

บทที่ 6

สรุปและวิเคราะห์ผล

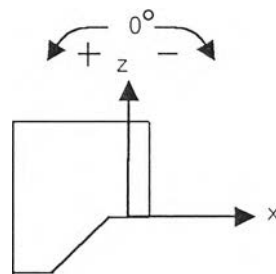
สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดสอบการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนหลักในข้อ 5.1 สรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแกนหลักทั้ง 3

แกน	ช่วง	ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว, step	ค่า 2% settling time, วินาที
แกน x	ระยะ 0-80 มิลลิเมตร	-2 ถึง 2	7.7 ถึง 7.8
	ระยะ 80-160 มิลลิเมตร	-6 ถึง 6	7.7 ถึง 7.8
	ระยะ 160-240 มิลลิเมตร	-3 ถึง 3	7.7 ถึง 7.8
แกน y	ระยะ 0-80 มิลลิเมตร	-1 ถึง 1	4.3 ถึง 4.4
	ระยะ 80-160 มิลลิเมตร	-1 ถึง 1	4.3 ถึง 4.4
	ระยะ 160-240 มิลลิเมตร	-1 ถึง 1	4.3 ถึง 4.4
แกน z	ระยะ 0-80 มิลลิเมตร	-1 ถึง 1	4.3 ถึง 4.4
	ระยะ 80-160 มิลลิเมตร	-1 ถึง 1	4.3 ถึง 4.4
	ระยะ 160-240 มิลลิเมตร	-1 ถึง 1	4.3 ถึง 4.4

2. จากผลการทดสอบแกนที่ 4 ในข้อ 5.1 ซึ่งจะทดสอบที่ค่ามุม + และ - และแต่ละค่าจะทดสอบการเคลื่อนที่ไปและกลับ ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 แสดงการบอกทิศทางของการเคลื่อนที่ของแกนที่ 4, ccw +, cw -

ตารางที่ 6.2 สรุปผลการทดสอบการหมุนของแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step เป็นมุมแคบๆ($2^{\circ}, 3^{\circ}, 4^{\circ}$)เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แบบกำหนดการเคลื่อนที่ด้วย Profile กับการเคลื่อนที่แบบไม่มีการกำหนด Profile

มุม	ทิศทางการเคลื่อนที่	ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว, องศา		ค่า 2% settling time, วินาที	
		Profile	No profile	Profile	No profile
2°	$0^{\circ} - 2^{\circ}$	-0.016	-0.016 , 0.128	0.06 ถึง 0.4	0.05 ถึง 0.14
	$2^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.128 , 0.016	-0.016 , 0.128	0.10 ถึง 0.28	0.05 , 0.06
3°	$0^{\circ} - 3^{\circ}$	-0.024 , 0.12	-0.024 , 0.12	0.07 ถึง 0.74	0.05 ถึง 0.19
	$3^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.12 , 0.024	-0.024 , 0.12	0.10 ถึง 0.43	0.07 ถึง 0.21
4°	$0^{\circ} - 4^{\circ}$	-0.032 , 0.112	-0.032 , 0.112	0.19 ถึง 0.36	0.06 ถึง 0.17
	$4^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.112 , 0.032	0.112	0.09 ถึง 0.38	0.06 ถึง 0.13

ตารางที่ 6.3 สรุปผลการทดสอบการหมุนของแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step เป็นมุม $5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}$ ใช้การเคลื่อนที่แบบกำหนดการเคลื่อนที่ด้วย Profile

มุม	ทิศทางการเคลื่อนที่	ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว, องศา	ค่า 2% settling time, วินาที
5°	$0^{\circ} - 5^{\circ}$	-0.04 , 0.104	0.12 ถึง 0.28
	$5^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.104 , 0.04	0.11 ถึง 0.45
10°	$0^{\circ} - 10^{\circ}$	-0.224 ถึง 0.06	0.23 ถึง 0.48
	$10^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.08 ถึง 0.08	0.24 ถึง 0.48
15°	$0^{\circ} - 15^{\circ}$	-0.264 ถึง 0.024	0.35 ถึง 0.46
	$15^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.024 ถึง 0.264	0.36 ถึง 0.40
20°	$0^{\circ} - 20^{\circ}$	-0.16 ถึง 0.132	0.46 ถึง 0.48
	$20^{\circ} - 0^{\circ}$	-0.128 ถึง 0.128	0.46 ถึง 0.49

