังตัวอย่าง รูปที่ 7.7(ก)

ข) แผนภาพแบบเส้นรัศมี เลือกเส้นรัศมีคู่ที่มีจำนวนช่องห่างกันเป็นสัดส่วนกับค่าต่างระดับระหว่าง 2 จุดที่จะทำการประมาณภายใน หมุนให้เส้นฐานขนานกับเส้นที่ลากระหว่าง 2 จุดนั้น เลื่อนจนจุดทั้งสองอยู่บนเส้นรัศมีคู่นั้น จุดที่มีค่าระดับเท่ากับเส้นชั้นความสูงจะอยู่บนเส้นรัศมีที่อยู่ระหว่างเส้นรัศมีคู่ที่เลือก ดังตัวอย่าง รูปที่ 7.7(ข)

8. การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่

การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ ต้องทำทั้งทางราบและทางดิ่ง โดยเลือกจุดทดสอบ แล้วทำการวัดเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากแผนที่กับค่าที่วัดได้จากพื้นที่จริง การทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแผนที่ควรจะทำอย่างน้อย10 จุด

8.1. การตรวจสอบทางราบ เป็นการตรวจสอบค่าแย้งของระยะทางราบ โดยการเปรียบเทียบระยะที่วัดบนแผนที่กับระยะทางที่วัดระหว่างจุดคู่นั้นบนพื้นดิน ความละเอียดระยะทางที่ได้จากแผนที่จะขึ้นกับมาตราส่วน และ ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการชี้จุดบนแผนที่ เช่น ถ้าให้ค่าคลาดเคลื่อนในการชี้จุดบนแผนที่เท่ากับ 0.5 มม. เมื่อแผนที่มาตราส่วน 1:1,000 จะได้ค่าความละเอียดของตำแหน่งของจุดใดๆเมื่อเทียบกับจุดอื่นในแผนที่จะเท่ากับระยะบนพื้นดิน 50 ซม.

เกณฑ์การพิจารณาความถูกต้องของระยะทางราบ คือ

ก) ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระยะทางราบที่วัดได้ระหว่างจุดหลายคู่ที่เลือกในการทดสอบจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนด

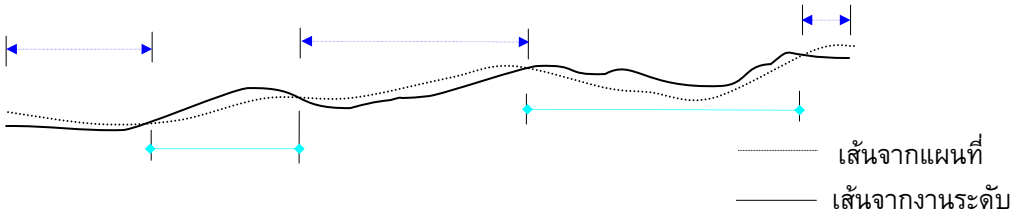
ข) ร้อยละของค่าคลาดเคลื่อนของพื้นที่วัดจากแผนที่เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่จริง ต้องไม่เกินค่าที่กำหนด

8.2. การตรวจสอบทางดิ่ง เป็นการตรวจสอบค่าระดับ ด้วยการเปรียบเทียบระดับของจุดที่เลือกขึ้นในสนามและจุดบนแผนที่ที่ตรงกันจำนวนหนึ่ง หาค่าระดับของจุดในสนามโดยทำระดับด้วยกล้องระดับ ส่วนบนแผนที่หาค่าระดับของจุดจากเส้นชั้นความสูง การเลือกจุดทดสอบอาจเลือกจุดบนเส้นวงรอบทุกๆระยะ 25 เมตร หรือเปรียบเทียบเส้นผิวดิน*(Profile)* ตามแนวจุดที่เลือกโดยการเขียนเส้นผิวดินจากข้อมูลเส้นชั้นความสูงบนแผนที่เปรียบเทียบกับเส้นผิวดินที่เขียนจากการทำระดับตามแนวในสนาม ถ้าเส้นทั้งสองไม่ทับ หรือตัดกันโดยเส้นใดเส้นหนึ่งอยู่บนหรืออยู่ล่างตลอด แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อนมีระบบแฝงอยู่ และถ้างานเขียนแผนที่ทำโดยไม่ระมัดระวังจะเห็นเส้นทั้งสองไม่ตรงกันได้อย่างชัดเจน ความถูกต้องในการเขียนเส้นชั้นความสูงอาจกำหนดเป็นค่าสูงสุดของการตรวจสอบทางดิ่ง

เกณฑ์การพิจารณาความถูกต้องของระยะดิ่งหรืองานระดับ คือ

ก) ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระดับที่ได้จากแผนที่กับที่ได้จากการทำระดับ ต้องไม่เกินค่าที่กำหนด

ข) เมื่อเปรียบเทียบแนวเส้นผิวดินจากแผนที่กับแนวเส้นจากการทำระดับรูปตัดตามแนว อัตราส่วนของความยาวที่แนวเส้นผิวดินจากแผนที่อยู่ บนและใต้ แนวเส้นจากการทำระดับรูปตัดตามแนว จะมีค่าใกล้เคียง1 หรือต่างไปไม่เกินค่าที่กำหนด



รูปที่ 7.8 เปรียบเทียบแนวเส้นผิวดินจากแผนที่กับที่ได้จากการทำระดับ

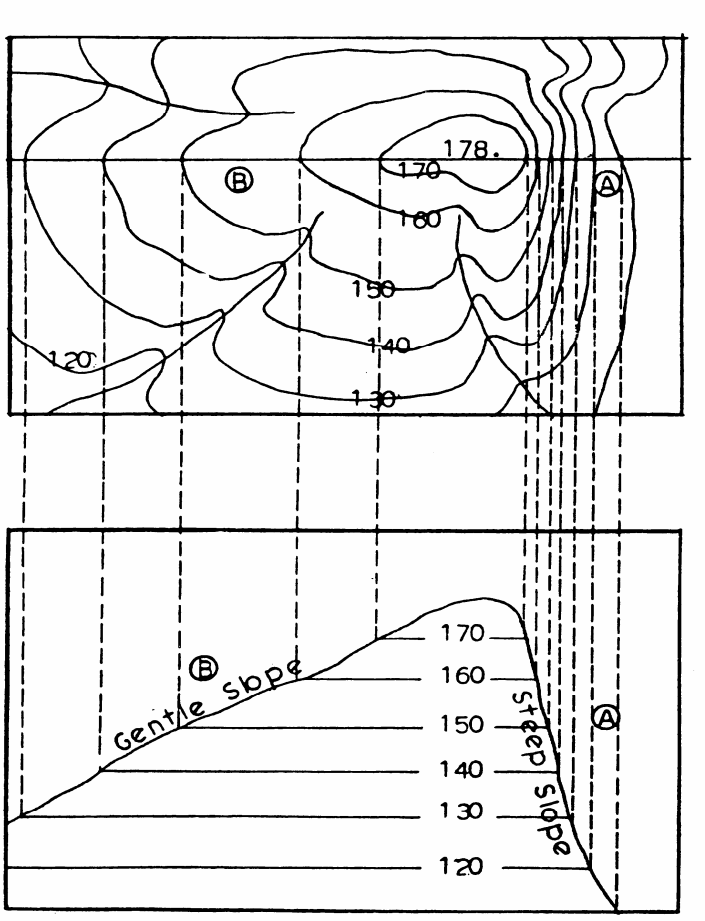
9. ประโยชน์ของแผนที่เส้นชั้นความสูง

ประโยชน์ของแผนที่เส้นชั้นความสูงหรือแผนที่ภูมิประเทศมีหลายประการดังนี้

1) ใช้แผนที่ในการศึกษาลักษณะภูมิประเทศของบริเวณใดๆได้โดยที่ไม่ต้องออกไปดูสถานที่จริง ทำให้รู้ว่าพื้นที่บริเวณนั้นเป็นที่ราบหรือภูเขา

2) ใช้แผนที่ในการออกแบบหรือตัดสินใจเลือกสถานที่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงงานทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น แนวคลองส่งน้ำ แนวท่อระบายน้ำ ที่ตั้งอ่างเก็บน้ำ แนวถนน แนวทางรถไฟ เป็นต้น

3) ใช้แผนที่ในการหารูปตัดของพื้นที่ เพื่อดูลักษณะของผิวดินตามธรรมชาติเป็นอย่างไร โดยการเขียนรูปตัดจากค่าระดับที่ได้จากเส้นชั้นความสูง

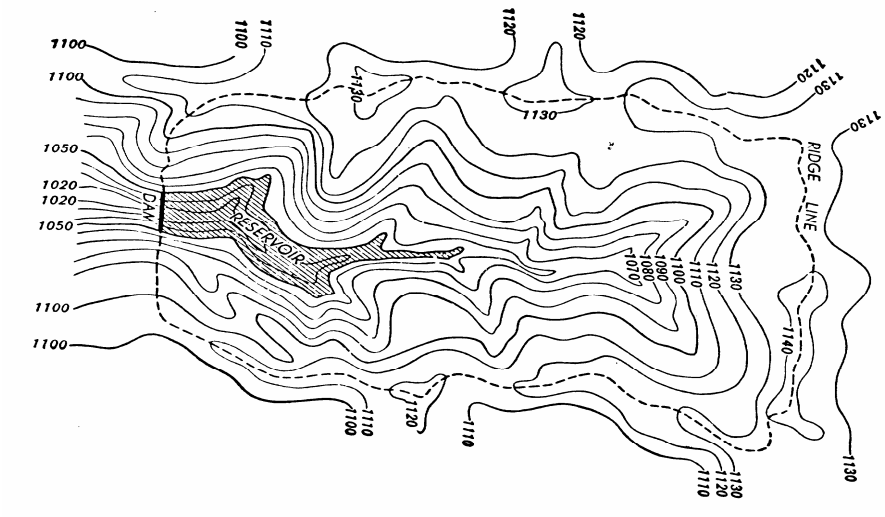


รูปที่ 7.9 การเขียนรูปตัดจากแผนที่เส้นชั้นความสูง

4) ใช้แผนที่ในการหาว่าจุด 2 จุดสามารถมองเห็นกันหรือไม่ โดยการเขียนรูปตัดผิวดินระหว่างจุดทั้งสอง แล้วลากเส้นตรงระหว่างจุดสองจุดที่อยู่เหนือพื้นดินตามความสูงที่กำหนด ซึ่งเปรียบได้เป็นแนวสายตา ถ้ามีส่วนใดของเส้นผิวดินอยู่สูงกว่าแนวสายตา แสดงว่าพื้นที่บริเวณนั้นขวางแนวการมองจุดทั้งสอง จึงไม่สามารถมองเห็นกัน

