บทที่ 5

การทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนและการเปรียบเทียบผลการวัด

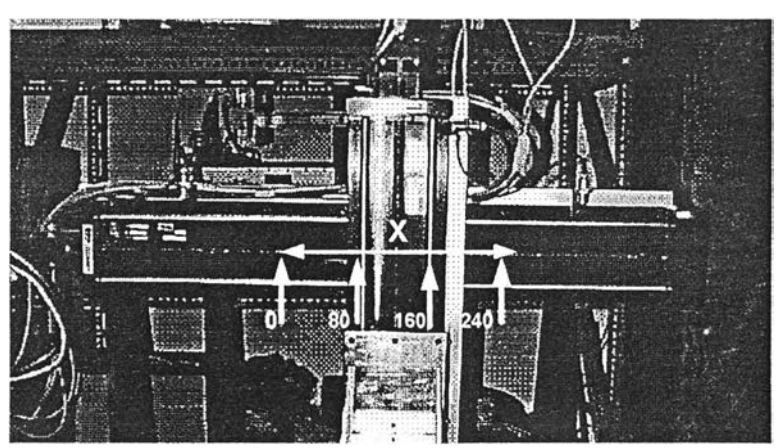
ต่อไปเป็นการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่และการวัดชิ้นงาน การทดสอบจะแบ่งเป็นการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของแกน x, y, z และแกนที่ 4 และการทดสอบการทำงานของแกนทั้ง 3 และ 4 แกน ซึ่งจะได้แสดงผลที่ได้ทำการทดสอบไปแล้วดังนี้

5.1 ผลของการทดสอบความแม่นยำของการควบคุม แกน X, แกน Y และแกน Z

ในหัวข้อนี้เราจะทำการทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัด CMM โดยพิจารณาแกนทั้ง 3 คือ แกน X แกน Y และแกน Z เคลื่อนที่ทีละแกน เพื่อดูความแม่นยำของระบบควบคุม และ Alignment ของตัวโครงสร้างของเครื่อง CMM ที่สร้างขึ้น

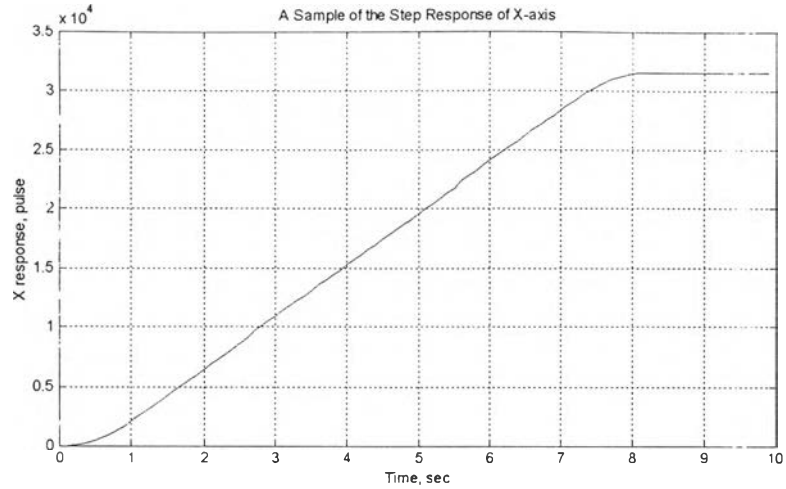
การทดสอบจะทดสอบในช่วงระยะทางที่โต๊ะทำงานกล่าวคือเหนือที่จับชิ้นงานซึ่งมีขนาด 250x250 mm. โดยแต่ละแกนจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง แต่ละช่วงจะมีระยะทางการเคลื่อนที่ 80 mm. แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ 1 mm. จะมีค่าเท่ากับ 395 pulse ดังนั้นเคลื่อนที่ 80 mm. จึงเท่ากับ 31600 pulse คำสั่งที่ป้อนเข้าไปยังระบบควบคุมจะเป็นคำสั่ง Step function และทำการวัดหาค่า 2% settling time ด้วย

<u>ทดสอบแกน X</u>



รูปที่ 5.1ก) แสดงระยะทางในการทดสอบการเคลื่อนที่แกน X

ช่วงระหว่าง 0-80 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน X (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ตัวอย่างผลการตอบสนองแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ตารางที่ 5.1 เป็นตาราง



รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างของ Step Response ของแกน X-axis ในช่วง 0-80 mm.

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน X ในช่วง 0-80 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	1	31600	31601	1	7.7
2 R	0	-31599	-31600	-1	7.7
3 F	1	31600	31601	1	7.7
4 R	0	-31599	-31600	-1	7.7
5 F	1	31599	31601	2	7.8
6 R	-1	-31599	-31601	-2	7.7
7 F	1	31600	31601	1	7.7
8 R	0	-31599	-31600	-1	7.8
9 F	1	31600	31601	1	7.8
10 R	0	-31599	-31600	-1	7.7
11 F	1	31599	31601	2	7.7
12 R	0	-31599	-31600	-1	7.8
13 F	1	31600	31601	1	7.8
14 R	0	-31599	-31600	-1	7.7
15 F	1	31600	31601	1	7.7
16 R	0	-31599	-31600	-1	7.8
17 F	1	31600	31601	1	7.7
18 R	0	-31599	-31600	-1	7.8
19 F	1	31600	31601	1	7.7

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
20 R	0	-31599	-31600	-1	7.8

(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

ช่วงระหว่าง 80-160 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน X (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 5-6 pulses หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 5-6 pulses โดยที่เวลา Settling time มีค่าประมาณ 7.7 sec

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน X ในช่วง 80-160 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	0	31598	31600	2	7.7
2 R	-2	-31597	-31602	-5	7.7
3 F	3	31598	31603	5	7.8
4 R	-2	-31597	-31602	-5	7.7
5 F	3	31598	31603	5	7.7
6 R	-2	-31596	-31602	-6	7.7
7 F	3	31598	31603	5	7.8
8 R	-2	-31597	-31602	-5	7.7
9 F	3	31598	31603	5	7.8
10 R	-2	-31597	-31602	-5	7.7
11 F	3	31598	31603	5	7.7
12 R	-2	-31596	-31602	-6	7.7
13 F	4	31598	31604	6	7.7
14 R	-2	-31596	-31602	-6	7.7
15 F	4	31598	31604	6	7.7
16 R	-2	-31597	-31602	-5	7.8
17 F	3	31598	31603	5	7.7
18 R	-2	-31596	-31602	-6	7.7
19 F	4	31598	31604	6	7.7
20 R	-2	-31597	-31602	-5	7.7

(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

ช่วงระหว่าง 160-240 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน X (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง 2-3 pulses หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 2-3 pulses โดยที่เวลา Settling time มีค่าประมาณ 7.7 sec

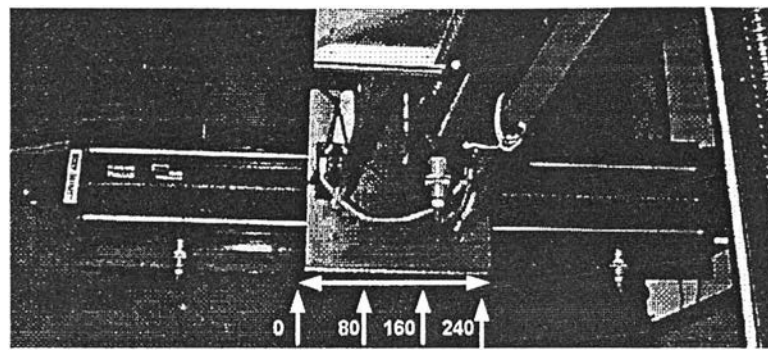
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน X ในช่วง 160-240 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	-2	31599	31598	1	7.7
2 R	-1	-31599	-31601	-2	7.7
3 F	-2	31599	31598	-1	7.7
4 R	-1	-31599	-31601	-2	7.7
5 F	1	31599	31601	+2	7.7
6 R	-1	-31598	-31601	-3	7.7
7 F	2	31599	31602	3	7.7
8 R	-1	-31599	-31601	-2	7.7
9 F	1	31599	31601	2	7.7
10 R	-1	-31599	-31601	-2	7.7
11 F	1	31599	31601	2	7.7
12 R	-1	-31598	-31601	-3	7.7
13 F	1	31599	31601	2	7.7
14 R	-1	-31599	-31601	-2	7.7
15 F	2	31599	31602	3	7.7
16 R	-1	-31598	-31601	-3	7.7
17 F	2	31599	31602	3	7.7
18 R	-1	-31598	-31601	-3	7.8
19 F	1	31599	31601	2	7.7
20 R	-1	-31599	-31601	-2	7.8

(* F = Forward, R = Reverse)

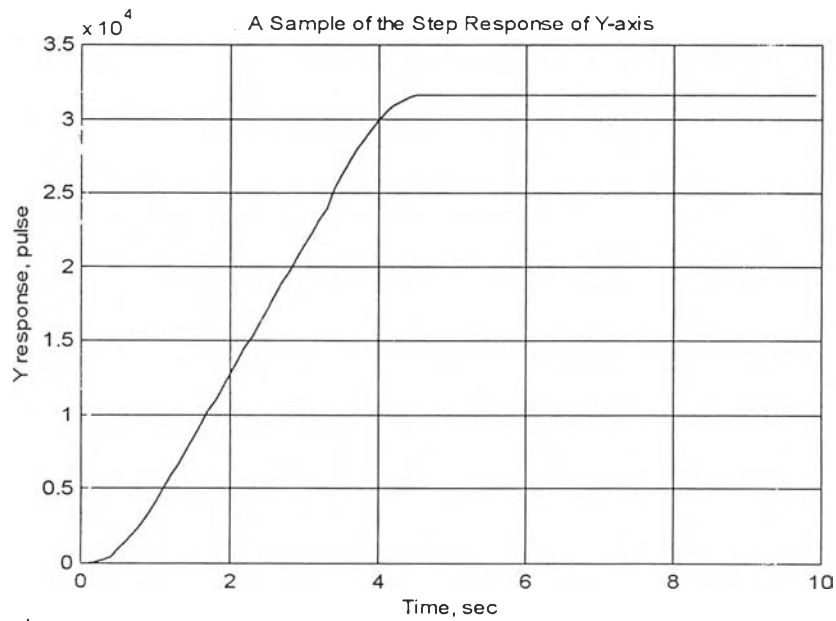
(** - = reverse direction, + = forward direction)

<u>ทดสอบแกน Y</u>



รูปที่ 5.1ข) แสดงระยะทางในการทดสอบการเคลื่อนที่แกน Y

ช่วงระหว่าง 0-80 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน Y (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ตัวอย่างผลการตอบสนองแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ตารางที่ 5.4 เป็นตารางสรุปผลการทดสอบที่ได้ จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง ± 1 pulse หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 1 pulse ช่วง steady state มีการแกว่งเล็กน้อย โดยที่เวลา Settling Time มีค่าประมาณ 4.3 sec



รูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างของ Step Response ของแกน Y-axis ในช่วง 0-80 mm.

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Y ในช่วง 0-80 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	14	31614	31614	0	4.3
2 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
3 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
4 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
5 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
6 R	14	-31585	-31586	-1	4.3
7 F	14	31615,31614	31614	-1,0	4.4
8 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
9 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
10 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
11 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.4
12 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
13 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
14 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
15 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
16 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
17 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
18 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
19 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.4
20 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3

(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

ช่วงระหว่าง 80-160 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน Y (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง ± 1 pulse หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 1 pulse ช่วง steady state มีการแกว่งเล็กน้อย โดยที่เวลา Settling Time มีค่าประมาณ 4.3 sec

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Y ในช่วง 80-160 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	14	31614,31615	31614	0,1	4.3
2 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
3 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
4 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
5 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
6 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
7 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
8 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
9 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
10 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
11 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
12 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
13 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
14 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
15 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.4
16 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
17 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
18 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
19 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
20 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3

(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

ช่วงระหว่าง 160-240 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน Y (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.6 จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง ± 1 pulse หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 1 pulse ช่วง steady state มีการแกว่งเล็กน้อย โดยที่เวลา Settling Time มีค่าประมาณ 4.3 sec

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Y ในช่วง 160-240 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

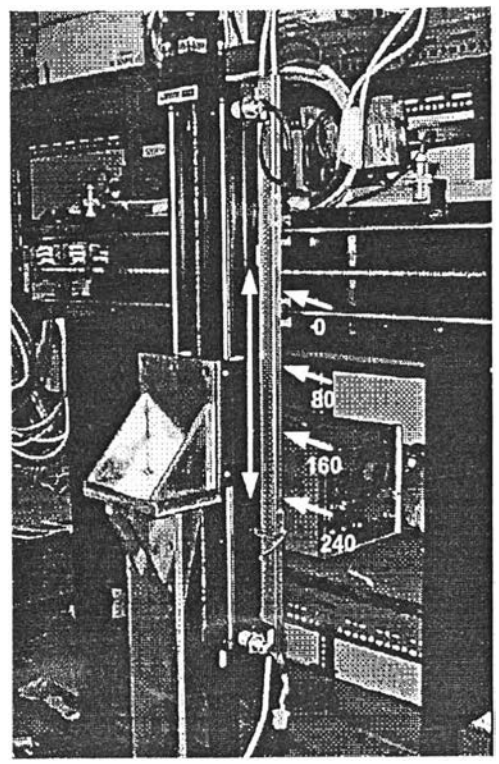
No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
2 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
3 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.4
4 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
5 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
6 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
7 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
8 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
9 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
10 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
11 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
12 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
13 F	15	31614,31615	31614	0,-1	4.3
14 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
15 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
16 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
17 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
18 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
19 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
20 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.4

(* F = Forward, R = Reverse)

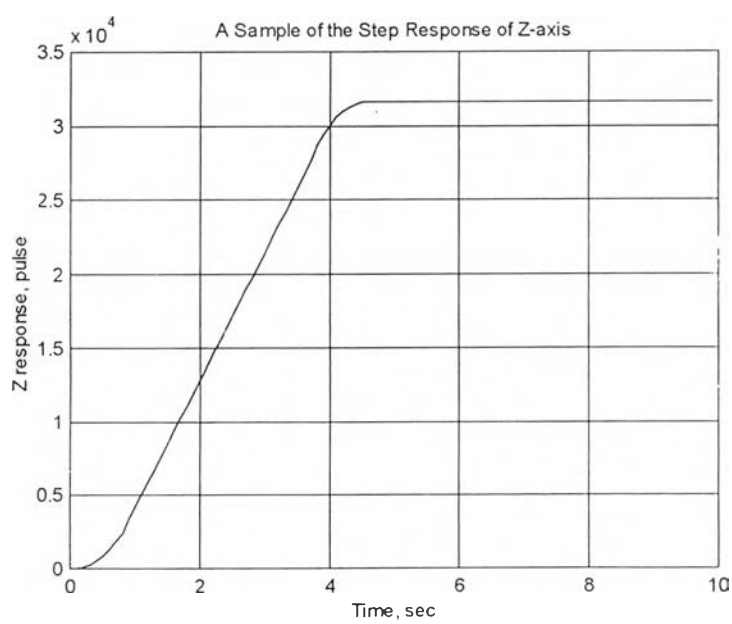
(** - = reverse direction, + = forward direction)

<u>ทดสอบแกน Z</u>



รูปที่ 5.4 แสดงระยะทางในการทดสอบการเคลื่อนที่แกน Z

ช่วงระหว่าง 0-80 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน Z (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ตัวอย่างผลการตอบสนองแสดงไว้ในรูปที่ 5.5 ตารางที่ 5.7 เป็นตารางสรุปผลการทดสอบที่ได้ จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง ± 1 pulse หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 1 pulse ช่วง steady state มีการแกว่งเล็กน้อย โดยที่เวลา Settling Time มีค่าประมาณ 4.3 sec



รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างของ Step Response ของแกน Z-axis ในช่วง 0-80 mm.