ตารางที่ 6.4 สรุปผลการทดสอบการหมุนของแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step เป็นมุม -5° , -10° , -15° , -20° ใช้การเคลื่อนที่แบบกำหนดการเคลื่อนที่ด้วย Profile

มุม	ทิศทางของการเคลื่อนที่	ค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัว, องศา	ค่า 2% settling time, วินาที
-5°	$0^{\circ} - (-5^{\circ})$	-0.104 , 0.04	0.12 ถึง 0.41
	$(-5^{\circ}) - 0^{\circ}$	-0.04 , 0.104	0.12 ถึง 0.31
-10°	$0^{\circ} - (-10^{\circ})$	-0.064 , 0.08	0.22 ถึง 0.48
	$(-10^{\circ}) - 0^{\circ}$	-0.08 , 0.064	0.23 ถึง 0.45
-15°	$0^{\circ} - (-15^{\circ})$	-0.298 ถึง 0.12	0.34 , 0.37
	$(-15^{\circ}) - 0^{\circ}$	-0.264 , -0.12	0.34 ถึง 0.37
-20°	$0^{\circ} - (-20^{\circ})$	0.016 , -0.128	0.48 ถึง 0.50
	$(-20^{\circ}) - 0^{\circ}$	-0.304 , 0.128	0.45 ถึง 0.48

3. จากผลการเปรียบเทียบในข้อ 5.2 ชิ้นงานชิ้นที่ 1 ได้สรุปผลได้ดังนี้

ตารางที่ 6.5 สรุปผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์วัดพิทช์แบบ 3 และ 4 แกนกับเครื่อง CMM มาตรฐาน (รูปที่ 5.20-5.21)

ชิ้นงานที่	จำนวนข้อมูลที่อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบไม่เกิน ± 25 ไมครอน, % ของข้อมูลทั้งหมด			จำนวนข้อมูลที่อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบไม่เกิน ± 50 ไมครอน, % ของข้อมูลทั้งหมด			ขอบเขตที่ข้อมูลมากกว่า 90 % ของทั้งหมดที่อยู่ห่างจากพื้นผิวต้นแบบ, ไมครอน		
	CMM	3 แกน	4 แกน	CMM	3 แกน	4 แกน	CMM	3 แกน	4 แกน
1	~60	~80	~30	~70	~90	~50	± 120	± 120	± 550
2	~20	~60	~50	~50	~70	~70	± 170	± 400	± 390

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ '~' แทนคำว่า ประมาณ

- ผลการเปรียบเทียบพื้นผิวที่ได้จากข้อมูลซึ่งวัดมาจากเครื่อง CMM มาตรฐานกับอุปกรณ์วัดพิทช์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ในโหมด 3 แกนและ 4 แกน ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ได้ผลว่าพื้นผิวที่สร้างจากข้อมูลที่ได้จากโหมด 3 แกนอยู่ห่างจากพื้นผิวที่สร้างจากข้อมูลของเครื่อง CMM มากที่สุด 0.5 มิลลิเมตร ส่วนข้อมูลในโหมดการทำงานแบบ 4 แกนอยู่ห่างจากพื้นผิวมากที่สุดเท่ากับ 0.7 มิลลิเมตร
- ผลการเปรียบเทียบการวัด Profile ของหูฟังโทรศัพท์พบว่าข้อมูลที่ได้จะมีความแตกต่างกันมากเมื่อพื้นผิวหรือ Profile มีความชันมากแต่เมื่อพื้นผิวหรือ Profile มีความชันไม่มากข้อมูลที่ได้จากโหมด 3 แกนและ 4 แกนจะใกล้เคียงกันมาก และพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทำงานในโหมด 4 แกนจะมีความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลอยู่พิจารณาจากการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทำงานในโหมด 4 แกนมาหาค่าความชันพบว่าความชันมีค่า