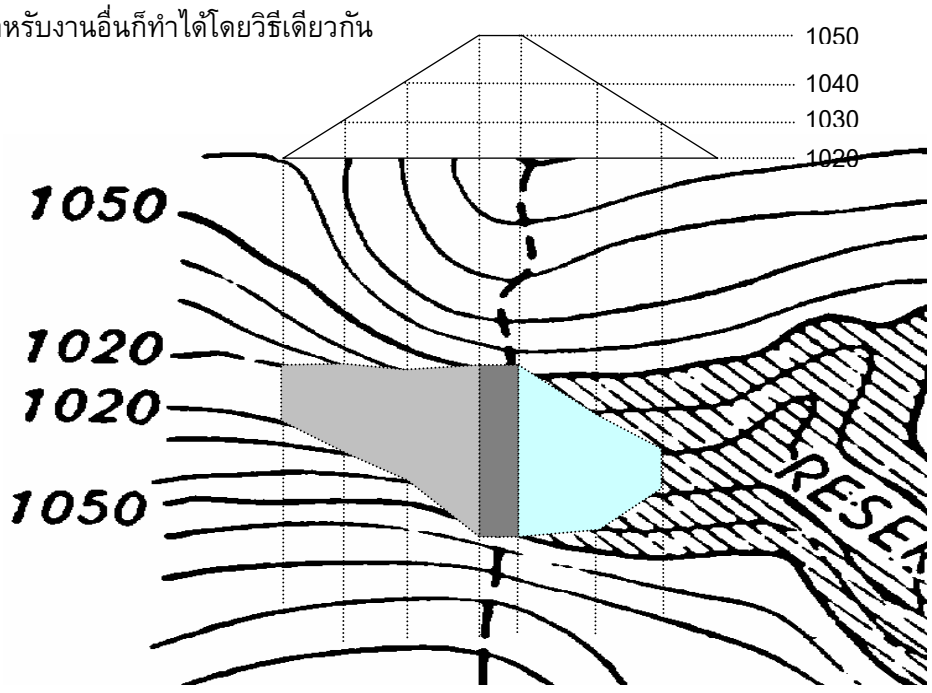
5) ใช้แผนที่ในการคำนวณปริมาตรของดินที่ขุดหรือถม การหาปริมาตรของดินขุดหรือถมมีหลายวิธี เช่น หาจากจุดความสูง หาจากรูปพื้นที่ตัดขวาง หรือหาจากพื้นที่ที่เส้นชั้นความสูงล้อมรอบ แต่ละวิธีล้วนสามารถหาได้จากแผนที่เส้นชั้นความสูงทั้งสิ้น ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทต่อไป

6) ใช้แผนที่ในการหาพื้นที่เก็บกักน้ำและพื้นที่รับน้ำของอ่างเก็บน้ำ ทำให้สามารถคำนวณความจุของอ่างเก็บน้ำและปริมาณน้ำที่ไหลลงอ่างได้ พื้นที่เก็บน้ำคือพื้นที่ที่ล้อมด้วยเขื่อนและเส้นชั้นความสูงที่มีค่าระดับเท่ากับความสูงของทางระบายน้ำล้น ส่วนพื้นที่รับน้ำจะล้อมรอบด้วยเส้นที่ลากตามแนวสันเขื่อนขึ้นไปจนถึงสันเขาทั้งสองด้าน แล้วลากตามสันเขาไปจนบรรจบกันที่ด้านเหนือเขื่อน เป็นพื้นที่รองรับน้ำฝนแล้วไหลลงอ่าง



รูปที่ 7.10 พื้นที่เก็บกักน้ำและพื้นที่รับน้ำฝนของอ่างเก็บน้ำ

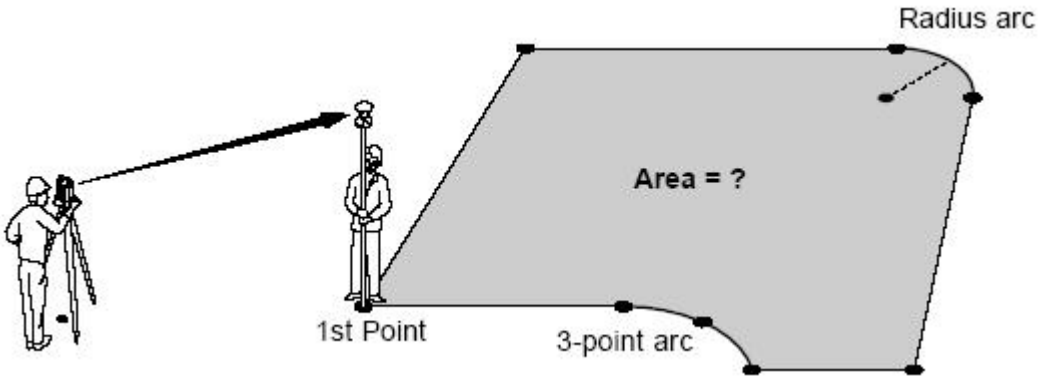
7) ใช้แผนที่ในการหารอยตัดของพื้นที่กับขอบสิ่งก่อสร้างเพื่อหาขอบเขตของบริเวณงานก่อสร้าง เช่น ขอบเขตฐานเขื่อน แนวฐานของถนน เป็นต้น วิธีการหาแนวขอบของฐานเขื่อนใช้การโยงเส้นระหว่างจุดที่มีความสูงเท่ากันจากภาพ 2 ด้านที่ตั้งฉากกัน คือแผนที่เป็นภาพที่มองจากด้านบน (TopView) และภาพด้านข้าง (SideView) ของเขื่อนที่มีมาตราส่วนเดียวกับแผนที่ ดังรูปที่ 7.11 สำหรับงานอื่นก็ทำได้โดยวิธีเดียวกัน



รูปที่ 7.11 การหาแนวขอบเขตของฐานเขื่อน

8.. พื้นที่และปริมาตร

การทำงานรังวัดอาจมีจุดมุ่งหมายต้องการหาพื้นที่ของบริเวณใดบริเวณหนึ่ง พื้นที่ในงานรังวัดจะหมายถึงพื้นที่บนระนาบราบไม่ใช่พื้นที่ตามผิวดินจริง หรือพื้นที่ในระนาบดิ่งในกรณีที่หาพื้นที่ของรูปตัดขวาง และบางครั้งก็อาจต้องการรู้ปริมาตร โดยเฉพาะปริมาตรของวัสดุที่ใช้ในงานวิศวกรรม เช่น ปริมาตรดิน หิน น้ำ แร่ เป็นต้น



รูปที่ 8.1 การวัดหาพื้นที่

วิธีการหาพื้นที่และปริมาตรมีหลายวิธี แต่ละวิธีต้องการข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณที่แตกต่างกัน วิธีการหาข้อมูลอาจเป็นการหาข้อมูลจากการวัดในงานสนามหรือจากแผนที่เขียนไว้ ซึ่งวิธีแรกจะให้ความถูกต้องดีกว่าเพราะวิธีที่สองจะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเขียนรูปเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ยังอาจใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณค่าอื่นๆมาคำนวณหาพื้นที่ ส่วนการหาปริมาตรมักต้องใช้ข้อมูลจากการหาพื้นที่ ในงานรังวัดอาจพิจารณาวิธีการหาพื้นที่และวิธีการหาปริมาตรได้ดังนี้

1.1. วิธีการหาพื้นที่แบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ

(1) การหาพื้นที่โดยการรังวัดพื้นที่

(2) การหาพื้นที่โดยการวัดจากแผนที่หรือแผนผัง

(3) การหาพื้นที่จากค่าระยะฉากและพิกัดฉาก

1.2. วิธีการหาปริมาตรแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ

(1) การหาปริมาตรจากพื้นที่รูปตัด

(2) การหาปริมาตรจากเส้นชั้นความสูง

(3) การหาปริมาตรจากจุดความสูง

การคำนวณพื้นที่หรือคำนวณปริมาตรควรทำเป็นรูปแบบที่ดูง่ายและตรวจสอบง่าย การตรวจสอบควรกระทำโดยผู้อื่นโดยใช้วิธีคำนวณวิธีเดียวกัน หรือผู้คำนวณเป็นผู้ทำการตรวจสอบเองโดยใช้วิธีคำนวณวิธีอื่น ถ้าการคำนวณถูกต้องผลการคำนวณต้องเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ความถูกต้องของผลลัพธ์ของการคำนวณพื้นที่และปริมาตรจะขึ้นกับปัจจัย 3 อย่างคือ

ก) ความถูกต้องของการรังวัดในสนาม

ข) ความถูกต้องของการเขียนแผนผัง ถ้าการคำนวณนั้นวัดจากแผนผังที่เขียนไว้

ค) วิธีการที่ใช้ในการคำนวณ ถ้ารูปที่คำนวณไม่เป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ผลลัพธ์ที่คำนวณได้จะเป็นค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้น

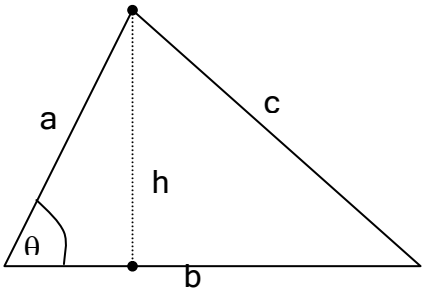
1. การหาพื้นที่โดยการรังวัดพื้นที่

การรังวัดในพื้นที่เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณหาพื้นที่ วิธีการรังวัดจะวางเส้นรังวัดให้ทับแนวเขตพื้นที่และให้คลุมพื้นที่ทั้งหมด แล้ววัดระยะที่จำเป็นต่อการคำนวณมักไม่นิยมวัดมุม วิธีการรังวัดได้แก่

1.1. พื้นที่รูปทรงเรขาคณิต โดยแบ่งพื้นที่ด้วยเส้นรังวัดออกเป็นรูปทางเรขาคณิต เช่น รูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมจตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น แล้วคำนวณหาพื้นที่ด้วยสูตรทางเรขาคณิต

พื้นที่ของรูปเรขาคณิตคำนวณตามสูตรต่อไปนี้

1) พื้นที่รูปสามเหลี่ยม (A) เมื่อ a b c เป็นความยาวด้านทั้งสาม



ก) $$A = \sqrt{s\,(s-a)\,(s-b)\,(s-c)}$$

เมื่อ $s = \frac{a+b+c}{2}$

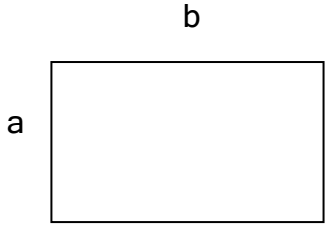
ข) $$A = \frac{1}{2}\,b\,h$$

เมื่อ h = ความสูงวัดจากด้าน b

ค) $$A = \frac{1}{2}\,a\,b\,\sin(\theta)$$

เมื่อ θ = มุมระหว่างด้าน a และ b

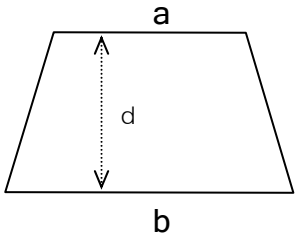
2) พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (A)



$$A = a \times b$$

เมื่อ a b เป็นความยาวด้านทั้งสองที่ตั้งฉากกัน

3) พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (A)

