

การสำรวจรังวัด ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้



วิชัย เยี่ยงวีรชน

การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้

การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้

วิชัย เยี่ยงวีรชน

 **สำนักพิมพ์**
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2566

วิชย เยี่ยงวีรชน

การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ / วิชย เยี่ยงวีรชน

1. การสำรวจ. 2. การรังวัด.

526.9

ISBN (e-book) 978-974-03-4225-0

สปพจ. 910/9



สรรคุณคำวิชาการ สู้สังคม

Knowledge to All

www.cupress.chula.ac.th

สิทธิในการผลิตและพิมพ์หนังสือเล่มนี้เป็นของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแต่ผู้เดียว

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดทำโดย สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ครั้งที่ 9 พ.ศ. 2566

www.cupress.chula.ac.th

โทร. 0-2218-3562-3

บรรณาธิการอำนวยการ : ศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย นางอรทัย นันทนาดิษฐ์

กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ : ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนถ บุนนาค รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธ์ เดชะคุปต์

รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ชำเซ็น

พิสูจน์อักษร : ทศนีย์ ผิวขำ

ออกแบบปกและรูปเล่ม : รองศาสตราจารย์วิชย เยี่ยงวีรชน

สั่งซื้อได้ที่ : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

<http://www.chulabook.com>

โทร. 08-6323-3703-4

customer@cubook.chula.ac.th, info@cubook.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

คำนำ

หนังสือการสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้เล่มนี้ได้ปรับปรุงและเรียบเรียงขึ้นใหม่จากหนังสือการสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้เดิม เพื่อใช้เป็นหนังสือเรียนขั้นพื้นฐานในวิชาการสำรวจตามเนื้อหาที่สอนตามหลักสูตรเป็นหลัก ตั้งแต่การรังวัดบนระนาบ การรังวัดแผนที่ภูมิประเทศ การฉายแผนที่ งานรังวัดดาวเทียม GNSS ซึ่งเนื้อหาในบทงานรังวัดดาวเทียมด้วย GNSS ได้ปรับปรุงเพิ่มเติมให้ทันสมัยจากเล่มเดิม เนื้อหาของหนังสือได้มีการเรียบเรียงตามความเหมาะสมสำหรับการสอน ประกอบกับเนื้อหาตามหลักสูตรที่พึงเรียนทางด้านการสำรวจพื้นฐาน โดยได้มีการจัดลำดับเนื้อหา คือ การเน้นความเข้าใจเรื่องทฤษฎีการวัดและความคลาดเคลื่อน เครื่องมือและปริมาณที่วัดได้จากเครื่องมือประเภทต่าง ๆ เช่น การวัดมุม การวัดระยะ เป็นต้น แล้วจึงกล่าวถึงการนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ การระดับ การเขียนเส้นชั้นความสูง การรังวัดวงรอบ การสำรวจแผนที่ภูมิประเทศ ระบบพิกัด UTM และการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS ฉะนั้นเนื้อหาบางส่วนจึงปรากฏในที่แตกต่างกันไปจากเล่มเดิมเล็กน้อย ด้วยการนำเอาเนื้อหาการเขียนเส้นชั้นความสูงมาต่อจากเนื้อหาการระดับ เพื่อให้เห็นการใช้ประโยชน์จากงานระดับเกี่ยวกับการแสดงผลทางความสูงด้วยเส้นชั้นความสูง แทนที่จะไปกล่าวในช่วงท้าย ทำให้ขาดความต่อเนื่อง

วิชัย เยี่ยงวีรชน

กุมภาพันธ์ 2566

สารบัญ

คำนำ

สารบัญ

ก

บทที่ 1 บทนำการสำรวจ

1

1.1 นิยามการสำรวจ

1

1.2 ประวัติการสำรวจ

2

1.3 ประเภทการสำรวจ

3

1.4 ชั้นความถูกต้องงานสำรวจ

4

1.5 สันฐานโลก

5

1.6 การวัดในงานสำรวจ

7

1.7 หน่วยการวัด

8

1.8 เลขนัยสำคัญ

11

1.9 การประมาณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือ

13

1.10 การปิดเศษตัวเลข

14

1.11 แบบฝึกหัด

14

บทที่ 2 ทฤษฎีการวัดและความคลาดเคลื่อน

15

2.1 การวัดและมาตรฐาน

15

2.2 การวัดโดยตรงและโดยอ้อม

15

2.3 ความคลาดเคลื่อนของการวัด

16

2.4 ค่าเฉลี่ย

20

2.5 ทฤษฎีการวัด

21

2.6 องค์ประกอบการวัด

22

2.7 ความแม่นยำและความถูกต้องของการวัด

22

2.8 ธรรมชาติทางสถิติของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

23

2.9 การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสุ่ม

26

2.10 การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสุ่มกรณีต่างๆ แบบง่าย

27

2.11 นัยของการวัด

29

2.12 แบบฝึกหัด

31

บทที่ 3 การวัดระยะทาง	33
3.1 ค่าความถูกต้องของการวัดระยะทาง	33
3.2 วิธีการวัดระยะ	34
3.3 ประเภทของเทป	37
3.4 การวัดระยะด้วยเทป	38
3.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะด้วยเทป	43
3.6 การตรวจแก้ความคลาดเคลื่อนมีระบบของการวัดระยะด้วยเทป	43
3.7 ความคลาดเคลื่อนสุ่มในการวัดระยะด้วยเทป	48
3.8 สรุปความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัดระยะด้วยเทป	49
3.9 การใช้เทปในงานรังวัด	49
3.10 การรังวัดแผนที่ด้วยเทป	51
3.11 เครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์	54
3.12 ประเภทเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์	55
3.13 หลักการทำงานของเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์	58
3.14 ความคลาดเคลื่อนมีระบบของเครื่องวัดระยะ	60
3.15 การวัดระยะของเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์	64
3.16 การตรวจแก้ระยะเนื่องจากสภาพอากาศ	65
3.17 การประเมินความคลาดเคลื่อนการวัดระยะด้วยเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์	68
3.18 การประเมินความแม่นยำการวัดมุมตั้ง และความสูง สำหรับการทอนระยะราบ	69
3.19 แบบฝึกหัด	71
 บทที่ 4 การระดับ	 73
4.1 วิธีการหาค่าระดับความสูง	74
4.2 อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการหาค่าระดับด้วยกล้องระดับ	76
4.3 กล้องระดับ	77
4.4 ส่วนประกอบกล้องระดับ	77
4.5 การปรับระดับกล้อง	80
4.6 การอ่านไม้ระดับ	81
4.7 การหาค่าระดับความสูงด้วยกล้องระดับ	83
4.8 การระดับโดยวิธีหาค่าต่างระดับ	84
4.9 ข้อกำหนดชิ้นงานระดับ	86

4.10 การจดบันทึกข้อมูลสนาม	90
4.11 สภาวะกล้องระดับและการวัดสอบ	91
4.12 ผลกระทบการรังวัดระดับจากแนวเล็งเอียง	95
4.13 ความคลาดเคลื่อนในงานระดับ	96
4.14 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในงานระดับ	97
4.15 ข้อระมัดระวังในการทำงานระดับ	98
4.16 ความโค้งของโลกและการหักเหของแสง	98
4.17 การประเมินความคลาดเคลื่อนสุ่มของการรังวัดระดับ	100
4.18 การประเมินความคลาดเคลื่อนของการรังวัดค่าต่างระดับ	102
4.19 การรังวัดระดับจุดต่างๆ	105
4.20 การประยุกต์ใช้งานระดับ	106
4.21 การรังวัดรูปตัดตามแนว	107
4.22 การรังวัดรูปตัดขวาง	109
4.23 การรังวัดไม้ระดับกลับหัว	111
4.24 การคำนวณปรับแก้ความคลาดเคลื่อนงานระดับ	112
4.25 การระดับแบบสอบกลับ	114
4.26 กล้องระดับความละเอียดสูง	116
4.27 กล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	117
4.28 ประเภทกล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	117
4.29 หลักการทำงานกล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	118
4.30 การวัดสอบแนวเล็งกล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	120
4.31 คุณสมบัติทั่วไปกล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	120
4.32 การประเมินความคลาดเคลื่อนการวัดระดับด้วยกล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	121
4.33 ข้อแนะนำในการรังวัดระดับด้วยกล้องระดับอิเล็กทรอนิกส์	122
4.34 แบบฝึกหัด	122
บทที่ 5 เส้นชั้นความสูง	125
5.1 คำจำกัดความที่เกี่ยวข้อง	126
5.2 คุณลักษณะเส้นชั้นความสูง	126
5.3 ลักษณะเส้นชั้นความสูงตามภูมิประเทศต่างๆ	128
5.4 ลักษณะความลาดชัน	131

5.5 ค่าความลาดชัน	132
5.6 ประเภทเส้นชั้นความสูง	133
5.7 การกำหนดช่วงเส้นชั้นความสูง	134
5.8 การเขียนเส้นชั้นความสูง	134
5.9 การใช้ประโยชน์จากเส้นชั้นความสูง	137
5.10 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข	139
5.11 ชนิดข้อมูลจุดระดับความสูง	141
5.12 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข	142
5.13 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศชนิดตารางกริด	143
5.14 สมการโพลีโนเมียลที่ใช้ในการแสดงพื้นผิว	146
5.15 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศชนิดสามเหลี่ยม	147
5.16 การเขียนเส้นชั้นความสูงจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ	150
5.17 การปรับความเรียบมนของเส้นชั้นความสูง	152
5.18 ลักษณะสำคัญในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ	153
5.19 การบูรณา-การเส้น Break Lines บนแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศแบบ TIN	154
5.20 แบบฝึกหัด	155

บทที่ 6 มุม แบริงส์ และ แอซิมัท 159

6.1 ประเภทของการวัดมุม	159
6.2 การวัดมุมราบ	160
6.3 การวัดมุมตั้ง	161
6.4 ทิศของเส้น	162
6.5 ระบบการบอกทิศ	162
6.6 ความสัมพันธ์ทิศไปและกลับของเส้น	164
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศแบริงส์และแอซิมัท	165
6.8 การคำนวณทิศของเส้นจากค่ามุม	166
6.9 เข็มทิศ	169
6.10 ชนิดเข็มทิศ	170
6.11 มุมบ่ายเบนแม่เหล็ก	171
6.12 แรงดึงดูดท้องถิ่น	173
6.13 สาเหตุความคลาดเคลื่อนในการวัดด้วยเข็มทิศ	173

