

บทที่ 2

แนวความคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากข้อมูลที่มีการรังวัดเดิมได้มาจากการเผ่าระวางที่ทำการรังวัดก่อนและหลังการซ่อมสะพานครั้งล่าสุด ซึ่งข้อมูลครั้งแรกสุรังวัดเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2543 ดังตารางที่ 2.1 กล้องที่ใช้ในการวัดสอบเป็นกล้องประมวลผลรวม ยี่ห้อ Leica รุ่น TCM 5000 ซึ่งมีความละเอียดในการวัดมุม 0.6 พิลิปดา ความละเอียดถูกต้องในการวัดระยะทาง 1mm + 2ppm. สำหรับการวัดมุมใช้การรังวัดแบบทิศทาง (Direction Method) โดยทำการรังวัดซ้ำ 4 จุด แต่ละจุดตั้งค่าเริ่มต้นของทิศทางอ้างอิงเปลี่ยนไปครั้งละ 45° ส่วนการรังวัดระยะอ่านทุกครั้งที่มีการรังวัดมุม

ตารางที่ 2.1 แสดงวันที่ทำการวัดสอบ โดยใช้ Mini-Prism เป็นเป้า

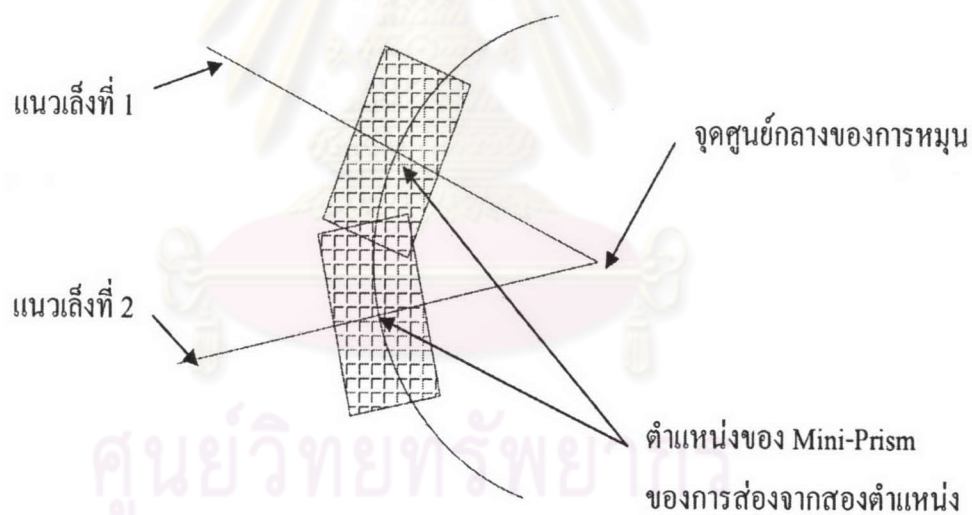
รังวัดครั้งที่	วัน/เดือน/ปี	หมายเหตุ
1	10 มกราคม 2543	
2	19 มกราคม 2543	
3	21 มกราคม 2543	
4	6 มีนาคม 2543	วัดสอบก่อนเลื่อนสะพานทันที 2 ครั้ง
5	7 มีนาคม 2543	วัดสอบก่อนเลื่อนสะพานทันที 2 ครั้ง
6	9 มีนาคม 2543	วัดสอบหลังเลื่อนสะพานทันที 2 ครั้ง
7	10 มีนาคม 2543	วัดสอบหลังเลื่อนสะพานทันที 2 ครั้ง
8	25 เมษายน 2543	วัดสอบหลังการเลื่อนสะพานแล้วเสร็จ 1 เดือน
9	30 พฤษภาคม 2543	วัดสอบหลังการเลื่อนสะพานแล้วเสร็จ 2 เดือน
10	28 มิถุนายน 2543	
11	27 กันยายน 2543	
12	11 มกราคม 2544	
13	29 มีนาคม 2544	

ซึ่งข้อมูลเก่าของการรังวัดเดิมมีความแตกต่างจากข้อมูลที่ทำกรรังวัดในปัจจุบัน กล่าวคือข้อมูลที่ได้จากการรังวัดเก่าทางทีมงานใช้ Mini-Prism ดังรูปที่ 2.1 ในการติดตั้งบนตะม่อสะพาน ลักษณะของ Mini-Prism นั้นจะมีการเยื้องศูนย์กลางจากการหมุนดังรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเยื้องศูนย์กลางของ Mini-Prism ดังนั้นค่าพิคคี่ที่ได้จากการส่องกล้องแต่ละสถานีจะมีค่าไม่

เท่ากัน ค่าที่ได้จากการรังวัดโดยใช้ Mini-Prism เป็นเป้า สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยใช้ค่า
ผลต่างจากค่าเฉลี่ยของการรังวัดในแต่ละครั้งเท่านั้น



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของ Mini-Prism



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเอียงศูนย์ของ Mini-Prism

ดังนั้นในการศึกษาข้อมูลเก่า จึงนำเอาค่าที่ได้จากการรังวัดโดยใช้ Mini-Prism
เป็นเป้าหมายค่าต่างจากค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบในการรังวัดแต่ละครั้งดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงการหาผลต่างของค่าพิกัดตะวันออกที่ได้จากการรังวัดโดยตั้งกล้องที่ หมุด BM ต่างๆ กันเช่น BM-1 F-16 หมายถึง ตั้งกล้องที่หมุด BM1 ส่องไปยังจุด F-16 บน ตะม่อ F ค่าเฉลี่ยของการรังวัดที่ปรากฏในตารางที่ 2.1 ทั้งหมด 10 ครั้ง (\bar{E}) ต่างกับการรังวัดครั้งใด ๆ (i) เท่ากับ $E_i - \bar{E}$ โดยทั้งหมดจำนวน 10 ครั้งการรังวัด

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบผลต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดตะวันออกที่ทำการรังวัดแต่ละครั้ง

Sta	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่าง									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 BM-1 F-16	663953.529	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.003	-0.002	-0.004
2 BM-1 E-14	664009.159	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.002	0.000	-0.002	0.000	0.000
3 BM-1 D-11	664077.021	0.001	-0.002	-0.001	-0.003	0.000	-0.003	0.002	-0.003	-0.002	0.001
4 BM-1 C-8	664163.53	0.005	0.003	0.004	-0.001	0.004	-0.003	0.003	-0.004	-0.007	-0.001
5 BM-1 B-5	664224.788	0.003	0.000	0.002	-0.003	0.004	-0.004	0.003	-0.005	-0.006	0.000
6 BM-1 A-2	664282.953	0.002	0.001	0.002	-0.005	0.003	-0.005	0.004	-0.007	-0.005	0.002
7 BM-4 A-3	664283.38	-0.004	0.000	0.002	-0.002	0.000	0.001	-0.001	-0.001	0.001	-0.001
8 BM-4 B-6	664228.659	-0.004	-0.002	-0.001	-0.002	0.001	0.002	0.000	0.003	0.001	0.001
9 BM-4 C-9	664166.439	0.000	0.001	0.004	-0.002	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000
10 BM-4 D-12	664079.704	-0.003	-0.003	-0.001	-0.005	-0.001	0.002	-0.001	0.004	0.003	0.002
11 BM-4 E-15	664018.569	-0.001	0.000	0.003	-0.005	0.000	-0.001	-0.002	0.004	0.002	0.001
12 BM-2 F-17	663955.324	-0.004	0.004	-0.003	0.000	0.000	-0.003	0.000	0.002	0.001	0.002
13 BM-2 F-18	663957.548	-0.004	0.002	-0.002	0.000	-0.002	-0.003	0.000	0.005	0.006	0.001
14 BM-2 E-13	664011.466	-0.001	0.002	-0.003	-0.001	-0.002	-0.002	0.000	0.006	-0.002	0.001
15 BM-2 D-10	664072.721	-0.002	0.002	-0.005	0.000	-0.002	-0.001	0.000	0.004	-0.001	-0.001
16 BM-2 C-7	664,161,185	0.001	0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.005	0.000
17 BM-3 A-1	664275.487	0.003	-0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	-0.003	-0.003	0.000
18 BM-3 B-4	664221.59	0.005	-0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	-0.001	-0.005
19 BM-3 C-7	664161.18	0.007	0.000	0.005	0.001	0.003	0.000	0.003	0.000	-0.001	-0.002
20 BM-3 D-10	664072.716	0.006	-0.002	0.002	-0.002	-0.001	-0.001	0.004	0.004	0.001	-0.002
21 BM-3 E-13	664011.462	0.008	-0.002	0.005	-0.001	0.001	-0.001	0.006	0.004	0.002	-0.004