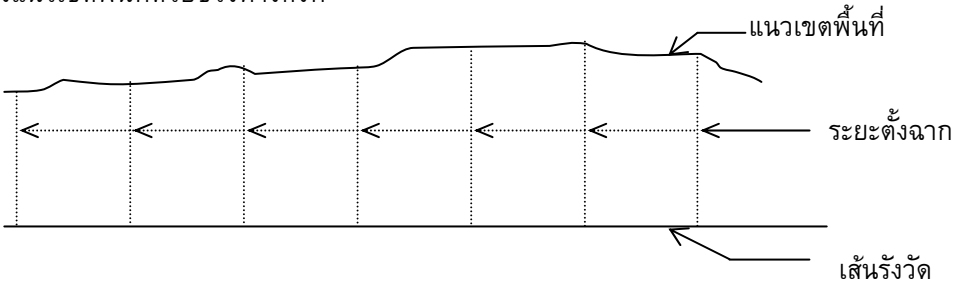


$$A = \frac{1}{2}\,(a+b)\,d$$

เมื่อ a b เป็นความยาวของด้านทั้งสองที่ขนานกัน

d เป็นระยะห่างของเส้นคู่ขนาน

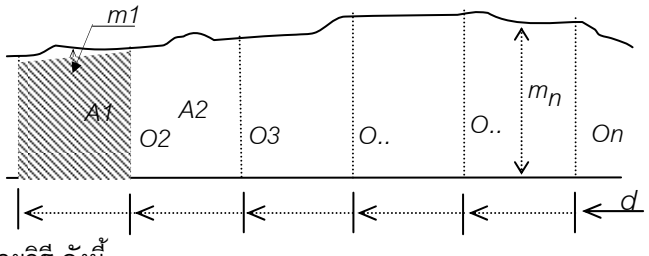
1.2. วัดระยะตั้งฉาก (Offset) จากเส้นรังวัด เป็นการหาพื้นที่ระหว่างเส้นตรงกับแนวคดโค้งไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปแนวเขตพื้นที่มักไม่เป็นเส้นตรงแต่จะคดโค้งไปตามแนวธรรมชาติ เช่น แนวชายฝั่งแม่น้ำ แนวชายป่า แนวโค้งถนน เป็นต้น การรังวัดจะวัดระยะตั้งฉากจากเส้นตรงหรือเส้นรังวัดที่วางแนวไว้ไปยังแนวเขตพื้นที่ด้วยช่วงห่างคงที่



ให้ *d* เป็น ระยะช่วงที่เท่าๆกัน

O เป็น ระยะตั้งฉากที่จุดแบ่งช่วง

m เป็น ระยะตั้งฉากที่จุดกลางช่วง



การคำนวณพื้นที่สามารถ คำนวณได้หลายวิธี ดังนี้

1) Mid-Ordinate Rule แบ่งเส้นรังวัดออกเป็นช่วงเท่าๆกันแล้ววัดระยะตั้งฉากที่จุดกลางช่วงไปยังเส้นแนวเขต พื้นที่แต่ละช่องเท่ากับระยะตั้งฉากที่จุดกึ่งกลางคูณระยะช่วง

$$A1 = m1 \times d$$

$$A = (m1+m2+m3+...+m_n) \times d$$

2) Average Ordinate Rule แบ่งเส้นรังวัดออกเป็นช่วงเท่าๆกัน วัดระยะตั้งฉากที่จุดแบ่งไปยังแนวเขตพื้นที่ พื้นที่เท่ากับระยะตั้งฉากเฉลี่ยคูณระยะทางทั้งหมด

$$A = \frac{(O1+O2+O3+...+On)}{n} \times D$$

3) Trapetzoidal Rule แบ่งเส้นรังวัดออกเป็นช่วงเท่าๆกัน วัดระยะตั้งฉากที่จุดแบ่งไปยังแนวเขตพื้นที่ สมมุติฐานของวิธีนี้คือ พื้นที่แต่ละช่องระหว่างระยะตั้งฉากสองเส้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู มีพื้นที่เท่ากับค่าเฉลี่ยของระยะตั้งฉากคู่หนึ่งคูณด้วยระยะระหว่างเส้นตั้งฉากคู่นั้น ฉะนั้นด้านแนวเขตที่เป็นเส้นโค้งจะกลายเป็นเส้นตรง

$$A1 = \frac{(O1+O2)}{2} \times d$$

$$A = (\frac{O1+On}{2} + O2 + O3 + ... + O_{n-1}) \times d$$

4) Simson's Rule แบ่งเส้นรังวัดออกเป็นช่วงเท่าๆกัน วัดระยะตั้งฉากที่จุดแบ่งไปยังแนวเขตพื้นที่ สมมุติฐานของวิธีนี้คือระหว่างพื้นที่ 2 ช่องที่แบ่งโดยเส้นตั้งฉาก ด้านแนวที่คดโค้งจะเป็นโค้งของ Parabola การคำนวณหาพื้นที่แต่ละครั้งจะหาพื้นที่ของ 2 ช่องที่ติดกัน ดังนั้นการแบ่งช่วงต้องแบ่งให้เป็นจำนวนคู่หรือมีระยะตั้งฉากเป็นจำนวนคี่

$$A1+A2 = \frac{d}{3} \times [O1+4O2+O3)$$

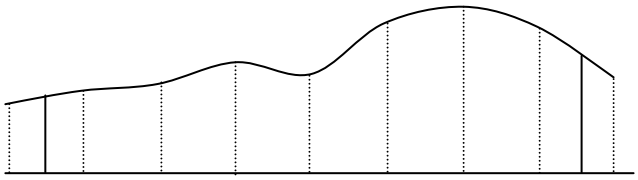
$$A = \frac{d}{3} \times [O1+4(O2+O4+..+On-1)+2(O3+O5+..+On-2)+On]$$

$$A = \frac{d}{3} \times (O1 + 4\sum O'' + 2\sum O' + On)$$

เมื่อ O'' คือ ระยะตั้งฉากคู่ *(2, 4, 6, ...n-1)*

O' คือ ระยะตั้งฉากคี่ *(3, 5, 7, ...n-2)*

ตัวอย่างที่ 8.1 จากการวัดระยะตั้งฉากออกจากเส้นรังวัดไปยังแนวเขตที่ดิน ได้ข้อมูลระยะตั้งฉากช่วงละ 20 เมตร จงหาพื้นที่ระหว่างเส้นรังวัดกับแนวเขตที่



ระยะบนเส้นรังวัด	0	20	40	60	80	100	120	140	160	เมตร
ระยะตั้งฉาก	2.30	3.80	4.55	6.75	5.25	7.30	8.95	8.25	5.50	เมตร

ก) วิธี Mid-Ordinate Rule

$$A = (m1+m2+m3+...+m_n) \times d$$

พื้นที่นับจากระยะ 10~150 ม. = $(3.8+4.55+6.75+5.25+7.30+8.95+8.25)\times 20$ = 897.0 ตารางเมตร

พื้นที่ช่วง 0 –10 ม. = $(2.30 + (3.80-2.30)\times\frac{1}{4}) \times 10$ = 26.75 ตารางเมตร

พื้นที่ช่วง 150 –160 ม. = $(5.50 + (8.25-5.5)\times\frac{1}{4}) \times 10$ = 31.88 ตารางเมตร

พื้นที่ทั้งหมด = 897.0+26.75+31.88 = 955.63 ตารางเมตร

ข) วิธี Average Ordinate Rule

$$A = \frac{(O1 + O2 + O3 + ... + On)}{n} \times D$$

$$= \frac{1}{9} \times (2.30+3.8+4.55+6.75+5.25+7.30+8.95+8.25+5.50)\times 160$$

= 936.0 ตารางเมตร

ค) วิธี Trapetzoidal Rule

$$A = (\frac{O1 + On}{2} + O2 + O3 + ... + O_{n-1}) \times d$$

$$= (\frac{2.30 + 5.50}{2} + 3.8+4.55+6.75+5.25+7.30+8.95+8.25)\times 20$$

= 975.0 ตารางเมตร

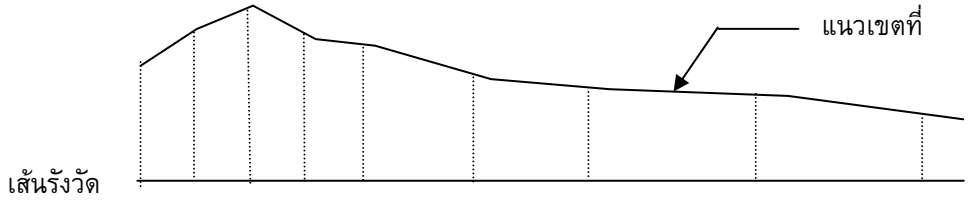
ง) วิธี Simson's Rule

$$A = \frac{d}{3} \times (O1 + 4\sum O'' + 2\sum O' + On)$$

$$= \frac{20}{3} \times (2.30+4(3.8+6.75+7.30+8.25)+2(4.55+5.25+8.95)+5.50)$$

= 998.0 ตารางเมตร

ตัวอย่างที่ 8.2 จากการวัดระยะตั้งฉากออกจากเส้นรังวัดไปยังแนวเขตที่ดิน ได้ข้อมูลระยะตั้งฉากของแต่ละระยะบนเส้นรังวัด จงหาพื้นที่ระหว่างเส้นรังวัดกับแนวเขตที่



ระยะบนเส้นรังวัด	0	20	40	60	80	120	160	220	280	เมตร
ระยะตั้งฉาก	9.4,	10.8,	13.6,	11.2,	9.6	8.4	7.5	6.3	4.6	เมตร