6.14 ระบบพิกัดบนระนาบและการคำนวณค่าพิกัด	174
6.15 แบบฝึกหัด	175
บทที่ 7 กล้องวัดมุมและโททอลสเตชัน	177
7.1 ความเข้าใจในการวัดมุมราบ	177
7.2 กล้องที่โอโดไลต์	178
7.3 การตั้งกล้องที่โอโดไลต์	180
7.4 การส่องกล้องที่โอโดไลต์	182
7.5 ตำแหน่งกล้องสำหรับการวัดทิศทาง	182
7.6 การวัดมุมราบ	184
7.7 การวัดมุมตั้ง	186
7.8 สภาวะทางเรขาคณิตของกล้องวัดมุม	186
7.9 การวัดสอบสภาวะกล้องวัดมุม	189
7.10 ความคลาดเคลื่อนของการวัดมุม	195
7.11 กล้องวัดมุมอิเล็กทรอนิกส์	195
7.12 ตำแหน่งการวัดทิศทางกล้องวัดมุมอิเล็กทรอนิกส์	198
7.13 กล้องโททอลสเตชัน	199
7.14 ประเภทของกล้องโททอลสเตชัน	199
7.15 การวัดสอบกล้องโททอลสเตชัน	203
7.16 ตัวชี้วัดความเอียงกล้องชนิดสองแกน	203
7.17 ความถูกต้องในการวัดมุม	205
7.18 โปรแกรมพื้นฐานในกล้องโททอลสเตชัน	206
7.19 โปรแกรมการรังวัดอื่น ๆ	208
7.20 ข้อควรปฏิบัติในการใช้กล้องโททอลสเตชัน	209
7.21 การรังวัดอิเล็กทรอนิกส์แทลลิอิมิตรี	209
7.22 ค่าความถูกต้องในการวัดมุม	211
7.23 ความคลาดเคลื่อนมุมจากการอ่านจานองศา	211
7.24 ความคลาดเคลื่อนมุมจากการเล็งเป้า	213
7.25 ความคลาดเคลื่อนมุมจากการอ่านจานองศาและเล็งเป้าของกล้องโททอลสเตชัน	214
7.26 ความคลาดเคลื่อนมุมจากการตั้งเป้า	214
7.27 ความคลาดเคลื่อนมุมจากการตั้งกล้อง	216

7.28 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการวัดมุม	216
7.29 การวัดระยะวิธีแทลิโอมิเทรี	218
7.30 การคำนวณค่าระดับจากการรังวัดสเตเดีย	220
7.31 การหาค่าคงตัวของกล้อง	221
7.32 ความถูกต้องของการวัดแบบสเตเดีย	221
7.33 การปฏิบัติงานสนาม	222
7.34 การรังวัดหาตำแหน่งพิกัดและความสูงด้วยวิธีการวัดมุม	223
7.35 การเล็งสกัดจากสองจุด	224
7.36 การเล็งสกัดย้อนจาก 3 จุด	226
7.37 ทฤษฎีงานระดับตรีโกณมิติ	229
7.38 การวัดมุมงานระดับตรีโกณมิติ	231
7.39 การคำนวณแก้ผลกระทบจากความโค้งผิวโลกและความหักเหของแสง	231
7.40 กรณีต่าง ๆ ของงานระดับตรีโกณมิติ	232
7.41 การวัดระดับตรีโกณมิติเพื่อหาความสูงของจุดที่เข้าไม่ถึง	236
7.42 การวัดระดับตรีโกณมิติด้วยกล้องโททอลสเตชัน	239
7.43 การใช้ประโยชน์กล้องวัดมุม	241
7.44 แบบฝึกหัด	244

บทที่ 8 งานวงรอบ 247

8.1 ความเข้าใจในการรังวัดพิกัดตำแหน่ง	247
8.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมและระยะทาง	248
8.3 การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด	249
8.4 ประเภทของวงรอบ	250
8.5 การวัดมุมวงรอบ	252
8.6 การเลือกสถานีวงรอบ	253
8.7 ข้อกำหนดงานรังวัดวงรอบ	254
8.8 การคำนวณตรวจแก้สภาวะทางมุมของวงรอบ	257
8.9 ระยะเหนือและระยะตะวันออก	259
8.10 การคำนวณตรวจสอบสภาวะทางระยะทางของวงรอบ	260
8.11 ความถูกต้องของงานวงรอบ	262
8.12 การคำนวณปรับแก้ความคลาดเคลื่อนบรรจบของวงรอบ	262

8.13 การคำนวณด้วยกฎซิมิทิส	263
8.14 การคำนวณด้วยกฎทรานซิด	268
8.15 การคำนวณระยะและทิศเส้นวงรอบ	271
8.16 สรุปขั้นตอนการคำนวณงานวงรอบ	272
8.17 การหาดำแหน่งผิดพลาดของงานวงรอบ	272
8.18 การคำนวณพื้นที่วงรอบปิด	273
8.19 ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะตะวันออกและระยะเหนือ	279
8.20 การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนค่าแอซิมัท	281
8.21 แบบฝึกหัด	281

บทที่ 9 การรังวัดแผนที่ภูมิประเทศ 283

9.1 รายละเอียดแผนที่ภูมิประเทศ	283
9.2 มาตรฐานแผนที่	284
9.3 ความถูกต้องแผนที่	285
9.4 ขั้นตอนการรังวัดแผนที่ภูมิประเทศ	289
9.5 การสำรวจสังเขป	289
9.6 การสำรวจรังวัดหมุดควบคุม	290
9.7 การสำรวจรังวัดเก็บรายละเอียด	294
9.8 การเขียนแผนที่ภูมิประเทศ	295
9.9 การตรวจสอบความถูกต้องข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศ	299
9.10 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน	299
9.11 รายงานการสำรวจรังวัดแผนที่ภูมิประเทศ	300
9.12 แบบฝึกหัด	301

บทที่ 10 พื้นที่และปริมาตร 303

10.1 การคำนวณหาพื้นที่	303
10.2 การคำนวณจากการนับตารางกริด	304
10.3 การคำนวณโดยใช้สูตรทางเรขาคณิตและตรีโกณมิติ	304
10.4 การคำนวณโดยใช้กฎพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู	306
10.5 การคำนวณพื้นที่โดยใช้กฎซิมป์สัน	307
10.6 การคำนวณจากค่าพิกัด	309

๗ การสำรวจรังวัด ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้

10.7 การคำนวณโดยใช้โปรแกรมช่วยเขียนแบบ	310
10.8 การใช้เครื่องวัดพื้นที่	310
10.9 การคำนวณปริมาตร	311
10.10 วิธีเฉลี่ยหน้าตัดทั้งหมด	310
10.11 วิธีเฉลี่ยหน้าตัดหัวท้าย	312
10.12 วิธีสูตรปริสมอยด์	313
10.13 ค่าแก้ปริสมอยด์	314
10.14 การคำนวณปริมาณงานดินตามแนวเส้นทาง	314
10.15 ผลกระทบของความโค้งที่มีต่อการคำนวณงานดิน	319
10.16 การคำนวณปริมาตรจากเส้นชั้นความสูง	321
10.17 การคำนวณปริมาตรจากข้อมูลตารางกริด	322
10.18 การคำนวณปริมาตรจากพื้นผิวแบบจำลองสามมิติแบบสามเหลี่ยม	322
10.19 เทคนิคการคำนวณปริมาตร TIN	323
10.20 แบบฝึกหัด	325

บทที่ 11 ระบบพิกัด UTM 327

11.1 ระบบพิกัด 2 มิติ	328
11.2 ระบบพิกัด 3 มิติ	329
11.3 ระบบพิกัดฉากขั้วโลก	330
11.4 ระบบพิกัดภูมิศาสตร์	330
11.5 ระบบพิกัดจีโอเดติก	332
11.6 ระบบพิกัดแผนที่	332
11.7 เส้นจีโอเดสิก	333
11.8 การฉายแผนที่	334
11.9 มาตรฐานและตัวคูณมาตรฐาน	335
11.10 การฉายแผนที่แบบคงรูป	335
11.11 ระบบพิกัด UTM	337
11.12 การแปลงพิกัดระหว่างระบบพิกัดฉาก UTM และระบบพิกัดจีโอเดติก	340
11.13 การแปลงพิกัดภูมิศาสตร์เป็นพิกัดฉาก UTM	341
11.14 การแปลงพิกัดฉาก UTM เป็นพิกัดภูมิศาสตร์	341
11.15 มุมสอบเมริเดียน	348

11.16 ตัวคูณมาตราส่วน	350
11.17 การคำนวณตัวคูณมาตราส่วนสำหรับเส้นยาว	352
11.18 การคำนวณค่าตรวจแก้ (t-T)	357
11.19 การคำนวณงานรังวัดโดยใช้ระบบพิกัดบนระนาบ	358
11.20 การคำนวณปัญหาตรงของงานรังวัดจีโอเดติก	358
11.21 การคำนวณปัญหาย้อนของงานรังวัดจีโอเดติก	361
11.22 การทอนระยะวัด	364
11.23 แบบฝึกหัด	367

บทที่ 12 การรังวัดดาวเทียม GNSS 369

12.1 ความเข้าใจเกี่ยวกับ GNSS	369
12.2 ระบบดาวเทียม GNSS	370
12.3 ระบบดาวเทียม GPS	371
12.4 ระบบดาวเทียม GLONASS	374
12.5 ระบบดาวเทียม GALILEO	378
12.6 ระบบดาวเทียม BEIDOU	381
12.7 ส่วนผู้ไ้	383
12.8 หลักเบื้องต้นการรังวัดดาวเทียม GNSS	384
12.9 การวัดระยะซุโดเรนจ์	387
12.10 ความคลาดเคลื่อนระยะซุโดเรนจ์	389
12.11 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS	391
12.12 เรขาคณิตดาวเทียม (Satellite Geometry)	392
12.13 ผลต่างค่าสังเกต (observable difference)	394
12.14 การประมวลผลพื้นฐาน	396
12.15 จำนวนเส้นฐานอิสระ	397
12.16 วิธีการรังวัดดาวเทียม GNSS	399
12.17 การวัดพิกัดแบบสัมบูรณ์	400
12.18 การวัดพิกัดแบบสัมพัทธ์	401
12.19 เทคนิค DGNSS ด้วยวิธีการวัดรหัส	402
12.20 เทคนิค DGNSS ด้วยวิธีการวัดเฟส	403
12.21 การรังวัดแบบสถิต	403

12.22 การรังวัดแบบจลน์	403
12.23 การรังวัดจุดเดียวความละเอียดสูงแบบทันทีทันใด	406
12.24 การรังวัดค่าระดับความสูงด้วย GNSS	408
12.25 ระบบพิกัดดาวเทียม	408
12.26 ลักษณะสมบัติค่าความถูกต้องเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม	410
12.27 ขั้นตอนการรังวัดพิกัดด้วยดาวเทียม GNSS ในงานสำรวจควบคุม	412
12.28 การสำรวจสังเขปเบื้องต้น	413
12.29 การออกแบบโครงข่ายสถานีหมุด GNSS	415
12.30 การวางแผนงานรังวัด GNSS	420
12.31 การรังวัดภาคสนาม	421
12.32 การประมวลผล	421
12.33 แบบฝึกหัด	423
บรรณานุกรม	425
ดัชนี	429