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 แสดงการหาผลต่างค่าพิกัดเหนือที่ได้จากการรังวัดโดยตั้งกล้องที่หมุด BM ต่าง ๆ กันเช่น BM-1 F-16 หมายถึง ตั้งกล้องที่หมุด BM1 ส่องไปยังจุด F-16 บนตะม่อ F ค่าเฉลี่ยของการรังวัดที่ปรากฏในตารางที่ 2.1 ทั้งหมด 10 ครั้ง (\bar{N}) ต่างกับการรังวัดครั้งใด ๆ (i) เท่ากับ $N_i - \bar{N}$ โดยทั้งหมดจำนวน 10 ครั้งการรังวัด

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบผลต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดเหนือที่ทำการรังวัดแต่ละครั้ง

Sta	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่าง									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 BM-1 F-16	1527143.368	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.005	0.001	-0.006
2 BM-1 E-14	1527193.477	-0.002	0.000	0.000	0.005	0.000	0.001	-0.001	0.001	0.004	-0.003
3 BM-1 D-11	1527244.151	-0.001	-0.001	-0.004	0.004	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.004	-0.002
4 BM-1 C-8	1527327.571	0.001	0.004	0.002	0.01	0.000	0.003	-0.003	0.001	0.005	-0.005
5 BM-1 B-5	1527384.673	0.000	0.002	0.000	0.01	0.000	0.003	-0.001	0.003	0.006	-0.003
6 BM-1 A-2	1527437.3	0.002	-0.001	0.000	0.011	0.000	0.004	-0.002	0.004	0.002	-0.006
7 BM-4 A-3	1527436.834	0.002	0.000	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	-0.003	-0.002	0.000
8 BM-4 B-6	1527385.795	0.001	-0.001	-0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.000
9 BM-4 C-9	1527329.451	-0.001	0.002	0.004	0.003	0.002	0.000	0.000	0.003	0.000	-0.003
10 BM-4 D-12	1527246.236	-0.003	-0.004	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001
11 BM-4 E-15	1527188.674	-0.001	-0.002	-0.001	0.004	0.001	0.002	0.002	-0.001	0.001	-0.003
12 BM-2 F-17	1527141.458	0.001	-0.001	-0.001	0.001	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.001	-0.003
13 BM-2 F-18	1527139.092	0.001	-0.001	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.003	0.001	0.000	-0.002
14 BM-2 E-13	1527196.279	0.000	-0.001	-0.001	0.000	0.001	-0.002	-0.002	0.000	0.001	-0.002
15 BM-2 D-10	1527253.678	0.000	-0.001	-0.003	-0.002	0.000	-0.002	-0.001	0.003	0.002	-0.001
16 BM-2 C-7	1527335.039	0.003	0.002	0.001	0.001	0.003	-0.002	0.000	0.003	-0.002	0.000
17 BM-3 A-1	1527445.191	0.003	-0.002	0.002	-0.001	0.001	0.002	0.001	-0.003	-0.002	0.002
18 BM-3 B-4	1527393.37	0.002	-0.003	0.002	-0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	-0.001
19 BM-3 C-7	1527335.035	0.002	0.000	0.002	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000	-0.003
20 BM-3 D-10	1527253.676	-0.001	-0.004	-0.001	-0.004	0.000	0.001	-0.003	0.000	0.003	0.002
21 BM-3 E-13	1527196.277	-0.004	-0.002	-0.003	-0.001	0.001	0.002	-0.004	-0.001	0.001	0.001

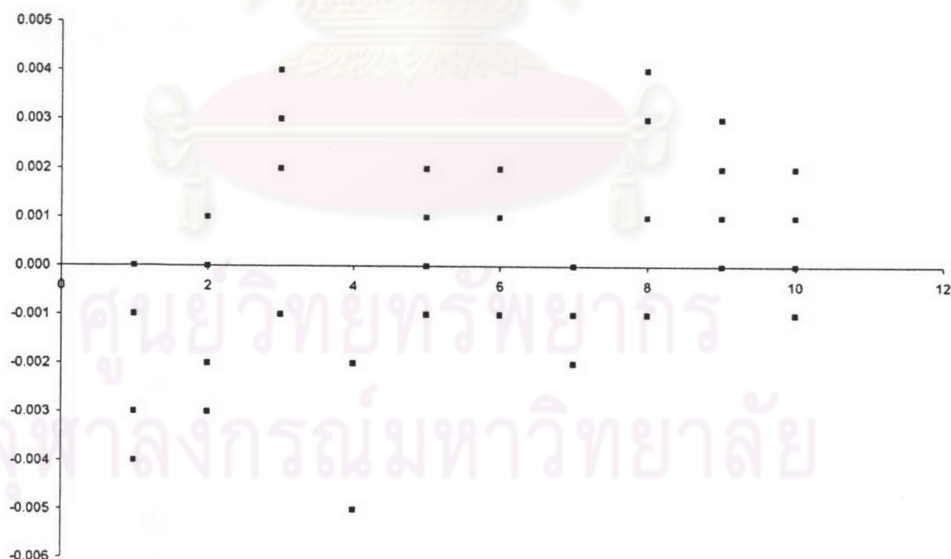
ตารางที่ 2.4 แสดงการหาผลต่างค่าความสูง ที่ได้จากการรังวัดโดยตั้งกล้องที่ หมุด BM ต่าง ๆ กันเช่น BM-1 F-16 หมายถึง ตั้งกล้องที่หมุด BM1 ส่องไปยังจุด F-16 บนตะม่อ F ค่าเฉลี่ยของการรังวัดที่ปรากฏในตารางที่ 2.1 ทั้งหมด 10 ครั้ง (\bar{H}) ต่างกับการรังวัดครั้งใด ๆ (i) เท่ากับ $H_i - \bar{H}$ โดยทั้งหมดจำนวน 10 ครั้งการรังวัด

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบผลต่างจากค่าเฉลี่ยของค่าความสูงที่ทำการรังวัดแต่ละครั้ง