ก) วิธี Mid-Ordinate Rule

$$A = (10.8+11.2)x40 + 8.4x80 + 6.3x120$$

$$= 880.0 + 672.0 + 756.0$$

$$= 2308.0 \quad \text{ตารางเมตร}$$

ข) วิธี Average Ordinate Rule

$$A = \frac{9.4+10.8+13.6+11.2+9.60}{5} x80 + \frac{9.6+8.4+7.5}{3} x80 + \frac{7.5+6.3+4.6}{3} x120$$

$$= 873.6 + 680.0 + 735.6$$

$$= 2289.2 \quad \text{ตารางเมตร}$$

ค) วิธี Trapetzoidal Rule

$$A = (\frac{9.4+9.6}{2}+10.8+13.6+11.2)\times 20 + (\frac{9.6+7.5}{2}+8.4)\times 40 + (\frac{7.5+4.6}{2}+6.3)\times 60$$

$$= 902.0 + 678.0 + 741.0$$

$$= 2321.0 \quad \text{ตารางเมตร}$$

ง) วิธี Simson's Rule

$$A = \frac{20}{3} x (9.4+4(10.8+11.2)+2(13.6)+9.6) + \frac{40}{3} x (9.6+4(8.4)+7.5) + \frac{60}{3} x (7.5+4(6.3)+4.6)$$

$$= 894.7 + 676.0 + 746.0$$

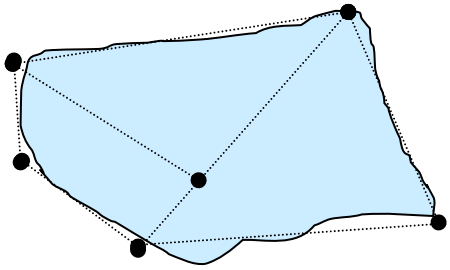
$$= 2316.67 \quad \text{ตารางเมตร}$$

หมายเหตุ การคำนวณโดยวิธี Mid-Ordinate Rule เนื่องจากการวัดระยะตั้งฉากไม่ได้เป็นการวัดที่จุดกลางแต่ละช่วง การคำนวณจึงขยายช่วงเป็น 2 เท่าของที่วัด เพื่อให้ได้ระยะจุดกลางช่วง ระยะตั้งฉากบางเส้นจึงไม่ถูกนำมาเป็นข้อมูลในการคำนวณ

2. การหาพื้นที่จากแผนผังหรือแผนที่

วิธีการหาพื้นที่จากแผนผังหรือแผนที่ โดยหลักการแล้วเหมือนกับการรังวัดในพื้นที่ เพียงแต่เปลี่ยนการวัดในสนามเป็นการวัดบนแผ่นกระดาษ และอาจใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือช่วยในการหาพื้นที่โดยลดการคำนวณลง วิธีการหาพื้นที่อาจทำได้ดังนี้

2.1. แบ่งพื้นที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต โดยทั่วไปจะแบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยม โดยใช้ดินสอเขียนแบ่งพื้นที่บนแผนที่หรือใช้กระดาษไขวางทับแผนที่ก่อน แล้ววัดความยาวเส้นฐานและความสูงของรูปสามเหลี่ยมหรือวัดความยาวด้านของรูปสี่เหลี่ยมทุกรูป ระวังการลืมวัดหรือวัดซ้ำ สำหรับด้านที่เป็นแนวโค้งแบบไม่สม่ำเสมอ ควรทำให้เป็นเส้นตรงโดยให้พื้นที่ที่เส้นตรงตัดผ่านเท่ากันทั้งสองด้าน



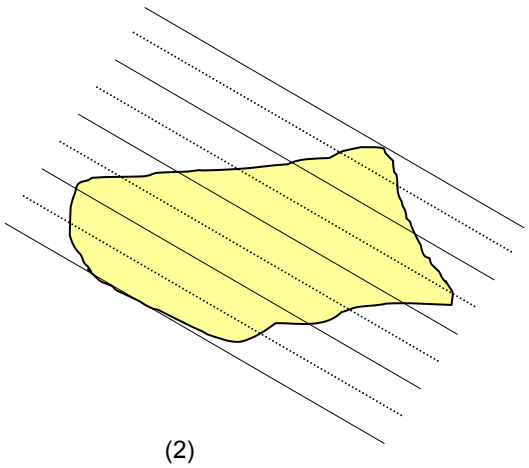
รูปที่ 8.2 การแบ่งพื้นที่บนแผนที่

2.2. ใช้แผ่นใสทาบ แผ่นใสที่ใช้มี 2 ลักษณะคือ

1) แผ่นใสตารางรูปสี่เหลี่ยม ใช้กระดาษไขหรือแผ่นใสที่มีเส้นตารางสี่เหลี่ยมทับบนแผนที่ นับจำนวนรูปสี่เหลี่ยมเต็ม และกะประมาณส่วนที่ไม่เต็มเป็นเศษส่วนของพื้นที่เต็ม เมื่อรวมจำนวนสี่เหลี่ยมทั้งหมดแล้วคูณด้วยค่าพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยม 1 รูปจะได้พื้นที่ทั้งหมด

2) แผ่นใสเส้นขนานใช้กระดาษไขหรือแผ่นใสที่มีเส้นตรงขนานกันและห่างเท่าๆกันระหว่างเส้นขนานมีเส้นแบ่งครึ่งช่องทำเป็นเส้นประ วางทับบนแผนที่ พยายามปรับทิศทางของกระดาษไขให้เส้นขนานคู่หนึ่งสัมผัสกับแนวขอบพื้นที่พอดี วัดความยาวของเส้นประที่อยู่ในพื้นที่ทุกเส้น พื้นที่ระหว่างเส้นขนานคู่หนึ่งคือผลคูณของความยาวเส้นประกับระยะห่างเส้นคู่ขนาน ฉะนั้นพื้นที่ทั้งหมดบนแผนที่เท่ากับผลบวกของความยาวของเส้นประคูณด้วยระยะห่างระหว่างเส้นขนาน และพื้นที่บนพื้นดินเท่ากับพื้นที่บนแผนที่คูณด้วยเลขมาตราส่วนยกกำลังสอง

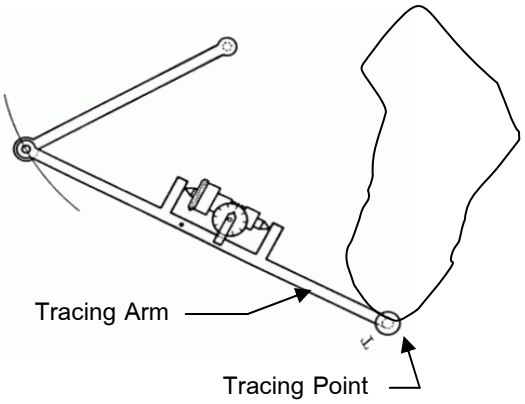
(1)



(2)

รูปที่ 8.3 การใช้แผ่นใสหาพื้นที่ (1) แบบตารางสี่เหลี่ยม (2) แบบเส้นขนาน

2.3. ใช้เครื่องมือวัดพื้นที่ *(Planimeter)* เครื่องมือวัดพื้นที่เป็นเครื่องมือกลที่ใช้ในการวัดพื้นที่บนแผนที่ มีหลายรูปแบบแต่โดยหลักการมี 2 ชนิดคือ เครื่องวัดพื้นที่แบบจุดขั้ว *(Polar Planimeter)* และเครื่องวัดพื้นที่แบบล้อ *(Rolling Planimeter)* ทั้งสองชนิดมีส่วนประกอบที่เหมือนกันคือ มีจุดมองหรือหมุดเขียนสำหรับเลื่อนไปตามแนวเขตของพื้นที่ในแผนที่ และผลของการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนอันหนึ่งจะบันทึกจำนวนพื้นที่ไว้



รูปที่ 8.4 ส่วนประกอบเครื่องมือวัดพื้นที่

วิธีใช้เครื่องมือวัดพื้นที่ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ก) ปรับความยาวของแขนหมุดเขียน *(Tracing Arm)* ตามมาตราส่วนของแผนที่ เพื่อให้ได้หน่วยพื้นที่ที่ต้องการโดยไม่ต้องแปลงค่าภายหลัง

ข) วางหมุดขั้วปักลงบนกระดาษแผนที่ภายนอกพื้นที่ที่จะวัด ให้จุดมอง *(Tracing Point)* สามารถเคลื่อนที่คลุมพื้นที่ได้หมด

ค) กำหนดจุดหนึ่งบนเส้นแนวเขตเป็นจุดเริ่มต้น แล้วนำจุดมองวางลงที่จุดนั้น อ่านตัวเลขที่หน้าปัทม์ ตัวเลขที่อ่านได้นี้เรียกว่า ค่าเริ่ม *(Initial Reading)* หรือตั้งให้เป็นศูนย์ก็ได้

ง) เคลื่อนที่จุดมองให้เดินตามแนวเส้นเขตของพื้นที่ไปตามเข็มนาฬิกา แล้วกลับมาวางไว้ที่จุดเริ่มต้น อ่านตัวเลขหน้าปัทม์ ตัวเลขที่อ่านได้เรียกว่า ค่าสุดท้าย *(Final Reading)*

จ) หาผลต่างของค่าสุดท้ายกับค่าเริ่ม คือ ค่าอ่านพื้นที่ที่ต้องการ

วิธีปฏิบัติทั่วไปไม่นิยมปรับความยาวของแขนหมุดเขียนตามมาตราส่วนของแผนที่ แต่จะตั้งความยาวแขนหมุดเขียนให้พอเหมาะ ทำการวัดพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีพื้นที่เป็นจำนวนตารางเมตรเต็มบนแผนที่ *(A)* สมมุติได้ค่าอ่านพื้นที่เป็น x แล้วจึงใช้เครื่องมือไปวัดพื้นที่ที่ต้องการ สมมุติได้ค่าอ่านพื้นที่เป็น y

$$\text{คำนวณพื้นที่ที่ต้องการ} \quad = \quad \frac{y}{x} \times A$$

ในกรณีที่พื้นที่ใหญ่มาก สามรถวัดได้ 2 วิธี คือ แบ่งเป็นส่วนย่อยๆแล้วหาพื้นที่ทีละส่วนหรือวางหมุดขั้วในพื้นที่ แต่ไม่แนะนำให้ใช้วิธีวางหมุดขั้วในพื้นที่ เพราะจะเกิดวงกลมที่ทำให้ล้อที่วัดการเคลื่อนที่ของแขนหมุดเขียนไม่หมุน ตัวเลขค่าอ่านพื้นที่จะไม่เปลี่ยน เรียกว่า Zero Circle พื้นที่ของวงกลมนี้คือค่าคงที่ที่ต้องบวกเข้ากับพื้นที่ที่อ่านได้ ปกติจะสลักไว้ที่แขนหมุดเขียนหรือติดไว้ที่กล่องใส่เครื่องวัด

ตัวอย่างที่ 8.3 การวัดพื้นที่ด้วยเครื่องมือวัดพื้นที่ บนแผนที่มาตรส่วน 1:500 ได้ผลต่างค่าอ่านของค่าสุดท้ายกับค่าเริ่มในการวัดพื้นที่ เท่ากับ 8.275 และเมื่อนำไปวัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส 2x2 ซม. ได้ผลต่างค่าอ่าน เท่ากับ 1.665 จงหาพื้นที่ที่วัดได้จากแผนที่

พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2x2 ซม. = *2x500 x 2x500* ตารางเซ็นติเมตร