บทที่ 1

บทนำการสำรวจ (Introduction to Surveying)

1.1 นิยามการสำรวจ

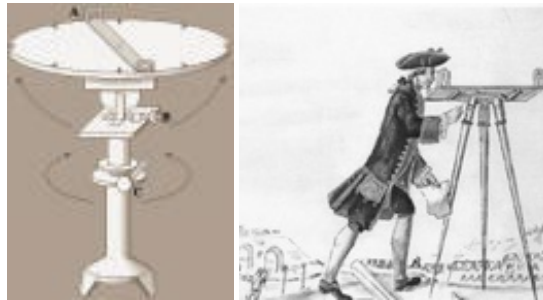
การสำรวจ (surveying) คือ ศาสตร์ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคนิคในการหาตำแหน่ง หรือการกำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ที่อยู่เหนือ บน และใต้ผิวโลก ด้วยวิธีการระบุตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ (relative positioning) หรือตำแหน่งเชิงสัมบูรณ์ (absolute positioning) โดยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าด้านต่าง ๆ ของการสำรวจในปัจจุบัน ทำให้การสำรวจเป็นศาสตร์ที่มีลักษณะพิเศษ มีความซับซ้อนและมีการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ มากมาย ตั้งแต่การได้มาซึ่งข้อมูลเชิงตำแหน่ง (spatial data) รวมไปถึงการบริหารจัดการข้อมูลประกอบต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับข้อมูลเชิงตำแหน่งนั้น ซึ่งข้อมูลประกอบเหล่านี้เรียกว่า ข้อมูลอรรถาธิบาย (attribute data) หรือข้อมูลชนิด ไม่มีตำแหน่ง (non-spatial data) ด้วยระบบภูมิสารสนเทศ (Geographic Information System, GIS) ดังนั้น จึงใช้ชื่อ “Geomatics” หรือ “Geospatial Engineering” แทนคำ “Surveying” ในปัจจุบัน

คำ Geomatics ยังมิได้มีการบัญญัติศัพท์ที่เหมาะสมขึ้นเป็นภาษาไทย จึงจะการใช้การทับศัพท์โดยตรงคือ “จีอเมติกส์” ซึ่งมีความหมายถึง การวัดสิ่งต่าง ๆ ของโลก (measurement of the earth) เป็นคำที่มีความหมายกว้างขวางรวมเอาแขนงวิชาการทุกด้านที่เกี่ยวข้องกับการวัดเพื่อจัดเก็บข้อมูล (data acquisitions) เช่น การสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (photogrammetry) การสำรวจระยะไกล (remote sensing) การรังวัดด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS) การสำรวจภาคพื้นดิน (ground surveys) การสำรวจชลศาสตร์ (hydrographic surveys) เป็นต้น

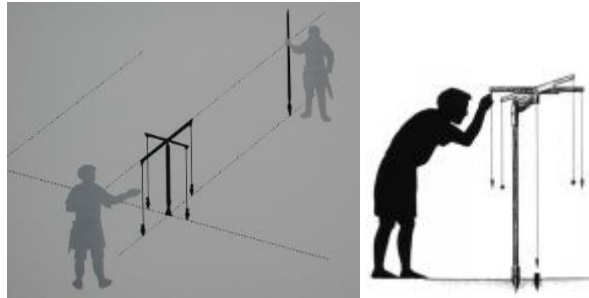
การสำรวจรังวัด หมายถึง การวัดหาค่าตำแหน่งพิกัดซึ่งเป็นค่าพิกัด 3 มิติ (x,y,h) หรืออย่างน้อยเป็นค่าพิกัดทางราบแบบ 2 มิติ (x,y) ซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลที่รังวัดได้ในสนาม ได้แก่ ทิศทาง ระยะระหว่างจุดสองจุดและมุมระหว่างทิศทางแต่ละทิศ โดยการใช้เครื่องมือและวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจรังวัดจะกล่าวในหนังสือเล่มนี้ อย่างไรก็ตาม ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทั้งเครื่องมือและวิธีการใหม่ ๆ เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ผู้ศึกษาต้องติดตามข่าวสารอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถเลือกใช้เครื่องมือและวิธีการที่เหมาะสมกับความถูกต้องที่ต้องการ

1.2 ประวัติการสำรวจ

เท่าที่ได้มีการบันทึกในประวัติศาสตร์ พบว่ามีการนำหลักการสำรวจมาใช้ตั้งแต่ 1,400 ปีก่อนคริสต์ศักราชโดยชาวอียิปต์ในการแบ่งแปลงที่ดินเพื่อการจัดเก็บภาษี และก่อนคริสต์ศักราช 120 ปี ชาวกรีกได้มีการคิดค้นศาสตร์ทางด้านตรีโกณมิติขึ้น เพื่อใช้ในการแบ่งแปลงที่ดินให้มีความถูกต้องที่ดีขึ้น มีการสร้างเครื่องมือสำรวจขึ้นมาชิ้นแรกเรียกว่า ไดออปทรา (dioptra, รูปที่ 1.1 (ก)) รวมทั้งได้มีการกำหนดขั้นตอนในการสำรวจ เพื่อใช้เป็นแนวทางเดียวกันในสมัยนั้น และได้มีการพัฒนาการสำรวจอย่างเห็นได้ชัดในสมัยโรมัน ผู้ที่เป็นที่รู้จักกันดีในต้นศตวรรษ คือ Frontinus ในยุคนี้ได้มีการผลิตเครื่องมือสำรวจสำหรับงานก่อสร้างที่เรียกว่า โกรมา (groma, รูปที่ 1.1 (ข))



(ก) Dioptra (ภาพจาก <http://www.catastro.gub.uy>)



(ข) Groma (ภาพจาก <http://mitglied.lycos.de>)

รูปที่ 1.1 เครื่องมือสำรวจ dioptra และ groma

ค.ศ. 1800 เป็นยุคที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านอุตสาหกรรม ความสำคัญของการกำหนดเขตที่ดิน การพัฒนาปรับปรุงระบบสาธารณูปโภค เช่น ทางรถไฟ คลองส่งน้ำ ถนน ฯลฯ มีมากขึ้น จึงทำให้การสำรวจมีบทบาทเพิ่มขึ้น และได้มีการพัฒนาเครื่องมือสำรวจที่ให้ความถูกต้องดีขึ้น ที่สำคัญได้มีการพัฒนาศาสตร์ของการสำรวจขึ้นเป็นระบบแบ่งเป็นการสำรวจบนพื้นระนาบ (plane surveying) และการสำรวจขั้นสูง (geodetic surveying) เกิดขึ้นด้วย

ปัจจุบันการสำรวจได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับทุก ๆ สิ่งใกล้ตัวมนุษย์มากขึ้น เนื่องมาจากข้อมูลส่วนใหญ่ที่ใช้กันในชีวิตประจำวันนั้น หากพิจารณาแล้วจะเห็นว่า จะมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่ต้องทราบตำแหน่งว่าอยู่ที่ใดด้วย ประกอบกับการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และสารสนเทศความสามารถทางด้านการประมวลผลภาพกราฟิก ทำให้ผลที่ได้จากการสำรวจได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง จากเดิมที่ใช้ในงานวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมเพื่อการออกแบบและก่อสร้างแล้ว ยังถูกนำไปใช้ในการบริหารจัดการทั้งในภาพรวมทุกระดับเป็นระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วย

1.3 ประเภทการสำรวจ

1.3.1 ลักษณะงานสำรวจ

โดยทั่วไปงานสำรวจจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามความละเอียดถูกต้องของการวัดและการคำนวณ คือ

1.3.1.1 งานสำรวจขั้นสูง (Geodetic Surveys)

เป็นงานสำรวจที่มีความละเอียดถูกต้องสูง และคำนึงถึงรูปร่างสัณฐานของโลกหรือความโค้งของผิวโลก (earth curvature) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จะใช้กับพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังนั้นการคำนวณต่าง ๆ จึงอยู่บนผิวโค้ง ซึ่งจะใช้ผิวทรงรี (ellipsoid) ที่เหมาะสมแทนสัณฐานของโลกในแต่ละพื้นที่

1.3.1.2 งานสำรวจบนพื้นระนาบ (Plane Surveys)

เป็นงานสำรวจที่ใช้สมมติฐานว่า พื้นที่ที่ทำการสำรวจเป็นพื้นระนาบ ดังนั้น การคำนวณจึงสามารถใช้สูตรทางเรขาคณิตบนพื้นระนาบในการคำนวณได้ ทำให้ง่ายต่อการทำงานโดยจะใช้กับพื้นที่ขนาดเล็กซึ่งความโค้งของผิวโลกไม่มีผลกระทบ

1.3.2 ชนิดงานสำรวจ

งานสำรวจยังสามารถแบ่งชนิดของงานได้ตามเฉพาะเรื่อง ๆ ได้ ดังนี้

1.3.2.1 งานสำรวจรังวัดควบคุม (Control Surveys)

คือ งานสำรวจเพื่อการจัดสร้างโครงข่ายหมุดหลักฐานทางราบ (horizontal control points) และหมุดหลักฐานทางตั้ง (vertical control points) หรือเป็นทั้งสองอย่าง (full control points) ใช้เป็นหมุดอ้างอิงสำหรับงานสำรวจอื่น ๆ

1.3.2.2 งานสำรวจภูมิประเทศ (Topographic Surveys)

คือ งานสำรวจเพื่อหาตำแหน่งของสิ่งต่าง ๆ บนผิวโลก ไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่ปรากฏในธรรมชาติหรือสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ รวมทั้งค่าระดับความสูงของพื้นที่ และนำมาเขียนเป็นแผนที่ภูมิประเทศ (topographic map)

1.3.2.3 งานสำรวจแปลงที่ดิน (Cadastral Surveys)

คือ งานสำรวจเพื่อกำหนดแนวเขต หรือขอบเขตที่ดิน เพื่อจัดทำกรรมสิทธิ์ที่ดินตามกฎหมาย

1.3.2.4 งานสำรวจทางวิศวกรรม (Engineering Surveys)

คือ งานสำรวจที่เกี่ยวข้องกับงานทางด้านวิศวกรรมโครงการต่าง ๆ ได้แก่ การวางผัง การให้แนว การวางตำแหน่งสิ่งปลูกสร้างตามการออกแบบ รวมทั้งการสำรวจเก็บรายละเอียดสภาพความเป็นจริงหลังจากการดำเนินงานก่อสร้างเสร็จแล้ว เพื่อจัดทำแบบขั้นสุดท้ายที่เรียกว่า “แบบก่อสร้าง” (as-built drawings)