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Z ในช่วง 0-80 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
2 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
3 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
4 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
5 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
6 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.4
7 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
8 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
9 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
10 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
11 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
12 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
13 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
14 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
15 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
16 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
17 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
18 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
19 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
20 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3

(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

ช่วงระหว่าง 80-160 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน Z (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.8 จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง ± 1 pulse หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 1 pulse ช่วง steady state มีการแกว่งเล็กน้อย โดยที่เวลา Settling Time มีค่าประมาณ 4.3 sec

ตารางที่ 5.8 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Z ในช่วง 80-160 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
2 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
3 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
4 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
5 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
6 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
7 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
8 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
9 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
10 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
11 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
12 R	14	-31586,-31585	-31586	0,1	4.3
13 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
14 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
15 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
16 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
17 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.4
18 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
19 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
20 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3

(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

ช่วงระหว่าง 160-240 mm. (80 mm. = 31600 pulse) ของแกน Z (* F = Forward, R = Reverse) ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าค่า steady state error ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง ± 1 pulse หรือน้อยกว่าที่ต้องการไปถึง 1 pulse ช่วง steady state มีการแกว่งเล็กน้อย โดยที่เวลา Settling Time มีค่าประมาณ 4.3 sec

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Z ในช่วง 160-240 mm. ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง

No.*	Starting Point	Measured End Point	Desired Travelling End Point	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
2 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
3 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
4 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.4
5 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
6 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
7 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
8 R	14	-31586,-31585	-31586	0,1	4.3
9 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
10 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
11 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
12 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
13 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
14 R	14	-31586,-31585	-31586	0,-1	4.3
15 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
16 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
17 F	15	31615,31614	31615	0,1	4.3
18 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3
19 F	14	31614,31615	31614	0,-1	4.3
20 R	15	-31585,-31586	-31585	0,1	4.3

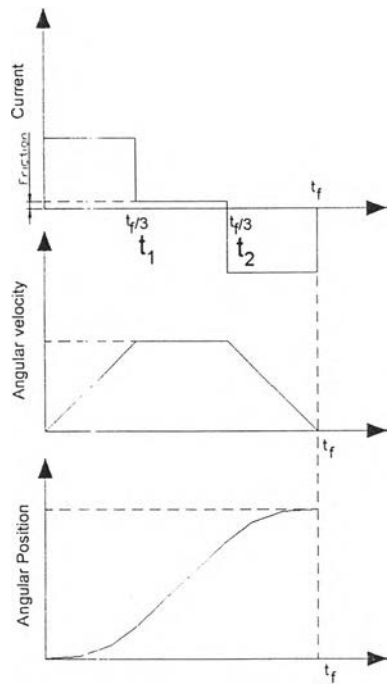
(* F = Forward, R = Reverse)

(** - = reverse direction, + = forward direction)

จะเห็นว่าแกน X เป็นแกนที่มีความผิดพลาดมากที่สุดโดยเฉพาะบริเวณช่วงกลางของแท่นจับชิ้นงาน ค่าอยู่ที่ประมาณ 0.0127 mm. หรือ 5 pulses ส่วนแกน Y และแกน Z นั้นค่าความผิดพลาดจะน้อยกว่า ค่าอยู่ที่ประมาณ 0.0025 mm

<u>ผลการควบคุมแกนที่ 4</u>

หัวข้อนี้จะทำการทดสอบเพื่อดูความแม่นยำในชุดระบบควบคุมแกนหมุนที่ 4 โดยจะทำการทดสอบทั้งเมื่อคำสั่งมุมที่สั่ง (θ_r) มีค่าขนาดเล็กคืออยู่ในช่วง $\pm1^\circ$, $\pm2^\circ$, $\pm3^\circ$, $\pm4^\circ$ และเมื่อคำสั่งมุมมีค่าสูงเช่นอยู่ในช่วง $\pm5^\circ$, $\pm10^\circ$, $\pm20^\circ$.



Acceleration Period

$$\theta(t) = \frac{a_m t^2}{2}$$

Constant Velocity Period

$$\theta(t) = \theta_1(t) + V_m(t - t_1)$$

Deceleration Period

$$\theta(t) = \theta_2(t) + V_m(t - t_2) - \frac{a_m(t - t_2)^2}{2}$$

$$\theta_f(t) = \theta_2(t) + V_m t_1 - \frac{a_m t_2^2}{2} = V_m t_2$$

$$t_1 = \frac{V_m}{a_m} \qquad t_2 = \frac{\theta_f}{V_m} \qquad t_f = \frac{V_m}{a_m} + \frac{\theta_f}{V_m}$$

In Case of 1/3 duty circle

$$2t_1 = t_2\,; \quad \frac{2V_m}{a_m} = \frac{\theta_f}{V_m} \Rightarrow a_m = \frac{2V_m^2}{\theta_f}$$

รูปที่ 5.6 แสดงการสร้างสัญญาณ Profile จากคำสั่งอ้างอิงที่เป็น Step

รูปที่ 5.6 แสดงรูป Profile ที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณอ้างอิงจากสัญญาณคำสั่งที่มีลักษณะเป็น Step (เช่น 5°) การสร้างสัญญาณ Profile นี้จะช่วยทำให้สัญญาณผิดพลาดที่ได้จากผลต่างของคำสั่งอ้างอิงแบบ step และสัญญาณที่วัดได้จาก encoder มีค่าค่อยเป็นค่อยไป ถ้าเราใช้คำสั่งอ้างอิงที่เป็น Step โดยตรงเราจะได้สัญญาณผิดพลาดตอนช่วงเริ่มต้นเคลื่อนที่มีลักษณะแบบกระโดดเช่น สัญญาณอ้างอิง (5°) – สัญญาณที่วัดได้จาก encoder (0°) ซึ่งมีลักษณะกระโดดจาก 0 เป็น 5 ทำให้สัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีค่ากระโดดตามไปด้วย แต่ถ้าใช้สัญญาณ Profile ที่คำนวณได้จากรูปที่ 5.6 นี้จะได้สัญญาณที่ค่อยเป็นค่อยไป อย่างไรก็ตามการคำนวณหาค่าสัญญาณอ้างอิงจาก Profile ดังกล่าวนี้เราจำเป็นต้องกำหนด ค่าตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ความเร็วของการเคลื่อนที่และความเร่งของ Profile จึงจะคำนวณหาค่าได้ ถ้าเรากำหนดให้คำสั่งการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นแบบ 1/3 duty circle ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เราก็จะลดค่าไปได้ 1 ค่าเช่นในกรณีนี้เรากำหนดเพียงเฉพาะตำแหน่งและความเร็วอ้างอิงเท่านั้น ในการเคลื่อนที่ที่มีมุมขนาดไม่มากนักอาจจะเป็นการยากและไม่คุ้นเคยที่จะกำหนดค่าความเร็วอ้างอิง เราจะทำการทดสอบความละเอียดของการควบคุมเปรียบเทียบทั้งแบบที่เป็น Profile และแบบไม่ใช้ Profile

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 2° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Measered Start-End (Point-to-Point)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	0.288-2.288	0.288-2.304	0.144-2.016	-0.016,0.128	0.18,0.05
2 cw	2.304-0.304	2.304-0.432	2.016-0.144	-0.128,0.128	0.1,0.05
3 ccw	0.432-2.432	0.432-2.448	0.144-2.016	-0.016,0.128	0.18,0.08
4 cw	2.448-0.448	2.448-0.432	2.016-0.144	0.016,0.128	0.12,0.05
5 ccw	0.432-2.432	0.432-2.448	0.144-2.016	-0.016,0.128	0.39,0.14
6 cw	2.448-0.448	2.448-0.432	2.016-0	0.016,-0.016	0.13,0.06
7 ccw	0.432-2.432	0.432-2.448	0-1.872	-0.016,0.128	0.4,0.05
8 cw	2.448-0.448	2.448-0.432	1.872- -0.144	0.016,-0.016	0.13,0.06
9 ccw	0.432-2.432	0.432-2.448	-0.144-1.872	-0.016,-0.016	0.06,0.1
10 cw	2.448-0.448	2.448-0.432	1.872-0	0.016,0.128	0.28,0.05

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 3° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Measered Start-End (Point-to-Point)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	0.432-3.432	0.432-3.312	0-3.024	0.12,-0.024	0.16,0.05
2 cw	3.312-0.312	3.312-0.288	3.024-0	0.024,-0.024	0.11,0.07
3 ccw	0.288-3.288	0.288-3.312	0-2.88	-0.024,0.12	0.74,0.07
4 cw	3.312-0.312	3.312-0.288	2.88-0	0.024,0.12	0.23,0.09
5 ccw	0.288-3.288	0.288-3.312	0,2.88	-0.024,0.12	0.38,0.19
6 cw	3.312-0.312	3.312-0.432	2.88-0	-0.12,0.12	0.43,0.21
7 ccw	0.432-3.432	0.432-3.312	0-2.88	0.12 0.12	0.07,0.12
8 cw	3.312-0.312	3.312-0.288	2.88-0	0.024,0.12	0.12,0.12
9 ccw	0.288-3.288	0.288-3.312	0-2.88	-0.024,0.12	0.24,0.06
10 cw	3.312-0.312	3.312-0.288	2.88-0	0.024,0.12	0.1,0.07

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)

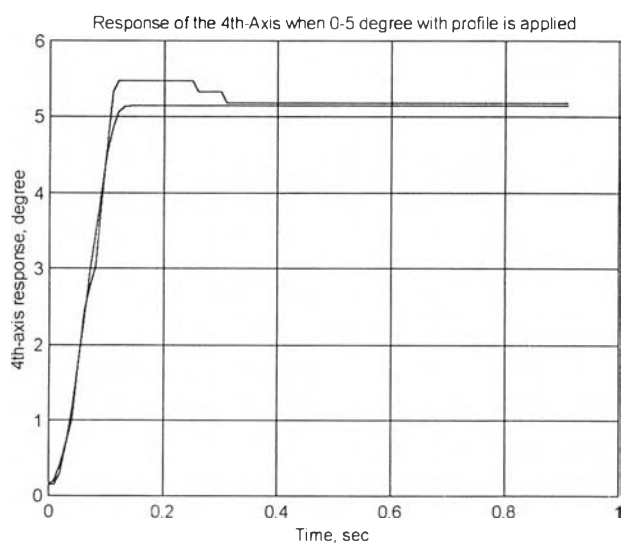
ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 4° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Measered Start-End (Point-to-Point)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	0.288-4.288	0.288-4.32	0-3.888	-0.032,0.112	0.19,0.07
2 cw	4.32-0.32	4.32-0.432	3.888-0	-0.112,0.112	0.36,0.13
3 ccw	0.432-4.432	0.432-4.464	0-3.888	-0.032,0.112	0.23,0.08
4 cw	4.464-0.464	4.464-0.576	3.888-0	-0.112,0.112	0.1,0.08
5 ccw	0.576-4.576	0.576-4.608	0-3.888	-0.032,0.112	0.21,0.07
6 cw	4.608-0.608	4.608-0.72	3.888-0	-0.112,0.112	0.38,0.06
7 ccw	0.72-4.72	0.72-4.752	0-4.032	-0.032,-0.032	0.22,0.17
8 cw	4.752-0.752	4.752-0.864	4.032-0.144	-0.112,0.112	0.09,0.08
9 ccw	0.864-4.864	0.864-4.752	0.144-4.032	0.112,0.112	0.22,0.06
10 cw	4.752-0.752	4.752-0.72	4.032-0.144	0.032,0.112	0.34,0.07

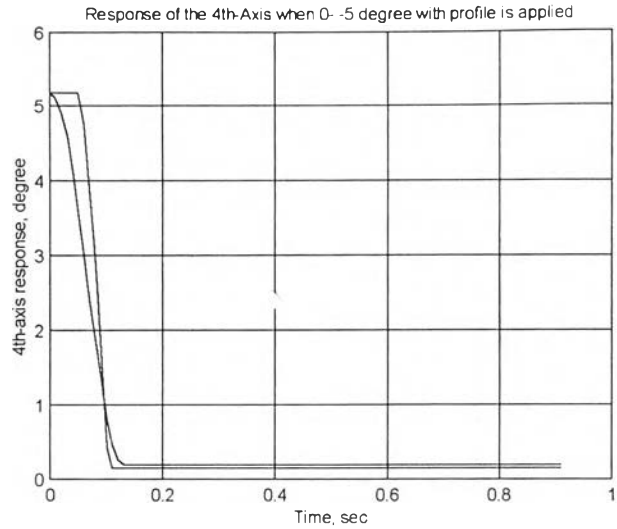
(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)