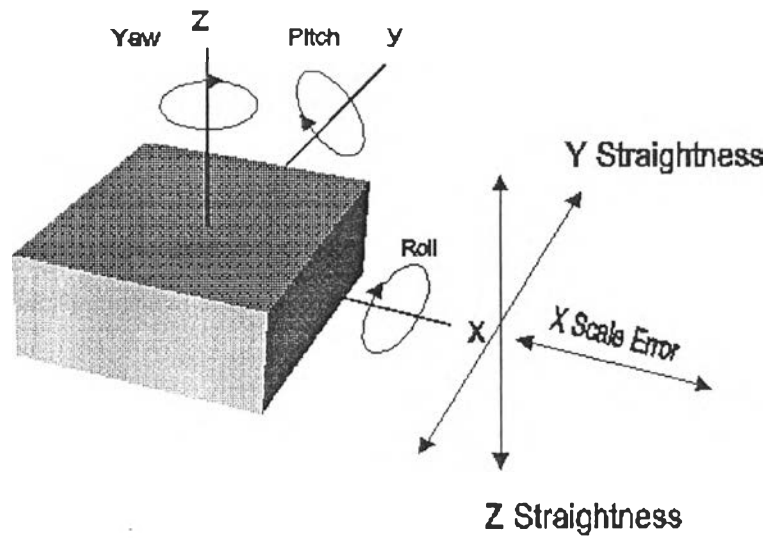
กระโดดเป็นช่วงๆ จากการสังเกตขนาดของความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวจะมีค่ามากในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันมาก

วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. จากผลการทดสอบการทำงานของแกนหลักทั้ง 3 พบว่าแกน x มีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวมากที่สุดโดยจะเคลื่อนที่ไปไม่ถึงค่าที่กำหนด เนื่องจากลักษณะของภาวะที่แกน x รับคือน้ำหนักของแกน z และแกนที่จับยึดหัววัด ค่าความผิดพลาดดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าบริเวณกลางของแกน x ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากตำแหน่งจุดรองรับทั้ง 2 ข้างมากที่สุดนั่นเอง เกิดการโก่งงอมากในบริเวณดังกล่าวมากซึ่งส่งผลต่อแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่ด้วย ส่วนการเคลื่อนที่ในแกน y และ z ให้ผลการเคลื่อนที่ที่ดีกว่าแกน x เนื่องจากในแกน y จุดรองรับอยู่ห่างกันไม่มากและพื้นที่ในการรับแรงของจุดรองรับของแกน y มีขนาดใหญ่กว่าดังนั้นบริเวณกลางของแกนจึงไม่เกิดโก่งงอมากจึงมีแรงเสียดทานไม่มาก ในแกน z ให้ผลการเคลื่อนที่ที่ดีเนื่องจากภาวะที่กระทำอยู่ในแนวของการเคลื่อนที่ จะมีโมเมนต์กระทำกับแกนข้างในระนาบ yz เนื่องจากผลของน้ำหนักของแกนจับยึด แต่ภาวะดังกล่าวมีค่าน้อยเนื่องจากแกนของโมเมนต์จากจุดศูนย์กลางมวลของแกนจับยึดไปยังบอลสกรูของแกน z มีค่าน้อย
2. จากการทดสอบแกนที่ 4 ด้วยคำสั่งที่เป็นมุมแคบๆ ไปกลับ จะเห็นว่าให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวใกล้เคียงกันทั้งในกรณีที่ใช้ Profile และในกรณีที่ไม่ใช้ Profile สิ่งที่แตกต่างกันคือค่าเวลา 2% settling time ซึ่งในกรณีที่ใช้ Profile จะมีค่ามากกว่าเนื่องจากระบบ(ซึ่งก็คือแกนที่ 4)จะติดตาม Profile ที่กำหนดไปเรื่อยๆจนเข้าสู่ค่าที่กำหนด แต่ในกรณีที่ไม่ใช้ Profile ระบบจะปรับตัวเพื่อให้เข้าสู่ค่าที่กำหนดทันที ระบบจึงเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วในช่วงต้นเนื่องจากมีความผิดพลาดเริ่มต้นระหว่างค่าที่กำหนดกับตำแหน่งปัจจุบันมาก ทำให้เวลาที่ใช้ในช่วงนี้น้อยกว่า เวลารวมที่ใช้จึงน้อยกว่าด้วย
3. เกี่ยวกับเรื่องของแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับแกนที่ 4 ในช่วงการหมุนแคบๆนั้น เนื่องจากตำแหน่งเริ่มกับตำแหน่งสุดท้ายอยู่ใกล้กัน ค่าภาระเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในสมการที่ 3.1 จึงมีความแตกต่างกันไม่มากสามารถประมาณเป็นภาระเชิงเส้นได้ระบบควบคุมที่ใช้จึงสามารถควบคุมได้
4. จากการทดสอบแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step 5° , 10° , 15° , 20° ไปกลับและ -5° , -10° , -15° , -20° ไปกลับ จะเห็นว่าให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 0.144 องศา(เท่ากับการหมุนของแกนที่ 4 ไป 1 พัลส์)ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมการเคลื่อนที่ไปและกลับให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนักเป็นผลมาจากลักษณะของแกนที่ 4 ที่มีมวลน้อย, แกนของโมเมนต์มีความยาวน้อย, ช่วงของการทำงานมีค่าน้อย($+20^\circ$ · -20°)และตัวควบคุมก็รวมท่อมที่พยายามกำจัดผลของแรงโน้มถ่วงไว้ด้วย
5. ผลการเปรียบเทียบการวัดชิ้นงานในโหมด 3 และ 4 แกนกับเครื่อง CMM มาตรฐานของชิ้นงานชิ้นที่ 1, 2, และ 3 ให้ผลที่แตกต่างกันมากซึ่งสาเหตุมาประการหนึ่งที่ได้กล่าวไปแล้วคือลักษณะการวัดของเครื่อง CMM มาตรฐานใช้หัววัดแบบสัมผัสชิ้นงานที่มีรัศมี 3.1665 มิลลิเมตรซึ่งใหญ่เมื่อเทียบกับหัววัดเลเซอร์ที่