= *2x5 x 2x5* ตารางเมตร

= *100* ตารางเมตร

พื้นที่ของแผนที่ = $\frac{8.275}{1.665} \times 100$

= *497* ตารางเมตร

ปัจจุบันเครื่องมือวัดพื้นที่ทั้งแบบจุดขั้วและแบบล้อ เป็นเครื่องมือวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์ สามารถตั้งค่ามาตราส่วนแผนที่, หน่วยพื้นที่ที่ต้องการ และจำนวนครั้งการวัดซ้ำ ทำให้การใช้ง่ายขึ้นมาก

รูปที่ 8.5 เครื่องมือวัดพื้นที่แบบอิเลกทรอนิกส์

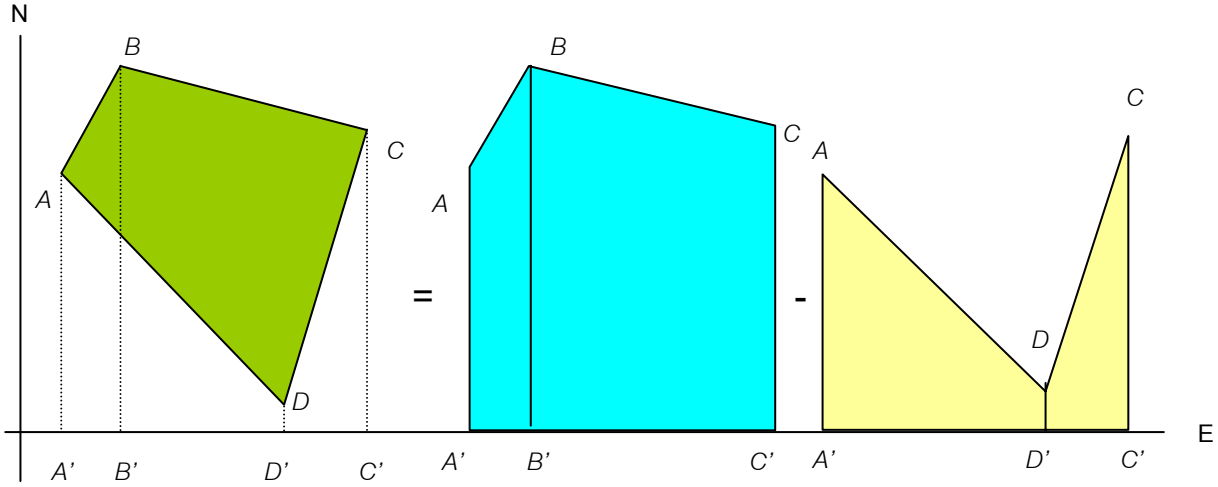
ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือวัดพื้นที่

(1) โต๊ะที่วางแผนที่จะต้องวางอยู่ในแนวราบ
(2) ควรหาพื้นที่อย่างน้อย 2 ครั้งโดยตั้งจุดขั้วในที่ต่างกัน
(3) ไม่ควรเสียเวลากับการตั้งเวอร์เนียร์หรือค่าอ่านเริ่มให้เป็นศูนย์
(4) ผิวของกระดาษแผนที่ที่วงล้อหมุนอยู่ควรเป็นผิวที่ราบเรียบ อาจใช้กระดาษไขปูทับ
(5) ถ้าแผ่นกระดาษแผนที่ถูกม้วนโค้งไม่ควรใช้
(6) การเคลื่อนจุดมองอาจใช้ไม้บรรทัดตรงหรือบรรทัดโค้งช่วย
(7) ควรคำนวณตรวจสอบค่าพื้นที่ที่ได้เคร่า ๆเพื่อป้องกันผิดพลาด

3. การหาพื้นที่โดยใช้พิกัดฉากหรือระยะฉาก

พิกัดฉากคือค่าตำแหน่งทางราบอาจเป็นค่า พิกัดเหนือ-ตะวันออก (N,E) หรือพิกัด X,Y แต่งานสำรวจนิยมใช้ค่าพิกัดรูปแบบ N,E มากกว่า ส่วนระยะฉากหมายถึง ระยะเหนือ *(Lattitude)* และระยะตะวันออก *(Departure)* ตามที่เคยกล่าวมาแล้วในงานวงรอบ การหาพื้นที่โดยใช้พิกัดฉากและระยะฉาก เป็นการหาพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นตรง หรือเป็นการหาพื้นที่ของรูปหลายเหลี่ยม

3.1. การคำนวณพื้นที่จากค่าพิกัดฉาก (N,E) วิธีการคำนวณพิสูจน์ได้จากการลากเส้นจากเหลี่ยมของรูปไปตั้งฉากกับแกนอ้างอิง จะเป็นแกนเมอริเดียนหรือแกนขนาน (แกนที่ตั้งฉากกับเมอริเดียน) ก็ได้ พื้นที่รูปเหลี่ยมจะเท่ากับผลบวกของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูส่วนที่ทับพื้นที่นั้นลบด้วยสี่เหลี่ยมคางหมูที่อยู่นอกพื้นที่



$$ABCD = A'ABCC' - A'ADCC'$$

$$= [ABB'A'+BCC'B'] - [DCC'D'+ ADD'A']$$

$$= [\,|\,A'B'(AA'+BB') + |\,B'C'(BB'+CC')] - [\,|\,D'C'(DD'+CC') + |\,A'D'(AA'+DD')]$$

$$2ABCD = [A'B'(AA'+BB')+ B'C'(BB'+CC')]-[D'C'(DD'+CC') + A'D'(AA'+DD')]$$

จากสมการข้างบนแทนค่า

$A'B'=E_B-E_A$ $B'C'=E_C-E_B$ $D'C'=E_C-E_D$ $A'D'=E_D-E_A$

$AA'= N_A$ $BB'= N_B$ $CC'= N_C$ $DD'= N_D$

$$2ABCD = [(E_B-E_A)(N_A+N_B)+(E_C-E_B)(N_B+N_C)]-[(E_C-E_D)(N_D + N_C)+ (E_D-E_A)(N_{A+}N_D)]$$

$$= [E_BN_A+ E_BN_B - E_AN_A - E_AN_B+ E_CN_B + E_CN_C - E_BN_B - E_BN_C] -$$

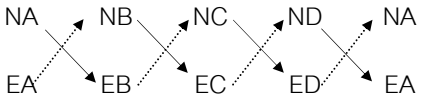
$$[E_CN_D + E_CN_C - E_DN_D - E_DN_C + E_DN_A + E_DN_D - E_AN_A - E_AN_D]$$

$$= [E_BN_A - E_AN_B+ E_CN_B - E_BN_C] - [E_CN_D - E_DN_C + E_DN_A - E_AN_D]$$

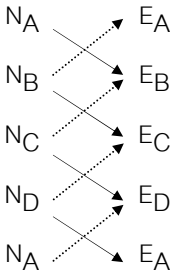
$$= [E_BN_A + E_CN_B+ E_DN_C + E_AN_D] - [E_AN_B+ E_BN_C+E_CN_D + E_DN_A]$$

จากผลลัพธ์ที่ได้อาจเขียนในรูปการคูณไขว้ค่าพิกัดเพื่อให้ง่ายต่อการจดจำได้ 2 รูปแบบดังนี้

2 เท่าพื้นที่ =



2 เท่าพื้นที่ =

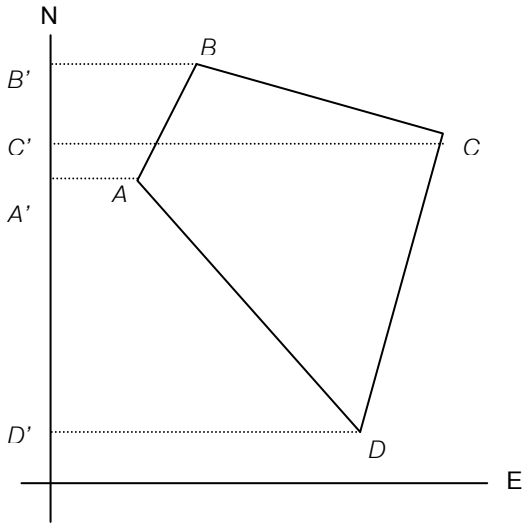


โดย คูณลงเป็นบวก (↘ เป็น +) และคูณขึ้นเป็นลบ (↗ เป็น -)

วิธีการคำนวณอาจพิสูจน์ได้จากการลากเส้นจากเหลี่ยมของรูปไปตั้งฉากกับแกนเมอริเดียน ดังรูปจะได้

ABCD = B'BCDD' – B'BADD'

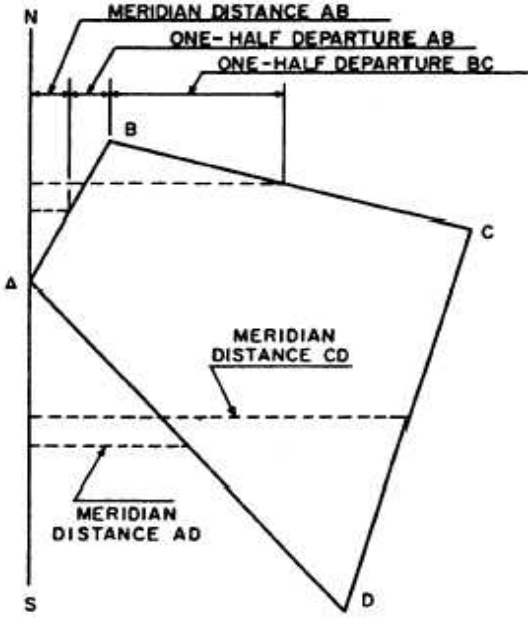
= [BCC'B' +CDD'C'] – [DA A'D'+ ABB'A']



<u>ข้อควรสนใจคือ</u>

1) สูตรการหาพื้นที่ที่ได้เป็นสูตรที่ให้ผลลัพธ์แน่นอน ไม่ใช่โดยประมาณ
2) การตั้งค่าพิกัดเพื่อทำการคูณไขว้จะเริ่มที่จุดใดก็ได้ แต่ต้องเรียงตามลำดับเหลี่ยมของรูปและจบด้วยพิกัดของจุดเริ่ม สลับไม่ได้
3) การตั้งค่าเพื่อคูณไขว้ถ้าพิกัดเป็นลบ ต้องนำเครื่องหมายลบมาคิดด้วย
4) การตั้งลำดับของเหลี่ยมรูปถ้าเวียนขวาหรือตามเข็มผลลัพธ์การคูณไขว้จะเป็นบวก ตรงข้ามถ้าตั้งลำดับของเหลี่ยมรูปเวียนซ้ายหรือทวนเข็มผลลัพธ์การคูณไขว้จะเป็นลบ ให้ตัดเครื่องหมายลบออกได้
5) ระบบพิกัด X,Y การตั้งค่าพิกัดเพื่อคูณไขว้ ถ้าให้ Y แทน N และ X แทน E ผลลัพธ์ที่ได้จะมีเครื่องหมายเช่นเดียวกับข้อ 4 แต่ถ้าให้ X แทน N และ Y แทน E ผลลัพธ์ที่ได้จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับข้อ 4)