1.3.2.5 การสำรวจชลศาสตร์ (Hydrographic Surveys)

คือ งานสำรวจขอบเขตชายฝั่งทะเล ความลึกท้องน้ำต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นแม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ ทะเลและมหาสมุทร เพื่อจัดทำแผนที่ร่องน้ำใช้ในการเดินเรือ

1.3.2.6 การสำรวจเส้นทาง (Route Surveys)

คือ งานสำรวจเพื่อการออกแบบก่อสร้างประเภทเส้นทางต่าง ๆ เช่น ถนน คลองส่งน้ำ อุโมงค์ การวางท่อ เป็นต้น

1.3.2.7 การสำรวจเหมืองแร่ (Mine Surveys)

คือ งานสำรวจสำหรับการทำเหมือง ไม่ว่าจะเป็นเหมืองเปิดบนดิน หรือเหมืองใต้ดิน

1.3.2.8 การสำรวจงานอุตสาหกรรม (Industrial Surveys)

คือ งานสำรวจที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากในการติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ หรือเครื่องจักรทางด้านอุตสาหกรรมเพื่อการผลิต

1.4 ชั้นความถูกต้องงานสำรวจ

คุณภาพของการรังวัดในงานสำรวจ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สามารถนำไปใช้งานตามที่ต้องการเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อกล่าวถึงคุณภาพงานรังวัดโดยทั่วไปจะกล่าวถึง ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง (spatial

accuracy) โดยได้มีการแบ่งระดับความถูกต้องไว้ 3 ระดับชั้นงาน ซึ่งจะระบุถึงเครื่องมือ กรรมวิธี การตรวจสอบผลการรังวัดที่ต้องปฏิบัติตามชั้นงานที่ใช้สำหรับแต่ละประเภทงาน และผลสุดท้ายต้องตรวจสอบผลการรังวัดที่ได้ปฏิบัติตามข้อกำหนดแล้วนั้น ว่าอยู่ในเกณฑ์กำหนดของชั้นงานนั้นหรือไม่ ทั้งนี้ได้มีการกำหนดรายละเอียดชั้นงานตามมาตรฐานของหน่วยงาน Federal Geodetic Control Committee (FGCC) ได้แก่

1.4.1 ระดับชั้นงานหนึ่ง (First Order)

เป็นมาตรฐานสูงสุดที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของงานรังวัดในระดับโครงข่ายหมุดควบคุมทั้งทางราบและทางตั้ง (horizontal and vertical control network) ของประเทศ จังหวัด หรือเมือง รวมทั้งงานวิจัยด้านต่าง ๆ

1.4.2 ระดับชั้นงานสอง (Second Order)

เป็นมาตรฐานรองลงมาจากชั้นงานที่หนึ่งใช้ในการขยายหรือเพิ่มจำนวนหมุดควบคุมทางราบและทางตั้งจากหมุดชั้นงานที่หนึ่ง เพื่อใช้เป็นหมุดควบคุมสำหรับพื้นที่ที่เล็กกว่าเมือง

1.4.3 ระดับชั้นงานสาม (Third Order)

เป็นมาตรฐานที่ต่ำที่สุดซึ่งใช้สำหรับงานโครงการพื้นที่เล็ก ๆ หรืองานก่อสร้างทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม

1.5 สัณฐานโลก (Earth Shape)

สัณฐานของโลกมีความสำคัญกับงานสำรวจที่ต้องทำความเข้าใจ จึงจะสามารถกำหนดตำแหน่งที่อยู่บนผิวโลกได้อย่างถูกต้อง เป็นที่ทราบกันว่า โลกมีสัณฐานค่อนข้างเป็นรูปทรงกลมซึ่งแบนหรือยุบตัวบริเวณขั้วโลก และผิวโลกมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน สูง ๆ ต่ำ ไม่ราบเรียบ ความลาดชันไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น การที่จะระบุว่าโลกมีรูปร่างสัณฐานเป็นอย่างไรนั้นกระทำได้ยาก สำหรับศาสตร์ทางด้านการสำรวจได้นิยามสัณฐานของโลกไว้ 3 ลักษณะ (รูปที่ 1.2) คือ

1.5.1 สัณฐานโลกทางกายภาพ (Terrestrial Surface)

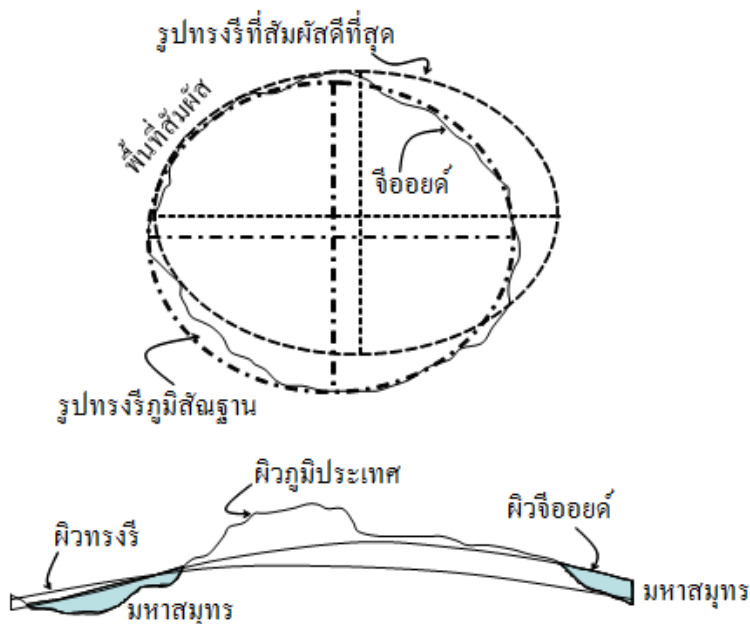
หมายถึง เส้นขอบเขตระหว่างผิวดินหรือผิวน้ำกับอากาศรอบผิวโลก เป็นลักษณะที่ปรากฏจริงของผิวโลก ไม่สามารถนิยามรูปร่างได้ด้วยรูปทรงทางเรขาคณิต หรือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.5.2 สัณฐานโลกจีโออยด์ (Geoid)

คือ สัณฐานของโลกที่เกิดจากการจินตนาการพื้นผิวของน้ำทะเลมหาสมุทรแผ่ขยายต่อเนื่องเข้าไปในแผ่นดินเป็นพื้นผิวเดียวกันทั่วโลก โดยที่ทุก ๆ จุดบนพื้นผิวนั้นมีค่าศักย์ภาพแรงโน้มถ่วงเท่ากัน โดยจะใช้เป็นผิวของน้ำทะเลที่กำหนดค่าระดับเฉลี่ยเท่ากับ 0 เมตร ซึ่งผิวดังกล่าวยังคงมีลักษณะไม่ราบเรียบ แบบจำลองที่ได้จึงไม่สะดวกและยากที่จะใช้ในการคำนวณ

1.5.3 สัณฐานโลกรูปทรงรี (Ellipsoid)

คือ การใช้รูปทรงรีซึ่งมีรูปทรงใกล้เคียงกับจีโออยด์มากที่สุดเป็นสัณฐานของโลก รูปทรงรีนี้เกิดจากการหมุนของวงรีรอบแกนสั้น ทำให้สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณปริมาณต่าง ๆ ได้ เรียกว่า “พื้นหลักฐาน” (datum) มีการใช้กันแพร่หลายและมีหลายพื้นหลักฐานสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ



รูปที่ 1.2 สัณฐานของโลก

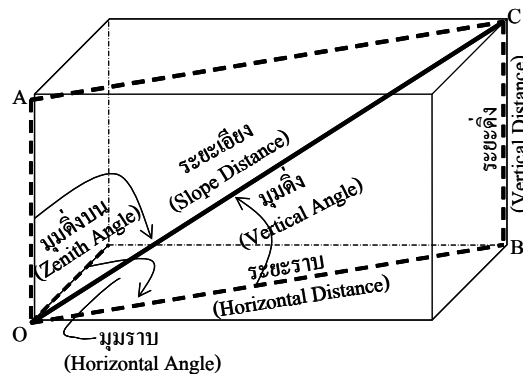
1.5.3.1 รูปทรงรีภูมิทัศน์ (Terrestrial Ellipsoid)

คือ รูปทรงรีพื้นหลักฐานที่ใช้อ้างอิงแทนลูกโลก ซึ่งจะมีจุดศูนย์กลางแน่นอนอยู่ที่จุดใจกลางโลก และแกนหมุนสมมาตรขนานกับแกนหมุนเฉลี่ยของโลก ดังนั้น ทุก ๆ จุดบนผิวโลกจะอยู่ในระบบอ้างอิงเดียวกัน

1.5.3.2 รูปทรงรีภูมิภาค (Best-fitting Ellipsoid)

คือ รูปทรงรีพื้นหลักฐานที่ใช้เฉพาะบริเวณหนึ่งในระดับภูมิภาคหรือระดับประเทศ โดยเป็นรูปทรงรีที่มีพื้นผิวใกล้เคียงกับพื้นผิวจริงในบริเวณนั้น ดังนั้น ตำแหน่งของจุดจะมีความสัมพันธ์กันเฉพาะพื้นที่ที่ใช้พื้นหลักฐานเดียวกันเท่านั้น การเชื่อมโยงไปยังพื้นหลักฐานอื่นทำได้ด้วยวิธีการแปลงพื้นหลักฐาน

1.6 การวัดในงานสำรวจ (Measurements in Surveying)



รูปที่ 1.3 การวัดในงานสำรวจ

รูปที่ 1.3 เมื่อจุด O เป็นตำแหน่งอ้างอิง และจุด C เป็นตำแหน่งที่สนใจ การวัดในงานสำรวจภาคสนาม ปริมาณที่วัดได้ประกอบด้วยปริมาณต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- 1) ระยะเอียง (slope distance, OC)
- 2) ระยะราบ (horizontal distance, OB)
- 3) ระยะตั้ง (vertical distance, CB)
- 4) มุมราบ (horizontal angle)
- 5) มุมตั้ง (vertical angle)
- 6) มุมตั้งบน (zenith angle)

จากรูปจะเห็นว่า ปริมาณดังกล่าวแต่ละปริมาณจะมีลักษณะเป็นองค์ประกอบซึ่งกันและกัน คือ สามารถคำนวณได้จากปริมาณอื่นโดยอาศัยความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ

1.7 หน่วยการวัด (Units of Measurement)

ขนาดของปริมาณต่าง ๆ ที่วัดได้ดังกล่าวในหัวข้อที่ 5 จะมีหน่วยกำกับการทำงานทุกครั้ง การทำงานในปัจจุบันเป็นยุคของการทำงานร่วมกัน (collaborative working) ทำให้ต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน จึงจำเป็นที่ต้องทราบถึงระบบการวัดต่าง ๆ ที่ใช้กันทั่วโลก รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างระบบการวัด เพื่อการแปลงหน่วยเหล่านี้ไปมา ระบบหน่วยการวัดที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่