รูปที่ 5.7 แสดงผลการตอบสนองของระบบเมื่อ θ_r เป็น $\pm 5^{\circ}$, $\pm 10^{\circ}$,$\pm 15^{\circ}$, $\pm 20^{\circ}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าการที่ระบบให้ผลตอบสนองที่ต่างกันเนื่องจากระบบจริงๆ ไม่เป็นระบบเชิงเส้นแต่มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่บ้าง



ก)



ข)

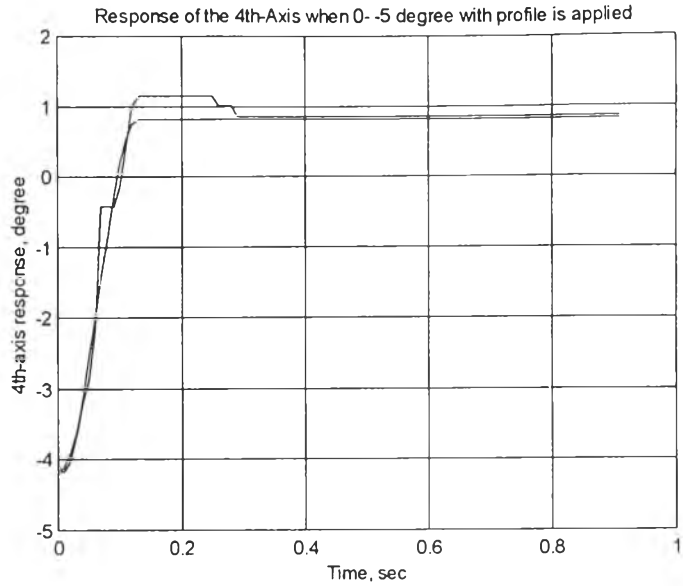
รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0-5° ก) ccw ข) cw

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0-5° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

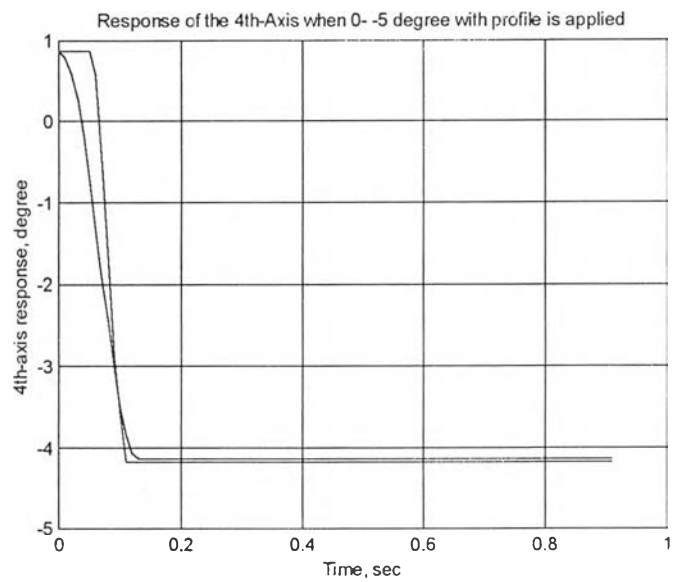
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.296-6.296	1.296-6.192	0.104	0.12
2 cw	6.192-1.192	6.192-1.296	-0.104	0.11
3 ccw	1.296-6.296	1.296-6.336	-0.04	0.12
4 cw	6.336-1.336	6.336-1.296	0.04	0.41
5 ccw	1.296-6.296	1.296-6.192	0.104	0.12
6 cw	6.192-1.192	6.192-1.296	-0.104	0.43
7 ccw	1.296-6.296	1.296-6.192	0.104	0.24
8 cw	6.192-0.192	6.192-1.296	-0.104	0.15
9 ccw	1.296-6.296	1.296-6.192	0.104	0.28
10 cw	6.192-1.192	6.192-1.296	-0.104	0.45

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0 - -5°ก) ccw ข) cw

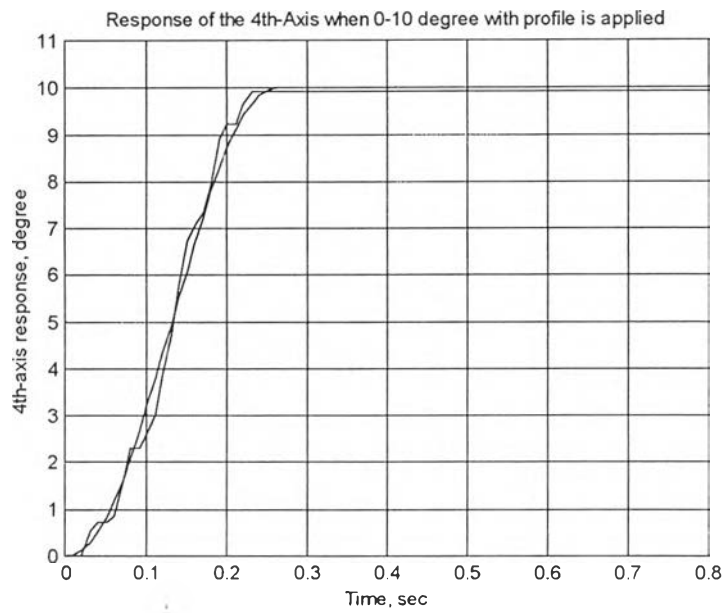
ตารางที่ 5.14 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0 - -5° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.584 - -3.416	1.584 - -3.456	0.04	0.25
2 cw	-3.456 – 1.544	-3.456 – 1.584	-0.04	0.3
3 ccw	1.584 - -3.416	1.584 - -3.456	0.04	0.3
4 cw	-3.416 – 1.544	-3.416 – 1.44	0.104	0.12
5 ccw	1.44 - -3.56	1.44 - -3.6	0.04	0.13
6 cw	-3.6 – 1.4	-3.6 – 1.296	0.104	0.22

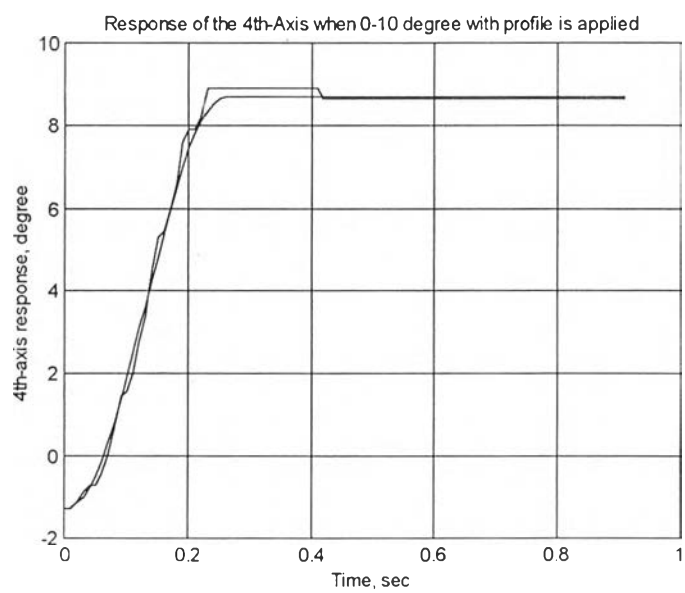
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
7 ccw	1.296 - -3.704	1.296 - -3.6	-0.104	0.41
8 cw	-3.6 – 1.4	-3.6 – 1.44	-0.04	0.31
9 ccw	1.44 - -3.56	1.44 - -3.6	0.04	0.12
10 cw	-3.56 – 1.4	-3.56 – 1.44	-0.04	0.14

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

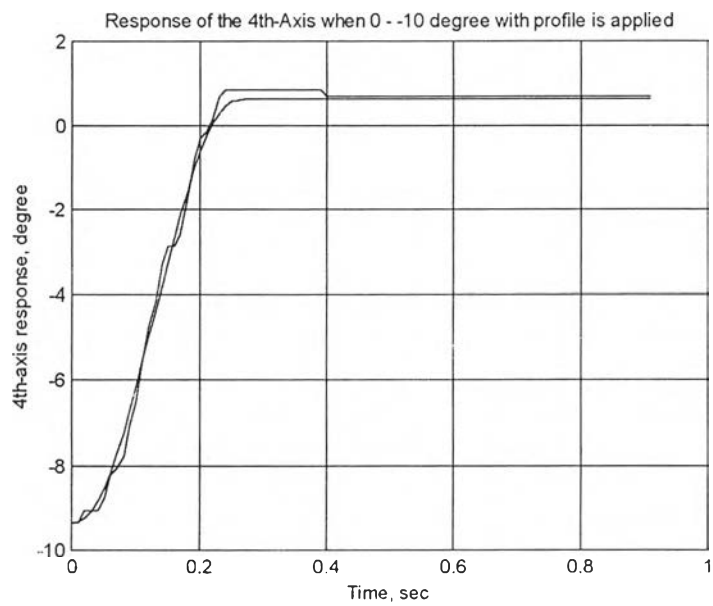
รูปที่ 5.9 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0-10° ก) ccw ข) cw

ตารางที่ 5.15 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0-10^{o} ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

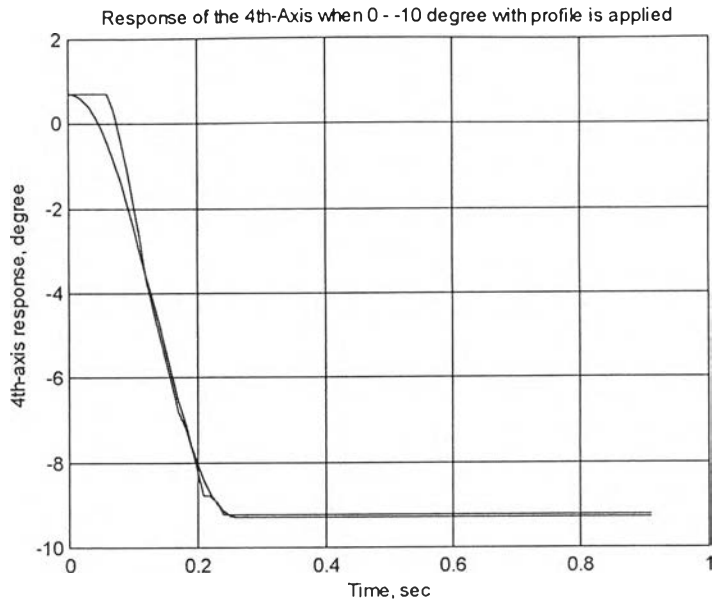
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.296 – 11.296	1.296 – 11.232	0.064	0.23
2 cw	11.232 – 1.232	11.232 – 1.152	0.08	0.24
3 ccw	1.152 – 11.152	1.152 – 11.088	0.064	0.36
4 cw	11.088 – 1.088	11.088 - 1.152	-0.064	0.47
5 ccw	1.152 – 11.152	1.152 – 11.232	-0.08	0.24
6 cw	11.232 - 1.232	11.232 – 1.152	0.08	0.24
7 ccw	1.152 – 11.152	1.152 – 11.232	-0.08	0.35
8 cw	11.232 – 1.232	11.232 – 1.152	-0.08	0.24
9 ccw	1.152 – 11.152	1.152 – 11.376	-0.224	0.48
10 cw	11.232 – 1.232	11.232 – 1.152	0.08	0.48

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

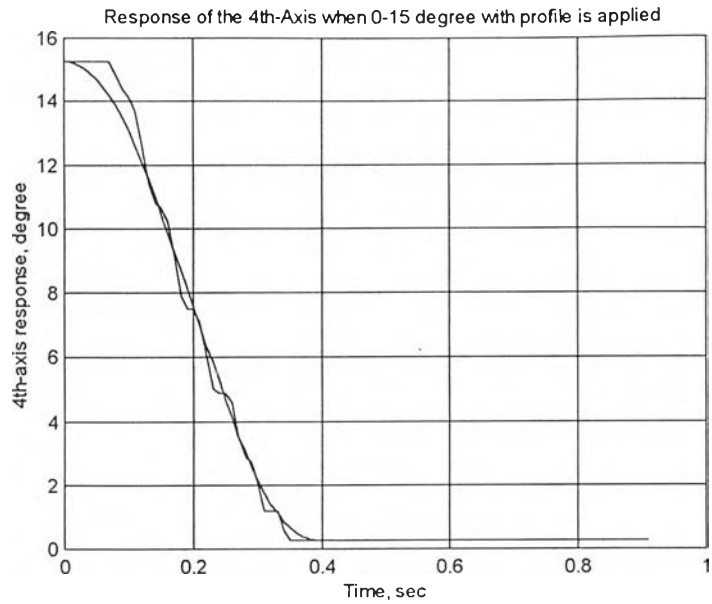
รูปที่ 5.10 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0 - -10° ก) ccw ข) cw

ตารางที่ 5.16 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0 - -10° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