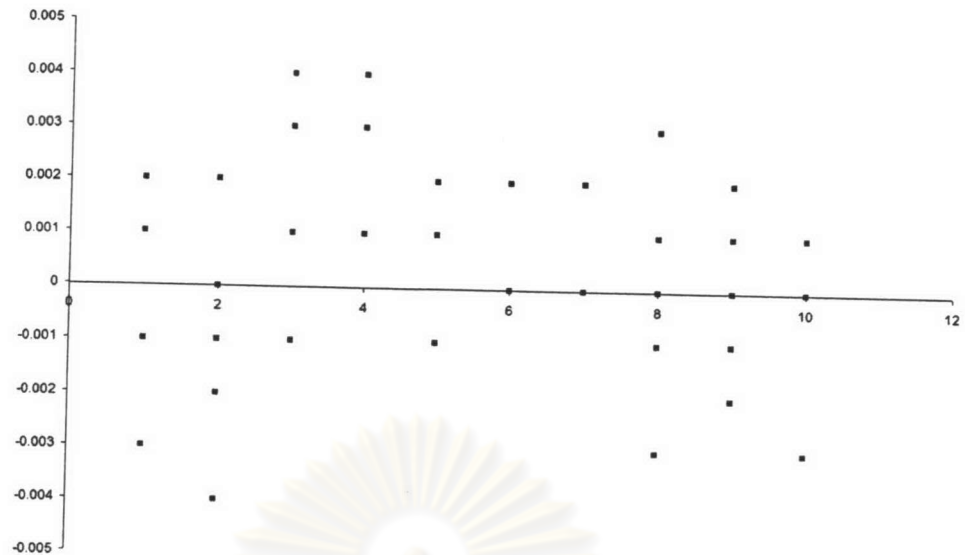
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่าง									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 BM-1 F-16	6.565	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.001	0.004	-0.003	-0.008	-0.001
2 BM-1 E-14	6.558	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.005	0.000	-0.009	0.000
3 BM-1 D-11	6.534	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.004	0.005	-0.002	-0.01	-0.003
4 BM-1 C-8	6.562	0.004	0.007	0.000	0.003	0.001	0.002	0.006	-0.003	-0.013	-0.001
5 BM-1 B-5	6.553	0.004	0.000	-0.004	0.005	0.001	0.000	0.004	-0.003	-0.014	0.003
6 BM 1 A-2	6.553	0.002	0.005	0.003	0.002	0.004	-0.001	0.01	-0.004	-0.019	0.002
7 BM-4 A-3	6.559	-0.002	-0.001	-0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	-0.004	0.000	0.001
8 BM-4 B-6	6.557	-0.002	0.001	-0.002	0.002	0.001	0.001	0.003	-0.005	0.001	0.000
9 BM-4 C-9	6.549	-0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	-0.008	0.000	-0.002
10 BM-4 D-12	6.525	-0.001	0.005	0.003	0.004	0.002	0.000	0.004	-0.006	-0.001	-0.005
11 BM-4 E-15	6.561	-0.004	0.003	0.001	0.005	-0.001	-0.002	0.004	-0.007	-0.002	-0.002
12 BM-2 F-17	6.551	-0.008	0.000	0.003	-0.003	-0.002	0.003	0.004	0.017	-0.005	-0.003
13 BM-2 F-18	6.55	-0.002	-0.001	0.003	0.001	0.000	-0.003	0.001	0.017	-0.001	-0.001
14 BM-2 E-13	6.555	0.002	0.000	0.004	0.000	-0.002	0.000	0.000	0.01	-0.003	-0.002
15 BM-2 D-10	6.527	0.000	0.000	0.003	0.002	-0.002	0.001	0.002	0.006	-0.001	-0.002
16 BM-2 C-7	6.554	0.002	0.000	0.003	0.000	0.001	0.002	0.004	0.000	-0.003	-0.001
17 BM-3 A-1	6.566	0.001	0.000	0.000	0.003	0.002	0.002	0.002	-0.009	0.000	0.000
18 BM-3 B-4	6.567	0.002	0.000	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	-0.006	0.000	-0.002
19 BM-3 C-7	6.557	0.003	0.001	0.000	0.003	0.002	0.002	0.002	-0.003	-0.001	-0.002
20 BM-3 D-10	6.527	0.006	0.001	-0.002	0.002	0.002	-0.001	0.000	0.003	-0.002	-0.001
21 BM-3 E-13	6.555	0.002	-0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	-0.001	0.008	-0.001	-0.002

จากตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.4 สังเกตเห็นว่าที่จุดตั้งกล้องเดียวกัน มีค่าผลต่างไปในทิศทางเดียวกัน ยกตัวอย่าง ผลต่างครั้งที่ 7 ของ BM 2 ส่องไปยังหมุดถาวรบน ตะม่อ (แถวที่ 12 ถึง 16) สำหรับค่าระยะตะวันออก (ตารางที่ 2.2) มีค่าเท่ากับศูนย์และน้อยกว่า ศูนย์ ทุกค่าต่าง สำหรับค่าระยะเหนือ (ตารางที่ 2.3) มีค่าเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าศูนย์ทุกค่าต่าง สำหรับค่าความสูง (ตารางที่ 2.4) มีค่าเท่ากับศูนย์และมากกว่าศูนย์ทุกค่าต่าง เช่นกัน ด้วยจากการ วิเคราะห์ข้างต้นจึงตั้งข้อสังเกตถึงการวัดสอบอาจจะมีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่ในการรังวัด

เพื่อจะเห็นภาพได้ง่ายขึ้นผู้ทำการทดลองจึงนำข้อมูลจากตารางที่ 2.2 ตารางที่ 2.3 และ ตารางที่ 2.4 ยกตัวอย่างนำผลต่างจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากจุดตั้งกล้อง BM-4 ทั้งหมด 10 ครั้งของการรังวัดมาแสดงในรูปของกราฟเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ดังรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นค่าผลต่างจากค่าเฉลี่ยระยะระยะตะวันออกของข้อมูลที่ได้จากจุดตั้งกล้อง BM-4 แกนนอนแสดงครั้งที่ทำการรังวัด แกนตั้งแสดงค่าต่างจากค่าเฉลี่ยของระยะตะวันออก ยกตัวอย่างครั้งที่ 3,5,6,8,9 และ 10 จะสังเกตเห็นว่าจากกราฟผลต่างจากค่าเฉลี่ยจะมากกว่าศูนย์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนในครั้งที่ 1,2,4 และ 7 จะสังเกตเห็นว่าจากกราฟผลต่างจากค่าเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าศูนย์เป็นส่วนใหญ่ รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นค่าผลต่างจากค่าเฉลี่ยระยะเหนือของข้อมูลที่ได้จากจุดตั้งกล้อง BM-4 แกนนอนแสดงครั้งที่ทำการรังวัด แกนตั้งแสดงค่าต่างจากค่าเฉลี่ยของระยะเหนือ ยกตัวอย่างครั้งที่ 3,4,5,6,7 และ 10 จะสังเกตเห็นว่าจากกราฟผลต่างจากค่าเฉลี่ยมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 จะสังเกตเห็นว่าจากกราฟผลต่างจากค่าเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าศูนย์เป็นส่วนใหญ่ รูปที่ 2.5 แกนตั้งแสดงให้เห็นค่าผลต่างจากค่าเฉลี่ยความสูงของข้อมูลที่ได้จากจุดตั้งกล้อง BM-4 แกนนอนแสดงครั้งที่ทำการรังวัด ยกตัวอย่างครั้งที่ 2,4,5 และ 6 จะสังเกตเห็นว่าจากกราฟผลต่างจากค่าเฉลี่ยในครั้งมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนในครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 8 จะสังเกตเห็นว่าจากกราฟผลต่างจากค่าเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าศูนย์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวทำให้ทราบว่ามีความคลาดเคลื่อนแบบมีระบบแฝงอยู่ในการวัดสอบ



รูปที่ 2.3 แสดงค่าต่างจากค่าเฉลี่ยระยะตะวันออกของการวัดสอบแต่ละครั้ง(ตั้งกล้องที่ BM4)



รูปที่ 2.4 แสดงค่าต่างจากค่าเฉลี่ยระยะเหนือของการวัดสอบแต่ละครั้ง(ตั้งกล้องที่ BM4)



รูปที่ 2.5 แสดงค่าต่างจากค่าเฉลี่ยความสูงของการวัดสอบแต่ละครั้ง(ตั้งกล้องที่ BM4)