1.7.1 หน่วยความยาว (Length)

1.7.1.1 ระบบเมตริก (Metric System)

10 มิลลิเมตร (millimeters)	=	1 เซนติเมตร (centimeter)
10 เซนติเมตร (centimeters)	=	1 เดซิเมตร (decimeter)
10 เดซิเมตร (decimeters)	=	1 เมตร (meter)
10 เมตร (meters)	=	1 เดคาเมตร (decameter)
10 เดคาเมตร (decameters)	=	1 เฮกโตเมตร (hectometer)
10 เฮกโตเมตร (hectometers)	=	1 กิโลเมตร (kilometer)
1,000 เมตร (meters)	=	1 กิโลเมตร (kilometer)

1.7.1.2 ระบบอังกฤษ (Imperial System)

12 นิ้ว (inches)	=	1 ฟุต (foot)
3 ฟุต (feet)	=	1 หลา (yard)
22 หลา (yards)	=	1 เซน (chain)
10 เซน (chains)	=	1 เฟอลอง (furlong)
8 เฟอลอง (furlongs)	=	1 ไมล์ (mile)
5,280 ฟุต (feet)	=	1 ไมล์ (mile)
1,760 หลา (yards)	=	1 ไมล์ (mile)

1.7.1.3 ระบบไทย (Thai System)

2 กีบ	=	1 สอก
4 สอก	=	1 วา
20 วา	=	1 เส้น
400 เส้น	=	1 โยชน์

1.7.1.4 การเทียบหน่วย

1 นิ้ว (inch)	=	2.54 เซนติเมตร (centimeters)
1 ฟุต (foot)	=	30.48 เซนติเมตร (centimeters)
1 ไมล์ (mile)	=	1.609344 กิโลเมตร (kilometers)
1 วา	=	2 เมตร (meters)
1 เมตร (meter)	=	2 ศอก
1 กิโลเมตร (kilometer)	=	25 เส้น

1.7.2 หน่วยมุม (Angle)

1.7.2.1 ระบบองศา (Degree System)

ระบบองศา คือ การแบ่งช่วงรอบวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางวงกลมเป็นจุดรองรับขนาดมุม โดยแบ่งออกเป็น 360 ช่วง เรียกช่วงละ 1 องศา (degree) และ 1 องศา แบ่งขีดย่อยอีก 60 ช่วง เรียกช่วงละ 1 ลิปดา (minute) และแบ่งขีดย่อยอีก 60 ช่วง เรียกช่วงละ 1 ฟลิปดา (second) การแสดงหน่วยระบบองศาสามารถแสดงได้ 2 วิธี คือ

1) ระบบเลขฐานสิบ (decimal system) เป็นการแสดงในรูปทศนิยมหน่วยองศาอย่างเดียว เช่น 28.23454325 องศา เป็นต้น

2) ระบบเลขฐานหกสิบ (sexagesimal system) เป็นการแสดงในรูปขององศา ลิปดา และ ฟลิปดา โดยที่หน่วยฟลิปดาจะเขียนเป็นเลขฐานสิบ เช่น $28^{\circ}14'04.36''$ จะเขียนในรูปเลขฐานหกสิบลักษณะของทศนิยม ได้เป็น 28.140436 ซึ่งมักจะใช้ในการแสดงผลในระบบโปรแกรม

1.7.2.2 ระบบเกรด (Centesimal System)

ระบบเกรด คือ การแบ่งช่วงรอบวงกลมทั้งหมด 400 ช่วง เรียกช่วงละ 1 เกรด หรือ กอน (gon) และแบ่งเป็นช่วงย่อยอีก 100 ช่วง เรียกว่า “Centesimal Minute” แต่ละช่วงยังแบ่งอีก 100 ช่วง เรียกว่า “Centesimal Second”

1.7.2.3 ระบบเรเดียน (Radian System)

ระบบเรเดียน คือ ระบบที่มุมรอบวงกลมที่มีค่าเท่ากับ 2π เรเดียน โดยที่

$$\pi = 3.1415926535897932$$

1.7.2.4 ระบบทางทหาร (Military System)

ระบบทางทหาร คือ ระบบที่มุมรอบวงกลมมีค่าเท่ากับ 6,400 มิล (mils)

1.7.2.5 การเทียบหน่วย

1 องศา (degree)	=	1.111111 กอน (gons)
1 พิลิปดา (second)	=	$\frac{1}{206265}$ เรเดียน (radians)

1.7.3 หน่วยพื้นที่ (Area)**1.7.3.1 ระบบเมตริก (Metric System)**

100 ตารางมิลลิเมตร (sq. mm)	=	1 ตารางเซนติเมตร (sq. cm)
10,000 ตารางเซนติเมตร (sq. cm)	=	1 ตารางเมตร (sq. meter)
100 ตารางเมตร (sq. meters)	=	1 เอเคอร์ (are)
100 เอเคอร์ (Ares)	=	1 เฮกตาร์ (hectare)
10,000 (sq. meters)	=	1 เฮกตาร์ (hectare)
100 เฮกตาร์ (hectares)	=	1 ตารางกิโลเมตร (sq. kilometer)
1,000,000 ตารางเมตร (sq. meters)	=	1 ตารางกิโลเมตร (sq. kilometer)

1.7.3.2 ระบบอังกฤษ (Imperial System)

144 ตารางนิ้ว (sq. inches)	=	1 ตารางฟุต (square foot)
9 ตารางฟุต (sq. feet)	=	1 ตารางหลา (square yard)
4,840 ตารางหลา (sq. yards)	=	1 เอเคอร์ (acre)
640 เอเคอร์ (acres)	=	1 ตารางไมล์ (square mile)

1.7.3.3 ระบบไทย (Thai System)

100 ตารางวา	=	1 งาน
4 งาน	=	1 ไร่

1.7.3.4 การเทียบหน่วย

1 ตารางวา	=	4 ตารางเมตร
1 ไร่	=	1,600 ตารางเมตร
625 ไร่	=	1 ตารางกิโลเมตร
1 ตารางเมตร	=	10.76 ตารางฟุต
1 ตารางกิโลเมตร	=	0.3861 ตารางไมล์
1 ตารางกิโลเมตร	=	247.1 เอเคอร์
1 ตารางไมล์	=	640 ตารางเมตร

1.7.4 หน่วยปริมาตร (Volume)

1.7.4.1 ระบบเมตริก (Metric System)

1,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (cu. mm)	=	1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cu. cm)
1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cu. cm)	=	1 ลูกบาศก์เดซิเมตร (cu. decimeter)
1,000 ลูกบาศก์เดซิเมตร (cu. decimeter)	=	1 ลูกบาศก์เมตร (cu. meter)
1,000,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cu. cm)	=	1 ลูกบาศก์เมตร (cu. meter)

1.7.4.2 ระบบอังกฤษ (Imperial System)

1,728 ลูกบาศก์นิ้ว (cu. inches)	=	1 ลูกบาศก์ฟุต (cubic foot)
27 ลูกบาศก์ฟุต (cu. feet)	=	1 ลูกบาศก์หลา (cubic yard)

1.7.4.3 การเทียบหน่วย

1 ลูกบาศก์เมตร	=	35.315 ลูกบาศก์ฟุต
1 ลูกบาศก์เมตร	=	1.30795 ลูกบาศก์หลา

1.8 เลขนัยสำคัญ (Significant Figures)

จำนวนเลขนัยสำคัญ คือ จำนวนหลักตัวเลขที่บอกถึงความละเอียดที่อ่านได้จากการวัดของเครื่องมือ ประกอบด้วยจำนวนหลักทั้งหมดของตัวเลขที่อ่านได้แน่นอนของเครื่องมือ โดยที่หลักสุดท้ายจะเป็นความละเอียดที่อ่านได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเรียกว่า ค่าที่อ่านได้น้อยที่สุด (least count) รวมกับหลักของตัวเลขที่ได้จากการประมาณอีกหนึ่งหลัก ดังนั้น ตัวเลขหลักสุดท้ายจะเป็นตัวเลขที่มีความไม่แน่นอนของการวัด เช่น เมื่อบอกว่าการวัดมีความไม่แน่นอนอยู่ ± 0.002 เมตร นั้นหมายถึง เมื่อวัดปริมาณหนึ่งได้ 45.165 เมตร ค่าที่เป็นไปได้จะอยู่ระหว่างค่า 45.163 และ 45.167 เมตร ฉะนั้น ค่าที่อ่านได้น้อยที่สุดของเครื่องมือเท่ากับ 0.01 เมตร ซึ่งตัวเลขที่อ่านได้ถูกต้องจากเครื่องมือมี 4 หลัก คือ 45.16 และตัวเลขที่อ่านโดยประมาณหลักสุดท้าย 1 หลัก คือ 5 ดังนั้น จำนวนเลขนัยสำคัญมีค่าเท่ากับ 5 หลัก

1.8.1 กฎการหาจำนวนเลขนัยสำคัญ

การหาจำนวนเลขนัยสำคัญนั้นมีกฎในการพิจารณา 3 ข้อ คือ

- 1) เลขทุกตัวยกเว้นเลขศูนย์ (1,2,3,4,5,6,7,8,9) นับเป็นเลขนัยสำคัญเสมอ เช่น 8,495 มีจำนวนเลขนัยสำคัญ 4 หลัก

2) เลขศูนย์ที่อยู่ระหว่างเลขใด ๆ นับเป็นเลขนัยสำคัญ เช่น 15.43005 มีจำนวนเลขนัยสำคัญ 7 หลัก

3) เลขศูนย์ที่อยู่หลังจุดทศนิยมและต่อท้ายจากเลขจำนวนเต็ม นับเป็นเลขนัยสำคัญ เช่น 0.6000 มีจำนวนเลขนัยสำคัญ 4 หลัก

4) เลขศูนย์ทุกตัวที่หน้าจุดทศนิยมของเลขจำนวนใด ๆ และมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 นับเป็นเลขนัยสำคัญ เช่น 10.0 มีจำนวนเลขนัยสำคัญ 3 หลัก

ตัวเลขศูนย์ก่อนหน้าจุดทศนิยมของเลขใด ๆ ที่ไม่มีทศนิยม อาจจะสร้างความสับสนในการบอกเลขนัยสำคัญ เช่น 54,000 สามารถมีจำนวนเลขนัยสำคัญ เป็น 2, 3, 4 หรือ 5 ก็ได้ในความหมายของการวัด ดังนั้น ในการแสดงตัวเลขเหล่านี้มักจะเขียนในรูปแบบเลขคูณสิบยกกำลังทางวิทยาศาสตร์ ดังเช่น 5.4×10^4 มีจำนวนเลขนัยสำคัญเป็น 2 หากเขียน 5.4000×10^4 จะมีจำนวนเลขนัยสำคัญเป็น 5 เป็นต้น เพื่อให้สามารถสื่อถึงความละเอียดของเครื่องมือวัดที่ใช้วัดปริมาณนั้น