3.2. การคำนวณพื้นที่จากสองเท่าระยะเมอริเดียน *(Double Meridian Distance, DMD)* ระยะเมอริเดียน คือ ระยะตั้งฉากจากจุดกึ่งกลางของด้านรูปเหลี่ยมถึงแกนเมอริเดียน



จากรูป

$$MD_{AB} = \frac{1}{2}Dep_{AB}$$

$$DMD_{AB} = Dep_{AB}$$

$$MD_{BC} = MD_{AB} + \frac{1}{2}Dep_{AB} + \frac{1}{2}Dep_{AB}$$

$$DMD_{BC} = DMD_{AB} + Dep_{AB} + Dep_{AB}$$

สรุปการหา DMD ของเส้นวงรอบได้ดังนี้

DMD เส้นแรก = Dep เส้นแรก

DMD เส้นใด ๆ = DMD เส้นก่อน+Dep เส้นก่อน+Dep เส้นนั้น

หลักการหาพื้นที่โดยวิธีนี้เหมือนกับการหาพื้นที่ด้วยพิกัดฉาก คือพื้นที่รูปเหลี่ยมจะเท่ากับผลบวกของรูปสี่เหลี่ยมคางหมูส่วนที่ทับพื้นที่นั้นลบด้วยสี่เหลี่ยมคางหมูที่อยู่นอกพื้นที่ โดยลากเส้นจากเหลี่ยมของรูปไปตั้งฉากกับแกนเมอริเดียน เพียงแต่ให้เส้นเมอริเดียนผ่านจุด A จะได้

$$\text{พื้นที่ ABCD} = (MD_{BC} \times -Lat_{BC} + MD_{CD} \times -Lat_{CD}) - (MD_{DA} \times Lat_{DA} + MD_{AB} \times Lat_{AB})$$

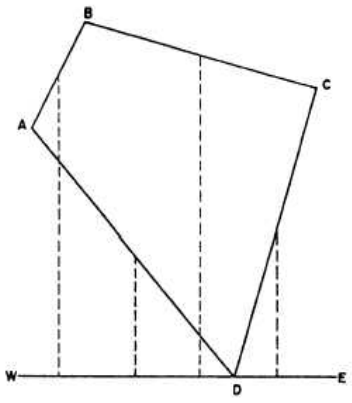
$$= -(MD_{BC} \times Lat_{BC} + MD_{CD} \times Lat_{CD} + MD_{DA} \times Lat_{DA} + MD_{AB} \times Lat_{AB})$$

$$2 \times \text{พื้นที่ ABCD} = 2 \times \left|(MD_{BC} \times Lat_{BC} + MD_{CD} \times Lat_{CD} + MD_{DA} \times Lat_{DA} + MD_{AB} \times Lat_{AB})\right|$$

$$= \left|(DMD_{BC} \times Lat_{BC} + DMD_{CD} \times Lat_{CD} + DMD_{DA} \times Lat_{DA} + DMD_{AB} \times Lat_{AB})\right|$$

$$= \left|\Sigma\ (DMD \times Lat)\right|$$

3.3. การคำนวณพื้นที่จากสองเท่าระยะขนาน (Double Parallel Distance, DPD) ระยะขนานคือ ระยะตั้งฉากจากจุดกึ่งกลางของด้านรูปเหลี่ยมถึงแกนขนาน



การหา DPD ของเส้นวงรอบและพื้นที่สรุปดังนี้

DPD เส้นแรก = Lat เส้นแรก

DPD เส้นใดๆ = DPD เส้นก่อน + Lat เส้นก่อน + Lat เส้นนั้น

การหาค่า DPD และพื้นที่มีวิธีการเหมือนกับการหาพื้นที่ด้วย DMD ทุกประการ

2 เท่าพื้นที่ = $\left|\Sigma\ (DPD \times Dep)\right|$

ตัวอย่างที่ 8.4

จากข้อมูลการปรับแก้งานวงรอบ ได้ค่า *Lattitude, Departure* หลังการปรับแก้และค่าพิกัดของหมุดวงรอบดังตาราง จงหาพื้นที่ของวงรอบ

จุด	*Lat*	*Dep*	*N*	*E*
A			*200.00*	*300.00*
B	*78.02*	*-38.30*	*278.02*	*261.70*
C	*-46.80*	*-180.04*	*231.22*	*81.66*
D	*-211.55*	*58.74*	*19.67*	*140.40*
E	*61.86*	*1.85*	*81.53*	*142.25*
A	*118.47*	*157.75*	*200.00*	*300.00*
	0.00	*0.00*		

ก*)* คำนวณจากค่าพิกัด *N,E*

จุด	*N*	*E*	↘	↗
A	*200.00*	*300.00*		*83406.00*
B	*278.02*	*261.70*	*52340.00*	*60510.28*
C	*231.22*	*81.66*	*22703.11*	*1606.25*
D	*19.67*	*140.40*	*32463.29*	*11446.81*
E	*81.53*	*142.25*	*2798.06*	*28450.00*
A	*200.00*	*300.00*	*24459.00*	
			134763.46	*185419.34*

พื้นที่วงรอบ = $\frac{1}{2}$ *|(134763.46 - 185419.34)|* = *25327.94* ตารางเมตร

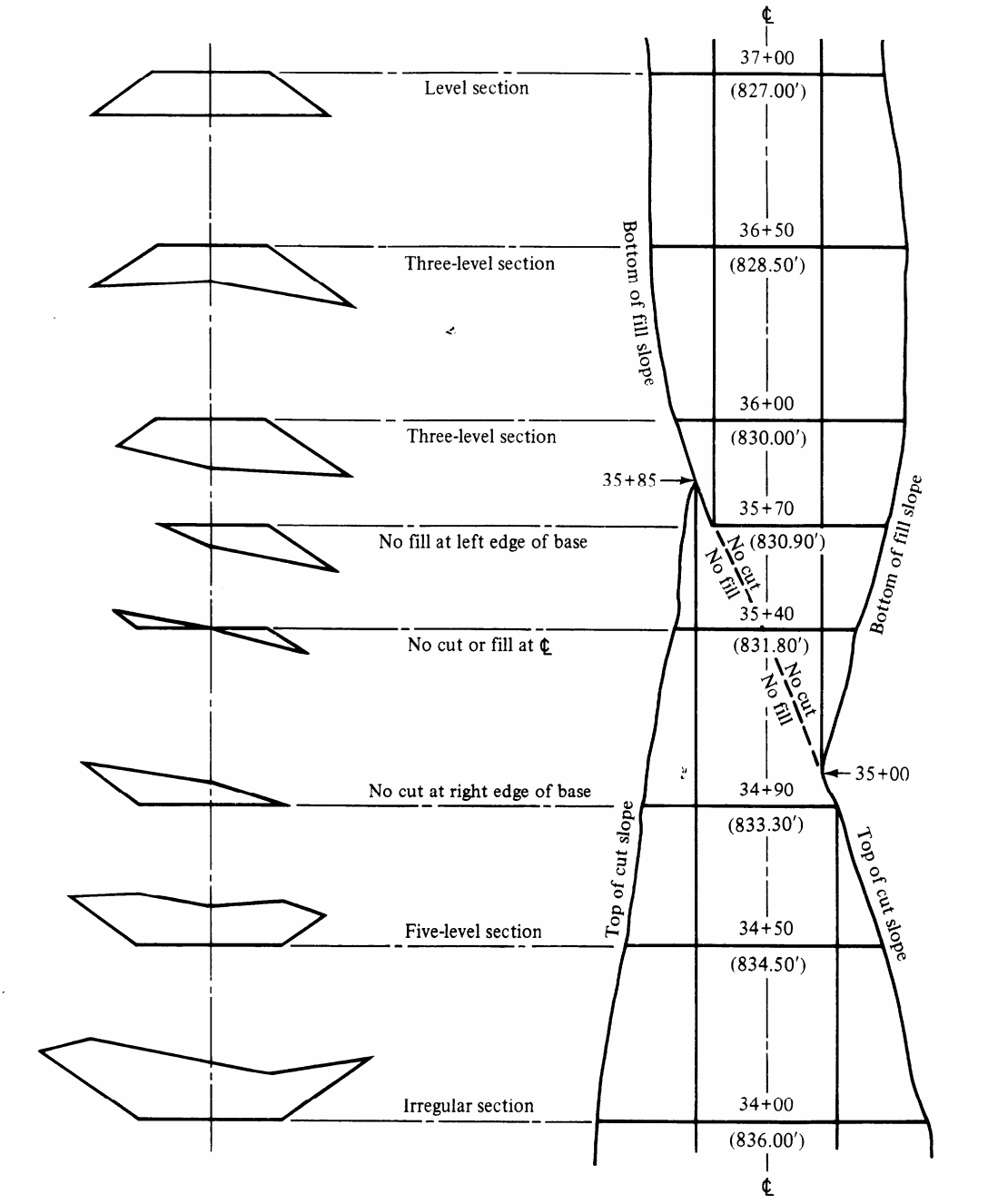
ข*)* คำนวณจากค่า *DMD* และ *DPD*

เส้น	*Lat*	*Dep*	*DMD*	*DMDxLat*	*DPD*	*DPDxDep*
AB	*78.02*	*-38.30*	*-38.30*	*-2988.17*	*78.02*	*-2988.17*
BC	*-46.80*	*-180.04*	*-256.64*	*12010.75*	*109.24*	*-19667.57*
CD	*-211.55*	*58.74*	*-377.94*	*79953.21*	*-149.11*	*-8758.72*
DE	*61.86*	*1.85*	*-317.35*	*-19631.27*	*-298.80*	*-552.78*
EA	*118.47*	*157.75*	*-157.75*	*-18688.64*	*-118.47*	*-18688.64*
	0.00	*0.00*		*50655.88*		*-50655.88*

พื้นที่วงรอบ = $\frac{1}{2}$ *(50655.88)* = *25327.94* ตารางเมตร

4. การหาพื้นที่รูปตัด

การหาพื้นที่ของรูปตัดโดยทั่วไปมีจุดประสงค์เพื่อหาปริมาตรงานดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานก่อสร้างทางต้องคำนวณปริมาตรงานดินขุดหรือดินถมเพื่อการคิดราคางานหรือการจ่ายค่าก่อสร้าง ทำให้ต้องรังวัดรูปตัดขวางแนวทางจำนวนมาก เช่น รังวัดรูปตัดขวางทุกๆ 25 เมตรตลอดแนวทาง จากข้อมูลการรังวัดทำให้รู้ลักษณะของพื้นดินและแบบก่อสร้างจะกำหนดรูปตัดถนนที่ต้องการ ทำให้สามารถหาได้ว่าแต่ละช่วงของรูปตัดต้องทำงานขุดหรือถมดิน และพื้นที่รูปตัดของงานดินนั้นมีขนาดเท่าใด อันนำไปสู่การหาปริมาตรงานดิน รูปตัดงานถนนมีหลายรูปแบบอาจเป็น รูปตัดงานถม รูปตัดงานขุด และรูปตัดที่มีทั้งงานขุดงานถม