จากสาเหตุข้อมูลการรังวัดโดยใช้เป้าแบบ Mini-Prism ไม่สามารถนำค่าที่ได้จากการรังวัด ในแต่ละจุดตั้งกล้องที่ต่างกันมาเปรียบเทียบกันได้ สาเหตุจากการเอียงศูนย์ (Eccentricity) ของ Mini-Prism ข้อมูลที่ได้จากการรังวัดจึงเปรียบเทียบได้เฉพาะกับจุดตั้งกล้อง

เดียวกันเท่านั้น ด้วยสาเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่ต้องการนำค่าที่ได้จากการรังวัดมาเปรียบเทียบกัน โดยจัดการเยื้องศูนย์ (Eccentricity) ออกไป

จากสาเหตุการเยื้องศูนย์ Mini-prism มีการทำการหล่อแท่นวางกล้องใหม่ในลักษณะ Pillar ไว้บนปีกตะม่อของสะพานสูงจากพื้นตะม่อมาประมาณ 60 ซม. ซึ่งทำให้การวางเป้าหรือ Prism ไม่มี Centering Error ใช้กับปริซึมแบบปกติ และจากนั้นก็ใช้ Prism แบบปกติในการรังวัดสะพานพระรามหก เป็นต้นมา จากตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นค่าความแตกต่างของพิกัดหมุดถาวรบนตะม่อที่ได้จากการวัดสอบต่างจุดควบคุม ผลจากการเปรียบเทียบจะเห็นว่า ผลต่างระหว่าง BM1-BM3 ของค่าพิกัดตะวันออกมีค่าน้อยกว่าศูนย์ทั้งหมด เช่นเดียวกับผลต่างระหว่าง BM2-BM3 ของค่าพิกัดตะวันออกมีค่าน้อยกว่าศูนย์ทั้งหมด ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับผลของการรังวัดโดยใช้ Mini-Prism โดยแสดงให้เห็นว่าข้อมูลข้างต้นยังมีความคลาดเคลื่อนแบบมีระบบเหลืออยู่ เป็นสาเหตุของการศึกษาเพื่อหาสาเหตุและลดค่าความคลาดเคลื่อนแบบมีระบบที่ยังเหลืออยู่ในการรังวัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าพิคัดของหมุดถาวร โดยใช้เป้าปริซึมแบบปกติ

ลำดับ ที่	จาก หมุด	ไปที่	ค่าพิคัด			เปรียบเทียบค่าระหว่าง BM1-BM2			เปรียบเทียบค่าระหว่าง BM1-BM3		
			E	N	H	E	N	H	E	N	H
1	BM-1	A-1	664275.356	1527445.266	8.051				-0.002	0.006	0.046
2	BM-1	B-1	664219.034	1527393.426	8.317				-0.001	0.010	0.055
3	BM-1	C-1	664158.019	1527335.973	8.730	0.002	0.010	0.027	-0.002	0.010	0.054
4	BM-1	D-1	664070.464	1527253.577	8.457	0.004	0.007	0.035	-0.003	0.009	0.058
5	BM-1	E-1	664009.204	1527196.062	8.372	0.003	0.005	0.044	-0.001	0.008	0.077
6	BM-1	F-1	663952.613	1527142.769	8.018	0.002	0.007	0.046	-0.002	0.009	0.072
7	BM-2	C-1	664158.017	1527335.963	8.703						
8	BM-2	D-1	664070.460	1527253.570	8.422						
9	BM-2	E-1	664009.201	1527196.057	8.328						
10	BM-2	F-1	663952.611	1527142.762	7.972						
11	BM-3	A-1	664275.358	1527445.260	8.005						
12	BM-3	B-1	664219.035	1527393.416	8.262				BM2-BM3		
13	BM-3	C-1	664158.021	1527335.963	8.676				-0.004	0.000	0.027
14	BM-3	D-1	664070.467	1527253.568	8.399				-0.007	0.002	0.023
15	BM-3	E-1	664009.205	1527196.054	8.295				-0.004	0.003	0.033
16	BM-3	F-1	663952.615	1527142.760	7.946				-0.004	0.002	0.026
17	BM-4	C-2	664166.894	1527325.936	8.600						
18	BM-4	B-2	664228.358	1527383.479	8.220						
19	BM-4	A-2	664284.891	1527436.603	7.954						
20	BM-4	F-2	663962.486	1527133.588	7.878						
21	BM-4	E-2	664018.537	1527186.228	8.234						
22	BM-4	D-2	664079.430	1527243.421	8.322						

เนื่องจากในการทำรังวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพานพระรามหก จุดที่ใช้
อ้างอิงจะต้องแน่ใจได้ว่าไม่มีการเคลื่อนตัว เพื่อว่าเมื่อโครงสร้างมีการเคลื่อนตัวไปแล้วระยะและ
ทิศทางเทียบกับจุดอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นการรังวัดตรวจสอบสามารถแบ่งการ

ทำงานเป็น 2 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรก เป็นการทำรังวัดโครงข่ายจุดควบคุมที่อยู่โดยรอบ สะพานพระรามหก จำนวน 6 หมุด ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการรังวัดไปยังจุดตรวจสอบ โครงข่ายจุดควบคุมนี้ใช้การรังวัดดาวเทียม GPS ด้วยวิธีรังวัดแบบสถิติ เพื่อหาค่าพิกัดจุดควบคุมทั้ง 6 หมุด ต่อมาขั้นตอนที่สอง จะเป็นการรังวัดโดยใช้กล้องแบบประมวลผล ทำการรังวัดไปยังหมุดถาวรบน ตะม่อสะพานพระรามหก เพื่อจะนำมาหาการเคลื่อนตัวของสะพานพระรามหก ดังนั้นการศึกษา ค่าความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นระหว่าง การรังวัดดาวเทียม GPS ด้วยวิธีรังวัดแบบสถิติกับการ รังวัดโดยใช้ กล้องแบบประมวลผล จะแยกพิจารณาเป็นกรณีไป

2.1 ความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดดาวเทียม GPS ด้วยวิธีรังวัดแบบสถิติ

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมโดยใช้ดาวเทียม GPS
พิจารณาได้ 3 กลุ่ม คือ

2.1.1 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับดาวเทียม

2.1.2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายของสัญญาณ

2.1.3 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณ

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียม GPS

2.1.1 ความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม

สาเหตุของความคลาดเคลื่อนวงโคจรดาวเทียม คือ ข้อมูลดาวเทียมในสัญญาณที่
รับได้นั้นเป็นวงโคจรที่ได้จากการคำนวณล่วงหน้า โดยอาศัยรูปจำลองของแรงต่างๆ ที่กระทำต่อ
ดาวเทียม รูปจำลองที่ใช้อาจจะไม่ถูกต้องหรือไม่ละเอียดเพียงพอเมื่อเทียบกับแรงจริงๆ ที่กระทำ
ต่อดาวเทียมในขณะที่ทำการวัด ดังนั้นตำแหน่งของดาวเทียมจากอีพีเมอร์สดาวเทียมที่ส่งกระจาย
ลงมาพร้อมสัญญาณดาวเทียมนั้นจึงไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม การลดความคลาดเคลื่อนของวงโคจร
ดาวเทียมสามารถเกิดขึ้น โดยการใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมที่คำนวณหาได้หลังจากที่ดาวเทียมนั้น
ได้โคจรผ่านตำแหน่งนั้นๆ แล้ว ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกจัดทำโดยหน่วยงาน IGS และสามารถ
ดาวน์โหลดข้อมูลได้จากอินเทอร์เน็ต

2.1.2 ความคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับ

ซูเกียรติ วิเชียรเจริญ และเฉลิมชนม์ สถิระพจน์ (2545 ก.) ได้อธิบายถึงเวลาจีพีเอส และ เวลาดาวเทียมไว้ดังนี้