ตัวอย่างที่ 1.1 การหาเลขนัยสำคัญ

ชุดตัวเลข	จำนวนเลขนัยสำคัญ	พิจารณาจากกฎข้อ
48,123	5	1
3.905	4	1
900.06	5	1,2,4
0.0008 (= 8 E-4)	1	1,4
8.8000	5	1,3
701.04	6	1,2,3,4
2,000,000 (= 2 E+6)	1	1
10.0 (= 1.00 E+1)	3	1,3,4

1.8.2 ผลลัพธ์เลขนัยสำคัญจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์

การแสดงผลเลขนัยสำคัญที่ได้จากการคำนวณ จะใช้กับการแสดงผลสุดท้ายของการคำนวณเท่านั้น ในระหว่างการคำนวณปกติจะใช้ตัวเลขทั้งที่มีนัยสำคัญและไม่มีนัยสำคัญทั้งหมด แล้วจึงทำการปัดเศษของผลลัพธ์สุดท้ายให้มีจำนวนนัยสำคัญที่เหมาะสม ซึ่งมีหลักการคิด ดังนี้

1.8.2.1 เลขนัยสำคัญจากการคูณและการหาร

จำนวนเลขนัยสำคัญของเลขสองจำนวนคูณหรือหารกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะมีจำนวนเลขนัยสำคัญเท่ากับ จำนวนเลขที่มีเลขนัยสำคัญน้อยที่สุดของการคูณหรือหารนั้น เช่น $3,454.23 \times 2.24 = 7,737.4752$ ผลลัพธ์ที่ได้นี้จะต้องแสดงให้มีจำนวนเลขนัยสำคัญเท่ากับ 2.24 หรือ 3 หลัก คือ 7.74×10^3 โดยที่เขียนเป็น 7,740 ไม่ได้ เพราะจะทำให้เกิดความสับสนถึงความละเอียดถูกต้องของการวัดนั้นได้

1.8.2.2 เลขนัยสำคัญจากการบวกและการลบ

เมื่อเลขสองจำนวนบวกหรือลบกัน จำนวนทศนิยมของผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนทศนิยมของตัวเลขที่น้อยที่สุด เช่น $2.342 + 454.86 = 457.20$ ดังนั้น จำนวนเลขนัยสำคัญเท่ากับ 5 หลัก

สิ่งที่เกิดขึ้นอยู่เสมอในงานคำนวณ คือ การแปลงหน่วยไปมา การคงจำนวนเลขนัยสำคัญให้คงเท่ากับปริมาณที่วัดได้ เช่น การแปลงระยะทาง 170 ฟุต $4\frac{3}{8}$ นิ้วให้เป็นหน่วยเมตร เริ่มด้วยการทำให้เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดคือ หน่วย $\frac{1}{8}$ นิ้ว เท่ากับ $(170 \times 12 \times 8) + (4 \times 8) + 3 = 16,355$ ซึ่งมีจำนวนเลขนัยสำคัญเท่ากับ 5 หลัก ดังนั้น การแปลงจะได้คำตอบเท่ากับ $\frac{16355}{8 \times 39.37} = 51.927$ เมตร ด้วยจำนวนเลขนัยสำคัญเท่ากับ 5 หลัก สำหรับตัวคูณแปลงหน่วย (39.37) ถือเป็นตัวเลขที่มีค่าคงที่แน่นอนจำนวนเลขนัยสำคัญสามารถใช้เท่าใดก็ได้

1.9 การประมาณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือ (Instrument Uncertainty)

ตัวเลขที่ประมาณได้จากเครื่องมือซึ่งเป็นเลขนัยสำคัญหลักสุดท้ายที่อ่านได้จากเครื่องมือ จะมีความไม่แน่นอนหรือความแม่นยำในการประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าที่อ่านได้น้อยที่สุด (least count) เช่น การวัดระยะด้วยไม้บรรทัดซึ่งสามารถอ่านได้ละเอียด 1 มิลลิเมตร ฉะนั้น ค่าไม่แน่นอนของการประมาณหลักสุดท้ายจึงเท่ากับ ± 0.5 มิลลิเมตร สมมติว่าวัดระยะหนึ่งและอ่านละเอียดได้ 10.2 เซนติเมตร การกะประมาณหลักสุดท้าย จะมีค่าระหว่าง 10.2 และ 10.3 เซนติเมตร โดยที่ผู้วัดสามารถกะประมาณได้เท่ากับ 10.23 เซนติเมตร ขณะที่ความถูกต้องของการประมาณเท่ากับ ± 0.5 มิลลิเมตร นั้นหมายถึง การวัดนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10.23 ± 0.05 เซนติเมตร

1.10 การปัดเศษตัวเลข (Rounding Off Numbers)

การปัดเศษ คือ การตัดตัวเลขออกให้มีจำนวนเลขน้อยลงเหลือเพียงพอที่ใช้ในการคำนวณ และแสดงผลตามจำนวนเลขน้อยลงที่ได้ การปัดเศษตัวเลขมีหลักเกณฑ์ ดังนี้

- 1) เมื่อตัวเลขที่ต้องการปัดมีค่ามากกว่า 5 ให้ปัดขึ้น เช่น 4,857.2436 ปัดเป็น 4,857.244
- 2) เมื่อตัวเลขที่ต้องการปัดมีค่าน้อยกว่า 5 ให้ปัดลง เช่น 843.982 ปัดเป็น 843.98
- 3) เมื่อตัวเลขที่ต้องการปัดมีค่าเท่ากับ 5 ให้พิจารณาตัวเลขที่อยู่หน้า ดังนี้
 - เมื่อเป็นเลขคี่ ให้ปัดขึ้น เช่น 753.135 ปัดเป็น 753.14
 - เมื่อเป็นเลขคู่ ให้ปัดลง เช่น 45.4245 ปัดเป็น 45.424

1.11 แบบฝึกหัด

- 1) จงอธิบายความแตกต่างระหว่างงานสำรวจรังวัดขั้นสูงและงานสำรวจรังวัดบนพื้นระนาบ
- 2) สันฐานของโลกในศาสตร์ของการสำรวจรังวัดมีกี่ชนิดอะไรบ้าง จงอธิบาย
- 3) งานรังวัดขั้นสูงใช้สันฐานของโลกชนิดใดอ้างอิงในการคำนวณปริมาณต่าง ๆ
- 4) จงเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่าง ๆ ที่ต้องรังวัดในสนามของงานสำรวจ
 - 5) จำนวนเลขน้อยสำคัญมีความสำคัญอย่างไรต่อการแสดงผลในงานสำรวจ
 - 6) การปัดเศษในกรณีที่ตัวเลขมีค่าเท่ากับ 5 ปัดอย่างไร และมีเหตุผลใดเชิงสถิติจึงทำเช่นนั้น
 - 7) จงระบุจำนวนเลขน้อยสำคัญของเลขต่อไปนี้ 4.0500, 0.00235, 2.45×10^{-5} , 83500, 0.004002, 4.200×10^{-9} , 450, 540000000, 0.0202, 0.0900 พร้อมระบุชื่อของกฎที่ใช้ในการพิจารณา
 - 8) สนามฟุตบอลวัดด้านยาวได้ 91.44 เมตร ด้านกว้างได้ 48.76 เมตร พื้นที่ที่คำนวณได้มีเลขน้อยสำคัญเท่าใด จงอธิบายเหตุผล
 - 9) จงคำนวณปริมาณต่อไปนี้ พร้อมเขียนผลลัพธ์ให้ถูกต้องตามหลักเลขน้อยสำคัญ
 - (1) 5.0 เมตร x 3.5 เมตร
 - (2) $V = 40.0$ เมตร / 8.9 วินาที
 - (3) $S = 4.53$ เมตร x 1.341 เรเดียน
 - (4) $A = \pi(4.320 \text{ เมตร})^2$
 - 10) จงแปลงหน่วยความยาว 91.44 เมตร เป็นเซนติเมตรด้วยตัวคูณ 30.5 เซนติเมตรต่อเมตร เขียนคำตอบให้ถูกต้องตามเลขน้อยสำคัญ พร้อมอธิบายเหตุผล

บทที่ 2

ทฤษฎีการวัดและความคลาดเคลื่อน (Theory of Measurements and Errors)

การวัด (measurements) เป็นกรรมวิธีพื้นฐานของการได้มาซึ่งค่าสังเกต (observations) ของข้อมูลตามต้องการ ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้าน การออกแบบ การวิเคราะห์ ทั้งสาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ข้อมูลที่ได้จากการวัดเหล่านี้ต้องมีการจัดการ การประเมิน และการตีความหมายก่อนนำไปใช้เสมอ เมื่อใดก็ตามที่มีการวัดเมื่อนั้นย่อมมีความคลาดเคลื่อน (errors) เกิดขึ้นด้วยทุกครั้ง ดังนั้น จึงไม่มีการวัดครั้งใดที่ปราศจากความคลาดเคลื่อนอยู่ด้วย การประเมินค่าความถูกต้อง (accuracy) และค่าความแม่นยำ (precision) ของการวัดจึงจำเป็นต้องกระทำทุกครั้ง เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของข้อมูลก่อนนำไปใช้งาน

ความเข้าใจเกี่ยวกับค่าความถูกต้องของการวัดมีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการวัด ซึ่งต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติ ชนิด และขนาด ของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้ในกระบวนการวัดแต่ละขั้นตอน รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดด้วย จึงจะสามารถวิเคราะห์ขนาดความคลาดเคลื่อนที่จะพึงมีในผลลัพธ์สุดท้ายได้

2.1 การวัดและมาตรฐาน (Measurements and Standards)

การวัดเป็นกระบวนการหาขนาด ปริมาณ ของสิ่งที่ต้องการด้วยการเทียบกับมาตรฐานอันหนึ่งที่ใช้ในการหาขนาดและปริมาณนั้น ๆ เช่น ความยาว น้ำหนัก ทิศทาง เวลา ปริมาตร ฯลฯ ตัวอย่างเช่น ความยาวมาตรฐาน 1 เมตร คือ ระยะทางที่แสงเดินทางได้ในสุญญากาศเป็นเวลา $1/299,792,458$ ของวินาที ซึ่งอาจจะทำการวัดเทียบกับสิ่งที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงนั้นโดยตรงหรือโดยอ้อม (direct or indirect measurements) ก็ได้

2.2 การวัดโดยตรงและโดยอ้อม (Direct and Indirect Measurements)