ใช้ลำแสงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตที่สุดเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร ขนาดของลำแสงที่เล็กย่อมสามารถวัดข้อมูลจากพื้นผิวที่มีความขรุขระได้ดีกว่า

6. จากผลที่ได้ในการทดสอบวัด Profile ของห่วงโทรศัพท์นั้น ในบริเวณที่ผิวของชิ้นงานมีความชันไม่มากผลการวัดจากเครื่อง 3 แกนและ 4 แกนจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน เมื่อความชันยิ่งเพิ่มความแตกต่างจะเพิ่มซึ่งเป็นผลเนื่องจากการสะท้อนของแสงเลเซอร์ไปยังตัวรับที่มุมไม่เท่ากันเมื่อใช้การทำงานแบบ 3 และ 4 แกน เพราะการทำงานในโหมด 4 แกนจะพยายามยิงลำแสงให้ตัวฉากกับพื้นผิวมากที่สุด ส่วนการทำงานแบบ 3 แกน จะยิงลำแสงแต่ในแนวแกน z เท่านั้น แสงที่สะท้อนจึงต่างกันด้วย
7. ความถูกต้องของข้อมูลที่วัดได้ขึ้นอยู่กับ
 - 7.1 ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงาน หากพื้นผิวชิ้นงานขรุขระการสะท้อนแสงจะไม่ดี แต่หากพื้นผิวเป็นผิวมันการค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดเช่นกัน หากพิจารณาข้อมูลค่ารีโซลูชันจากผู้ผลิตในภาคผนวกจะเห็นว่าเมื่อใช้ชิ้นงานที่เป็นแผ่นอะคริลิกสีน้ำตาลจะมีความผิดพลาดมากกว่าใช้กระดาษขาว นอกจากนี้ลักษณะความเอียงของพื้นผิวชิ้นงานยังมีผลต่อความถูกต้องเนื่องจากเมื่อพื้นผิวชิ้นงานมีความเอียงมาก แสงที่สะท้อนกลับมายังตัวรับจะมีความเข้มข้นหรือตำแหน่งของจุดศูนย์กลางลำแสงจะเบี่ยงเบนไปทำให้เกิดความผิดพลาดได้
 - 7.2 สิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความร้อน แสง ความชื้น ละอองในอากาศ เสียง จากการทดลองจะเห็นว่าความร้อนมีผลต่อค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งแหล่งของความร้อนอาจมาจากหลายๆ ทางเช่นมาจากการนำ การพา หรือ การแผ่รังสี จากหลอดไฟ จากเครื่องจักร หรือแม้กระทั่งจากผู้ควบคุมเอง นอกจากอุณหภูมิแล้วสิ่งแวดล้อมอย่างอื่นก็มีผลเช่นการสั่นสะเทือนจากสิ่งแวดล้อมเช่น จากเครื่องปรับอากาศหรือจากเครื่องจักรในบริเวณใกล้เคียง การลดผลของการสั่นสะเทือนสามารถลดได้โดยลดที่ตัวแหล่งกำเนิดหรือที่ตัวส่งผ่านการสั่นสะเทือน การกำจัดที่แหล่งกำเนิดเป็นหนทางที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดการสั่นสะเทือน การจัดการอาจใช้ vibration isolation ในการแยกแหล่งกำเนิดจากสิ่งแวดล้อมไม่ใหส่งการสั่นสะเทือนไปยังตัวกลางได้ แต่ก็มีแหล่งกำเนิดของสัญญาณบางแหล่งที่ไม่สามารถใช้ vibration isolation ได้เช่น ในกรณีที่เครื่องบินบินในระดับต่ำๆ เป็นต้น ส่วนการจัดการที่ตัวกลางอย่างง่ายคือเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและตัวรับ สำหรับการจัดการที่ตัวรับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด วิธีที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นการ isolation ซึ่งถึงแม้จะใช้กับเครื่อง CMM แต่บริเวณข้างเคียงก็ยังได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนอยู่ดี
 - 7.3 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ เมื่อมีความผิดพลาดของโครงสร้างเช่นการบิดตัวความเอียงของโครงสร้าง ย่อมมีผลกระทบต่อผลการวัดอย่างแน่นอนผลของความผิดพลาดดังกล่าวสรุปได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ความผิดพลาดของโครงสร้างเมื่อโต๊ะวางชิ้นงานเคลื่อนที่ในแนวแกน x เมื่อสมมุติว่าโครงสร้างเป็นวัตถุเกร็ง