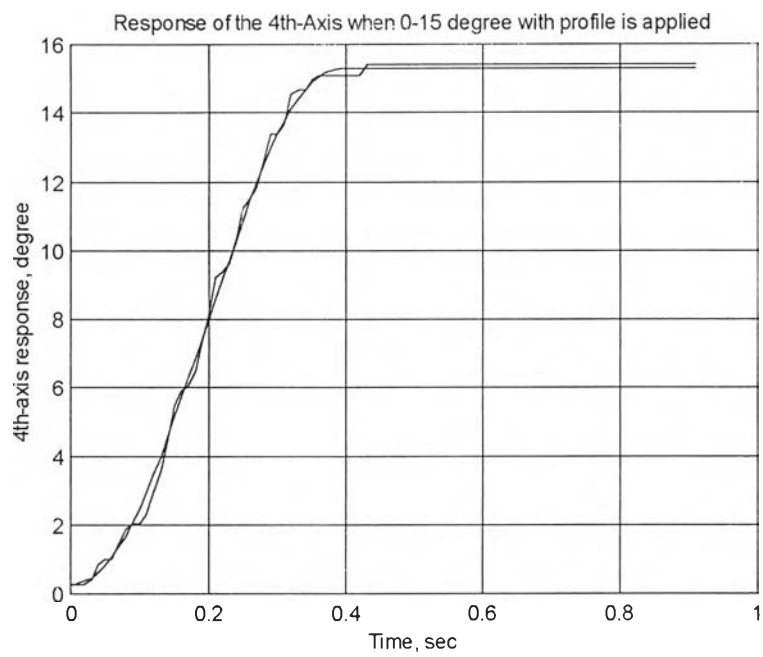
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.44 - -8.56	1.44 - -8.496	-0.064	0.22
2 cw	-8.496 – 1.504	-8.496 – 1.44	0.064	0.4
3 ccw	1.44 - -8.56	1.44 - -8.64	0.08	0.35
4 cw	-8.64 – 1.36	-8.64 – 1.296	0.064	0.23
5 ccw	1.296 - -8.704	1.296 - -8.784	0.08	0.32
6 cw	-8.784 – 1.216	-8.784 – 1.296	-0.08	0.38
7 ccw	1.296 - -8.704	1.296 - -8.64	-0.064	0.34
8 cw	-8.64 – 1.36	-8.64 – 1.44	-0.08	0.45
9 ccw	1.44 - -8.56	1.44 - -8.64	0.08	0.48
10 cw	-8.64 – 1.36	-8.64 – 1.44	-0.08	0.37

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

รูปที่ 5.11 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0-15° ก) ccw ข) cw

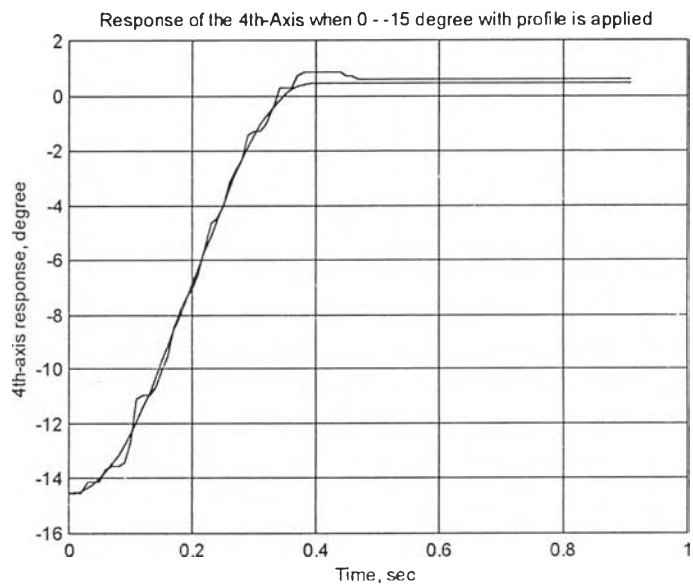
ตารางที่ 5.17 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0-15° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.152 – 16.152	1.152 – 16.128	0.024	0.35
2 cw	16.128 – 1.128	16.128 – 0.864	0.264	0.38
3 ccw	0.864 – 16.008	0.864 – 16.128	-0.12	0.44
4 cw	16.128 – 1.128	16.128 – 1.152	-0.024	0.37
5 ccw	1.152 – 16.152	1.152 – 16.128	0.024	0.35

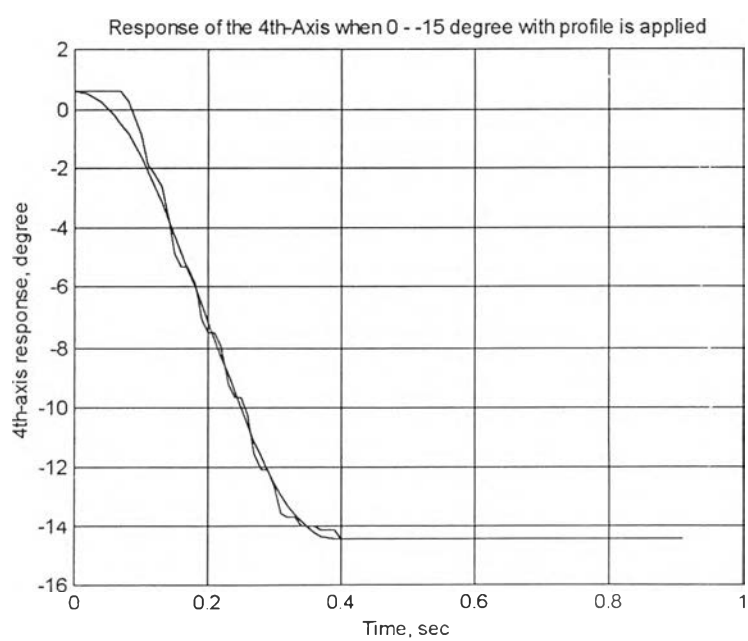
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
6 cw	16.128 – 1.128	16.128 – 1.152	-0.024	0.36
7 ccw	1.152 – 16.152	1.152 – 16.272	-0.12	0.46
8 cw	16.272 – 1.272	16.272 – 1.296	-0.024	0.40
9 ccw	1.296 – 16.296	1.296 – 16.56	-0.264	0.45
10 cw	16.56 – 1.416	16.56 – 1.44	-0.024	0.36

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

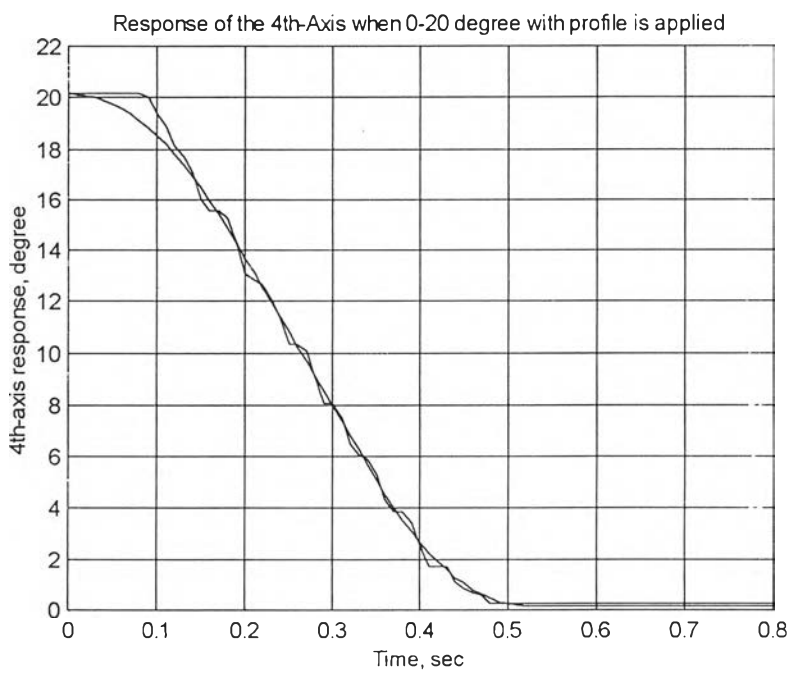
รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0 - -15^{o} ก) ccw ข) cw

ตารางที่ 5.18 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0 - -15° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

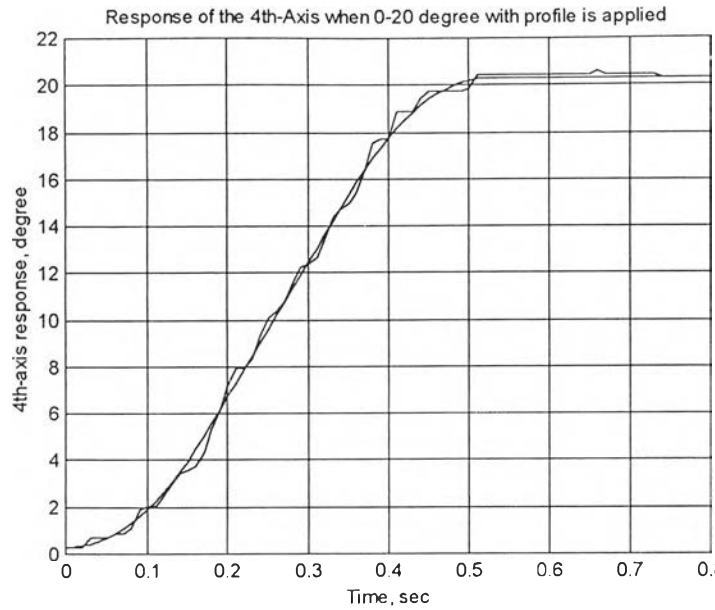
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.44 - -13.56	1.44 - -13.392	-0.168	0.34
2 cw	-13.682 – 1.32	-13.682 – 1.584	-0.264	0.37
3 cw	-13.536 – 1.464	-13.536 – 1.728	-0.264	0.34
4 cw	-13.392 – 1.608	-13.392 – 1.728	-0.12	0.36
5 ccw	1.584 - -13.68	1.584 - -13.392	-0.298	0.34
6 cw	-13.392 – 1.608	-13.392 – 1.728	-0.12	0.36
7 cw	-13.248 – 1.752	-13.248 - 1.728	0.024	0.34
8 cw	-13.392 – 1.608	-13.392 – 1.728	-0.12	0.36
9 ccw	1.728 - -13.272	1.728 - -13.392	0.12	0.37
10 cw	-13.392 – 1.608	-13.392 – 1.728	-0.12	0.34

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

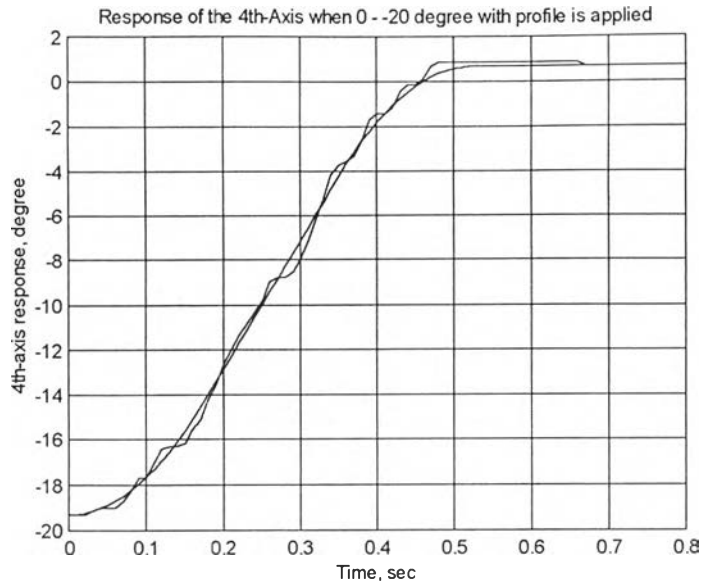
รูปที่ 5.13 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0-20° ก) ccw ข) cw

ตารางที่ 5.19 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0-20° ทดลองทั้งสิ้น 9 ครั้ง

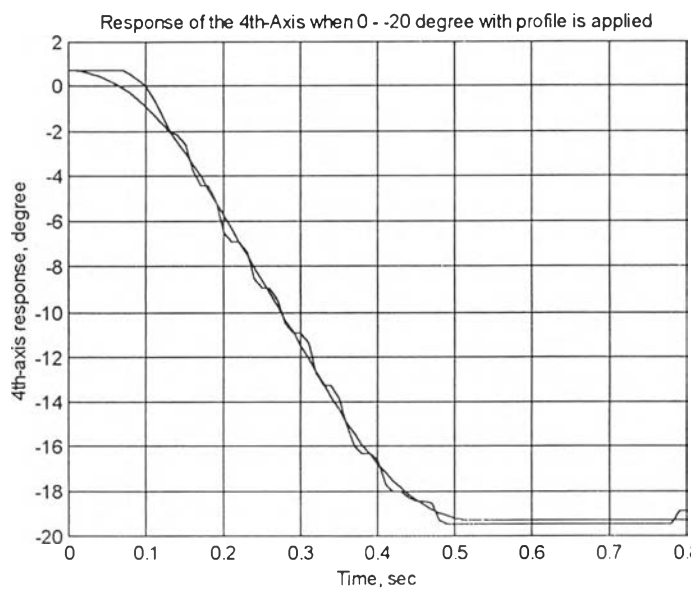
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.44 – 21.44	1.44 – 21.6	-0.16	0.48
2 cw	21.456 – 1.456	21.456 – 1.44	0.016	0.49
3 cw	21.456 – 1.456	21.456 – 1.584	-0.128	0.46
4 ccw	1.584 – 21.584	1.584 – 21.456	0.128	0.47
5 cw	21.456 – 1.456	21.456 – 1.44	-0.016	0.47
6 ccw	1.44 – 21.44	1.44 – 21.312	0.132	0.47
7 cw	21.312 – 1.312	21.312 – 1.44	-0.128	0.48
8 ccw	1.44 – 21.144	1.44 – 21.456	-0.012	0.46
9 cw	21.456 – 1.456	21.456 – 1.584	-0.128	0.46

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

(** + = ccw direction, - = cw direction)



ก)



ข)

รูปที่ 5.14 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0 - -20° ก) ccw ข) cw