การวัดโดยตรง (direct measurement) คือ การวัดปริมาณที่ต้องการโดยเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้เป็นมาตรฐานของการวัดนั้น อุปกรณ์ดังกล่าวที่ใช้ถือเป็นเครื่องมือในการวัด เช่น การวัดความยาว

ได้แก่ ไม้บรรทัดชนิดต่าง ๆ เทปวัดระยะชนิดต่าง ๆ ฯลฯ ซึ่งแต่ละชนิดจะให้ความถูกต้องเมื่อเทียบกับระยะทางที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานสากลแตกต่างกัน และขึ้นกับคุณภาพการผลิตเครื่องมือชิ้น ๆ นั้น เครื่องมืออุปกรณ์เหล่านี้ก็จะมีมาตรฐานความถูกต้องแตกต่างกันไปด้วย ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณที่วัดได้จะขึ้นกับชนิดอุปกรณ์ที่ใช้วัดโดยตรง

อย่างไรก็ตาม ส่วนมากการวัดปริมาณที่ต้องการทราบในหลายกรณี ไม่สามารถทำการวัดด้วยเครื่องมือได้โดยตรง แต่จะทำการวัดปริมาณอื่นแทน แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณที่ต้องการนั้นด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ การวัดลักษณะนี้เรียกว่า การวัดโดยอ้อม (indirect measurement) เช่น พื้นที่สี่เหลี่ยมมุมฉากได้จากการวัดความยาวด้านของสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้น แล้วคำนวณพื้นที่จากสูตรกว้างคูณยาว ซึ่งผลลัพธ์ของพื้นที่ที่ได้นี้ต้องมีการวิเคราะห์ถึงความคลาดเคลื่อนว่าเป็นเท่าใดด้วยวิธีการที่เรียกว่า การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (propagation of errors) อันเป็นผลมาจากการวัดโดยอ้อมของปริมาณต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ โดยวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ปริมาณนั้นด้วย

2.3 ความคลาดเคลื่อนของการวัด (Measurement Errors)

2.3.1 การอ่าน (Readings)

โดยทั่วไปการอ่านมาตรบนเครื่องมือที่ใช้ในการวัด จะอ่านละเอียดตัวเลขหลักสุดท้ายเป็นตัวเลขที่ประมาณได้จากการแบ่งขีด เช่น ไม้บรรทัดที่มีการแบ่งขีดละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร จะสามารถประมาณตัวเลขการอ่านได้ถึง 0.1 มิลลิเมตร เป็นต้น ตัวอย่างเช่น 3.62 เซนติเมตร

2.3.2 การวัดซ้ำ (Repeated measurements)

สมมติว่าวัดระยะทางหนึ่งด้วยเทปวัดระยะที่มีการแบ่งขีดละเอียดถึง 1 มิลลิเมตร จำนวน 10 ครั้ง ซึ่งการอ่านสามารถอ่านประมาณได้ถึง 0.1 มิลลิเมตร หรือ 0.0001 เมตร ดังตารางที่ 2.1

ผลจากการวัด 10 ครั้งของระยะทางดังกล่าว ค่าระยะทางที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมด (arithmetic mean) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.27603 เมตร ตัวเลขหลักที่ 5 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณและทำการปัดเศษเพื่อให้มีเลขนัยสำคัญคงเดิมจะได้เท่ากับ 9.2760 เมตร เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า ในขณะที่ตัวเลขทศนิยมหลักที่ 4 ซึ่งเป็นตัวเลขที่ได้จากการวัด ที่มีความไม่แน่นอน และไม่สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดสามารถทำได้เพียงเท่านี้ จะเห็นว่าระยะทางที่วัดได้นั้นไม่สามารถ

ทราบได้ว่า ค่าที่ถูกต้องจริงเป็นเท่าไร ในทางการวัดปริมาณใด ๆ จึงทำได้เพียงหาค่าที่ดีที่สุดของการวัดเท่านั้น ด้วยการหาค่าเฉลี่ยของการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลการวัดระยะซ้ำจำนวน 10 ครั้ง

ครั้งที่	ค่าที่วัดได้ (เมตร)
1	9.2763
2	9.2757
3	9.2761
4	9.2760
5	9.2761
6	9.2758
7	9.2760
8	9.2764
9	9.2759
10	9.2760

2.3.3 ค่าที่ดีที่สุด (Best Value)

ค่าที่ดีที่สุดของการวัด คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดหลาย ๆ ครั้ง หรือเป็นค่าที่เป็นไปได้มากที่สุด (most probable value) จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า ค่าที่ถูกต้องหรือค่าจริงของการวัดไม่ทราบว่าเป็นเท่าใด นั่นหมายความว่า การวัดทุกครั้งจะมีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่ด้วยเสมอ จึงทำให้ผลการวัดแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริง จะเห็นว่าค่าที่วัดได้แต่ละครั้งจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากในเกณฑ์ความละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ ดังนั้น การวัดแต่ละครั้งจึงมีความคลาดเคลื่อนเกิดรวมอยู่ด้วยทุกครั้ง ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ความคลาดเคลื่อนมีระบบ (systematic errors)
- 2) ความคลาดเคลื่อนบังเอิญหรือสุ่ม (accidental errors or random errors)

2.3.4 ความคลาดเคลื่อนมีระบบ (Systematic Errors)

ความคลาดเคลื่อนมีระบบ เป็นความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดและเครื่องหมายคงที่ภายใต้สภาวะแวดล้อมการทำงานหนึ่ง บางครั้งจึงเรียกว่า “ความคลาดเคลื่อนคงที่” (constant errors) ดังนั้น หากการวัดกระทำอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน ความคลาดเคลื่อนชนิดนี้ก็มีขนาดและทิศทางคงที่ตลอดช่วงเวลาการวัดนั้น สำหรับการวัดระยะทางหลายช่วง ระยะทางรวมที่ได้จะมีผลของความคลาดเคลื่อนรวมเท่ากับผลรวมของความคลาดเคลื่อนคงที่นั้น ฉะนั้นความคลาดเคลื่อนนี้จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “ความคลาดเคลื่อนสะสม” (cumulative errors)

การตรวจสอบหาว่า การวัดแต่ละครั้งมีความคลาดเคลื่อนมีระบบแฝงอยู่หรือไม่ นั้น มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากความคลาดเคลื่อนมีระบบจะทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่ถูกต้อง ซึ่งทำได้ด้วยการเปรียบเทียบผลของการวัดที่ใช้กรรมวิธีและเครื่องมือที่แตกต่างกัน โดยต้องมีความน่าเชื่อถือที่ใกล้เคียงกันหรือดีกว่า หากยังคงใช้วิธีเดิมด้วยเครื่องมือเดิมก็จะไม่สามารถตรวจสอบได้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการสร้างสภาวะการวัดที่เป็นอิสระต่อกัน และผลการวัดที่ได้จะเป็นอิสระต่อกันด้วย (independent results) เมื่อพบว่ามีความคลาดเคลื่อนมีระบบแฝงอยู่ จะต้องมีการตรวจแก้ไขจัดออกไปจากค่าสังเกต ก่อนนำข้อมูลนั้นไปใช้งานในขั้นต่อไป ตามสมการที่ 2.1

$$x_c = x_{obs} + c_s \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ x_c = ค่าสังเกตที่ตรวจแก้ค่าความคลาดเคลื่อนมีระบบแล้ว
 x_{obs} = ค่าสังเกตที่ได้จากการวัด
 c_s = ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนมีระบบ

2.3.5 ความคลาดเคลื่อนบังเอิญ (Accidental Errors)

ความคลาดเคลื่อนบังเอิญ เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับการวัดที่มีขนาดเล็กมาก และมีลักษณะไม่แน่นอน รวมทั้งทิศทางการเกิดด้วย กล่าวคือ มีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบ โดยที่โอกาสจะเป็นบวกหรือลบเท่า ๆ กัน ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของการเกิดได้ จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “ความคลาดเคลื่อนสุ่ม” (random errors)

2.3.6 แหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อนมีระบบและความคลาดเคลื่อนสุ่ม มีสาเหตุการเกิดได้ 4 สาเหตุ คือ

2.3.6.1 ความคลาดเคลื่อนเกิดจากสภาพธรรมชาติ (Natural Errors)

คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ได้แก่ อุณหภูมิ ความกดดันของอากาศ ความชื้น เป็นต้น ในขณะที่ทำการวัดนั้นไม่เป็นสภาวะเดียวกับสภาวะมาตรฐานของการออกแบบการใช้เครื่องมือที่ได้กำหนดไว้ และหากทราบการเปลี่ยนแปลงหรือความแตกต่างระหว่างสภาวะทำงานกับสภาวะมาตรฐานของการใช้เครื่องชนิดนั้น ก็จะสามารควัดหาขนาดและทิศทางการคลาดเคลื่อนมีระบบ และทำการตรวจแก้ (correction) ได้ เช่น การยืดหดของอุปกรณ์ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การหักเหของแสงที่มีต่อการส่องกล้อง เป็นต้น

2.3.6.2 ความคลาดเคลื่อนเกิดจากเครื่องมือวัด (Instrumental Errors)

คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมืออันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์หรือการปรับแก้ของเครื่องมือ การที่เครื่องมือถูกใช้งานมานาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพทางกายภาพไป เช่น การชำรุดของแถบวัดระยะ การแบ่งขีดมาตราวัด (graduation) การขยับเคลื่อนจากตำแหน่งของชิ้นส่วน ฯลฯ ซึ่งปริมาณเหล่านี้สามารถหาได้จากกรรมวิธีการตรวจสอบเครื่องมือเทียบกับมาตรฐานเพื่อหาค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เรียกว่า “การวัดสอบ” (calibration)

2.3.6.3 ความคลาดเคลื่อนเกิดจากผู้ทำการวัด (Personal Errors)

คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่ระมัดระวัง ความไม่ประณีตรวมทั้งความไม่ชำนาญของผู้ปฏิบัติในการทำงาน เช่น การติดตั้งเครื่องมือ การเล็งเป้าหมาย การปรับเครื่องมือ ฯลฯ ซึ่งปริมาณเหล่านี้สามารถหาได้จากการทดลอง และทดสอบทางสถิติ

2.3.6.4 ความคลาดเคลื่อนเกิดจากการคำนวณ (Calculation Errors)

คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้เครื่องคำนวณที่มีความละเอียดไม่เพียงพอ ถึงแม้ในปัจจุบันเครื่องคำนวณจะมีความละเอียดเพียงพอ การคำนวณเกี่ยวกับฟังก์ชันตรีโกณมิติต้องใช้จำนวนทศนิยมอย่างน้อย 8 หลัก แล้วจึงทำการปัดเศษตัวเลขในผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้

2.3.7 ความผิดพลาด (Mistakes or Blunders)