เวลาจีพีเอส หมายถึง เวลาที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงในระบบจีพีเอส โดยมีสถานีควบคุมหลัก (Master Control Station) ทำหน้าที่เป็นผู้เฝ้าระวังและรักษาเวลาจีพีเอสให้มีความถูกต้องและเที่ยงตรง โดยปกติเวลาจีพีเอสและเวลามาตรฐานสากล (UTC) จะถูกรักษาให้ต่างกันไม่เกิน 100 ns (10^{-7} วินาที)

เวลาดาวเทียม หมายถึง เวลาที่อ่านได้จากนาฬิกาดาวเทียม บนดาวเทียมแต่ละดวงจะมีมาตรฐานความถี่อะตอมที่เป็นรูบิเดียม 2 เครื่อง และซีเซียม 2 เครื่อง เวลามาตรฐานอ้างอิงมาจากค่าเฉลี่ยมาตรฐานความถี่ 4 เครื่องนี้ สถานีควบคุมหลักสามารถควบคุมเวลาดาวเทียมให้ต่างจากเวลาจีพีเอสไม่เกิน 1 ใน 1000 วินาที (1 ms) และควบคุมความถี่ให้มีความถูกต้องถึง 10^{-9}

ความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียม นอกจากจะเกิดจากการเทียบเวลาและความถี่มาตรฐานแล้ว ยังมีความคลาดเคลื่อนระยะยาวที่เกิดจากความไม่เสถียรของมาตรฐานความถี่ที่เรียกว่า ครีฟท์ (drift) อีกด้วย โดยข้อมูลความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมแต่ละดวงอยู่ในข้อมูลดาวเทียมที่ส่งลงมาถึงสัญญาณ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณล่วงหน้าจากสถานีควบคุมหลักเช่นเดียวกับวงโคจรดาวเทียม โดยสามารถลดความคลาดเคลื่อนของนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับดังกล่าวได้จากการใช้เทคนิคการหาค่าต่างครั้งที่สอง (Double-differencing technique) ในวิธีการหาค่าตำแหน่งแบบสัมพัทธ์

2.1.3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการหักเหในชั้นบรรยากาศ

2.1.3.1 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระในชั้นบรรยากาศทำให้สัญญาณของ GPS ไม่สามารถเดินทางด้วยความเร็วแสงได้ ดังนั้นซูโดเรนจ์ที่ได้จึงมีขนาดมากกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตามเราสามารถลดความคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้ โดยการใช้แบบจำลองที่เหมาะสมในกรณีของเครื่องรับแบบสอง ความถี่สำหรับวิธีการกำจัดผลกระทบจากชั้นไอโอโนสเฟียร์คือ การใช้แบบจำลองแบบ Ionosphere-free combination (L3) โดยการสร้างซูโดเรนจ์ L3 ขึ้นมาจาก

$$P(L3) = \frac{f_1^2 \cdot P(L1) - f_2^2 \cdot P(L2)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.1)$$

$$\Phi(L3) = \frac{f_1^2 \cdot \Phi(L1) - f_2^2 \cdot \Phi(L2)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.2)$$

โดยที่

f_1 คือ ความถี่ของคลื่นส่ง L1, 1575.42 MHz

f_2 คือ ความถี่ของคลื่นส่ง L2, 1227.60 MHz

P(L1) คือ ชูโคเรนจ์ที่วัดจากคลื่นส่ง L1 (เมตร)

P(L2) คือ ชูโคเรนจ์ที่วัดจากคลื่นส่ง L2 (เมตร)

P(L3) คือ ชูโคเรนจ์ที่ได้จาก Ionosphere-free combination(เมตร)

$\Phi(L1)$ คือ เฟสของคลื่นส่ง L1

$\Phi(L2)$ คือ เฟสของคลื่นส่ง L2

$\Phi(L3)$ คือ เฟสของคลื่นส่งที่ได้จาก Ionosphere-free combination

2.3.1.2 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นโทรโพสเฟียร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นส่ง แต่ขึ้นอยู่กับความกดดันอุณหภูมิและความชื้นในบรรยากาศ ซึ่งอิทธิพลของบรรยากาศที่มีต่อการวัดระยะสามารถแยกออกเป็นส่วนประกอบขึ้นและแห้ง โดยเราจะลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจากการใช้แบบจำลอง Saastamoinen (Hofmann-Wellenhof, 2001 : 113-116)

2.1.4 ความคลาดเคลื่อนจากคลื่นสะท้อน (Multipath)

คลื่นสะท้อน หมายถึง การแพร่กระจายของคลื่นที่มีการสะท้อนตั้งแต่หนึ่งครั้งขึ้นไป พื้นผิวที่สะท้อนอาจอยู่ในแนวตั้งราบ หรือเอียงก็ได้ ผลของคลื่นสะท้อนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคลื่นหลุด (Cycle Slip) โดยเราสามารถหลีกเลี่ยงการรับสัญญาณที่มีคลื่นสะท้อนได้โดย

- 1) เลือกจุดวางเครื่องรับที่ไม่มีพื้นผิวสะท้อนอยู่ใกล้เคียง

- 2) เลือกเสาอากาศที่ออกแบบเฉพาะ เช่น เสาอากาศที่มีแผ่นกาวน้
- 3) ใช้วัสดุที่ดูดซับคลื่นวางรอบเสาอากาศ

2.1.5 ความคลาดเคลื่อนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องรับสัญญาณ (Receiver-Dependent Biases)

ความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับได้แก่

- 1) noise ในการวัดของเครื่องรับ โดยทั่ว ๆ ไปมีขนาดประมาณ 1% ของค่าความยาวคลื่นของสัญญาณที่กำลังวัด
- 2) ความคลาดเคลื่อนระหว่างช่องรับสัญญาณ (Interchannel bias)

ในปัจจุบันเครื่องรับรุ่นใหม่ ๆ สามารถทำให้ทั้ง noise ในการวัดของเครื่องรับและความคลาดเคลื่อนระหว่างช่องรับสัญญาณ ซึ่งมีผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับลดลงไปมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดในขณะทำการรังวัดหมุดควบคุมซึ่งใช้วิธีรังวัดดาวเทียมแบบสถิต

การรังวัดแบบสถิตเป็นวิธีการวัดโดยเครื่องรับไม่มีการเคลื่อนที่ กล่าวคือเครื่องรับจะตั้งไว้ที่จุดปลายของเสัฐานที่ต้องการหาความยาวเสัฐานเพื่อจะนำมาหาค่าพิกัดต่อไป ระยะเวลาที่รับสัญญาณเป็นเวลาที่นานพอจะหาค่าตัวเลขปริศนาตามเกณฑ์ความถูกต้องที่ต้องการ ดังนั้นระยะเวลาในการรับสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับความยาวเสัฐาน จำนวนดาวเทียมและเรขาคณิตดาวเทียม

2.2 ความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดโดยใช้กล้องแบบประมวลผล (Total-Station)

เมื่อจบการทำงานรังวัด GPS ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการทำงานรังวัดโดยใช้กล้องแบบประมวลผลความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะและวัดมุม ความคลาดเคลื่อนที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเกิดจากวัดมุมราบ มุมสูง และส่วนที่สองเกิดจากการวัดระยะ สำหรับในการศึกษามีการใช้กล้องแบบประมวลผลทั้งหมด 2 แบบ แบบแรก Leica TDM 5000 ความละเอียดถูกต้องทางการวัดมุมเท่ากับ 0.6" ความละเอียดถูกต้องสำหรับการวัดระยะเท่ากับ