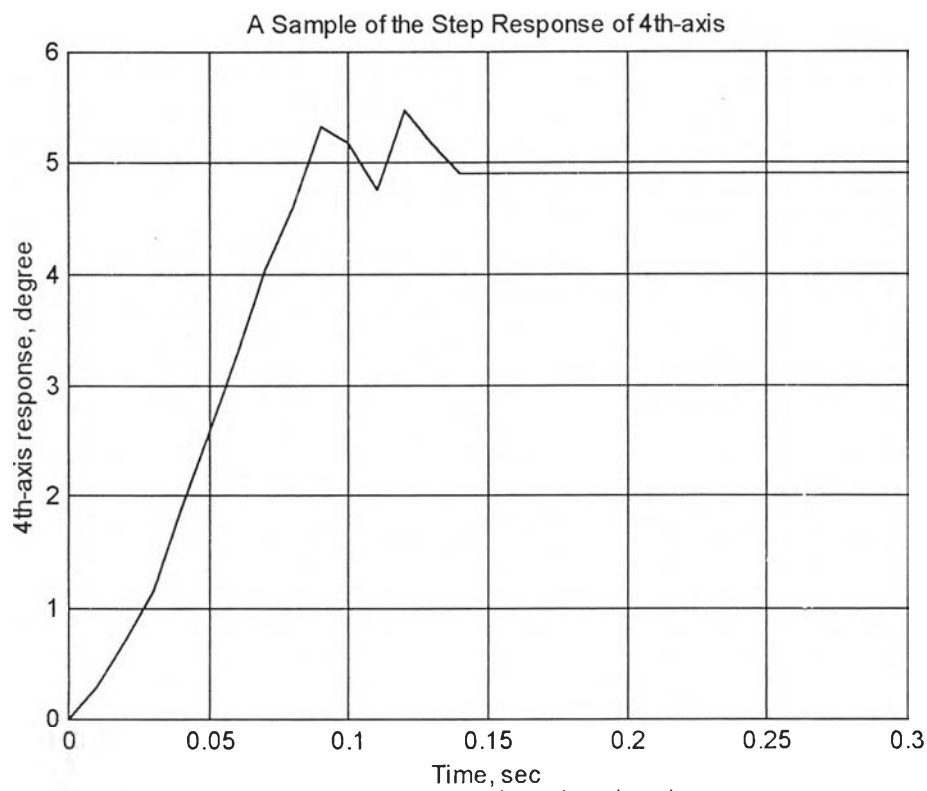
ตารางที่ 5.20 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step = 0 - -20° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง

No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
1 ccw	1.728 - -18.272	1.728 - -18.144	-0.128	0.49
2 cw	-18.144 – 1.856	-18.144 – 1.728	0.128	0.48
3 ccw	1.728 - -18.180	1.728 - -18.144	-0.036	0.5
4 cw	-18.144 – 1.856	-18.144 – 2.16	-0.304	0.47
5 ccw	1.872 - -18.128	1.872 - -18	-0.128	0.49

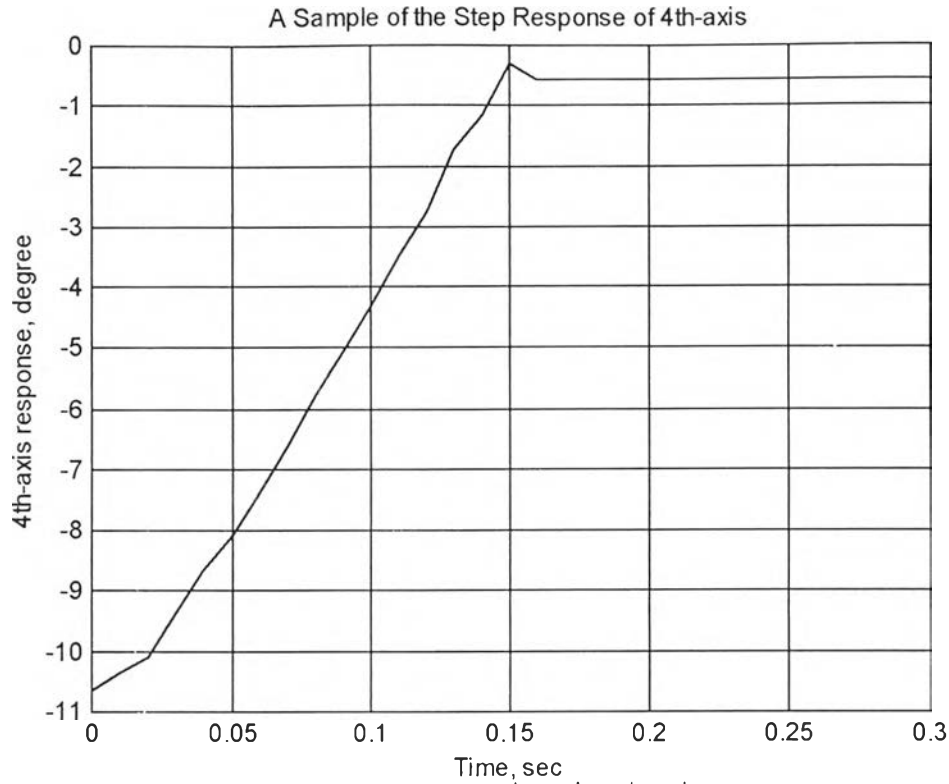
No.*	Reference Profile	Measured Start-End Point (Profile)	Steady State Error**	2% Setting Time (Sec)
6 cw	-18 – 2	-18 – 1.872	0.128	0.45
7 ccw	1.872 - -18.128	1.872 - -18	-0.128	0.5
8 cw	-18 – 2	-18 – 1.872	0.128	0.46
9 ccw	1.872 - -18.128	1.872 - -18.144	0.016	0.48
10 cw	-18.144 – 1.856	-18.144 – 1.728	0.128	0.47

(* ccw = counter clock-wise, cw = clock-wise)

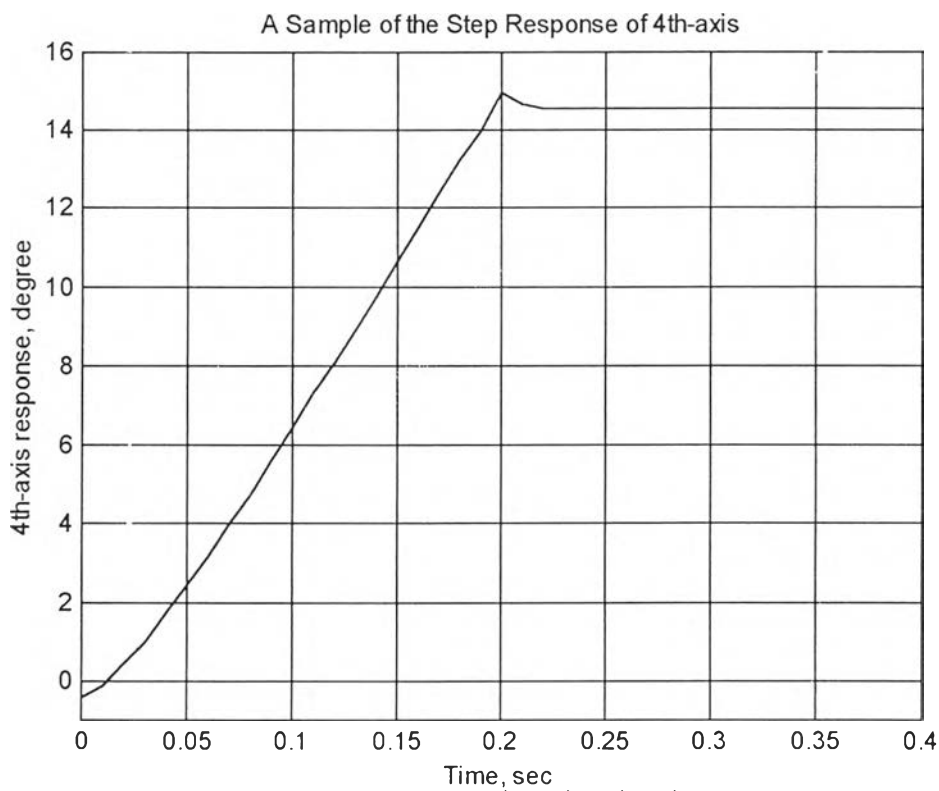
(** + = ccw direction, - = cw direction)



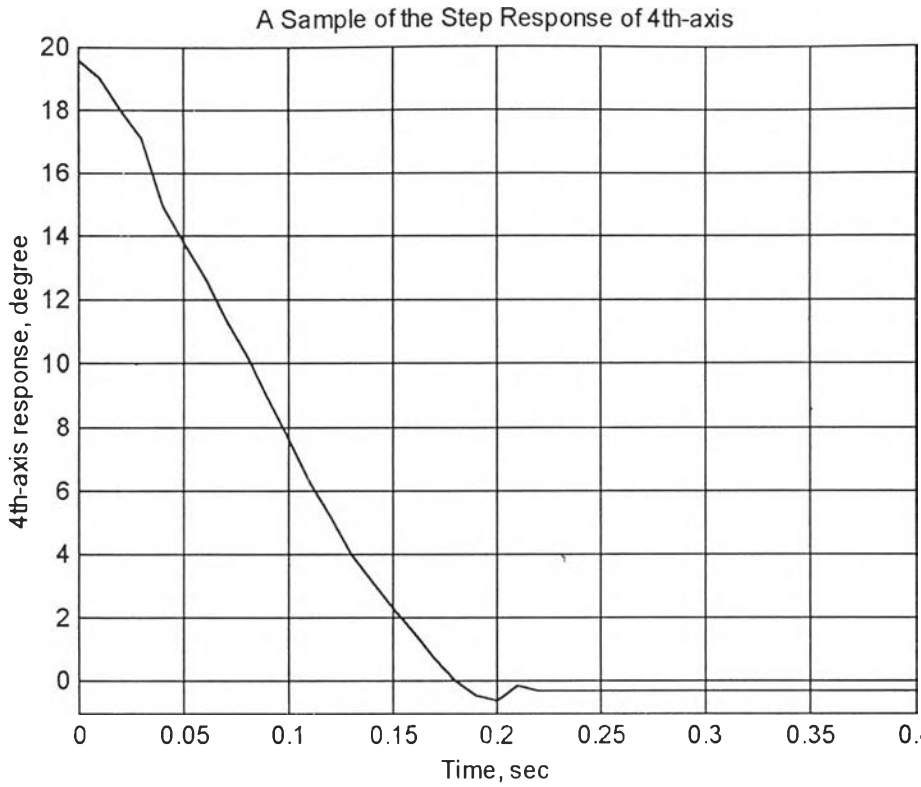
รูปที่ 5.15 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ 5 degree Forward



รูปที่ 5.16 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ 10 degree Forward



รูปที่ 5.17 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ 15 degree Forward



รูปที่ 5.18 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ 20 degree Reverse

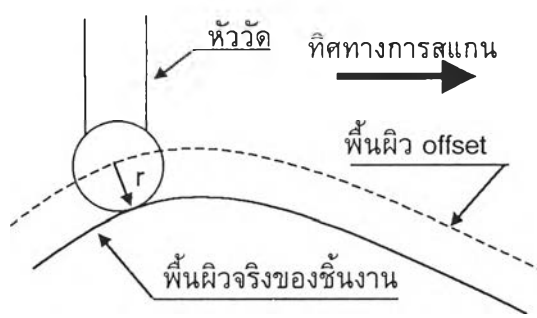
5.2 ผลเปรียบเทียบผลการวัดชิ้นงานกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง

ในตอนนี้เป็นผลการทดสอบการวัดชิ้นงานโดยใช้อุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติ แบบ 3 และ 4 แกน เปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากเครื่อง CMM ที่ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมซึ่งผลิตโดยบริษัท BROWN&SHARPE ผลการทดสอบแสดงได้ดังนี้

<u>การเปรียบเทียบผลการวัด</u>

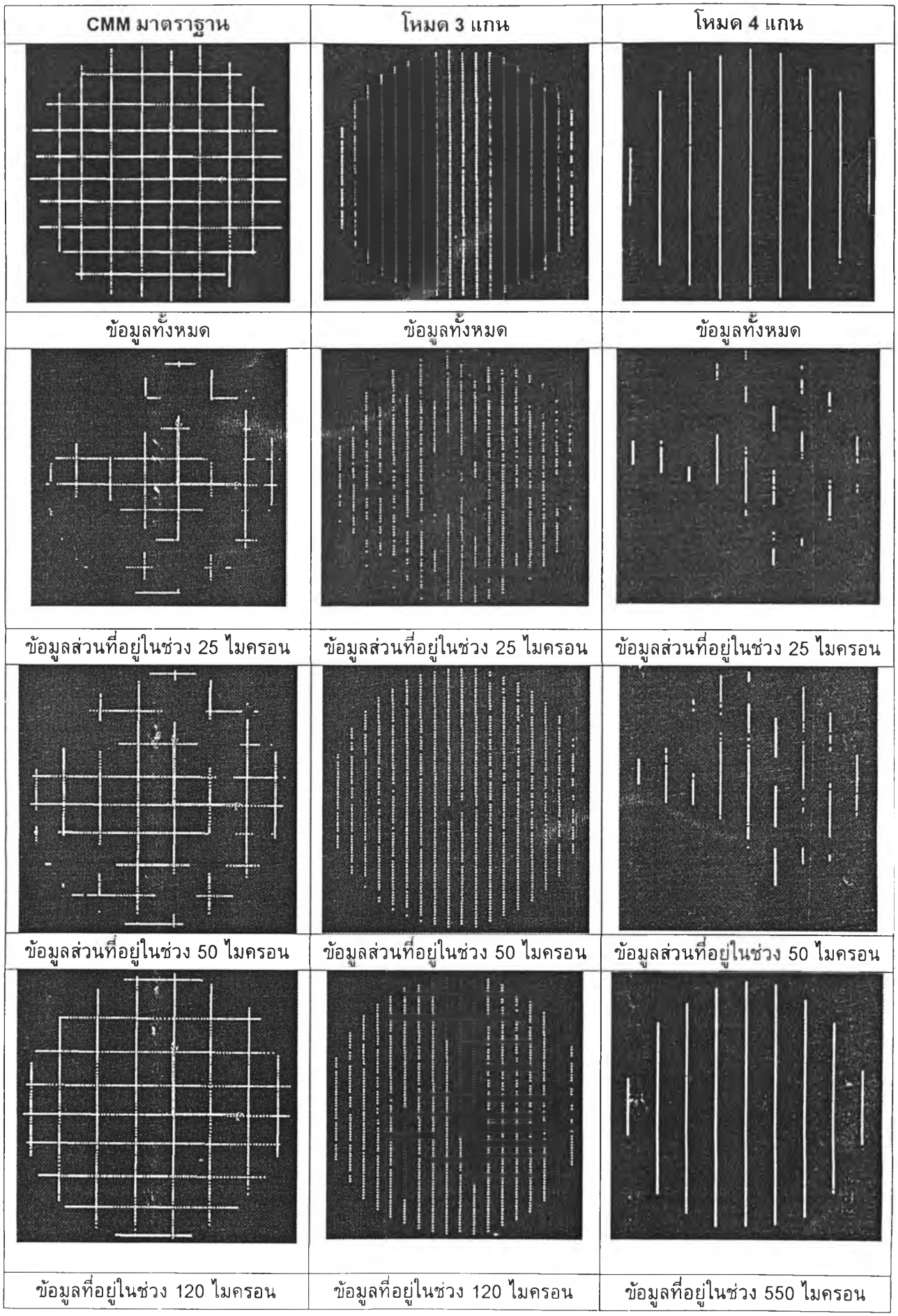
ในการเปรียบเทียบมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างต้นแบบจาก CAD
2. นำข้อมูลที่ได้จาก CAD ไปสร้างเป็นชิ้นงานโดยใช้เครื่อง CNC
3. นำชิ้นงานดังกล่าวมาทำการวัดด้วยอุปกรณ์วัดพิกัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยการทำงานแบบ 3 และ 4 แกน
4. นำผลที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับต้นแบบในคอมพิวเตอร์
5. นำชิ้นงานดังกล่าวไปวัดด้วยเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง
6. นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 5 ไปเปรียบเทียบกับต้นแบบในคอมพิวเตอร์ สำหรับขั้นตอนนี้จะเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้กับพื้นผิว offset พิจารณารูปที่ 5.19 ประกอบ เนื่องจากการวัดด้วย CMM ของบริษัท BROWN&SHARPE ข้อมูลที่วัดได้เป็นโคออร์ดิเนตของจุดศูนย์กลางของหัววัดดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงอยู่ห่างจากพื้นผิวจริงเท่ากับรัศมีของหัววัด r ในการทดสอบได้ใช้หัววัดที่ปลายของหัววัดเป็นทรงกลมรัศมี r เท่ากับ 3.1665 มิลลิเมตร
7. เปรียบเทียบผลที่ได้ในข้อ 4 และข้อ 6