รูปที่ 8.6 รูปหน้าตัดงานดินของการก่อสร้างถนน

การหาพื้นที่รูปตัดทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้มากคือ

1) นำข้อมูลการรังวัดเขียนรูปตัดลักษณะพื้นดินแล้วซ้อนทับด้วยรูปตัดถนนตามแบบก่อสร้าง ทำให้ได้รูปตัดของงานดิน และหาพื้นที่รูปตัดงานดินตามวิธีที่ในหัวข้อ 2 คือ

ก*)* ใช้เครื่องวัดพื้นที่วัดรูปตัดของงานดิน

ข*)* ใช้แผ่นใสเส้นขนานทาบรูปตัดของงานดิน

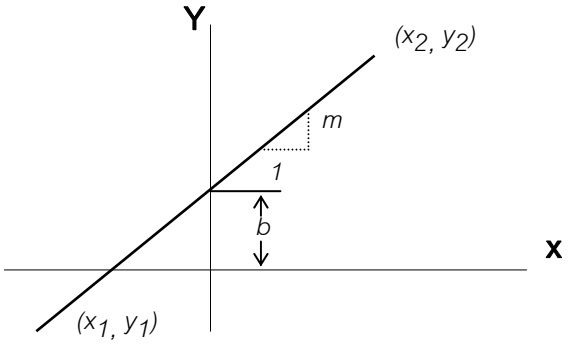
ค*)* ใช้วิธีวัดระยะตั้งฉากบนรูปตัดที่เขียนขึ้นโดยแบ่งรูปตัดงานดินเป็นช่อง ๆแล้วคำนวณพื้นที่จากระยะตั้งฉากเหมือนกับวิธีหัวข้อ 1.2 แต่เป็นการวัดระยะตั้งฉากบนแบบเท่านั้น

2) คำนวณด้วยสูตรทางเรขาคณิต สูตรการคำนวณจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับรูปทรงของรูปตัด ฉะนั้นจะมีสูตรได้มากมาย จึงไม่แนะนำให้จำสูตรไปใช้เพราะมีโอกาสที่นำไปใช้ผิดมาก แต่ขอแนะนำหลักการสำหรับการคำนวณเพื่อหาพื้นที่รูปตัดดังนี้

ก*)* สมการพื้นฐานที่ใช้คำนวณเป็นสมการเส้นตรง คือ

General line equation $y = m x + b$

Two-point line equation $(y_2-y_1)x - (x_2-x_1)y = x_1y_2 - x_2y_1$



ข*)* ใส่แกนอ้างอิงที่จุดตัดของแนวระดับศูนย์ กับแนวกลางถนน

ค*)* ใส่ค่าพิกัด (x,y) ที่จุดตัดหรือจุดมุมทั้งหมด

ง*)* หาพิกัด (x,y) ของจุดตัดระหว่างผิวดินเดิมกับส่วนของถนนทุกจุด โดยตั้งสมการจากสมการเส้นตรงในข้อ ก)

จ*)* หาพื้นที่จากค่าพิกัด x,y หรือคำนวณโดยแบ่งเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตก็ได้

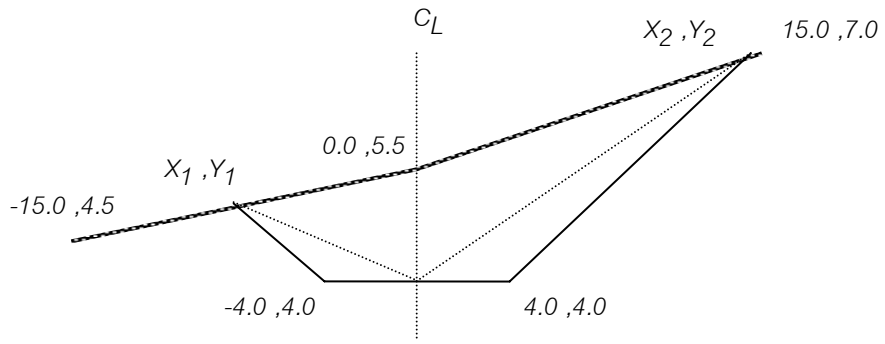
ตัวอย่างที่ 8.5 จงคำนวณพื้นที่รูปตัดขวางจากข้อมูลการทำระดับดังนี้

ระยะจากแนวศูนย์กลาง	-15	0	15
ค่าระดับ	4.5	5.5	7.0

กำหนดให้ ความกว้างของผิวถนน = 8.0 เมตร

ระดับของผิวถนน = 4.0 เมตร

ความลาดด้านข้าง = 2:1 (ราบ:ดิ่ง)



สร้างสมการจาก *General line equation* $y = mx + b$

$$Y_1 = \frac{1}{15} X_1 + 5.5 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$Y_1 = -\frac{1}{2} X_1 + 2.0 \quad \cdots\cdots (2)$$

จากสมการ *(1)* และ *(2)* แก้สมการได้ $X1 = -6.176$ และ $Y1 = 5.088$

$$Y_2 = \frac{1.5}{15} X_2 + 5.5 \quad \cdots\cdots (3)$$

$$Y_2 = \frac{1}{2} X_2 + 2.0 \quad \cdots\cdots (4)$$

จากสมการ *(3)* และ *(4)* แก้สมการได้ $X2 = 8.75$ และ $Y2 = 6.375$

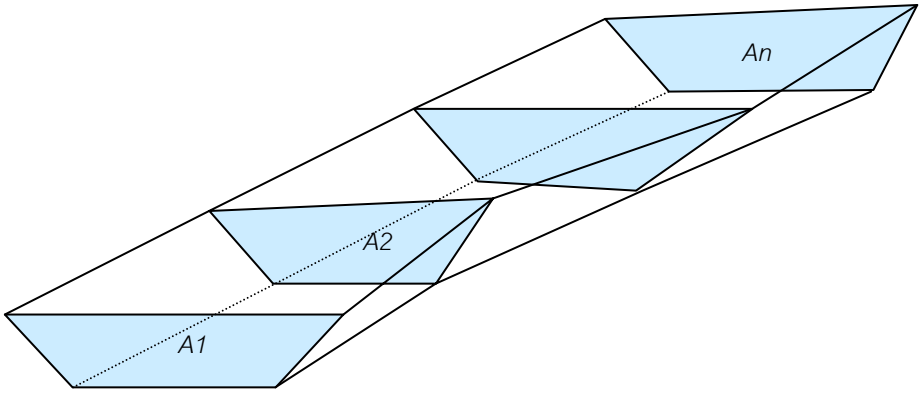
พื้นที่รูปตัด $= \frac{1}{2}(4x1.088 + 1.5x6.176 + 1.5x8.75 + 4x2.375)$

$= \frac{1}{2} \times 36.24$

$= 18.12$ ตารางเมตร

5. การคำนวณหาปริมาตรจากรูปตัด

การหาพื้นที่หน้าตัดมักมีจุดประสงค์หลักเพื่อหาปริมาตรงานดิน ฉะนั้นเมื่อต้องการหาปริมาตร จะรังวัดหาพื้นที่หน้าตัดที่ห่างกันสม่ำเสมอเป็นช่วงๆ หรือระยะระหว่างรูปตัดเท่ากันตลอด



ถ้าให้ A1, A2, A3,.. An เป็น พื้นที่รูปตัดของแต่ละช่วงทั้งหมด n รูป

และ d เป็น ระยะช่วงห่างของรูปตัดแต่ละรูป

5.1. วิธีพื้นที่เฉลี่ย *(Average Area)* วิธีนี้ใช้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดทุกรูป เป็นตัวแทนของรูปหน้าตัด ดังนั้นปริมาตรจะเท่ากับพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยคูณกับระยะทางทั้งหมด (L)

$$V = \frac{(A1 + A2 + A3 + ... + An)}{n} \times L$$

5.2. วิธีพื้นที่หัวท้ายเฉลี่ย *(Average End Area)* วิธีนี้คล้ายกับวิธีที่ 1. แต่แทนที่จะเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดจะเฉลี่ยเพียงพื้นที่รูปตัดที่อยู่ถัดกัน คือเป็นการหาปริมาตรของแต่ละช่วงพื้นที่หน้าตัดด้วยวิธีพื้นที่เฉลี่ย แล้วนำปริมาตรแต่ละรูปมารวมกันเป็นปริมาตรทั้งหมด

$$V1 = \left(\frac{A1 + A2}{2}\right) \times d$$

$$V = \left(\frac{A1 + An}{2} + A2 + A3 + ... + A_{n-1}\right) \times d$$

5.3. วิธีสูตรพิสมอย *(Prismoidal Formular)* วิธีนี้เป็นการหาปริมาตรของสองช่วงรูปตัด หรือมีพื้นที่หน้าตัด 3 รูป แล้วนำปริมาตรที่ได้แต่ละสองช่วงมารวมกันเป็นปริมาตรทั้งหมด ดังนั้นเพื่อให้การคำนวณมีพื้นที่หน้าตัดจำนวนลงตัวจะต้องรังวัดรูปตัดให้มีจำนวนรูปเป็นเลขคี่ และมีระยะระหว่างรูปตัดเท่ากันตลอด

$$V1 + V2 = \frac{d}{3} \times (A1 + 4A2 + A3)$$

$$V = \frac{d}{3} \times (A1 + 4\sum A'' + 2\sum A' + An)$$

A" คือ พื้นที่หน้าตัดคู่ (2, 4, 6, ..ถึง n-1)

A' คือ พื้นที่หน้าตัดคี่ (3, 5, 7, ..ถึง n-2)

ตัวอย่างที่ 8.6 จงคำนวนปริมาตรของดินจากข้อมูลพื้นที่รูปตัดขวางที่ระยะต่าง ๆทุก *25* เมตรดังนี้

ระยะทาง *m.*	*0*	*25*	*50*	*75*	*100*	*125*	*150*
พื้นที่รูปตัดขวาง *m2*	*10.22*	*39.50*	*59.49*	*70.83*	*147.79*	*166.38*	*241.67*