1mm+2ppm. แบบที่สอง Leica TC 1700 ความละเอียดถูกต้องทางการวัดมุมเท่ากับ 1.5" ความละเอียดถูกต้องสำหรับการวัดระยะเท่ากับ 2mm+2ppm. ดังนั้นในหัวข้อความคลาดเคลื่อนที่เกิดกับการรังวัดมุมราบ ,มุมสูง และ ระยะทาง นั้นจะพิจารณาจากความละเอียดถูกต้องของกล้องแบบประมวลผลทั้งสองแบบที่ใช้ในการทดลอง ดังหัวข้อ 2.2.1 และ หัวข้อ 2.2.2

2.2.1 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดมุมราบ

1) ผลกระทบของ Sighting error (σ_p) เนื่องจากขีดความสามารถของการมองผ่านกล้องจะแปรผันตามสภาพบรรยากาศ ขึ้นกับกำลังขยายของกล้องที่ใช้สามารถประมาณได้จากสมการที่ 2.3 โดยปกติป้องกันได้จากการส่องซ้ำที่เป้าเดิมหลาย ๆ ครั้ง หรือส่องเป็นชุดขนาดของผลกระทบจากการส่องเป็นชุดดังสมการที่ 2.4 (US Army, 2003)

$$\sigma_p = 30" / M \text{ to } \sim \sigma_p = 60" / M \quad (2.3)$$

โดย

M คือ กำลังขยายกล้องมีค่าเท่ากับ 32.x (สำหรับกล้อง TDM 5000) และ 30.x (สำหรับกล้อง TC 1700)

เมื่อ

แทนค่ากำลังขยาย (M) ในสมการ 2.3 $\sigma_p = 1.875" \sim 2"$

$$\sigma = \sigma_p / \sqrt{n} \quad (2.4)$$

โดย

n คือ จำนวนชุดของการส่อง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นของบทที่ 2 กล่าวคือการรังวัดทำการรังวัดทำการรังวัดทั้งหมด 4 ชุดต่อหนึ่งมุม ดังนั้นนำค่าดังกล่าวแทนค่าในสมการที่ 2.4 โดยใช้ค่าประมาณ $\sigma_p = 2"$ เนื่องจากค่าที่ได้มาจากการคำนวณของทั้งกล้อง Leica TDM 5000 และ Leica TC 1700 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนี้

$$\sigma = 2" / \sqrt{4}$$

ดังนั้น

$$\sigma = 1''$$

2) ผลกระทบของการอ่านค่า Reading error : (σ_r) ความคลาดเคลื่อนของการอ่าน โดยจะมีความสัมพันธ์กับค่าเล็กสุดที่อ่านได้ สามารถประมาณได้จากสมการ (2.5) สำหรับกล้องแบบประมวลผลรวมสามารถหาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองส่อง 20 ครั้ง หรือได้จากค่าความละเอียดถูกต้องของกล้องที่ได้มาจากโรงงาน (Kuang, 1996)

$$\sigma_r = 2.5d'' \quad (2.5)$$

โดย

d คือ ค่าน้อยที่สุดที่สามารถอ่านได้จากกล้อง (โดยปกติ d เท่ากับ 1" ,0.5" ,0.1") (seconds)

เมื่อ

สำหรับกล้อง แบบประมวลผล Leica TC 1700 แทนค่า ความสามารถในการอ่านของกล้อง(d) เท่ากับ 1.5" ในสมการ (2.5) จะได้เท่ากับ 3.75"

สำหรับกล้อง แบบประมวลผล Leica TDM 5000 แทนค่า ความสามารถในการอ่านของกล้อง(d) เท่ากับ 0.6" ในสมการ (2.5) จะได้เท่ากับ 1.5"

3) ผลกระทบของการตั้งระดับเครื่องมือ Instrument leveling error : ความถูกต้องของระดับของเครื่องมือ สามารถประมาณได้ดังนี้ (Kuang, 1996)

$$\sigma_v = 0.02 v'' \quad (2.6)$$

โดย

v" คือ ความไวของหลอดระดับ (seconds)

ใช้ค่า ความไวของหลอดระดับ (v) เท่ากับ 0.3" (สำหรับกล้อง Leica TDM 500 และ Leica TC 1700 มีค่าเท่ากัน)

สำหรับผลกระทบในการวัดทิศทาง ดังสมการที่ 2.7

$$\sigma_L = \sigma_v \cdot \cot(Z) \quad (2.7)$$

โดย

Z คือ ค่า Zenith distances ที่อ่านได้จากการส่องไปยังเป้า (Degree)

เมื่อ

ประมาณค่า Zenith distances เท่ากับ 89°

แทนค่าในสมการ (2.7) จะได้ค่าดังนี้ $(0.006") \cdot \cot(Z) \approx 0$

4) ผลกระทบของ Centering error : ที่เกิดขึ้นจากจุดศูนย์กลางของเครื่องมือที่ใช้ งาน คำนี้นขึ้นอยู่กับวิธีรังวัดและการใช้เครื่องมือ ถ้าสภาพสิ่งแวดล้อมอยู่ในสภาพดีเราจะได้ค่า Centering Error ดังแสดงในตาราง 2.6 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.6 แสดง Centering Error แยกแต่ละชนิดเครื่องมือที่ใช้ (Kuang, 1996)

Method of Centering	Expected Error
String plumb bob	1 mm/m
Optical plummet	0.5 mm/m
Plumbing rods	0.5 mm/m
Forced or self-centering	0.1 mm

จากค่าในตารางที่ 2.6 เมื่อทราบค่า Expected Error ของแต่ละวิธีการรังวัดแล้ว นำมาหาค่า Centering Error จากสมการ 2.8 (Kuang, 1996)

$$\sigma^2 = (\rho'')^2 \sqrt{\left(\frac{\sigma_1^2}{s_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{s_2^2} + \frac{\sigma_3^2}{s_1^2 s_2^2} (s_1^2 + s_2^2 - 2s_1^2 s_2^2 \cos\beta) \right)} \quad (2.8)$$

โดย

σ_1 และ σ_2 คือ Centering Error ของเป้าทั้ง 2

σ_3 คือ Centering Error ของจุดตั้งกล้อง

β	คือ มุมที่รังวัด	องศา
s_1 และ s_2	คือ ระยะที่วัดไปถึงเป้า	เมตร
ρ''	คือ 206265"	

สำหรับค่าต่าง ๆ ที่นำมาแทนค่าในสมการที่ 2.8 ดังนี้ Centering Error ของ Back-Sight ใช้ Optical plummet มีค่าเท่ากับ 0.5 mm/m. สำหรับ Centering Error ของจุดถาวรบนตะม่อ เนื่องจากใช้ Pillar ดังนั้นใช้ค่าเท่ากับ 0.1 mm. สำหรับ Centering Error ของจุดตั้งกล้องเนื่องจากในการทดลองใช้ขาตั้งกล้องแบบ Forced-centering มีค่าเท่ากับ 0.1 mm. เมื่อนำค่า Centering Error ข้างต้นแทนค่าในสมการ 2.8 จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในส่วนของ Centering Error แต่ละการรังวัดจากหมุด BM1, BM2 และ BM3 ไปยังจุดที่รังวัดบนตะม่อดังตารางที่ 2.7 ยกตัวอย่างการคำนวณ ตั้งกล้องที่จุด BM2 ส่องไปยังหมุดถาวรบนตะม่อ C รายละเอียดการรังวัดที่จะนำไปคำนวณเป็นดังนี้

ตั้งกล้องที่จุด BM2 ส่อง Back-Sight ไปยัง BM1 ระยะ 282 เมตร

ตั้งกล้องที่จุด BM2 ส่องไปยังหมุดถาวรบนตะม่อ C เป็นมุม 147° ระยะทาง 167 เมตร

ดังนั้นเมื่อนำค่าข้างต้นไปแทนค่าในสมการที่ 2.8 จะได้

$$\sigma^2 = \rho \sqrt{\left[\left(\frac{0.001}{282} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{167} \right)^2 + \left(\frac{0.0001}{282 \cdot 167} \right)^2 (282^2 + 167^2 - 2 \cdot 282 \cdot 167 \cdot \cos(147^\circ)) \right]}$$

$$\sigma^2 = 206265 \sqrt{(1.25 \text{E}^{-11} + 3.58 \text{E}^{-13} + 4.51 \text{E}^{-18} (186405 .7))}$$

$$\sigma = 1.42''$$

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากผลกระทบของ Centering Error