รูปที่ 5.19 แสดงพื้นผิว offset

ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.20-5.21



รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยโหมดการทำงานแบบ 3 และ 4 แกน เทียบกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง(ชิ้นงานรูปที่ 5.25ข))

รูปที่ 5.20 เป็นผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพิกัดที่ใช้งานวิทยานิพนธ์นี้ในโหมด 3 แกนและ 4 แกน เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริงหรือ CMM มาตรฐาน ชิ้นงานชิ้นที่ 1 เป็นพื้นผิว Convex-like ขนาด 50×50 ลึกประมาณ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.26ข) วัสดุที่ใช้สร้างเป็นอลูมิเนียม โดยผลการเปรียบเทียบที่เห็นในรูปเป็นการมองจากด้านบนหรือมองในระนาบ xy จากรูปที่ 5.20 แถวบนเป็นข้อมูลที่วัดได้ในทั้ง 3 กรณี แถวที่ 2 เป็นข้อมูลที่อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบไม่เกิน ±25 ไมครอน แถวที่ 3 เป็นข้อมูลที่อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบไม่เกิน ±50 ไมครอน ส่วนแถวที่ 4 เป็นข้อมูลโดยส่วนใหญ่ที่อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบไม่เกินค่าที่เขียนไว้ที่ใต้รูป ผลที่ได้จาก CMM มาตราฐานเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากอุปกรณ์วัดพิกัดที่ใช้ในโหมด 3 แกน ผลที่ได้จากอุปกรณ์ วัดพิกัดในโหมด 3 แกนแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีพื้นผิวที่ใกล้เคียงกับต้นแบบในคอมพิวเตอร์มากโดยข้อมูลส่วนใหญ่(ประมาณ 79 เปอร์เซ็นต์)อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบไม่เกิน ±25 ไมครอน ส่วนผลที่ได้จากเครื่อง CMM มาตราฐานแสดงว่ามีข้อมูลประมาณครึ่งหนึ่งหรือ 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นข้อมูลบริเวณกลางและขอบของชิ้นงานจะมีค่าอยู่ในช่วง ±25 ไมครอน การที่ผลของ CMM มาตราฐานกับผลที่ได้จากอุปกรณ์วัดพิกัดต่างกันนั้นสาเหตุประการหนึ่งคือลักษณะของการวัดและหัววัดที่ใช้ต่างกัน เครื่อง CMM มาตราฐานใช้หัววัดทรงกลมที่มีขนาดใหญ่สัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงานเทียบกับอุปกรณ์วัดพิกัดที่ใช้หัววัดเลเซอร์ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่ส่องกระทบพื้นผิวชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตรเท่านั้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่เล็กทำให้สามารถวัดพื้นผิวที่มีความขรุขระบนพื้นผิวชิ้นงานได้ แต่หัววัดของเครื่อง CMM มาตราฐานมีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถวัดความขรุขระบนพื้นผิวชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของหัววัดมากๆได้ เปรียบเทียบผลที่ได้จากโหมด 3 และ 4 แกนจะเห็นว่าผลจาก 4 แกนที่อยู่ในช่วง ± 25 ไมครอน มีจำนวนน้อยกว่า ซึ่งสาเหตุที่จำนวนข้อมูลของแกนที่ 4 แสดงผลดังกล่าวเนื่องจากแกนที่ 4 มีแหล่งของความผิดพลาดมาจากการทำงานของแกนที่ 4 และการแปลงข้อมูลซึ่งสาเหตุของความผิดพลาดดังกล่าวจะได้กล่าวถึงในตอนต่อไป ในแถวสุดท้ายของรูปที่ 5.20 แสดงขอบเขตที่ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ภายในขอบเขตนี้ สำหรับ CMM มาตรฐาน ขอบเขตดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 120 ไมครอน ส่วนอุปกรณ์วัดพิกัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ในโหมด 3 แกน มีค่าเท่ากับ 120 ไมครอน ในโหมด 4 แกนมีค่าเท่ากับ 550 ไมครอน

รูปที่ 5.21 เป็นผลการเปรียบเทียบของชิ้นงานชิ้นที่ 2 ซึ่งเป็นระนาบโค้งจากขอบ 2 ด้านไปชนกันตรงกลางชิ้นงาน ขนาดของพื้นผิวเท่ากับ 150×150 มิลลิเมตร มีความสูง 5 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.26ก) รูปแสดงผลการเปรียบเทียบใช้รูปแบบเดียวกับชิ้นงานชิ้นที่ 1 จากรูปที่ 5.21 ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง CMM มาตราฐานมีความแตกต่างจากผลที่ได้จากอุปกรณ์วัดพิกัดแบบ 3 และ 4 แกนอย่างชัดเจนแต่ผลจากในกรณี 3 และ 4 แกนให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากกว่าเนื่องจากชิ้นงานเป็นชิ้นงานที่มีความชันน้อยผลการทำงานของแกนที่ 4 จึงมีการปรับตัวน้อยในขณะทำงานความผิดพลาดในการแปลงข้อมูลซึ่งจะได้กล่าวต่อไปจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย แต่การที่ผลของ CMM ต่างจากผลของเครื่องวัดมากนั้นอาจเป็นผลมาจากลักษณะของหัววัดที่ใช้ดังได้กล่าวในข้างต้นแล้ว

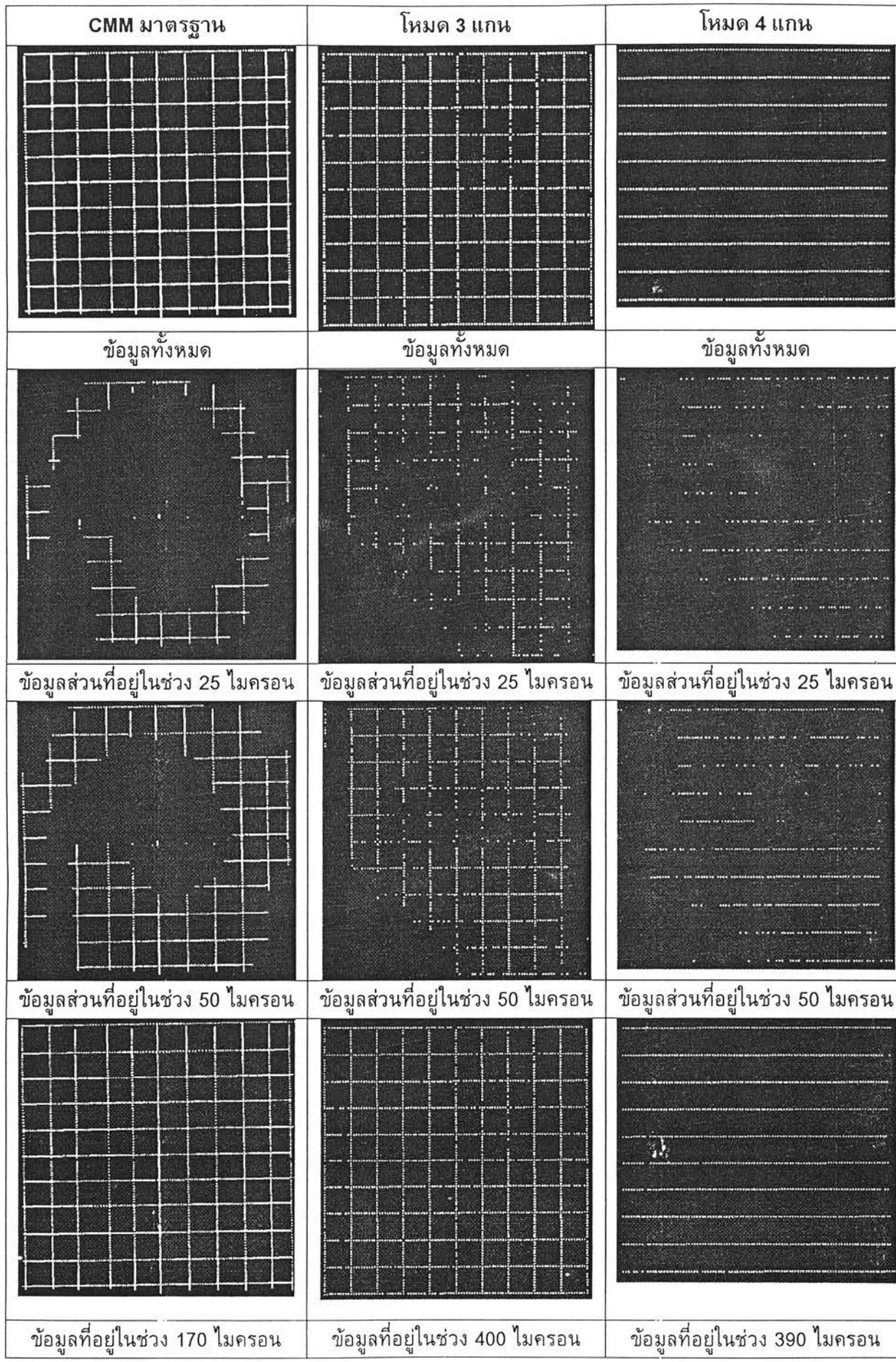
ในรูปที่ 5.22 เป็นผลการเปรียบเทียบของชิ้นงานชิ้นที่ 3 แสดงในรูปที่ 5.26ง) เป็นชิ้นงานรูปหูฟังโทรศัพท์ วิธีการเปรียบเทียบจะแตกต่างจากชิ้นงาน 2 ชิ้นข้างต้น เนื่องจากชิ้นงานชิ้นที่ 3 ไม่มีต้นแบบใน

คอมพิวเตอร์จึงไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับต้นแบบในคอมพิวเตอร์ได้ วิธีการเปรียบเทียบที่ทำในวิทยานิพนธ์นี้มีขั้นตอนดังนี้

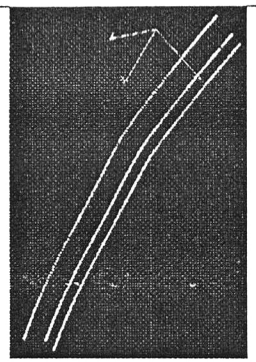
1. ทำการวัดชิ้นงานด้วยอุปกรณ์วัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยโหมด 3 แกน
2. ทำการวัดชิ้นงานด้วยอุปกรณ์วัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยโหมด 4 แกน
3. ทำการวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CMM มาตรฐาน
4. นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1, 2 และ 3 ถ่ายโอนเข้าสู่โปรแกรม CATIA
5. สร้างพื้นผิวจากจุดข้อมูลในข้อ 1, 2 ,3 ที่ได้ถ่ายโอนไปยังโปรแกรม CATIA เรียบร้อยแล้ว
6. เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากข้อ 1 กับข้อ 2 และข้อมูลที่ได้จากข้อ 1 กับข้อ 3 ดังในแถวที่ 2 ของรูปที่ 5.22

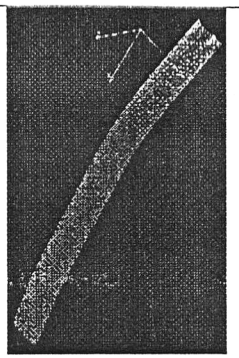
ในรูปที่ 5.22 เป็นรูปที่มองข้อมูลใน 3 มิติ จากผลที่ได้ปรากฏว่าพื้นผิวที่สร้างจากข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ในโหมด 3 แกนและ 4 แกนให้ผลที่ไม่เหมือนกันโดยพื้นผิวที่ได้จากโหมด 3 แกนจะมีส่วนที่ต่ำกว่าพื้นผิวจาก CMM มาตราฐานมากกว่าโหมด 4 แกน