จากรูปที่ 6.2 แสดงความผิดพลาดของโครงสร้างเมื่อสมมุติว่าโครงสร้างเป็นวัตถุเกร็ง ในรูปแสดง ความผิดพลาดเมื่อโต๊ะวางชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ตามแกน x ซึ่งมีพารามิเตอร์ 6 ตัวคือความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ (Translation) อันได้แก่ X scale error , Y straightness , Z straightness และความผิดพลาดของการหมุนอันได้แก่ Roll , Pitch , Yaw เมื่อรวมผลการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนแล้วจะได้พารามิเตอร์ที่กำหนดความผิดพลาดของหัววัด 18 ตัว นอกจากนี้ในระนาบ XY , YZ และ XZ ยังมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความตั้งฉากอีก ดังนั้นจำนวนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดของตำแหน่งของหัววัดมีทั้งหมด 21 ตัว ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีค่าไม่คงที่แต่จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของหัววัดด้วย และหากมีการเสริมอุปกรณ์ Rotary table เข้าไปด้วยพารามิเตอร์ของความผิดพลาดของตำแหน่งเพิ่มเป็น 29 ตัว

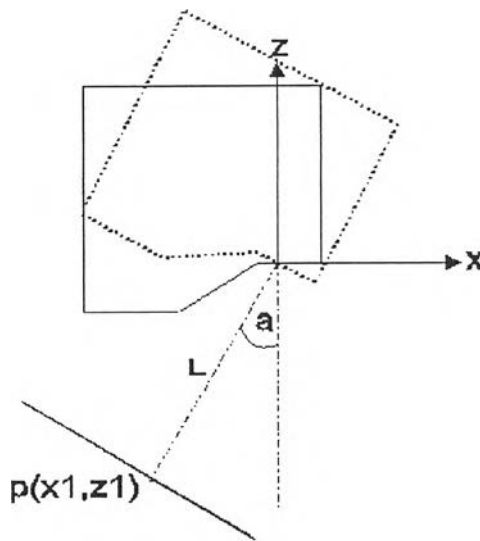
การกำจัดความผิดพลาดดังกล่าวในสมัยก่อนทำโดยการควบคุมการผลิตและการประกอบชิ้นส่วนแต่ละชิ้น แต่ในปัจจุบันได้มีวิธีการที่เรียกว่า Computer aided accuracy หรือ Accuracy enhancement ในการกำจัดความผิดพลาดดังกล่าวโดยจะทำการวัดความผิดพลาดทั้งหมดและโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์ทำการชดเชยความผิดพลาด ณ ตำแหน่งของหัววัดขณะนั้น นอกจากนี้เมื่อทำการวัดโครงสร้างของ CMM โดยแท้จริงแล้วไม่ได้เป็นวัตถุเกร็งแต่จะมีการโก่งงอเกิดขึ้นซึ่งการที่จะชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากการโก่งที่เกิดขึ้นเป็นเรื่องยากเพราะจะไปเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดที่ได้กล่าวถึงแล้วในตอนต้น แต่ก็สามารถที่จะทำได้ในทางทฤษฎี