ก*)* หาปริมาตรโดยวิธีพื้นที่เฉลี่ย

$$\text{ปริมาตร} = \frac{(10.22 + 39.50 + 59.49 + 70.83 + 147.79 + 166.38 + 241.67)}{7} \times 150$$

$$= 15768.86 \quad \text{ลูกบาศก์เมตร}$$

ข*)* หาปริมาตรโดยวิธีพื้นที่หัวท้ายเฉลี่ย

$$\text{ปริมาตร} = \left(\frac{10.22 + 241.67}{2} + 39.50+59.49+70.83+147.79+166.38\right) \times 25$$

$$= 15248.38 \quad \text{ลูกบาศก์เมตร}$$

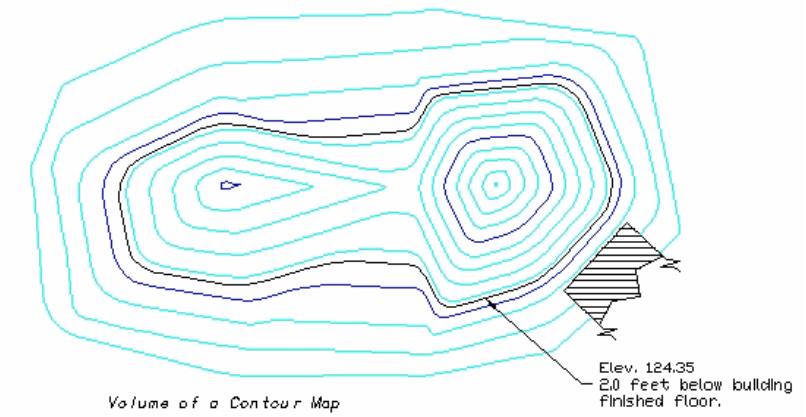
ค*)* หาปริมาตรโดยวิธีใช้สูตรพิสมอย

$$\text{ปริมาตร} = \frac{25}{3} x[10.22+4(39.50+70.83+166.38)+2(59.49+147.79)+241.67]$$

$$= 14777.42 \quad \text{ลูกบาศก์เมตร}$$

6. การหาปริมาตรจากเส้นชั้นความสูง

แผนที่เส้นชั้นความสูงสามารถนำคำนวณหาปริมาตรได้เช่นเดียวกับการคำนวณปริมาตรจากรูปตัด แต่เป็นรูปตัดในแนวราบไม่ใช่รูปตัดแนวดิ่งหรือรูปตัดขวาง เป็นรูปตัดที่ล้อมรอบด้วยเส้นชั้นความสูงแต่ละเส้น โดยหาพื้นที่ตามวิธีในหัวข้อ 2 แล้วหาปริมาตรตามวิธีในหัวข้อ 5




```
Volume of a Contour Map
Date Prepared: 11/2/1996
Drawing Name:E:\ACAD12D\DWG\CVOLUME
Volume 116.00 to 117.00 =          297.50 cu.ft.
Volume 117.00 to 118.00 =        1,370.35 cu.ft.
Volume 118.00 to 119.00 =        3,418.40 cu.ft.
Volume 119.00 to 120.00 =        6,451.25 cu.ft.
Volume 120.00 to 121.00 =       11,899.10 cu.ft.
Volume 121.00 to 122.00 =       21,603.53 cu.ft.
Volume 122.00 to 123.00 =       36,015.28 cu.ft.
Volume 123.00 to 124.00 =       54,091.76 cu.ft.
Volume 124.00 to 124.35 =       23,643.69 cu.ft.
                Total Volume =  158,820.88 Cu.Ft.
                                5,882.25 Cu.Yd.
                                    3.65 Acre Ft.
```

รูปที่ 8.7 แสดงการหาปริมาตรจากเส้นชั้นความสูง

ตัวอย่างที่ 8.7 การออกแบบอ่างเก็บน้ำความจุ $3.54x10^6$ ลูกบาศก์เมตร เพื่อใช้ในการเกษตร ถ้าออกแบบให้ระดับน้ำใช้ได้ต่ำสุดที่ 210 เมตร จงหาระดับน้ำสูงสุด จากข้อมูลการวัดพื้นที่ที่เส้นชั้นความสูงที่ได้

ค่าเส้นชั้นความสูง 230 227 224 221 218 215 212 209

พื้นที่ (ตร.ม.) 290410 274900 229840 205130 178560 163420 118540 48310

ประมาณพื้นที่ที่ระดับ 210 = $48310 + \frac{1}{3} x (118540-48310) = 71720$

ระดับ	พื้นที่	พื้นที่เฉลี่ย	ค่าต่างระดับ	ปริมาตร	V สะสม
210	71720	95130	2	190260	---
212	118540	140980	3	422940	190260
215	163420	170990	3	512970	613200
218	178560	191845	3	575535	1126170
221	205130	217485	3	652455	1701705
224	229840	252370	3	757110	2354160
227	274900	282655	3	847965	3111270
230	290410				3959235

ให้ค่าระดับที่ต้องการ = $230 - y$

พื้นที่ที่ระดับ (230-y) = $290410 - (290410-274900)x \frac{y}{3}$

= $290410 - 5170y$

ปริมาตรส่วนเกิน = $\frac{290410 + (290410-5170y)}{2} \times y$

(3959235-3540000) = $290410y - 2585y^2$

$2585y^2-290410y+419235 = 0$

$y = \frac{290410 \pm \sqrt{290410^2 - 4 \times 2585 \times 419235}}{2 \times 2585}$

= 1.46

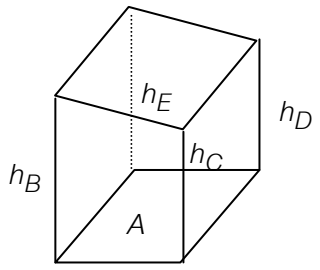
ค่าระดับน้ำสูงสุด = 230 - 1.46 = 228.54 เมตร

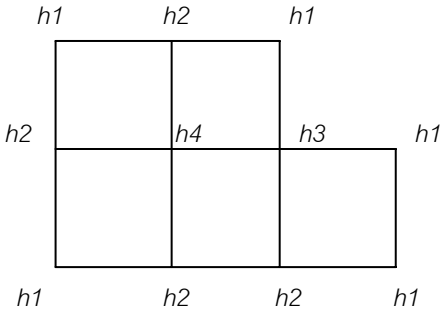
7. การคำนวณปริมาตรจากจุดความสูง (Spot Level)

การหาปริมาตรของดินที่ขุดหรือถมเป็นจำนวนมากๆหรือบริเวณกว้างใหญ่ เช่น บ่อดินยืม *(Borrow Pit)* ในงานก่อสร้างทาง วิธีการหาปริมาตรที่เหมาะสมคือการทำระดับของจุดที่กำหนดขึ้นและหาปริมาตรจากค่าระดับของจุดเหล่านี้ ดังนั้นงานสนามประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1) แบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีขนาดเท่าๆกัน
2) ทำระดับหาระดับผิวดินที่จุดมุมของรูปเหลี่ยมเหล่านั้น

การคำนวณปริมาตรของดิน จะคิดว่าแท่งดินที่มีรูปหน้าตัดเป็นรูปเหลี่ยมแบบต่างๆนั้นเป็นแท่งปริซึมที่มีหน้าตัดหัวท้ายไม่ขนานกัน ปริมาตรแท่งดินเท่ากับพื้นที่หน้าตัดตามแนวราบคูณด้วยความสูงเฉลี่ยของดินที่มุมของรูปหน้าตัดนั้น วิธีแบ่งพื้นที่ที่นิยมทำคือแบ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยม





$$\text{ปริมาตรแท่งดิน} = \frac{h_B + h_C + h_D + h_E}{4} \times A$$

$$\text{ปริมาตรบ่อดิน} = \frac{h_1 + 2\sum h_2 + 3\sum h_3 + 4\sum h_4}{4} \times A$$

h1 คือ ความสูงของจุดที่มุมตารางเดี่ยว

h2 คือ ความสูงของจุดที่มีตารางร่วม 2 หน่วย

h3 คือ ความสูงของจุดที่มีตารางร่วม 3 หน่วย

h4 คือ ความสูงของจุดที่มีตารางร่วม 4 หน่วย

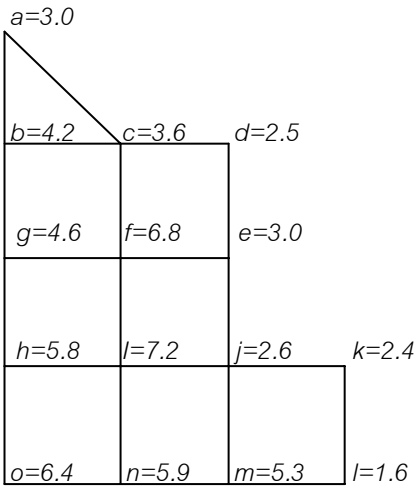
A คือ พื้นที่ของ 1 หน่วยตาราง

หรือ ปริมาตรบ่อดิน $= \frac{\sum nh}{4} \times A$ (เมื่อ n คือจำนวนตารางที่ความสูง h)

การแบ่งพื้นที่เป็นรูปต่างๆบนพื้นดินจะให้มีขนาดเท่าไร ขึ้นกับความละเอียดหรือความถูกต้องของงานที่ต้องการและขึ้นกับลักษณะของผิวดินด้วย โดยทั่วไปพื้นที่ที่จะหาปริมาตรของดินอาจจะมีรูปร่างทางราบไม่เป็นรูปเรขาคณิตแต่จะคดโค้ง ดังนั้นในการแบ่งพื้นที่จะแบ่งเป็นตารางสี่เหลี่ยมภายในพื้นที่ และส่วนที่ไม่เต็มหน่วยตรงแนวเขต อาจคิดว่าพื้นที่เหล่านั้นมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูก็ได้ การคำนวณปริมาตรของแท่งดินเหล่านี้แยกคิดต่างหากแล้วนำไปรวมภายหลัง

ตัวอย่างที่ 8.8 จากจุดความสูงของบ่อดินยึมตามรูป ถ้าต้องการขุดดินถึงระดับ +0.0 เมตร โดยมีผนังทุกด้าน เป็นระนาบดิ่ง จงหาปริมาตรดินที่ต้องขุดออก

h1	*h2*	*h3*	*h4*
b=4.2	*c=3.6*	*j=2.6*	*f=6.8*
o=6.4	*g=4.6*		*i=7.2*
l=1.6	*h=5.8*		
k=2.4	*n=5.9*		
d=2.5	*m=5.3*		
	e=3.0		
17.1	*28.2*	*2.6*	*14.0*



ปริมาตรส่วนเต็มหน่วย $= \frac{17.1 + 2x28.2 + 3x2.6 + 4x14.0}{4}$ *x(20x20)*

= 13730.0 ลบ.ม.

ปริมาตรส่น *abc* $= \frac{3.0 + 4.2 + 3.6}{3} \times \frac{20 \times 20}{2}$ *= 720* ลบม.

ปริมาตรรวม *= 13730 + 720* *= 14450* ลูกบาศก์เมตร