ในตอนต่อไปเป็นการกล่าวถึงความไม่ต่อเนื่องในการวัดชิ้นงานด้วยโหมด 4 แกนและพิจารณา profile ของชิ้นงานชิ้นที่ 3 เพื่อที่จะดูความแตกต่างกันของข้อมูลที่ได้จาก 3 แกนและ 4 แกนในระนาบ 2 มิติและแสดงให้เห็นถึงลักษณะของข้อมูลที่ได้จากแกนที่ 4 ว่ามีความไม่ต่อเนื่องอยู่ด้วย

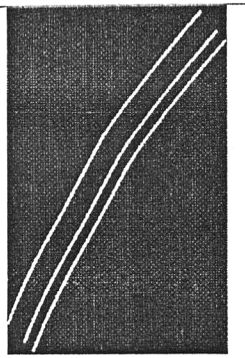


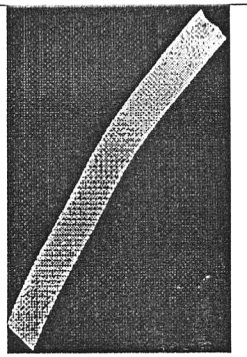
รูป ที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยโหมดการทำงานแบบ 3 และ 4 แกน เทียบกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง(ชิ้นงานรูปที่ 5.25ก))



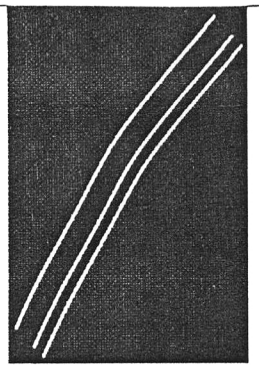


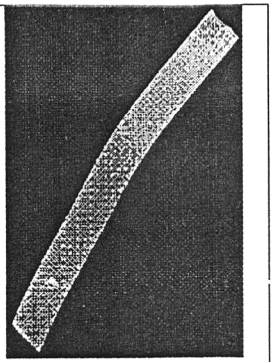
1. ข้อมูลที่ได้จาก CMM มาตราฐาน(ซ้าย) พื้นผิวที่สร้างจากข้อมูล(ขวา)



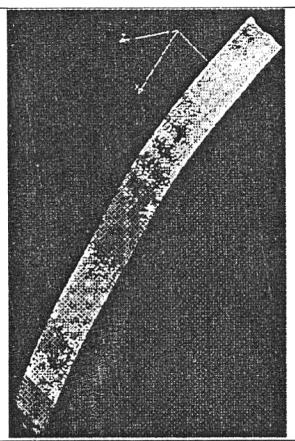


2. ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดพิกัด โหมด 3 แกน (ซ้าย)และพื้นผิวที่สร้างจากข้อมูล(ขวา)

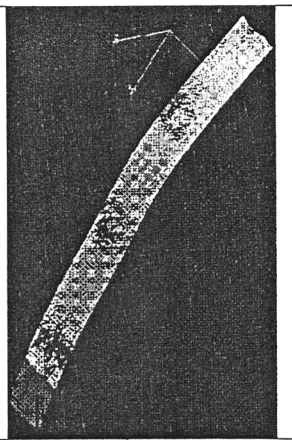




3. ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดพิกัด โหมด 4 แกน (ซ้าย)และพื้นผิวที่สร้างจากข้อมูล(ขวา)



ความแตกต่างระหว่างพื้นผิวที่สร้างในรูปที่ 1 และ 2 ข้างบน, ระยะทางที่ห่างกันมากที่สุด = 0.5 mm

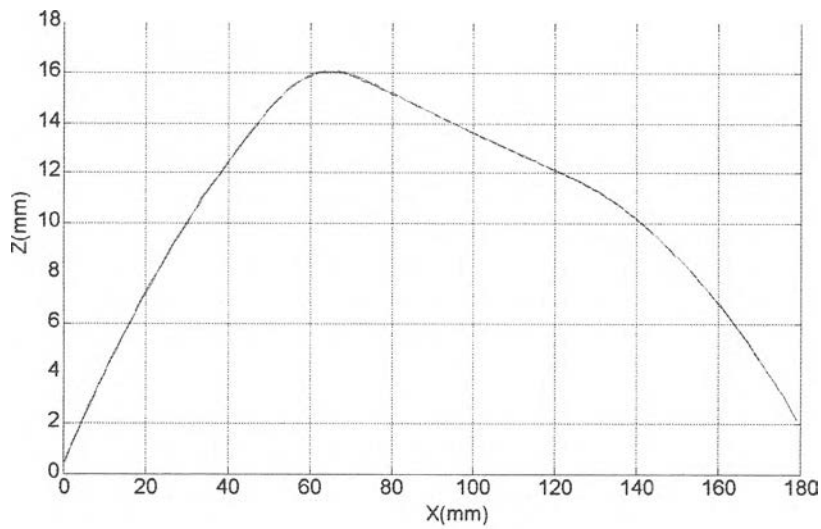


ความแตกต่างระหว่างพื้นผิวที่สร้างในรูปที่ 1 และ 3 ข้างบน, ระยะทางที่ห่างกันมากที่สุด = 0.7 mm

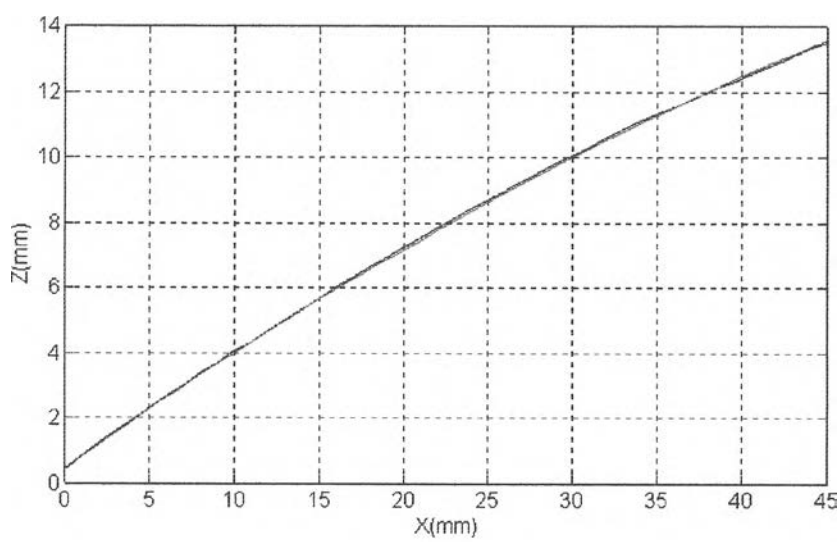
รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยโหมดการทำงานแบบ 3 และ 4 แกน เทียบกับผลจาก CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง(ชิ้นงานรูปที่ 5.25ง))

5.3 การเปรียบเทียบ Profile ของหูฟังโทรศัพท์ที่ได้จากโหมด 3 และ 4 แกน และความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลจากโหมด 4 แกน

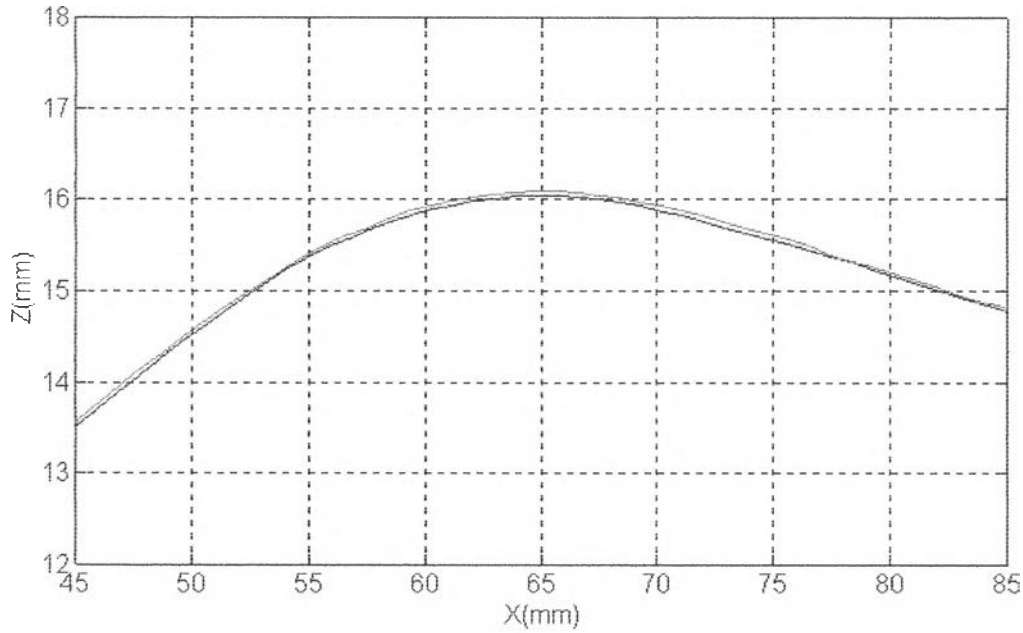
ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.23 ในรูปที่ 5.23ก) ข้อมูลที่แทนด้วยเส้นทึบเป็นข้อมูลที่ได้จากการใช้แกนที่ 4 ส่วนข้อมูลที่แทนด้วยเส้นทึบสีน้ำเงินและจุดสีแดงเป็นข้อมูลที่ไม่ได้ใช้แกนที่ 4 จะเห็นว่าข้อมูลทั้ง2 มีความใกล้เคียงกันมากแต่ก็มีความแตกต่างกันอยู่ในบริเวณ X=0–45 มิลลิเมตร ซึ่งเนื่องจากความชันของพื้นผิวมีค่ามากผลที่ได้ทั้ง 2 จึงมีค่าที่แตกต่างกันมาก ส่วนในบริเวณ X = 45-85 มิลลิเมตรนั้นที่มีความแตกต่างกันมากทั้งที่มีความชันไม่มากเนื่องมาจากการปรับหัวของอุปกรณ์วัดในบริเวณดังกล่าวยังใช้มุมมุมเดียวกันกับมุมที่ใช้ในข้อมูลบริเวณที่มีความชันมากอยู่ (เนื่องจากการปรับองศาของหัววัดจะกระทำทุกๆ ข้อมูล 11 จุด) จึงทำให้มุมของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบทำมุมห่างจากค่า 90 องศามาก ส่วนในบริเวณ X = 85-200 มิลลิเมตร เป็นบริเวณที่ชิ้นงานมีความลาดชันน้อยดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงใกล้เคียงกันมาก



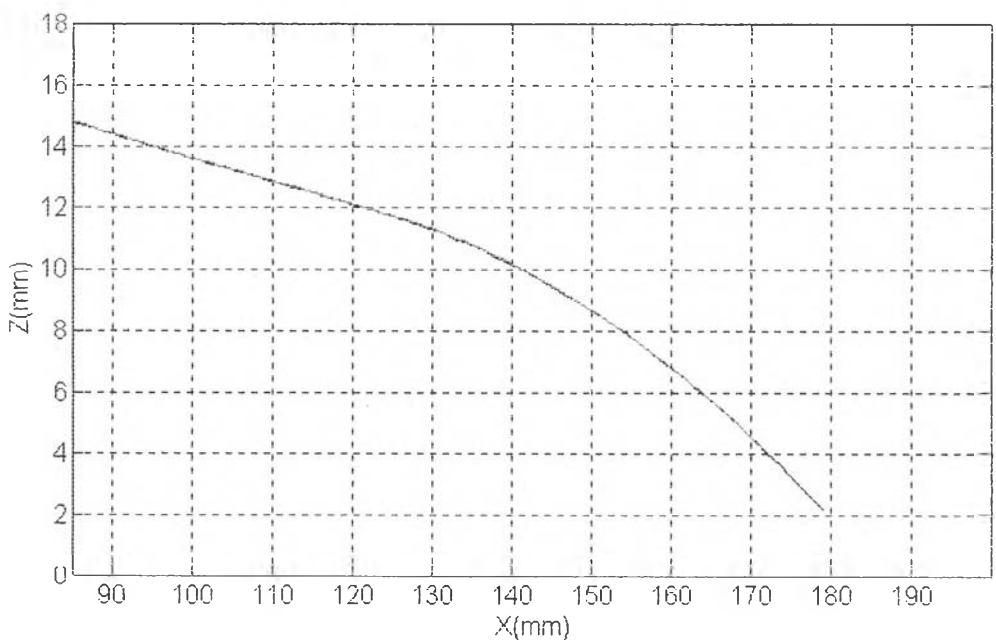
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 5.23 แสดงข้อมูลที่ได้จากพื้นผิวมือถือโทรศัพท์