ความผิดพลาดของการวัด คือ ผลของการวัดที่ผิดพลาดอันเนื่องมาจากขาดความระมัดระวังในการวัดของผู้วัด ทำให้ข้อมูลที่ได้อาจไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้โดยส่วนใหญ่ ซึ่งค่าความผิดพลาดจะมีขนาดใหญ่กว่าค่าความคลาดเคลื่อนมาก และไม่ถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อน ฉะนั้น ในการวัดจึงต้องมีการวัดซ้ำและตรวจสอบคัดปริมาณที่คาดว่า มีความผิดพลาด ออกจากกลุ่มข้อมูลก่อนนำข้อมูลทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์และใช้งานต่อไป

2.3.8 ค่าความแตกต่าง (Discrepancy)

ค่าความแตกต่าง คือ ค่าต่างของการวัด 2 ครั้งหรือมากกว่า ค่าความแตกต่างนี้ช่วยบอกถึงความระมัดระวังในการวัดแต่ละครั้งว่า มีความผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่ รวมทั้งการเกิดความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดใหญ่ (gross errors) ที่ผิดสังเกตหรือเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ดังนั้น ผู้วัดต้องพิจารณาค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นในระหว่างการวัดซ้ำ เพื่อคัดกรองค่าสังเกตดังกล่าวออกไปและทำการวัดใหม่ เพื่อให้การวัดปริมาณนั้นได้มาซึ่งผลการวัดที่มีความแม่นยำสูงตามไปด้วย

2.3.9 ค่าความคลาดเคลื่อน (Errors) และค่าเศษเหลือ (Residuals)

ค่าความคลาดเคลื่อน ε คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ x กับค่าจริง μ

$$\varepsilon_i = x_i - \mu \dots\dots\dots (2.2)$$

เมื่อมีการวัดจำนวนมากขึ้นเท่าใด ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทางบวกและทางลบ จะมีปริมาณใกล้เคียงกันมากขึ้นเท่านั้น ฉะนั้น ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจะมีค่าเข้าใกล้ค่าจริงยิ่งขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากไม่สามารถทำการวัดได้จำนวนมากรั้ง และไม่ทราบค่าจริงของการวัด ทำให้การหาค่าคลาดเคลื่อนของการวัดแต่ละครั้งตามสมการที่ 2.2 ไม่สามารถทำได้ ดังนั้น การใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าที่ใกล้เคียงหรือค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของค่าจริง ซึ่งหมายถึงเป็นค่าที่มีโอกาสเป็นไปได้ในการวัดแต่ละครั้ง ถ้าการวัดซ้ำนั้นมีความละเอียดเช่นเดียวกัน ฉะนั้น เมื่อให้ $\bar{x}$ เป็นค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตที่ได้จากการวัดซ้ำภายใต้สภาวะและความละเอียดเดียวกัน ดังนั้น ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตใด ๆ $\bar{x}$ กับค่าเฉลี่ย x_i เรียกว่า “ค่าเศษเหลือ” v_i (residuals) ของค่าสังเกตนั้น ดังสมการ

$$v_i = \bar{x} - x_i \dots\dots\dots (2.3)$$

สมการที่ 2.3 จึงเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณปรับแก้ความคลาดเคลื่อน เมื่อใดที่สามารถทำการวัดได้จำนวนมาก $\bar{x}$ จะมีค่าเข้าใกล้ค่าจริง และค่าเศษเหลือจะมีขนาดเข้าใกล้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัดเช่นกัน

2.4 ค่าเฉลี่ย (Mean Value)

ตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการวัดระยะหนึ่งซ้ำกัน 10 ครั้ง จะเห็นว่า ไม่สามารถบอกได้ว่าค่าใดเป็นค่าที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดดังกล่าวกระทำภายใต้สภาวะเดียวกันทุกครั้ง ข้อมูลที่ได้จะถือว่า มีน้ำหนักความน่าเชื่อถือเท่ากัน (equal weight) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมดซึ่งเท่ากับ 9.2760 จึงเป็นค่าที่ดีที่สุดที่กล่าวได้ว่า ใกล้ค่าจริงมากที่สุด และเมื่อคำนวณหาค่าเศษเหลือของการวัดแต่ละครั้งเทียบกับค่าเฉลี่ย จะได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนคู่ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่า มีขนาดเล็กและเครื่องหมายไม่แน่นอน ซึ่งสามารถใช้พิจารณาถึงข้อมูลที่วัดผิดพลาดได้ หากข้อมูลใดมีขนาดค่าเศษเหลือใหญ่ แสดงว่าข้อมูลนั้นมีความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (gross errors) ที่ไม่ใช่ความคลาดเคลื่อนคู่ จึงควรตัดข้อมูลนั้นทิ้งไป ตัวอย่างเช่น ข้อมูลครั้งที่ 8 ซึ่งให้ค่า $v = -0.0004$ มีขนาดผิดสังเกตแตกต่างจากค่าสังเกตอื่น หากพิจารณาแล้วเห็นว่าเป็นความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ก็สามารถตัดข้อมูลนี้ออกจากการนำมาใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยก่อนนำไปใช้งาน

ข้อควรระวัง ในการใช้ค่าเฉลี่ยจากข้อมูลการวัดหลายครั้งนั้น ต้องให้มั่นใจว่า ไม่มีความคลาดเคลื่อนมีระบบหรือความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่แฝงอยู่ จึงต้องทำการตรวจสอบและตรวจแก้ให้หมดไปทุกครั้ง

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าเศษเหลือของการวัดแต่ละครั้ง

ครั้งที่	ค่าที่วัดได้	$v_i = \bar{x} - x_i$
1	9.2763	-0.0003
2	9.2757	0.0003
3	9.2761	-0.0001
4	9.2760	0.0000
5	9.2761	-0.0001
6	9.2758	0.0002
7	9.2760	0.0000
8	9.2764	-0.0004
9	9.2759	0.0001
10	9.2760	0.0000

2.5 ทฤษฎีการวัด

ในการวัดนั้นที่สำคัญ ปริมาณที่วัดได้ต้องมีความน่าเชื่อถือว่าถูกต้อง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้น ผู้ทำการวัดต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับพื้นฐานการวัดตามทฤษฎีการวัด ซึ่งเป็นเหตุเป็นผลกันตามลำดับ กล่าวคือ

- 1) การวัดทุกครั้งไม่มีความแม่นยำที่แน่นอน
- 2) การวัดทุกครั้งมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ
- 3) ค่าที่ถูกต้องของการวัดไม่สามารถทราบได้แน่นอน
- 4) ค่าความคลาดเคลื่อนที่แน่นอนไม่สามารถทราบได้

สิ่งที่ผู้ทำการวัดต้องคำนึงถึงตามทฤษฎีดังกล่าว คือ การวัดนั้น ๆ ต้องไม่มีความผิดพลาด (mistakes) เกิดขึ้น หรือมีความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (gross errors) แฝงอยู่ ซึ่งความผิดพลาดนี้เกิดจากการทำงานในการวัดของผู้วัดเอง เช่น ไม่มีความชำนาญในการใช้เครื่องมือวัด จดข้อมูลผิดพลาด ความระมัดระวังในการทำงาน การไม่ตรงต่อตนเองในการทำงาน เป็นต้น รวมทั้งต้องตรวจแก้ความคลาดเคลื่อนมีระบบออกไปด้วย

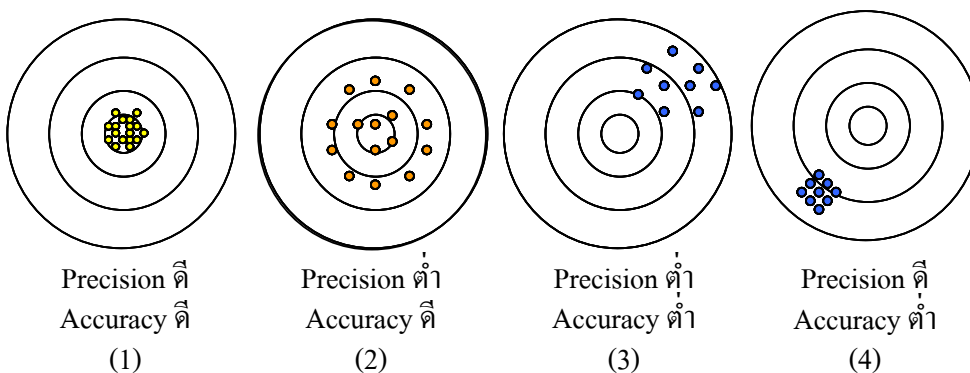
2.6 องค์ประกอบการวัด

การวัดปริมาณใด ๆ ทุกครั้งจะประกอบด้วยองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบ คือ

- 1) มีการประมาณขนาดของการวัดที่ได้ตามความละเอียดของเครื่องมือและกรรมวิธีที่ใช้ เช่น ระยะทางจากบ้านถึงตลาดเท่ากับ 4.1
- 2) มีหน่วยที่ใช้ในการวัด เช่น ระยะทางจากบ้านถึงตลาดเท่ากับ 4.1 กม.
- 3) มีการประมาณค่าช่วงของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัด เช่น ระยะทางจากบ้านถึงตลาดเท่ากับ 4.1 (± 0.2) กม. หมายถึง ระยะทางจะอยู่ในช่วง 3.9 ถึง 4.3 กม.
- 4) มีการบอกถึงระดับความเชื่อมั่นของช่วงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการวัด เช่น มีความเชื่อมั่น 95% ว่าระยะทางจากบ้านถึงตลาดเท่ากับ 4.1 (± 0.2) กม. หมายถึง โอกาสที่การวัดระยะดังกล่าวคลาดเคลื่อนเกินค่า 4.1 (± 0.2) กม. เท่ากับ 5%

2.7 ความแม่นยำและความถูกต้องของการวัด (Precision and Accuracy)

ความแม่นยำ (precision) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความประณีตและความละเอียดในการวัด หากการวัดปริมาณหนึ่งหลาย ๆ ครั้ง แล้วให้ค่าเศษเหลือหรือความคลาดเคลื่อนน้อย แสดงว่าการวัดนั้นมีความแม่นยำสูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการกระจายตัวของค่าสังเกตที่ได้จากการวัดมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด ขณะที่ความถูกต้อง (accuracy) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความถูกต้องของค่าที่วัดได้ว่าใกล้เคียงค่าจริงเพียงใด ซึ่งค่าทั้งสองจะไม่มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ การวัดที่มีความแม่นยำสูง แต่อาจจะไม่มีความถูกต้องสูงก็ได้ ในทางตรงข้ามการวัดที่มีความแม่นยำไม่ดีนั้นอาจจะให้ความถูกต้องดีกว่า ดังแสดงได้จากการเปรียบเทียบการยิงเป้าในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความหมายของความแม่นยำและความถูกต้องของการวัด