8. จากการทดสอบโดยอาศัยแกนที่ 4 สแกนแบบปรบองศาของหัววัดตามความลาดชันของพื้นผิวชิ้นงานแสดงให้เห็นว่า เกิดความผิดพลาดมากขึ้นเมื่อใช้แกนที่ 4 ถึงแม้จะพยายามเอียงหัวเลเซอร์ให้ตั้งฉากกับพื้นผิวแล้วก็ตามแต่ความผิดพลาดกลับมีมากขึ้น สาเหตุที่ความผิดพลาดมีค่ามากขึ้นเนื่องจาก

8.1 โครงสร้างของแกนที่ 4 ที่เพิ่มเติมเข้าไปมีความคลาดเคลื่อนเช่น ชิ้นส่วนไม่ตั้งฉากกันโดยแท้จริง ,

แกนหมุนเยื้องศูนย์กลาง ความผิดพลาดเหล่านี้เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการสร้างถึงแม้จะควบคุมการผลิตอย่างดีแล้วก็ตาม

- 8.2 ความละเอียดของตัววัดตำแหน่ง (เอนโคเดอร์) ของแกนที่ 4 ที่วัดได้ละเอียด 0.144° /step ซึ่งเมื่อทำการแปลงข้อมูลแล้วจะเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งขึ้นตั้งจะกล่าวต่อไป
- 8.3 การแปลงข้อมูล เนื่องจากจุดที่แสงเลเซอร์ตกกระทบพื้นผิวชิ้นงานเมื่อเทียบกับแกนการเคลื่อนที่ของโครงสร้างไม่อยู่ในแนวเดียวกันดังนั้นจึงต้องทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในแกนหลักของโครงสร้าง พิจารณาจากรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3

จุด P เป็นจุดที่อยู่บนพื้นผิวค่าพิกัดของจุด P เท่ากับ

$$x1 = x + L \cdot \sin(a)$$

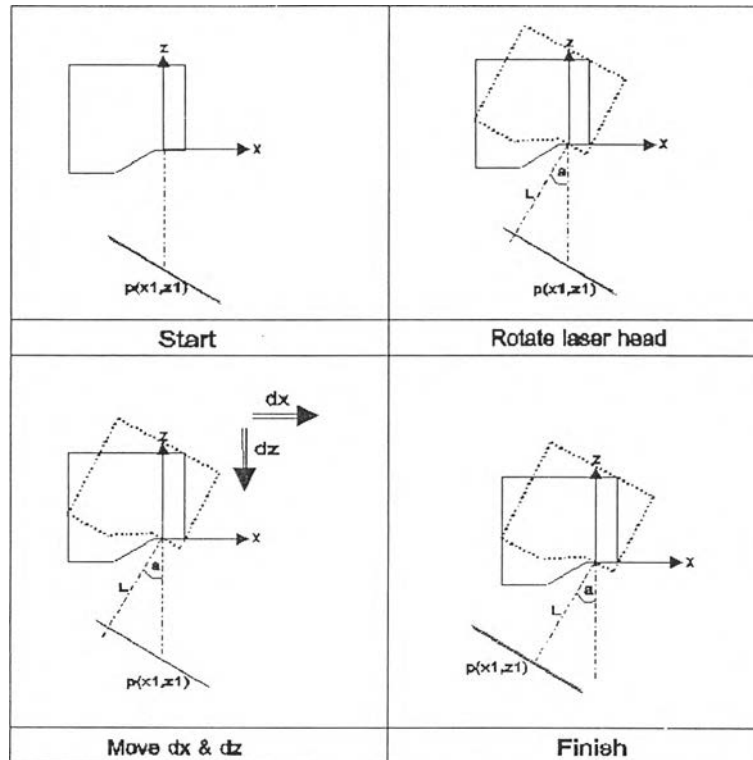
$$z1 = z + L \cdot \cos(a)$$

การแปลงข้อมูลด้วยสมการดังกล่าวอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้หากมีความผิดพลาดจากมุม a และความยาว L ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าโดยประมาณเป็น

$$\begin{aligned} dx1 &= \frac{\partial(L \cdot \sin(a))}{\partial L} dL + \frac{\partial(L \cdot \sin(a))}{\partial a} da \\ &= \sin(a) \cdot dL + L \cdot \cos(a) \cdot da \\ dz1 &= \frac{\partial(L \cdot \cos(a))}{\partial L} dL + \frac{\partial(L \cdot \cos(a))}{\partial a} da \\ &= \cos(a) \cdot dL - L \cdot \sin(a) \cdot da \end{aligned}$$