จุดตั้งกล้อง	เป้า	ความคลาดเคลื่อน (")
BM1	A	0.99
	B	1.04
	C	1.06
	D	1.25
	E	1.50
	F	-
BM2	C	1.42
	D	1.34
	E	1.27
	F	1.22
BM3	A	-
	B	2.63
	C	1.77
	D	1.53
	E	1.48
	F	-

จากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละส่วน นำมาทำการประเมินค่าความคลาดเคลื่อน จากสมการของการวัดมุมแบบทิศทาง ($\sigma_{d_i}^2$) ที่เกิดขึ้นในการรังวัดจากกล้องแบบประมวลผล Leica TDM 5000 และ กล้องแบบประมวลผล Leica TC1700 โดยนำมาแทนค่าในสมการ 2.9 (Kuang, 1996)

$$\sigma_{d_i}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_v^2 \cot^2 Z + (\rho'')^2 \frac{2\sigma_c^2}{s^2} \quad (2.9)$$

สำหรับกล้องแบบประมวลผล Leica TDM 5000 นำค่าที่ได้จากสมการ (2.4), (2.5), (2.7), (2.8) แทนในสมการ (2.9) จะได้ดังต่อไปนี้

$\sigma_{d_i}^2 = 1^2 + 1.5^2 + 0 +$ (นำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 2.7 ประมาณ 1.5 " มาทำการคำนวณ)

$$\sigma_{d_i}^2 = 5.5 "$$

$$\sigma_{d_i} = 2.5"$$

สำหรับกล้องแบบประมวลผล Leica TC 1700 นำค่าที่ได้จากสมการ (2.4), (2.5), (2.7), (2.8) แทนในสมการ (2.9) จะได้ดังต่อไปนี้

$\sigma_{d_i}^2 = 1^2 + 3.75^2 + 0 +$ (นำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 2.7 ประมาณ 1.5 " มาทำการคำนวณ)

$$\sigma_{d_i}^2 = 17.3"$$

$$\sigma_{d_i} = 4"$$

สำหรับการหักเหของแสงที่มีผลต่อการวัดมุมราบจากกล้องวัดมุมเนื่องจากสภาพบรรยากาศที่ไม่คงที่ตามแนวการเล็งมีค่าความคลาดเคลื่อน (e_{ref}) ที่สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10 (US Army Corps of Engineers, 2002)

$$e_{ref} = (8") [S \cdot P / T^2] \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.10)$$

โดย

S คือ ระยะระหว่างสถานี (m)

P คือ ความดันบรรยากาศ (mb)

T คือ อุณหภูมิ (Kelvin)

dT/dx คือ Temperature gradient (°C/m)

จากสมการถ้าสมมุติค่า Temperature gradient เท่ากับ $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C/m}$, ระยะ 250 เมตรที่ความดัน 1015 mb และอุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนทิศทาง เท่ากับ 2" เป็นตัวเลขที่น้อยและมีค่าไม่มากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดในการรังวัดทิศทางราบ ที่ได้จากสมการ 2.9 ดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่นำผลของหักเหของแสงที่มีผลต่อการวัดมุมราบมาพิจารณา

2.2.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดมุมสูง

โดยปกติการวัดมุมสูงสามารถหาได้จากทิศทางการวัดมุมโดยอ้างอิงกับแกนตั้งของกล้องวัดมุม โดยความถูกต้องของการรังวัดมุมสูงหาได้โดยสมการ 2.11 (Kuang, 1996)

$$\sigma_{zen} = \sqrt{(\sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_v^2 + \sigma_{ref}^2)} \quad (2.11)$$

โดย

σ_p	คือ Sighting error	ฟิลิปดา
σ_r	คือ Reading Error	ฟิลิปดา
σ_v	คือ Instrument leveling error	ฟิลิปดา
σ_{ref}	คือ Refraction error	ฟิลิปดา
σ_{zen}	คือ ความคลาดเคลื่อนของมุมสูง	ฟิลิปดา

ในส่วนของ Sighting error, Reading Error และ Instrument Leveling Error ใช้ค่าเดียวกับค่าจาก สมการ 2.4, 2.5 และ 2.7 ตามลำดับ ในส่วนของ Refraction error เป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนกับการวัดมุมสูงโดยขึ้นกับสภาพบรรยากาศ การศึกษานี้จะใช้สมการ 2.12 ในการหาค่า Refraction Error ของ US Army Corp of Engineers (2002)

$$\sigma_{ref} = \sqrt{[s^2 / (4 R^2) (\rho) (4)]} \quad (2.12)$$

โดย

σ_{ref}	คือ Refraction Error	ฟิลิปดา
S	คือ ระยะทางที่รังวัด	เมตร
R	คือ รัศมีโลก (~6371000 m)	เมตร

ρ คือ 206265

ฟิลิปดา

จากสมการ 2.12 ยกตัวอย่างที่ระยะที่วัดได้เฉลี่ย 200 เมตร สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_{ref} &= \text{Sqrt} [(200^2 / (4 \cdot 6371000^2)) \cdot (206265)(4)] \\ &= 6''\end{aligned}$$

ฟิลิปดา

ค่า Refraction Error (σ_{ref}) ได้ค่าประมาณ 6 ฟิลิปดา

เมื่อนำค่าที่ได้มาจาก สมการ 2.4 (Sighting error), สมการ 2.5 (Reading Error), สมการ 2.7 (Instrument Leveling Error) และ สมการ 2.12 (Refraction Error) มาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการรังวัดมุมสูงได้ดังต่อไปนี้

เมื่อ

$$\sigma_p \text{ คือ } 1''$$

$$\sigma_r \text{ คือ } 1.5'' \text{ (สำหรับกล้องแบบประมวลผล Leica TDM 5000)}$$

$$\sigma_r \text{ คือ } 3.75'' \text{ (สำหรับกล้องแบบประมวลผล Leica TC 1700)}$$

$$\sigma_v \text{ คือ } 0''$$

$$\sigma_{ref} \text{ คือ } 6''$$

ดังนั้นจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดมุมสูงสำหรับกล้องแบบประมวลผล Leica TDM 5000 โดยแทนค่าลงในสมการ 2.11 ได้ดังนี้

$$\sigma_{zen} = \sqrt{(1^2 + 1.5^2 + 6)}$$

$$\sigma_{zen} \approx 3''$$

สำหรับกล้องแบบประมวลผล Leica TC 1700 นำค่าต่าง ๆ มาคำนวณและแทนค่าในสมการที่ 2.11 ได้ดังนี้

$$\sigma_{zen} = \sqrt{(1^2 + 3.75^2 + 6)}$$

$$\sigma_{zen} \approx 5''$$

2.2.3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดระยะโดยเครื่องวัดระยะ อิเล็กทรอนิกส์

สำหรับการวัดระยะความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดระยะโดยเครื่องวัดระยะ อิเล็กทรอนิกส์ สามารถแยกพิจารณาออกเป็นส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1) ความคลาดเคลื่อนคงตัว : เกิดจากการเอียงศูนย์ของเครื่องมือ เกิดได้กับทั้ง กล้องและเป้า

2) ความคลาดเคลื่อนมาตราส่วน: ความถี่ที่ผลิตได้ไม่เท่ากับที่ทำการออกแบบไว้

เนื่องจากบรรยากาศมีลักษณะเป็นชั้นๆ ดังนั้นทำให้ทิศทางและความเร็วของรังสีของเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนไปต่างจากการออกแบบ ทำให้ระยะทางที่วัดได้มีค่าไม่ตรงกับความจริง