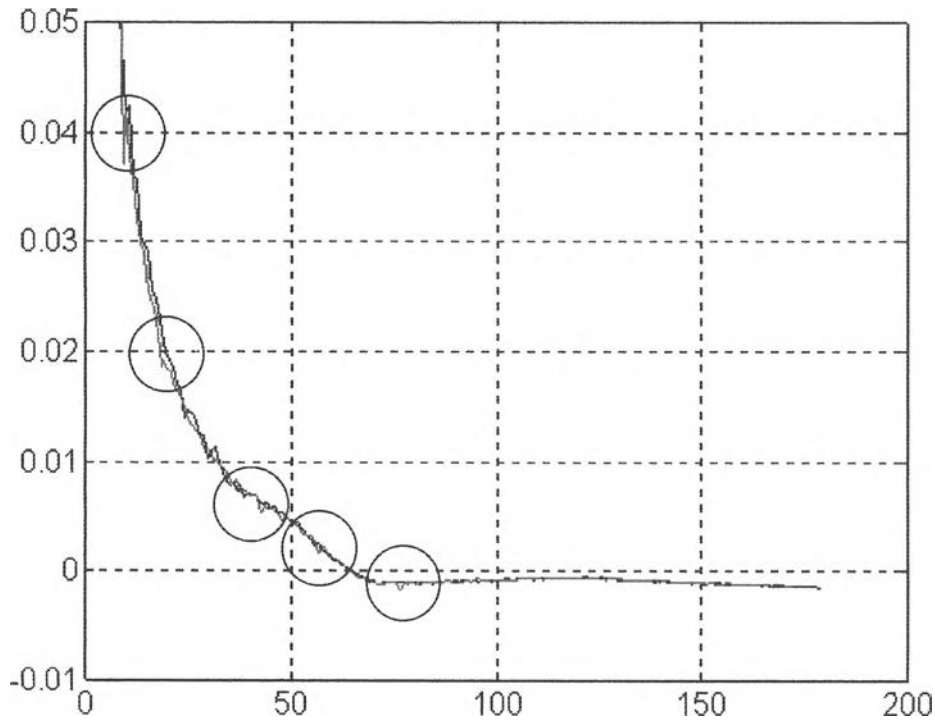
ก) เป็นข้อมูลที่ได้เส้นทึบแทนข้อมูลที่ได้เมื่อใช้แกนที่ 4 ช่วยในการปรับองศาของหัววัดส่วนข้อมูลที่แทนด้วยเส้นทึบและจุดเป็นข้อมูลที่ไม่ได้ใช้แกนที่ 4

ข) เป็นภาพขยายของบริเวณ X=0-45 มิลลิเมตร

ค) เป็นภาพขยายของบริเวณ X=45-85 มิลลิเมตร

ง) เป็นภาพขยายของบริเวณ X=85-200 มิลลิเมตร

แล้วจึงค่อยๆ ลดลงมาจนต่ำกว่า 0 นอกจากนี้ความชันในช่วงแรกๆ ยังมีการลดลงอย่างรวดเร็วกว่าในช่วงถัดมา ซึ่งเมื่อถึงในช่วงท้ายความชันมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และ กราฟความชันของข้อมูลที่ได้จากการใช้แกนที่ 4 ยังมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องเป็นช่วงๆ แสดงอยู่ในวงกลมในรูป ความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องมาจากการปรับตัวขององศาของหัววัด ขนาดของความไม่ต่อเนื่องของความชันจะมีขนาดขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความชันหากมีการเปลี่ยนแปลงความชันมากขนาดของความไม่ต่อเนื่องก็จะยิ่งมีมาก

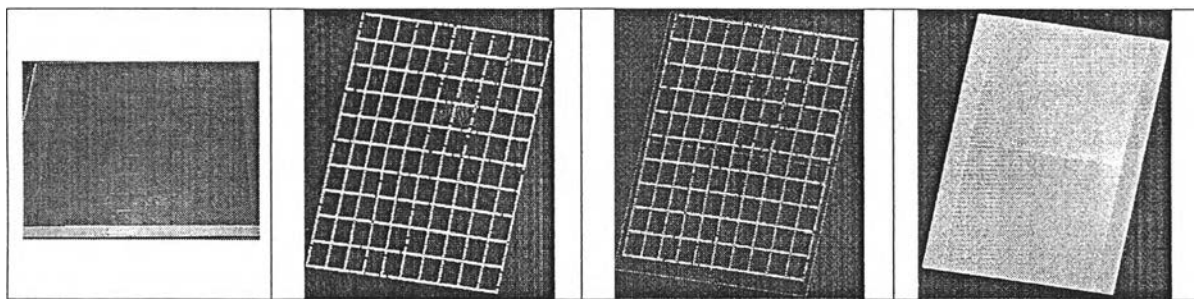


รูปที่ 5.24 แสดงความชันของพื้นผิวชิ้นงานโทรศัพท์ เส้นสีน้ำเงินแทนข้อมูลที่ได้จากการสแกนด้วย 3 แกน ส่วนสีแดงเป็นเส้นที่ได้จากการสแกนด้วย 4 แกน

จากผลการทดสอบจะเป็นว่าการทำงานด้วยแกนที่ 3 จะมีความถูกต้องสูงกว่าการทำงานในกรณี 4 แกนซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเพิ่มแกนที่ 4 และการทำงานของแกนที่ 4 แต่จะเห็นว่ามีข้อดีในกรณีที่สามารถเก็บข้อมูลของพื้นผิวที่มีความชันมากๆ ได้และพื้นผิวทีซับซ้อนมากๆ ก็สามารถวัดได้ ลักษณะของความผิดพลาดจะเปลี่ยนแปลงตามความชันและการเปลี่ยนแปลงความชันหมายความว่าหากชิ้นงานมีการเปลี่ยนความชันจากความชันน้อยไปเป็นความชันมากบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงก็จะเกิดความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลและยิ่งมีการหักมุมของพื้นผิวความไม่ต่อเนื่องก็จะมีขนาดมากขึ้น ด้วยส่วนในการทำงานแบบ 3 แกนจะให้ความถูกต้องมากในกรณีที่พื้นผิวมีความลาดชันไม่มากเกินไป นอกจากนี้ถึงแม้การทำงานแบบ 3 แกนจะให้ความถูกต้องแต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องที่ไม่สามารถวัดพื้นผิวได้ในบางกรณี ดังนั้นการจะใช้การสแกนแบบ 3 หรือ 4 แกนนั้นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับงานด้วย

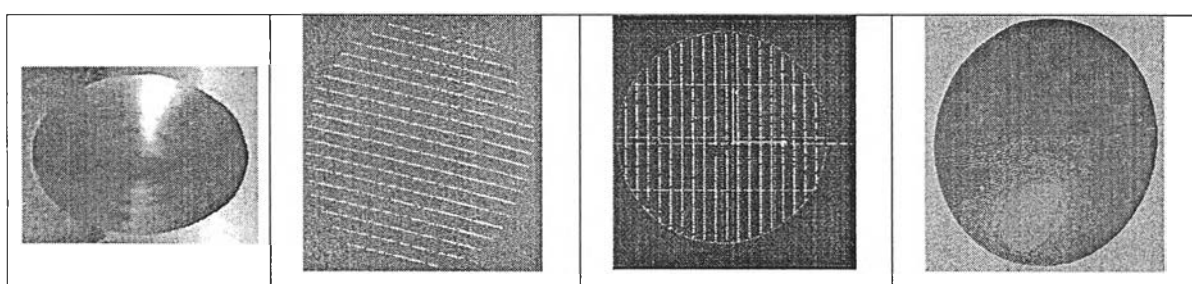
5.4 ชิ้นงานที่ได้ทำการวัดในวิทยานิพนธ์บางส่วน

รูปข้างล่างต่อไปนี้เป็นชิ้นงานที่ได้ทำการวัดบางส่วน



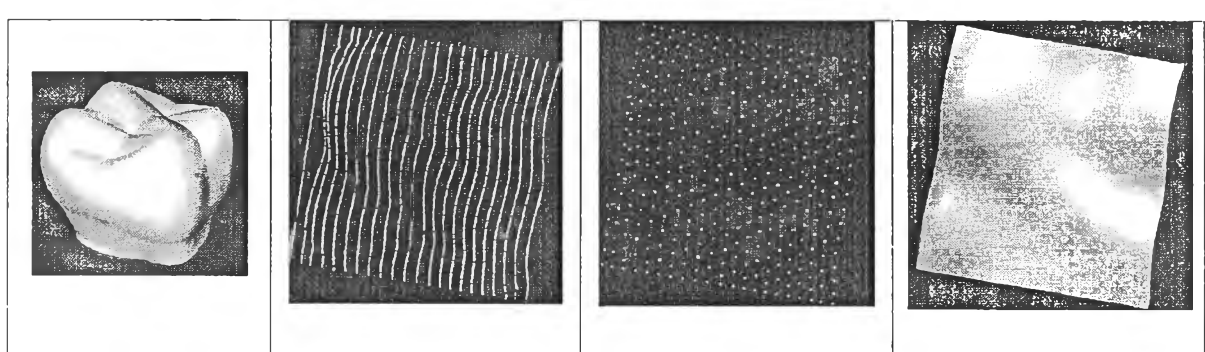
Object convex-like	Data-point from CMM	Data-point from our CMM	Regenerated Surface

ก)



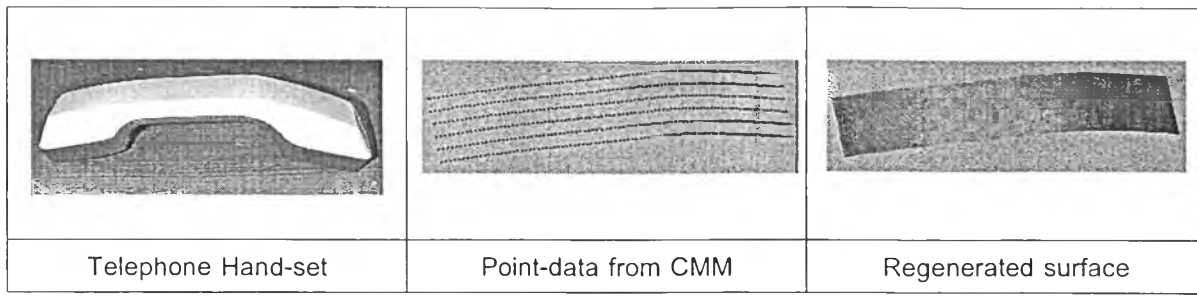
Object concave-like	Data-point from CMM	Points within the specified accuracy	Regenerated Surface

ข)



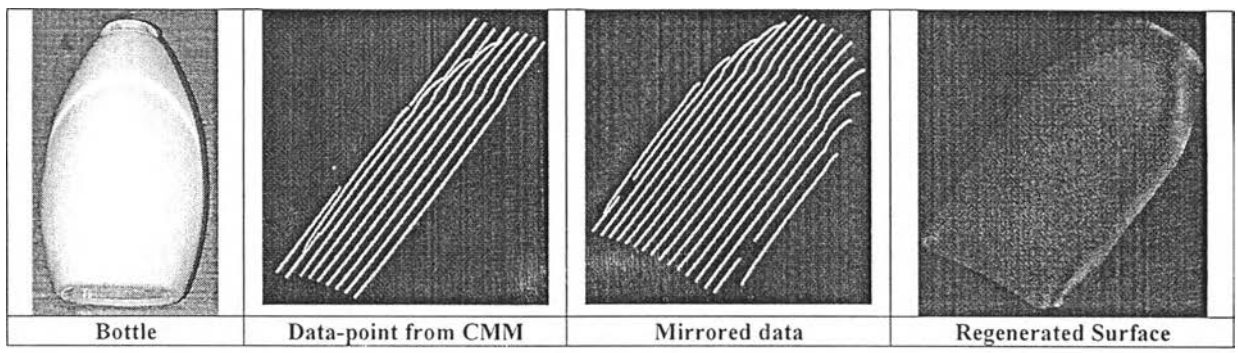
Object tooth surface	Data-point from CMM	After Pre-filter	Regenerated Surface

ค)



Telephone Hand-set	Point-data from CMM	Regenerated surface

ง)



Bottle	Data-point from CMM	Mirrored data	Regenerated Surface

จ)

รูปที่ 5.25 แสดงชิ้นงานที่ได้ทำการวัด

ในหัวข้อนี้เป็นการรวบรวมรูปของข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์วัดพิกัดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ บางรูปได้อ้างอิงถึงในตอนต้นไปแล้ว แต่บางรูปจะนำมากล่าวในหัวข้อนี้ รูปที่แสดงถึงจุดข้อมูลเป็นรูปที่นำมาจากหน้าจอของโปรแกรม CATIA โดยตรง ต่อไปจะข้ออธิบายไปทีละรูปดังนี้

รูปที่ 5.25ก) เป็นชิ้นงานที่อ้างถึงแล้วในตอนต้น ในส่วนที่เกี่ยวกับการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง รูปแรกทางด้านซ้ายของผู้อ่านเป็นภาพที่ถ่ายจากชิ้นงานจริง รูปต่อมาเป็นข้อมูลที่ได้สแกนเข้าสู่โปรแกรม CATIA รูปที่ 3 เป็นรูปของจุดข้อมูลที่อยู่ในช่วง ±25ไมครอน รูปสุดท้ายเป็นพื้นผิวที่ได้จากการ Regenerated จากข้อมูล

รูปที่ 5.25ข) เป็นชิ้นงานที่อ้างถึงแล้วเช่นเดียวกัน เป็นชิ้นงานที่มีพื้นผิวแบบเว้าเข้า

รูปที่ 5.25ค) เป็นชิ้นงานที่มีพื้นผิวซับซ้อนมากขึ้น เป็นลักษณะของฟันกรามของคน ส่วนที่ทำการวัดคือบริเวณพื้นผิวด้านบนของฟันซึ่ง ในการ Regenerated ชิ้นงานนี้จะทำการปรับปรุงข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดพิกัดเสียก่อนด้วยการใช้ตัวกรอง(filter)กรองความไม่เป็นระเบียบในข้อมูลออก และทำการ Sampling ข้อมูลที่มีมากเกินไปให้น้อยลงเพื่อที่จะง่ายต่อการสร้างพื้นผิวและไม่ทำให้พื้นผิวที่สร้างมีความซับซ้อนเพราะมีข้อมูลมากเกินไป

รูปที่ 5.25ง) เป็นชิ้นงานที่อ้างถึงแล้ว เป็นหูฟังโทรศัพท์ ได้ทำการวัดพื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน

รูปที่ 5.25จ) เป็นข้อมูลที่ได้จากกระป๋องแป้งยี่ห้อหนึ่งทำการวัดพื้นผิวด้านเดียว และวัดเพียงครึ่งเดียวดังแสดงในรูปแรกหลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงข้อมูลโดยการตัดข้อมูลที่อยู่ห่างจากข้อมูลมากๆ ออกไป

แล้ว Mirror ข้อมูลให้ได้ข้อมูลที่แทนพื้นผิวของกระป๋องแป้งด้านเดียว จากนั้นจึงทำการสร้างพื้นผิวด้วยฟังก์ชันใน CATIA ดังแสดงในสุดท้าย