สมมุติความยาว L ไม่มีความผิดพลาดคือเท่ากับระยะทำงานเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ความผิดพลาดของมุม a เท่ากับ 0.144 องศา (0.0025 เรเดียน) ที่มุม a เท่ากับ 20 องศา ดังนั้นความผิดพลาดของพิกัด $x1$ และ $z1$ เท่ากับ 0.094 มิลลิเมตรและ -0.034 มิลลิเมตร

8.4 เกิดจากการปรับองศาของหัววัด พิจารณาขั้นตอนการปรับองศาของหัววัดในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการปรับองศาของหัววัด

จากรูปขั้นตอนการปรับองศาของหัววัดเราสามารถคำนวณระยะ dx และ dz ได้จากความยาว L และมุม a ดังนี้

$$dx = L(\sin(a_2) - \sin(a_1))$$

$$dz = L(\cos(a_1) - \cos(a_2))$$

โดยที่ a_1 เป็นมุมของหัววัดเริ่มต้นก่อนที่จะมีการปรับตัว

a_2 เป็นมุมของหัววัดหลังจากที่มีการปรับตัวแล้ว

ความผิดพลาดของค่า dx และ dz เมื่อมีความผิดพลาดเนื่องจากมุม a_1 , a_2 และความยาว L เท่ากับ

$$\Delta dx = (\sin(a_2) - \sin(a_1)) \cdot dL - L \cdot \cos(a_1) \cdot d(a_1) - L \cdot \cos(a_2) \cdot d(a_2)$$

$$\Delta dz = (\sin(a_2) - \sin(a_1)) \cdot dL - L \cdot \sin(a_1) \cdot d(a_1) + L \cdot \sin(a_2) \cdot d(a_2)$$

แทนความผิดพลาด $d(a_1)$ และ $d(a_2)$ เท่ากับ 0.0025 เรเดียน ส่วน dL เท่ากับ 0 มิลลิเมตร มุม a_1 เท่ากับ 0 องศา มุม a_2 เท่ากับ 20 องศา จะได้ค่า $\Delta dx = -0.1940$ มิลลิเมตร, $\Delta dz = 0.0342$ มิลลิเมตรซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับระดับความถูกต้องที่ได้ตั้งเอาไว้

ข้อเสนอแนะและวิจารณ์

1. ความถูกต้องในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีความถูกต้องมากแต่ผลการวัดที่ได้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่าง เช่น ความร้อน สิ่งแวดล้อม และโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ สิ่งเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อผลการวัดทั้งสิ้น ในบางแห่งจะมีการสร้างห้องเฉพาะสำหรับเครื่อง CMM ซึ่งในห้องมีการปรับเทียบสภาวะให้เป็นสภาวะมาตรฐานที่กำหนดโดยหน่วยงานสากลที่เป็นที่ยอมรับกันในวงกว้าง เป็นต้น ดังนั้นในการวัดจะต้องควบคุมสิ่งเหล่านี้ แต่การที่จะควบคุมสิ่งเหล่านั้นนั้นจะมีความยุ่งยากมาก แต่หากความต้องการความถูกต้องในการวัดอยู่ในระดับที่ไม่สูงมาก เราก็สามารถที่จะทำการละลายปัจจัยบางประการไปได้
2. การปรับแต่งความถูกต้องของอุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิตินั้นอาจทำได้โดยการคำนวณหรือวัดค่าความผิดพลาดแล้วนำมาชดเชยอันเป็นผลจากปัจจัยหลายๆ ประการ เช่น
 - 2.1 การไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง ได้แก่ การไม่ตั้งฉากกันในระนาบหรือมีความผิดพลาดดังแสดงในรูปที่ 6.1 เราสามารถทำการชดเชยความผิดพลาดเหล่านี้ได้โดยใช้เครื่องมือเฉพาะทำการวัดความผิดพลาดเหล่านี้แล้วนำมาชดเชยกับค่าที่วัดได้
 - 2.2 การเสียรูปเนื่องจากความร้อน การชดเชยผลของการเสียรูปเนื่องจากความร้อนมีความยุ่งยากเนื่องจากต้องคำนวณความผิดพลาดดังกล่าวในกรณี 2 หรือ 3 มิติแต่ก็สามารถทำได้