3) ความคลาดเคลื่อนเป็นคาบ: เนื่องจากคลื่นมีลักษณะเป็น sin curve จึงมีช่วงความยาวที่เป็นเศษส่วนของความยาวหนึ่งหน่วย ขนาดของความคลาดเคลื่อนขึ้นกับความถี่ของคลื่นที่ใช้

Bruce (1984) กล่าวว่าเนื่องจากคลื่นเดินทางผ่านอากาศ ทำให้ความเร็วของคลื่นเปลี่ยนแปลงไปตามดัชนีการหักเหของสภาพบรรยากาศในขณะที่ทำการรังวัด ดังนั้นเพื่อต้องการทราบความเร็วของแสงจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาดัชนีหักเหของแสง ซึ่งจากการศึกษาดัชนีการหักเหของแสงจึงขึ้นอยู่กับ

1) อากาศมีลักษณะเป็นชั้นๆ แตกต่างกัน
 2) ความดันไอในอากาศขณะทำการรังวัด (หาจากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ กระเปาะเปียก/กระเปาะแห้ง)

3) อุณหภูมิขณะทำการรังวัด (ใช้ Thermometer วัดอุณหภูมิ)

4) ความดันบรรยากาศ (ใช้เครื่องวัดความดันบรรยากาศ Barometer)

5) ความถี่ของคลื่นที่ใช้ (ขึ้นกับชนิดของคลื่นที่ใช้วัดระยะ)

Rueger (1984) ได้ศึกษาสมการค่าแก้การหักเหของแสงที่เกิดจากการรังวัดระยะด้วย เครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของคลื่นที่ใช้ในการรังวัด มีสมการทั่วไปในสมการดังต่อไปนี้

$$k' = \left(C - \frac{D \cdot p}{T_k} + \frac{11.20 \cdot e}{T_k} \right) \cdot 10^{-6} \cdot d \quad (2.13)$$

โดย

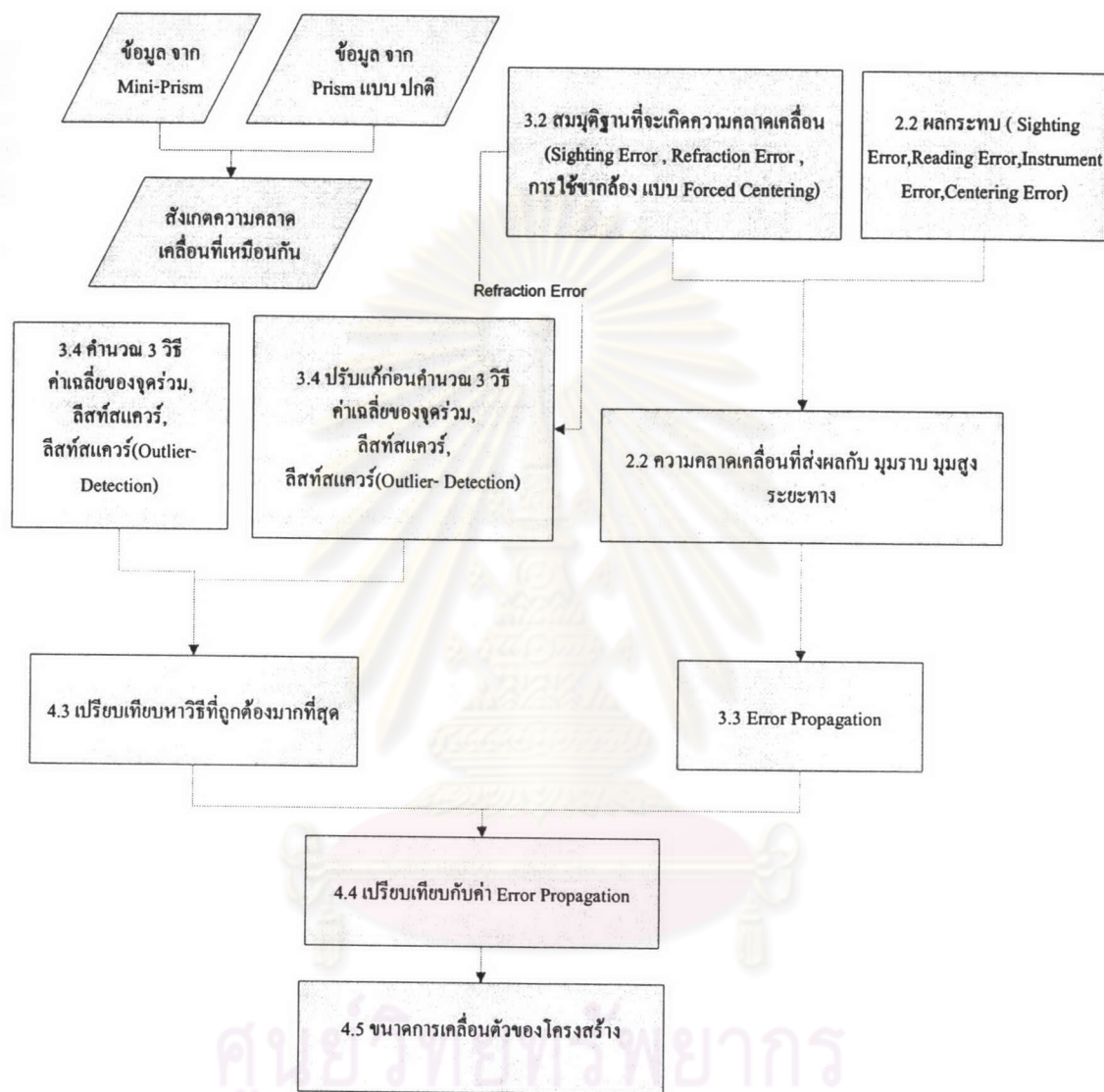
k'	คือ ค่าแก้จากการหักเห	เมตร
T_k	คือ อุณหภูมิ	(Kelvin)
P	คือ ความดันบรรยากาศ	(mb)
e	คือ ความดันไอน้ำ	(mb)
C, D	คือ สัมประสิทธิ์ ตามชนิดของเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์	
d	คือ ระยะที่อ่านได้จากเครื่องวัด	(เมตร)
h	คือ ความชื้นสัมพัทธ์	(mb)

สำหรับการปรับแก้ระยะทางที่รังวัดได้นั้นจะกล่าวอีกครั้งในบทที่ 3 การปรับแก้การวัดระยะทาง และจะยกตัวอย่างการทำงานจริง รวมถึงการนำค่าที่รังวัดระยะทางจากสนามมาปรับแก้ค่า

นอกจากค่าความคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2 ความคลาดเคลื่อนในการรังวัดโดยใช้กล้องแบบประมวลผล ผู้ทำการทดลองได้ทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นขณะรังวัด เนื่องจากการรังวัดสะพานพระราม 6 มีความแตกต่างจากการรังวัดทั่วไป ทั้งนี้เพราะใช้กล้องแบบ Force-Centering, และเนื่องจากการรังวัดอยู่ใกล้แม่น้ำเจ้าพระยาจึงต้องคำนึงถึงการหักเหของแสงมากเป็นพิเศษ โดยแยกออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

- 1) ความคลาดเคลื่อนจากการตั้งกล้องด้วยกล้องแบบ Forced Centering
- 2) การหักเหของแสงในช่วงตลอดวัน
- 3) ความสามารถในการส่องกล้อง

ซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดของบทที่ 3 นอกจากนั้นประกอบไปด้วยวิธีดำเนินการศึกษาตามลำดับ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลำดับการศึกษาทั้งหมด